

Федеральная служба по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды
(РОСГИДРОМЕТ)

И.Г. Грингоф, А.Д. Клещенко

**ОСНОВЫ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
МЕТЕОРОЛОГИИ**

Том I

**ПОТРЕБНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
КУЛЬТУР В АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ
И ОПАСНЫЕ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО
ПРОИЗВОДСТВА ПОГОДНЫЕ УСЛОВИЯ**

Допущено

*Учебно-методическим объединением по образованию
в области гидрометеорологии в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению «Гидрометеорология»
и специальностям «Метеорология» и «Агрономия»*

**Под редакцией
докторов географических наук, профессоров,
заслуженных метеорологов Российской Федерации
Г.Н. Чичасова и А.Д. Клещенко**

Обнинск
2011

УДК 630: 551.5 (075)

И.Г. Грингоф, А.Д. Клещенко. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том I. Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. – 808 с.

ISBN 978-5-901579-33-6

ISBN 978-5-901579-24-4 (том I)

Рецензенты:

профессор кафедры земледелия и агрометеорологии Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева, доктор сельскохозяйственных наук А.И. Белолюбцев;

профессор кафедры географии Калужского государственного университета им. К.Э. Циолковского, главный научный сотрудник ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» Росгидромета, доктор географических наук В.А. Семенов.

Учебное пособие состоит из пяти частей: I – «Ресурсы биосферы и проблемы продовольствия», II – «Физиологические основы агрометеорологии», III – «Агрометеорологические условия, сельскохозяйственные культуры и пастбищная растительность», IV – «Неблагоприятные и опасные погодные явления для сельскохозяйственного производства», V – «Спутниковые методы исследований в агрометеорологии и их практическое применение».

В первой части описаны ресурсы биосферы – основы производства продуктов питания быстро растущего населения Земли. Обсуждаются вопросы продовольственной безопасности людей. Приведены основные принципы и методы агрометеорологических наблюдений и исследований, краткая история и современные задачи этой науки.

Во второй части кратко изложены особенности строения растительного организма, протекающих в нем процессов фотосинтеза, дыхания, минерального питания, а также общие закономерности роста и развития растений. Отмечена космическая роль растений для биосферы.

В третьей части описано влияние основных агрометеорологических факторов – света, тепла и влаги на жизнедеятельность растений; рассмотрена сущность технологии программирования урожаев, закономерностей продукционного процесса растений; потребность растений в агрометеорологических условиях; показано влияние условий погоды на развитие и распространение вредителей и болезней основных сельскохозяйственных культур.

В четвертой части приводится характеристика и влияние неблагоприятных и опасных явлений погоды на возделываемые культуры в теплый и холодный периоды года. Описаны основные меры борьбы с этими явлениями для смягчения их негативного влияния на аграрный сектор экономики.

В пятой части описаны концепция и понятие дистанционного зондирования подстилающей поверхности Земли, состояния сельскохозяйственных посевов и почвы; дано описание существующих спутниковых систем, приводится методология распознавания образов при дистанционном зондировании. Рассмотрены примеры практического применения космической информации в системе агрометеорологического обеспечения потребителей различного уровня.

Учебное пособие рассчитано на студентов географических факультетов университетов и сельскохозяйственных вузов, а также на учащихся гидрометеорологических техникумов Росгидромета по специальностям «Гидрометеорология» и «Агрономия». Учебное пособие может быть полезно специалистам сельскохозяйственного профиля и экологам.

ISBN 978-5-901579-24-4



9 785901 579244

The workbook consists of five parts: I «Resources of the biosphere and problems of food production», II «Physiological basis of Agricultural Meteorology», III «Agrometeorological conditions, crops and pasture vegetation», IV «Adverse weather and hazardous conditions for agricultural production», V «Satellite research methods in agricultural meteorology and its practical applications».

The first part describes the heat, land, water and forest resources of the biosphere, which constitute the basis for food production for rapidly growing world population. It outlines the issues of food safety. It also presents the basic principles and methods of agrometeorological observations and research, a brief outline of the development of agricultural meteorology in Russia and the modern problems of that branch of science.

The second part summarizes the structural features of the plant, the processes of photosynthesis, respiration, mineral nutrition occurring in the plant as well as general regularities of growth and development of plants. The space role of plants for the biosphere is outlined.

The third part describes the effects of the main agro-meteorological factors - light, heat and humidity on the life of plants; the essence of technology of yields programming, the laws of the production process and the need for plant crops and pasture vegetation in agro-meteorological conditions are considered. The effect of the weather conditions on the quality of crops, development and distribution of pests and diseases of major crops is described.

The fourth section presents the characteristics of adverse and dangerous weather, their impact on arable crops in warm and cold periods of the year. The effect of the frosts, droughts, hot winds, hail, soil rehumidifying, winter conditions for winter and fruit crops, etc., as well as basic measures to combat these phenomena to mitigate their negative impact on agricultural production are described.

The fifth part describes the concept and the notion of remote sensing of land surface, the state of agricultural crops and soils, a description of existing satellite systems; it provides a methodology for pattern recognition in remote sensing. We consider the Russian, foreign and international systems of monitoring crop conditions, and their practical application in agrometeorological provision of the consumers of different levels with information.

The workbook is designed for the students and teachers of geography and agricultural high schools and students of secondary special schools, trained on a specialty of «gricultural Meteorology» and «gronomy». The workbook might be used by the specialists in agriculture, environmentalists.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сельскохозяйственное производство любого государства взаимодействует со сложной системой природных условий, из числа которых климат и погода являются самыми динамичными и активными. Формирование урожая сельскохозяйственных культур и качества продукции постоянно находятся под воздействием складывающихся погодных (агрометеорологических) условий. Следствием неустойчивости погоды вегетационных периодов, смены засушливых лет влажными, суровых зим – теплыми, проявления неблагоприятных и опасных условий является большая изменчивость валовых сборов сельскохозяйственной продукции.

Поэтому, несмотря на достижения агрономии и совершенствование агротехники возделывания культур, сельскохозяйственное производство относится к числу наиболее погодозависимых отраслей хозяйственного сектора экономики. Иллюстрацией этой зависимости являются значительные колебания величины и качества сельскохозяйственного урожая, меняющегося от года к году. По словам известного русского ученого В.В. Докучаева, «почва и климат суть основные и важнейшие факторы земледелия – первые и неизбежные условия урожайности».

Подразделения системы Росгидромета осуществляют оперативное обеспечение гидрометеорологической (агрометеорологической) информацией сельскохозяйственное производство и другие отрасли экономики. Система агрометеорологического обеспечения различных уровней потребителей базируется на результатах научных исследований влияния складывающихся погодных (и климатических) условий на возделываемые культуры, динамику их состояния, роста, развития и формирования продуктивности. Большая и ответственная роль в системе оперативного агрометеорологического обеспечения потребителей принадлежит специалистам высшего и среднего звена системы Росгидромета, владеющих знаниями в области сельскохозяйственной метеорологии и смежных дисциплин.

Специалисты сельскохозяйственного производства также должны обладать определенными знаниями о влиянии погоды и климата на выращиваемые культуры, грамотно использовать получаемую от подразделений Росгидромета разнообразную гидрометеорологическую информацию.

Для подготовки специалистов в области сельскохозяйственной метеорологии высших учебных заведений по агрономическим специальностям в различные годы были опубликованы учебники и учебные пособия, основные из них: Ю.И. Чирков «Агрометеорология» (1979, 1986); А.П. Лосев, Л.Л. Журина «Агрометеорология» (2001). Серию учебников для студентов сельскохозяйственных техникумов опубликовал Ю.И. Чирков (1975, 1982, 1988).

Для студентов по гидрометеорологическим и географическим специальностям вузов были опубликованы учебные пособия: А.М. Шульгин «Агрометеорология и агроклиматология» (1978); Н.И. Сеницына, И.А. Гольцберг, Э.А. Струнников «Агроклиматология» (1973); учебник А.Н. Полевого «Сельскохозяйственная метеорология» (1992), а для гидрометеорологических техникумов – Г.В. Руднев «Агрометеорология» (1964, 1973); И.Г. Грингоф, В.В. Попова, В.Н. Страшный «Агрометеорология» (1987).

Как прикладная наука современная сельскохозяйственная метеорология постоянно развивается, обогащаясь новыми знаниями, методами и технологиями, направленными на повышение оперативности предоставления информации, увеличение заблаговременности и точности оценки и прогнозов состояния, роста, развития и ожидаемого урожая основных сельскохозяйственных культур. В этой связи специалисты головного института в области сельскохозяйственной метеорологии в России – ФГБУ «ВНИИСХМ» – опубликовали новый учебник для студентов гидрометеорологических техникумов – И.Г. Грингоф, А.Д. Пасечнюк «Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения» (2005). В последние годы ФГБУ «ВНИИСХМ» приступило к подготовке новых учебных пособий для студентов географических факультетов и сельскохозяйственных вузов «Основы сельскохозяйственной метеорологии».

В первый том – «Основы сельскохозяйственной метеорологии» – включены пять частей: I – «Ресурсы биосферы и проблемы продовольствия», II – «Физиологические основы агрометеорологии», III – «Агрометеорологические условия, сельскохозяйственные культуры и пастбищная растительность», IV – «Неблагоприятные и опасные погодные явления для сельскохозяйственного производства», V – «Спутниковые методы исследований в агрометеорологии и их практическое применение».

В этом томе на общем фоне ресурсов биосферы, представляющих основу для производства продуктов питания увеличивающейся численности населения Земли, описаны особенности физиологических процессов, протекающих в растениях, и потребности основных сельскохозяйственных культур в ресурсах света, тепла, влаги и минерального питания. Рассмотрено влияние неблагоприятных погодных (агрометеорологических) явлений на процессы роста, развития и формирования продуктивности возделываемых культур, на массовое развитие вредителей и болезней, наносящих серьезный урон формированию урожая сельскохозяйственных растений.

В последние десятилетия возрастает роль и значение использования оперативной дистанционной (спутниковой) информации о текущем и ожидаемом состоянии посевов на больших площадях при агрометеорологическом обеспечении аграрного сектора страны. Основы современных технологий,

применяемых в России и за рубежом, изложены в заключительной части учебного пособия.

Первый том подготовлен в ФГБУ «ВНИИСХМ» Росгидромета доктором биологических наук, профессором, заслуженным метеорологом России И.Г. Грингофом (части I – IV) и доктором географических наук, профессором, заслуженным метеорологом России А.Д. Клещенко (часть V).

Последующие тома «Основ сельскохозяйственной метеорологии» предполагается посвятить изложению учебного материала по проблемам: «Физические основы изучения среды обитания растений», «Методы и технологии агрометеорологического и агроклиматического обеспечения аграрного сектора экономики», «Изменения климата и устойчивое развитие сельскохозяйственного производства».

Авторы благодарны научному редактору – доктору географических наук, профессору, заслуженному метеорологу России Г.Н. Чичасову (ФГБУ «ИПК») и рецензентам – доктору географических наук, профессору В.А. Семенову (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД») и доктору биологических наук, профессору А.И. Белолюбцеву (Государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева), за их замечания и предложения, направленные на улучшение содержания учебного пособия. Авторы признательны всем, кто прямо или косвенно содействовал улучшению и выходу в свет настоящего учебного пособия.

Авторы будут признательны также за замечания и предложения по улучшению настоящего пособия, направленные по адресу: 249037, г. Обнинск, ул. Ленина, 82, ФГБУ «ВНИИСХМ» Росгидромета.

Ч А С Т Ь I

РЕСУРСЫ БИОСФЕРЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ

ГЛАВА 1 ПОНЯТИЕ О БИОСФЕРЕ

Жизни совсем нет вне биосферы.

В.И. Вернадский
«Биосфера», 1926 г.

С незапамятных времен люди сталкивались с великим разнообразием живой природы и стремились познать мир. Чувствуя превосходство стихии над собой, человек обожествлял ее, поклоняясь богам Солнца, Луны, Ветра, Морей, Вулканов и т.п. Древние памятники письменности, дошедшие до нашего времени, описывали явления природы, как знаки божественной воли, как проявления силы божественного существа. «Жрецы первобытных религий были первыми учеными далекой древности. В течение тысячелетий развивались и совершенствовались религиозно-философские системы, а вместе с ними собирались, хотя и бесконечно медленно, элементы науки» (Хргиан А.Х., 1948, с. 4).

Научные исследования природы (и ее компонентов) нашей планеты, начавшиеся в древних цивилизациях Египта, Греции, Китая и др., продолжают-ся и поныне. Истории изучения природы планеты Земля, ее биосферы посвящена обширная научная литература, которая здесь не рассматривается.

Исключительное разнообразие растений и животных, населяющих Землю, находится в тесном взаимодействии между собой и с окружающей их средой. Различные элементы и явления природной среды, закономерности их пространственного изменения находятся в постоянной динамической взаимообусловленности, происходящей благодаря обмену веществ и энергии между компонентами среды и живыми организмами. «Вследствие этого всестороннее исследование как самих процессов обмена вещества и энергии, так и изучение географических модификаций этого обмена представляет собой основной путь к раскрытию физической сущности природных процессов, их взаимосвязей и различий в пространстве» (Герасимов И.П., Арманд Д.Л. и др., 1956).

Впервые термин «биосфера» был использован в начале XIX столетия в трудах французского биолога Ж.Б. Ламарка (1744–1829), который писал: «...Все вещества, находящиеся на поверхности земного шара и образующие его кору, сформировались благодаря деятельности живых организмов». Австрийский геолог и палеонтолог Э. Зюсс (1831–1914) в своей книге «Лик Земли» (1875) утверждал, что биосфера – это «совокупность организмов, ограниченных в пространстве и во времени и обитающих на поверхности Земли».

По мере исследований накапливались новые факты в области биологии (ботаники), географии растений, почвоведения, геологии и других наук. Значительный вклад в становление и развитие системного изучения закономерностей жизнедеятельности растительных и животных организмов, динамики явлений природы внесли исследования известных естествоиспытателей А. Гумбольдта (1769–1859), К.Ф. Рулье (1814–1858), Ч. Дарвина (1809–1882), В.В. Докучаева (1846–1903) и многих других. Постепенно складывались элементы новой науки – экологии, изучающей и объясняющей взаимодействие организмов и среды их обитания.

В 1866 г. Эрнст Геккель в своем двухтомном труде «Общая морфология организмов» впервые применил термин «экология», обозначив им биологическую науку, изучающую взаимоотношения организмов и окружающей их среды. Он писал: «Под экологией мы понимаем сумму знаний, относящихся к экономике природы. Изучение взаимоотношений животного с окружающей его средой, как органической, так и неорганической, и прежде всего – дружественных или враждебных отношений с теми животными, с которыми он прямо или косвенно вступает в контакт. Одним словом, экология – это изучение всех сложных взаимоотношений, которые Чарльз Дарвин называет условиями, порождающими борьбу за существование». И далее: «Непредвиденные последствия почти неизменно сводят “на нет” все усилия человека подчинить себе сложную систему сдерживающих и уравнивающих механизмов, обеспечивающих стабильность в природе. Поскольку деятельность человека продолжает оказывать все более осязаемое воздействие на окружающую среду, вмешательство в природу будет становиться все более сложным и трудным, а выявление и применение основных экологических принципов – все более важным для сохранения жизни, в том числе и жизни самих людей».

Развитию экологических знаний посвящена обширная научная литература, здесь же мы назовем только некоторые значимые исследования, изданные в последней четверти XX столетия в СССР и России, и потому доступные заинтересованным читателям. Книги (учебные пособия) американского ученого Ю. Одума «Основы экологии» (1975) и «Экология» (1986) представляют собой капитальную сводку, содержащую развернутый обзор основных экологических проблем и их толкование.

Американский ученый-эколог Р.Е. Риклефс (Robert E. Ricklefs) опубликовал учебное пособие «Основы общей экологии» (1979), в которой систематически описал предмет и методы экологии, различные среды обитания биологических сообществ, круговороты энергии и различных веществ в природе.

В книге французского эколога Франсуа Рамада (François Ramade) «Основы прикладной экологии» (1981) рассматривается структура биосферы и протекающие в ней процессы, включая проблемы загрязнения, вопросы ограниченности ресурсов биосферы, особенности взаимодействия человека и окружающей среды.

В 1989 г. английскими учеными М. Бигонем, Дж. Харпером, К. Таунсендом (Michael Begon, John Harper, Colin R. Townsend) был опубликован двухтомный учебник «Экология. Особи, популяции и сообщества», отличающийся аналитической и объяснительной направленностью сложных вопросов взаимодействия трех уровней – *биологической особи, популяции и сообщества* с окружающей их средой. Авторы, в частности, утверждают: «...Экология была и будет естественным перекрестком для натуралистов, экспериментаторов, полевых биологов и специалистов по математическому моделированию. Нам кажется, что разумно сочетать все эти ипостаси – обязанность каждого эколога».

В Республике Беларусь несколько изданий выдержал учебник «Экология» (1977) В.А. Радкевича, рассматривающий основные направления современной экологии, методы экологических исследований, особенности взаимодействия организмов и среды их обитания, а также основные закономерности развития и динамики биосферы, место и роль в ней человека.

Наконец, необходимо назвать учебник для вузов «Агроэкология», подготовленный и опубликованный в двух томах (2000, 2004 гг.) учеными-экологами Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева – с привлечением ученых, работающих в различных ведомствах страны. В первом томе учебника обобщены основные сведения о биосфере, агроэкосистемах и особенностях их функционирования в условиях усиления техногенного давления, о роли сельского хозяйства в биогенном загрязнении почвенной и водной среды, о производстве экологически безопасной сельскохозяйственной продукции, а также об организации и ведении агроэкологического мониторинга.

Во втором томе рассмотрены ключевые вопросы системного анализа и моделирования агроэкосистем, экологического риска и экологической безопасности, сохранения биоразнообразия, развивающихся антропогенных изменений климата. Раскрыты взаимосвязи экологических, экономических и социальных проблем России и предложены пути их решения, в частности основы устойчивого развития сельскохозяйственного производства.

Основные идеи об особых свойствах пространства, занимаемого живыми организмами, об исключительном значении деятельности этих организмов в формировании окружающей их среды принадлежат выдающемуся русскому ученому академику В.И. Вернадскому (1863–1945). Научные основы науки о биосфере были заложены им в монографии «Биосфера» (1929), состоящей из двух частей: «Биосфера в космосе» и «Область жизни». В этих книгах были всесторонне рассмотрены и обоснованы планетарная геохимическая роль живого вещества и его глобальные функции. Автор ввел новое понятие о *пленке живого вещества*, находящегося у поверхности Земли, как в океанах, так и на суше. Он писал: «...Автор пытается описать геологическое проявление жизни, дать картину совершающегося вокруг нас планетарного процесса» (цит. по: Будыко М.И. Эволюция биосферы, 1984, с. 4).

Согласно В.И. Вернадскому, область существования большинства организмов ограничена «тонкой пленкой», включающей нижний слой атмосферы, верхний слой литосферы (земная кора), особенно почвенный покров суши, а также верхние слои океанических вод, в которых осуществляются процессы преобразования солнечной радиации в химическую энергию жизнедеятельности живых организмов. Именно поэтому жизнедеятельность организмов становится решающим фактором геохимической эволюции поверхностных оболочек Земли.

По В.И. Вернадскому, «*живое вещество*» представляет собой сложную совокупность взаимодействующих между собой и с окружающей неорганической средой микроорганизмов, водорослей, грибов, высших растений и различных представителей животного мира. Он писал: «На суше органические остатки концентрируются в почвах, которые, однако, никак нельзя рассматривать как косную материю. В почвах живое вещество достигает нескольких десятков весовых процентов, это область наивысшей геохимической энергии живого вещества, важнейшая по своим геохимическим последствиям лаборатория идущих в ней химических и биохимических процессов» (Живое вещество и биосфера, 1994, с. 396).

Он первым обратил внимание на усиливающееся воздействие хозяйственной деятельности человеческого сообщества на биосферу, в результате которой она превращается в *ноосферу*, т.е. в сферу разума: «С появлением на нашей планете озаренного разумом живого существа, планета переходит в новую стадию своей истории – биосфера переходит в ноосферу. Более того, мы, видимо, выходим за пределы планеты, так как все указывает, что действие геохимического разума жизни цивилизованного человечества не остановится размерами планеты» (Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере, 1944).

Известно несколько определений термина «биосфера», близкие по смыслу к понятию «глобальная экологическая система». **Биосфера** (греч.

bios – жизнь, *sphaira* – шар) – это оболочка Земли, населенная живыми организмами, включающая нижние слои атмосферы, верхнюю часть литосферы и гидросферу; область существования живого вещества. Это сложная адаптивная и развивающаяся система, в которой совокупная деятельность живых организмов, преобразующих солнечную энергию, проявляется как геохимический фактор планетарного масштаба.

По-существу, биосфера Земли – это весь окружающий нас мир, составляющий среду обитания человека; из биосферы человек черпает все, что необходимо ему для жизни.

Верхней границей биосферы является озоновый слой, задерживающий большую часть ультрафиолетовых лучей, губительных для живых организмов, а нижняя граница ограничивается тепловым барьером, в котором могут существовать хлорофиллоносные (зеленые) растения. Таким образом, поле существования активной жизни ограничено в атмосфере по вертикали до 6–7 км, в литосфере (на суше) – до 3–4 км, в гидросфере – (дно океана) – до 10–11 км (рис. 1.1).

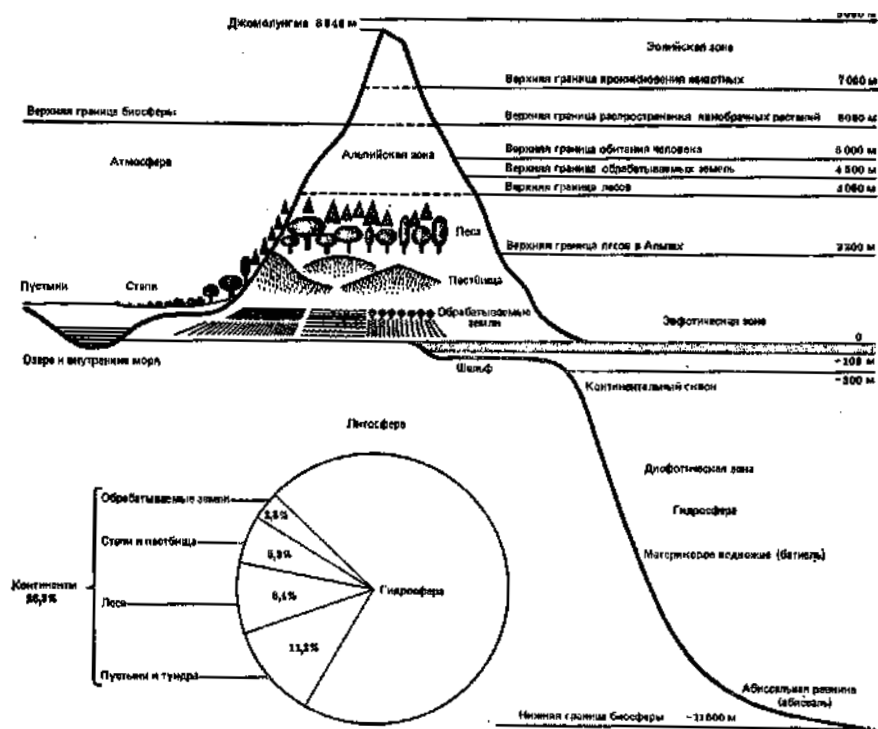


Рис. 1.1. Вертикальная зональность биосферы и соотношение площадей, занятых основными структурными единицами (Рамад, 1981)

«Сама биосфера занимает в планете особое место, резко отделена от других ее областей, как своеобразная в физическом, химическом, геологическом и биологическом отношениях. Она должна быть учитываема, как особая оболочка планеты, хотя в общей массе планеты биосфера является ничтожным по весу придатком» (цит. по: Вернадский В.И., 1988, 126 с.).

На Земле, по данным систематиков, описано около 1 800 тысяч видов животных и растений, причем количество видов животных в несколько раз превышает число видов растений, в основном за счет разнообразия видов класса насекомых. Общий объем массы живых организмов на Земле оценивается в 2 423 млрд т (или 2 488 км³). При этом биомасса растений (фитомасса) в 2,5 тысячи раз превышает суммарную биомассу животных (зоомассу). Общий объем биосферы определен специалистами в 1 400 000 км³. Если условно равномерно распределить всю массу живых организмов по поверхности земного шара, то образовалась бы «живая пленка» толщиной всего 5 мм (Сытник К.М. и др., 1987).

Количественной характеристикой живого вещества является суммарное количество биомассы на Земле. По В.И. Вернадскому, это количество составляет от 10²⁰ до 10²¹ г или 1000 ... 10 000 триллионов т. Им же приводится любопытный пример: площадь поверхности Земли составляет несколько меньше 0,0001 % поверхности Солнца, а площадь листовой поверхности всех видов растений (включая зеленые фотосинтезирующие водоросли), обитающих в различные сезоны года на Земле, колеблется и составляет от 0,86 до 4,20 % площади поверхности Солнца. Этим примером ученый подчеркнул значимость суммарной энергии биосферы. Правильность расчетов В.И. Вернадского была подтверждена впоследствии в исследованиях ряда других ученых.

Совокупность всего разнообразия живых существ (микроорганизмов, растений и животных) с их многоступенчатыми трофическими (пищевыми) цепями, круговоротом вещества и энергии (цикличность) превращают космическую, лучистую энергию Солнца в биохимическую. Благодаря этим процессам создается бесконечное разнообразие видов на Земле. Непрерывная смена поколений живых существ (в результате дыхания, питания, размножения, метаболизма, смерти и разложения) порождает присущий биосфере широкомасштабный планетарный процесс – миграцию химических элементов. Под его воздействием преобразуются как абиотическая (неорганическая) среда, так и сами живые организмы.

Хорошо известны слова Ф. Энгельса: «Жизнь есть способ существования белковых тел, существенным моментом которого является постоянный обмен веществ с окружающей их внешней природой, причем с прекращением этого обмена веществ прекращается и жизнь». Живое вещество, постоянно взаимодействуя с окружающим неорганическим миром, оказывает решающее воздействие на химические процессы в

атмосфере, гидросфере и в верхних слоях литосферы. Приведем несколько примеров.

Геохимический эффект физиологической деятельности организмов обратно пропорционален их размерам. Наиболее значимой оказывается деятельность организмов, лишенных оформленного клеточного ядра, так называемых *прокариотов*, к которым относятся вирусы, бактерии, сине-зеленые водоросли и др.

Максимальный геохимический эффект на суше создают «грунтоеды», а в океане – «илоеды» и «фильтраторы». По заключению Чарльза Дарвина, дождевые черви в процессе питания органическими веществами на плодородных почвах Великобритании пропускают через себя почвенный пласт мощностью 1 м за 200 лет. При этом слой экскрементов, выделяемых дождевыми червями, составляет около 5 мм в год. В наземных экосистемах велика роль животных «землероев». Например, степные сурки роют норы до 2...4 м глубиной, выбрасывая на поверхность массу грунта и не выветрившиеся минералы.

В прибрежной зоне велико влияние так называемых «сверлильщиков» скал. К ним относятся различные виды водорослей, губок, бактерий, моллюсков, рачков и морских ежей. В результате их жизнедеятельности морской берег в окрестностях г. Сочи (Краснодарский край, Российская Федерация) отступает на 4 м в год. В Западной Европе опасным оказался «мохнаторукий» краб, завезенный из Китая. Популяции этого краба строят свои многочисленные норы по берегам пресноводных рек, что стало причиной обрушения берегов и разрушения плотин.

В океане высокой «пропускной» способностью обладают черви-полихеты (многощетинковые кольчатые черви длиной от 2 мм до 3 м), а также различные ракообразные. Например, 40 экземпляров червей-полихетов на 1 м² пропускают через пищевой тракт поверхностный слой донных осадков мощностью 20–30 см в год. При этом субстрат существенно обогащается кальцием (Ca), железом (F), магнием (Mg), калием (K) и фосфором (P), по сравнению с исходными илами.

Биосферные процессы характеризуются цикличностью различных временных ритмов: суточных, лунных, сезонных, годовых, многолетних, связанных с вращением Земли и ее положением на солнечной орбите. Вещественной формой цикличности являются круговорот (кругооборот – у других авторов) веществ, химических элементов, а также процессы использования, превращения и рассеивания энергии, непрерывно происходящие в биосфере, например глобальный и локальный круговороты воды, кислорода, диоксида углерода (CO₂), азота, биогенных элементов и т.п. Цикличность биосферных процессов обуславливает их повторяемость, воспроизводство и устойчивость (рис. 1.2). Именно круговороты веществ, потоки и процессы превращения энергии являются основой динамического равновесия и устойчивости биосферы.

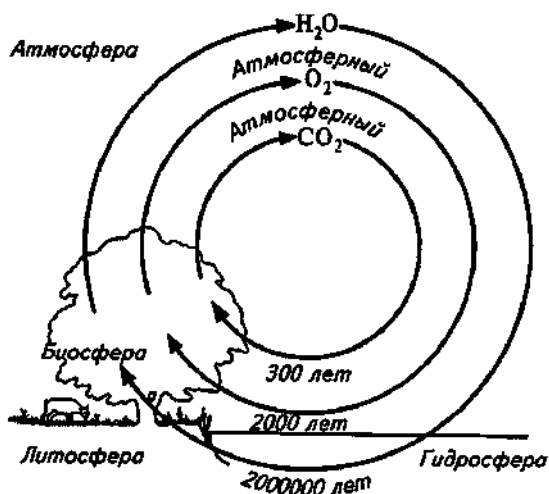


Рис. 1.2. Упрощенная схема кругового водяного пара, кислорода и диоксида углерода (Клауд Джибор, 1972)

Важнейшими компонентами биосферы являются живое вещество (растения, животные, микроорганизмы) и геосферные оболочки, в которых обитают живые организмы: атмосфера, гидросфера и литосфера.

Атмосфера (от греч. *atmos* – пар; *sphaera* – шар) – воздушная оболочка Земли, состоящая из смеси газов (в объемных долях): молекулярный азот $\approx 78\%$, кислород $\approx 21\%$; озон, аргон – $0,93\%$, диоксид углерода – $0,03\%$ и другие газы – менее $0,005\%$, взвешенных коллоидных примесей (пыль, водяной пар – $0,1\text{--}1,0\%$) и пр.

В атмосфере, особенно в ее нижнем слое – тропосфере – происходят основные физические процессы, которые в сочетании с географическими условиями определяют изменения погоды и оказывают влияние на формирование климата в различных регионах Земли. К числу этих процессов относятся: поглощение солнечной радиации, формирование уходящего от Земли длинноволнового излучения, общая циркуляция атмосферы, теплооборот и влагооборот (Будыко М.И., 1984).

Резкой верхней границы атмосферы нет. С высотой газовый состав атмосферы меняется незначительно. Около половины всей массы атмосферы сосредоточено в слое $0\text{--}5$ км. Нижняя часть атмосферы называется *тропосферой*. Ее высота в полярных широтах составляет $8\text{--}10$ км, в умеренных широтах достигает $10\text{--}12$ км и в тропиках – $16\text{--}18$ км. В тропосфере преобладает основная масса водяного пара, сильно развита турбулентность, конвекция. В нижнем слое тропосферы ($1\text{--}2$ км)

происходят наиболее активные процессы формирования воздушных масс, развиваются фронты, циклоны и антициклоны. Выше тропосферы расположен слой *тропопаузы* – переходный слой между тропосферой и стратосферой. Выше стратосферы располагаются слои *стратопаузы*, *мезосферы*, *мезопаузы*, *ионосферы* (*термосферы*). Физические особенности всех слоев атмосферы подробно рассматриваются в курсе метеорологии.

Гидросфера (от греч. *hydor* – вода; *sphaera* – шар) – водная оболочка Земли, включающая все воды планеты в жидком и твердом (лед) состояниях. Основная часть воды заключена в Мировом океане, который занимает около 71 % поверхности земного шара. Общий объем этой воды оценивается в 1,5...1,6 млрд км³. По данным акад. А.П. Виноградова (1963), из общей массы воды 98 % находится в океанах и морях, 1,65 % – во льдах и 0,35 % приходится на пресные воды.

Физические и химические процессы в гидросфере тесно связаны с аналогичными процессами в атмосфере. Преобразование солнечной энергии, круговороты воды, двуокиси углерода, кислорода и других газов происходят в гидросфере и атмосфере, как в единой системе. Именно такое взаимодействие этих сфер определяет особенности годового и сезонного характера общей циркуляции атмосферы в Северном и Южном полушариях планеты Земля (Будыко М.И., 1984).

Литосфера (от греч. *lithos* – камень; *sphaera* – шар) – твердая оболочка Земли, сложенная горными породами, осадочными и биогенными соединениями, продуктами выветривания и т.п. В верхней части этой оболочки, в пределах слоев почвы и подпочвы, глубина которых обычно не превышает нескольких метров, сосредоточена основная масса живых организмов.

Почва – это природное, исторически сложившееся образование, состоящее из генетически связанных почвенных горизонтов, сформировавшихся в результате преобразования поверхностных слоев горных пород и рельефа под воздействием воды, ветра и живых организмов. Почва обладает *плодородием* – органическими веществами – продуктами жизнедеятельности и разложения организмов, благодаря которым происходит воспроизводство биомассы на Земле.

Нижняя часть атмосферы – *тропосфера* – является открытой динамической системой, находящейся в состоянии непрерывного взаимного обмена веществом, энергией, информацией с верхними слоями атмосферы, космическим пространством, подстилающей поверхностью суши и океана, биотой (от греч. *biote* – жизнь) – исторически сложившейся совокупностью всех живых организмов, объединенных общей площадью распространения. Изменчивость протекающих процессов в тропосфере закономерно определяет многие процессы в жизни растений, животных и жизнедеятельности человека.

Для атмосферного воздуха, как среды обитания, присущи жизнеобеспечивающие свойства. Например, высокое содержание кислорода предопределяет формирование достаточного уровня энергетического обмена веществ (метаболизма). «Не случайно именно в воздушной среде возникли гомойотермные (теплокровные) животные, отличающиеся высоким уровнем энергетики организма, большой степенью автономности от внешних воздействий и высокой биологической активностью в экосистемах» (акад. Шилов И.А., 1997).

Низкая плотность воздуха – важное свойство тропосферы для жизни всех животных и растений. В среднем у земной поверхности она равна $1,25 \text{ кг/м}^3$, на высоте 5 км – $0,74 \text{ кг/м}^3$, на высоте 20 км – $0,09 \text{ кг/м}^3$. Таким образом, резкое понижение плотности воздуха с высотой ограничивает распространение и закрывает возможность существования высокоразвитых организмов вне связи с подстилающей поверхностью. Понижение с высотой парциального давления атмосферных газов, в том числе и CO_2 , предопределило в определенной мере границы распространения фотосинтезирующих растений на больших высотах.

По-существу, тропосфера является относительно тонким слоем над поверхностью Земли, поэтому значительное сокращение видового разнообразия жизненных форм в воздушной среде по вертикали «заменяется» исключительным разнообразием по горизонтали, которое определяется сменой почвенно-климатических зон и ландшафтными факторами (Исаев А.А., 2001).

Каковы же ресурсы биосферы – единственного источника существования человечества на Земле?

ГЛАВА 2

РЕСУРСЫ БИОСФЕРЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ

...Снабжение населения продовольствием и сохранение природной среды оказываются взаимосвязанными, а будущее человеческой цивилизации зависит не только и даже не столько от экономических, сколько от экологических факторов.

Акад. А.А. Жученко
«Глобальные проблемы биосферы», 2001 г.

В интегральное понятие термина «ресурс» входят любые источники и предпосылки получения необходимых для людей материальных и духовных благ, которые могут быть реализованы при существующих технологиях и социально-экономических отношениях. По Н.Ф. Реймерсу (1990), ресурсы принято делить на три основные группы: *природные* (или *естественные*), *материальные* и *трудовые* (в том числе интеллектуальные).

В рамках проблематики настоящего учебного пособия мы будем рассматривать исключительно природные ресурсы.

Природные ресурсы – это часть всей совокупности природных условий существования людей, важнейшие компоненты окружающей человека естественной среды, используемые в процессе производства, в первую очередь сельскохозяйственного, для удовлетворения материальных и иных потребностей.

Природные условия – это совокупность объектов, явлений и факторов природной среды.

Масштабная, целенаправленная хозяйственная деятельность человека способна частично изменять отдельные компоненты природных условий, например, замена лесных угодий на пашню, орошение и обводнение в интересах сельскохозяйственного производства и т.п. С другой стороны, нерегулируемая деятельность людей может привести к существенным изменениям природных условий, в экстремальных случаях – необратимым. Например, чрезмерная нагрузка выпасаемых животных на единицу площади пастбищ, вырубка кустарников, промышленное освоение полезных ископаемых и т.п. приводят к разрушению сложившегося природного равновесия и развитию процессов деградации почвы, растительности и животного мира.

Совокупность природных условий и ресурсов формирует **природный потенциал** – меру потенциальной способности какого-либо природного

комплекса (территории, природного объекта и т.п.) удовлетворять многообразные потребности общества. На рис. 2.1 представлена общая схема природных ресурсов биосферы. Экологи условно классифицируют природные ресурсы на *неисчерпаемые*, *исчерпаемые* и *потенциально возобновляемые* (рис. 2.2).

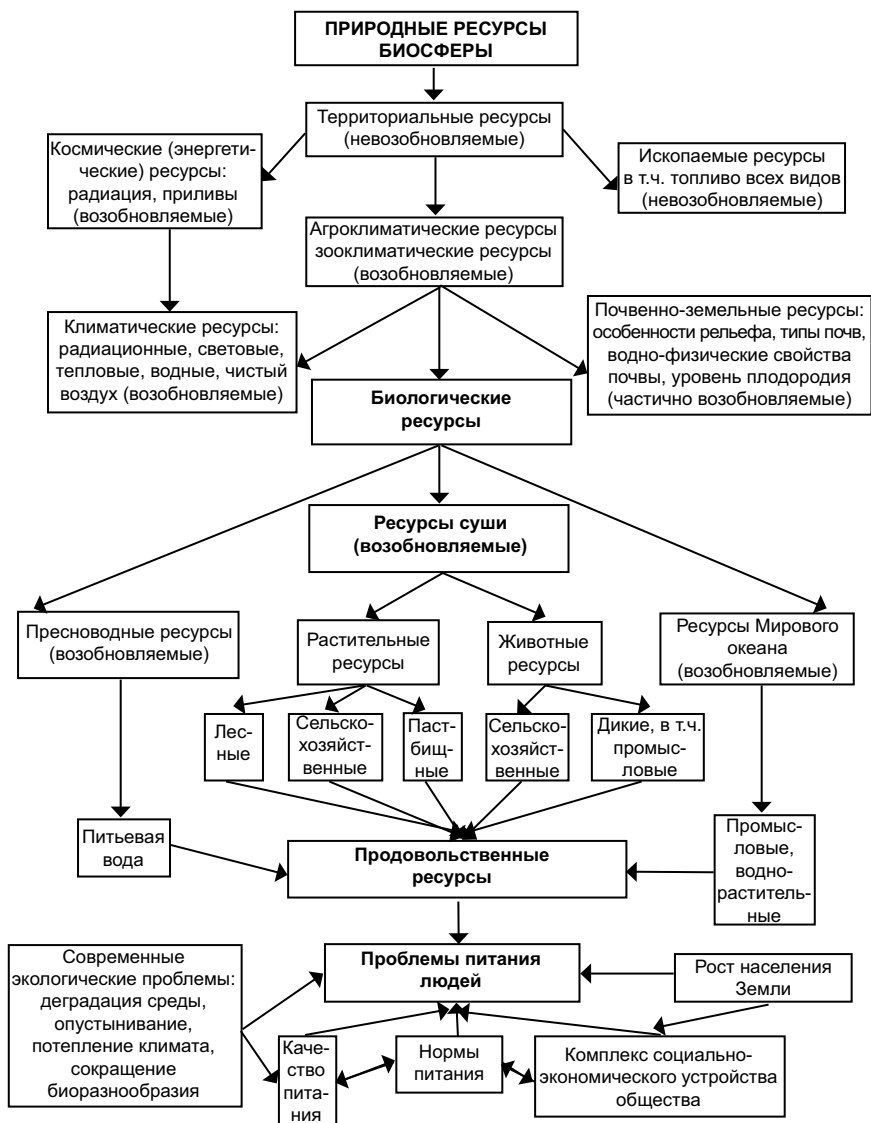


Рис. 2.1. Общая схема природных ресурсов биосферы

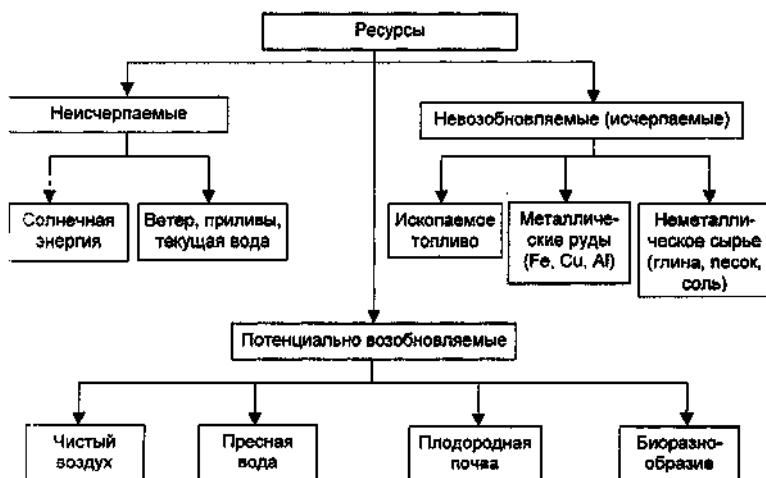


Рис. 2.2. Основные типы природных ресурсов

2.1. Солнечная радиация

Солнце непрерывно излучает в мировое пространство энергию. Ее количественной мерой является плотность потока радиации (или энергетическая освещенность), т.е. количество лучистой энергии, падающей на единицу площади в единицу времени. Энергетическая освещенность измеряется в Вт/м² (или кВт/м²). Это означает, что на 1 м² в секунду поступает 1 Дж (или 1 кДж) лучистой энергии. Энергетическую освещенность солнечной радиации, падающую на верхнюю границу атмосферы, на единицу площади, перпендикулярно к солнечным лучам при среднем расстоянии Земли от Солнца называют *солнечной постоянной*, равной 1367 Вт/м² ± 0,3%.

На верхнюю границу атмосферы падает количество солнечной энергии, равное произведению солнечной постоянной на площадь большого круга Земли. При среднем радиусе Земли 6371 км эта площадь равна: $\pi(6371)^2 = 1,275 \cdot 10^{14}$ м², а приходящая на нее лучистая энергия равна 1,743·10¹⁷ Вт. За год Земля получает 5,49·10²⁴ Дж. В среднем на каждый квадратный километр на верхней границе атмосферы приходится за год 10,76·10¹⁵ Дж. Чтобы искусственно получить такое количество тепла, нужно одновременно сжечь около 400 тыс. т каменного угля. За 1,5 суток Солнце дает Земле столько же энергии, сколько дают электростанции всех стран в течение года. При этом из излучаемой Солнцем энергии (3,95·10²⁶ Вт) Землей улавливается менее одной полумиллиардной доли всего излучения, т.е. 1,8·10¹⁷ Вт.

В сравнении с этим количеством суммарная мощность всех источников энергии (космические лучи, радиоактивное излучение и др.) оказывается ничтожно малой (Хромов С.П., Петросянц М.А., 1994).

Поступающая от Солнца на Землю радиация является практически единственным источником энергии, света и тепла в форме лучистой энергии, определяющей энергетический баланс и температурный режим нашей планеты. Благодаря наклону оси земного шара – $23^\circ 27'$ (воображаемая линия, соединяющая Северный и Южный полюсы) к плоскости небесного экватора – солнечные лучи попадают на земную поверхность под различным углом. Приход солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы меняется в зависимости от расстояния Земли от Солнца, которое в течение года не остается постоянным вследствие эллиптической формы земной орбиты. Наименьшее расстояние Земли от Солнца наступает 2 января, когда оно составляет 147 млн км. В наибольшем удалении от Солнца Земля находится 5 июля, когда это расстояние достигает 152 млн км.

Энергетическая освещенность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния Земли от Солнца и изменяется в течение года на верхней границе атмосферы на $\pm 3,3\%$. Астрономические факторы – вращение Земли вокруг своей оси и ее склонение относительно Солнца – обуславливают смену дня и ночи, изменение их продолжительности, а также смену сезонов года.

На рис. 2.3 показано годовое распределение суммарной солнечной радиации по земному шару. На территории России и сопредельных государств годовое количество суммарной радиации изменяется от $25 \cdot 10^2$ мДж/м² на островах Северной Земли до $67 \cdot 10^2$ мДж/м² на юге Туранской низменности и в высокогорьях Памира. Особенно велики эти значения на территории Центральноазиатских (Среднеазиатских) государств, где в теплое полугодие преобладает безоблачная погода.

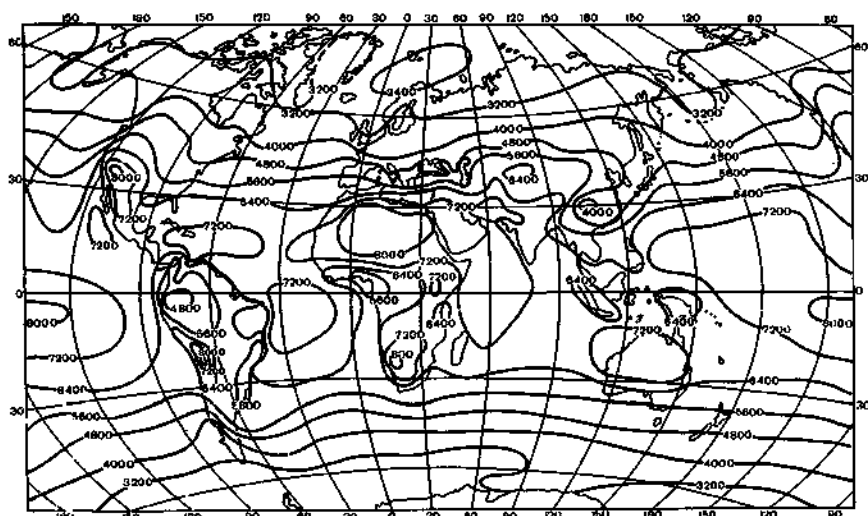


Рис. 2.3. Годовое количество суммарной солнечной радиации (мДж/(м²·год))

Количество солнечной радиации, поступающей к земной поверхности, неодинаково в летнее и зимнее полугодия и зависит также от географической широты местности (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Суммы солнечной радиации, приходящей к земной поверхности при абсолютно прозрачной атмосфере, ккал/см² (Будыко М.И., 1971)

Полугодие	Широта, град.									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Летнее	161	170	175	174	170	161	149	139	135	133
Зимнее	161	147	129	108	84	59	34	13	3	0
Год	322	317	304	282	254	220	183	152	138	133

Солнечная радиация, или лучистая энергия, состоит из электромагнитных волн, которые в условиях космического вакуума распространяются со скоростью около 300 000 км/с.

В связи с тем, что Земля окружена сплошной оболочкой атмосферы, солнечные лучи, прежде чем достичь поверхности нашей планеты, проходят всю толщу атмосферы, которая частично отражает их, частично рассеивает, изменяя тем самым количество и качество света, поступающего к поверхности Земли. Получая такую радиацию от Солнца, атмосфера и поверхность Земли нагреваются, после чего сами становятся источниками излучения тепла. Средний за год глобальный баланс солнечной энергии, поступающей на Землю, представлен на рис. 2.4.

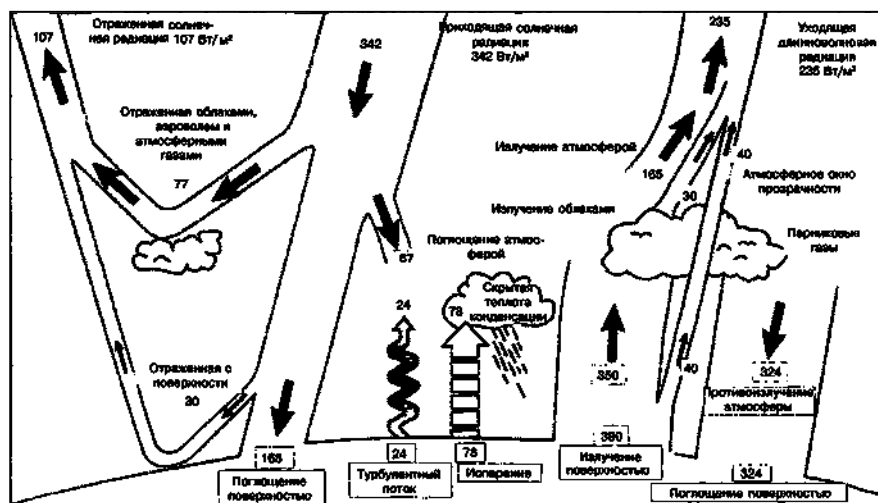


Рис. 2.4. Средний за год глобальный баланс энергии в климатической системе Земли (Solomon et al., 2007). $1 \text{ Вт/м}^2 = 1 \text{ Дж/м}^2$; $1 \text{ ккал/м}^2 = 4,19 \text{ Дж/м}^2$

Потоки лучистой энергии и теплового излучения Земли и атмосферы условно делят по длинам волн (λ) на коротковолновую (0,1...4,0 мкм) и длинноволновую радиацию (4,0–100 мкм). Видимый человеком свет занимает интервал длин волн от 0,40 до 0,76 мкм. В этом интервале заключено 47 % всей солнечной лучистой энергии. Коротковолновую радиацию еще называют и интегральной, поскольку она включает, кроме видимого света, еще и ближние к ней по длинам волн ультрафиолетовую (0,01...0,39 мкм, или 9 % всей лучистой энергии) и инфракрасную радиацию (0,76...4,0 мкм, или около 44 % всей лучистой энергии). На 99 % солнечная радиация состоит из коротковолновой радиации. Около 1 % составляет радиация с меньшими и большими длинами волн, вплоть до рентгеновских лучей и радиоволн (Хромов С.П. и Петросянц М.А., 1994).

Свет, излучаемый Солнцем, представляет собой один из видов электромагнитного колебания. Распределение энергии солнечной радиации по длинам волн называется *солнечным спектром*. Разные виды электромагнитного излучения различаются по длине волны, т.е. по расстоянию между ее соседними максимумами. Длины волн обычно измеряют в микрометрах (1 мкм = 10^{-6} м) или в нанометрах (1 нм = 10^{-9} м). Участок электромагнитных волн от 10^{-3} до 10^{-2} мкм относится к тепловому излучению. До вхождения потока солнечной радиации в атмосферу солнечный спектр, заключенный в интервале длин волн 0,17...4 мкм, с максимумом при 0,475 мкм, обусловлен только природой Солнца.

Атмосфера Земли прозрачна лишь для небольшой части электромагнитного излучения Солнца: она пропускает часть ультрафиолетового и инфракрасного излучения и весь видимый свет. Видимая часть радиации создает освещенность и воспринимается глазами человека как белый свет, состоящий, как известно, из суммы цветных лучей, имеющих различные длины волн. Свет с длиной волны около 0,40 мкм воспринимается как фиолетовый, с длиной волны около 0,76 мкм – как красный. В промежутках между ними находятся все другие цвета видимого спектра (рис. 2.5).

Спектральный состав прямой солнечной радиации, так же как и ее интенсивность, не остаются постоянными при прохождении через атмосферу. По мере увеличения высоты Солнца над горизонтом доля синих, фиолетовых и ультрафиолетовых лучей увеличивается. Максимум энергии, находящийся в красных лучах, постепенно перемещается, и в часы, близкие к полудню, приходится на сине-зеленые и синие лучи. Доля инфракрасных (тепловых) и длинноволновых лучей (красных, желтых) мало меняется в зависимости от высоты Солнца (при высоте 20...90°), значительно сильнее изменяется количество коротковолновых лучей – ультрафиолетовых, фиолетовых и синих. На интенсивность светового потока заметно влияет прозрачность атмосферы, наличие облачности и высота над уровнем моря. Уменьшение прозрачности атмосферы влечет за

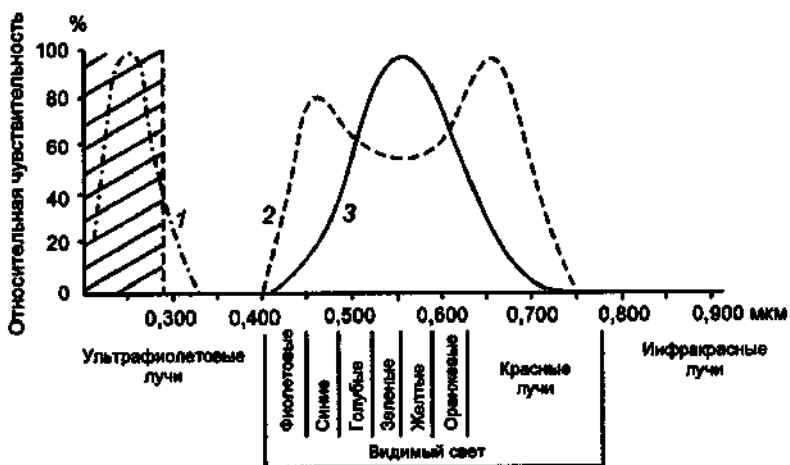


Рис. 2.5. Показательные примеры биологического действия участков солнечного спектра (Общая биология, 1982): 1 – свертывание белка; 2 – интенсивность фотосинтеза пшеницы; 3 – спектральная чувствительность глаза человека. Заштрихована область ультрафиолетового излучения, не проникающая сквозь атмосферу

собой уменьшение интенсивности прямой солнечной радиации и увеличение доли рассеянной радиации.

Степень рассеяния и поглощения зависит от длины волны. Чем короче волна, тем сильнее рассеиваются и поглощаются лучи. Например, фиолетовые лучи ($\lambda \sim 0,40$ мкм) почти в 1,9 раза короче волны красных лучей (0,76), рассеиваются в 14 раз сильнее; ультрафиолетовые лучи рассеиваются атмосферой в 15–30 раз, синие – в 5–7 раз сильнее, чем красные. Поэтому при низком стоянии Солнца над горизонтом, когда лучи проходят через атмосферу более длинный путь, рассеяние их увеличивается и происходит почти полное поглощение атмосферой коротковолновых лучей.

Интенсивность прямой солнечной радиации при прохождении через толщу атмосферы снижается благодаря поглощению (около 15 %) и рассеиванию (около 25 %) энергии газами, аэрозолями и облаками. Степень ослабления солнечного потока в атмосфере зависит от высоты Солнца над горизонтом и коэффициента прозрачности атмосферы. Соотношение различных участков спектра солнечной радиации постоянно меняется под влиянием составляющих атмосферу газов, паров воды, ледяных кристаллов, пыли, различных аэрозолей, а также вследствие изменения высоты Солнца над горизонтом – угла, образованного условной линией горизонта и направлением солнечных лучей. Чем меньше угол, под

которым падают на Землю солнечные лучи, тем длиннее их путь в атмосфере. Самый короткий путь лучей при нахождении Солнца в зените (рис. 2.6). При этом максимально возможное количество солнечной радиации получает единица площади, расположенная перпендикулярно к солнечным лучам. На единицу горизонтальной поверхности приходится количество лучистой энергии:

$$S = S_0 \cdot \sin h_0 \quad (2.1)$$

где h_0 – высота Солнца.

На горизонтальную площадку s' приходится количество радиации $S's'$, равное количеству радиации Ss , приходящему на перпендикулярную к лучам площадку s :

$$S's' = Ss \quad (2.2)$$

Но площадка s относится к площадке s' , как AB к AC ; так как $AB/AC = \sin h_0$, то:

$$S' = S(S/s') = S(AB/AC), \quad (2.3)$$

тогда:
$$S = S_0 \cdot \sin h_0 \quad (2.4)$$

Таким образом, S' равно S только тогда, когда Солнце находится в зените, во всех остальных случаях S' меньше S .

Когда Солнце находится у горизонта, его лучи проходят в атмосфере путь (L) почти в 35 раз больший, чем при падении лучей под углом 90° к поверхности Земли. За единицу принимается *атмосферная масса* вертикального столба воздуха с основанием 1 см^2 , проходимая лучами Солнца в зените (табл. 2.2).

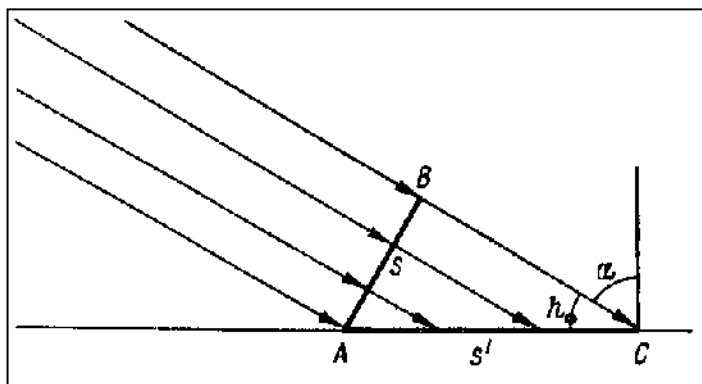


Рис. 2.6. Приток солнечной радиации на поверхность AB , перпендикулярную к лучам, и на горизонтальную поверхность AC

Таблица 2.2

Относительная длина луча в атмосфере при различной высоте Солнца над горизонтом

Высота Солнца, град	90	80	70	60	50	40	30	20	15	10	5	1	0
<i>L</i>	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	1,6	2,0	2,9	3,8	5,6	10,4	26,0	34,4

Различают коротковолновую солнечную радиацию с длинами волн 0,1...4,0 мкм, представляющую собой излучение Солнца при 6000 К, и длинноволновую – с длинами волн 4...80 мкм, являющуюся излучением вещества в атмосфере и на поверхности Земли с температурой 250...300 К. Напомним, что *Кельвин (К)* – это *единица термодинамической температуры*, названная по имени английского физика У. Томсона, лорда Кельвина (W. Thomson, Lord Kelvin). Он впервые (1848 г.) предложил принцип построения температурной шкалы на основе второго начала термодинамики (Физический энциклопедический словарь, 1984). Нижней границей такой температуры является абсолютный нуль (минус 273 градуса), а основной реперной точкой – температура, характеризующая состояние термодинамического равновесия воды в трех фазах (жидкой, парообразной и твердой – лед), называемой тройной точкой воды.

1 К определяется как 1/273,16 часть термодинамической температуры точки равновесия льда, воды и пара, равная 1 °С по Международной системе единиц (СИ).

Глаз человека воспринимает свет с длиной волн 0,34...0,76 мкм, с максимумом около 0,55 мкм. В общем плане солнечный спектр делят на три основных части: *ультрафиолетовую (УФР)* $\lambda \leq 0,40$ мкм, *видимую* ($0,40 \leq \lambda < 0,76$) и *инфракрасную (ИФА)* ($\lambda \geq 0,76$ мкм).

Поступающая на верхнюю границу атмосферы, проходя через нее, солнечная радиация претерпевает ряд изменений: часть ее поглощается, преобразуясь в тепловую энергию, часть рассеивается молекулами газов и парами воздуха, часть отражается в космическое пространство (см. рис. 2.4). У верхней границы атмосферы на видимую часть спектра приходится около 47 %, на инфракрасную – 44 %, на ультрафиолетовую часть – 9 % всей поступающей солнечной радиации. При прохождении через слои атмосферы солнечный свет разлагается на цветные лучи, расположенные по убывающей длине волны от красного до фиолетового (см. рис. 2.5). Максимум энергии в спектре солнечной радиации на верхней границе атмосферы приходится на длину волны 0,48...0,49 мкм, находящуюся в сине-голубой области спектра, а у поверхности Земли – в области желто-зеленой части спектра.

В слоях атмосферы солнечная радиация поглощается различными газами и аэрозолями, рассеивается молекулами, аэрозолями, каплями воды в облаках и кристаллами замерзшей воды. Так, в стратосфере

озоном (O_3) полностью поглощается ультрафиолетовое излучение с длинами волн короче 0,29 мкм, опасное для всего живого на Земле; сильно ослабляется биологически активная радиация с длинами волн короче 0,32 мкм. В среднем озон, являющийся естественной защитой живых организмов от вредного излучения, поглощается всего 3% солнечного излучения. В небольших дозах (пороговые медицинские нормы) ультрафиолетовые лучи физиологически необходимы для нормального развития растений, животных и человека.

В красной и инфракрасной областях спектра наиболее существенно поглощает солнечную радиацию водяной пар (H_2O); в этой же области находятся и участки поглощения углекислого газа (CO_2). Всего водяным паром и аэрозолями поглощается около 15 % солнечной радиации, облаками – примерно 5 % (Исаев А.А., 2001).

Видимые лучи с длиной волны 0,40...0,75 мкм, на долю которых приходится большая часть энергии солнечного излучения, достигающего земную поверхность, имеют большое значение для основной массы живых организмов: растений, животных и человека. Световая и цветовая ориентация является важным фактором их выживания. Для незначительной части бесхлорофилльных растений и некоторых животных (пещерных, глубоководных) свет не является обязательным условием их существования.

По мере увеличения высоты Солнца над горизонтом доля синих, фиолетовых и ультрафиолетовых лучей увеличивается. Максимум энергии, находящийся в красных лучах, постепенно перемещается, и в часы, близкие к полудню, приходится на сине-зеленые и синие лучи.

Доля инфракрасных (тепловых) и длинноволновых лучей (красных, желтых) мало меняется в зависимости от высоты Солнца (при высоте 20...90°). Значительно сильнее изменяется количество коротковолновых лучей – ультрафиолетовых, фиолетовых и синих.

На интенсивность светового потока заметно влияет прозрачность атмосферы, наличие облачности и высота местности над уровнем моря. Уменьшение прозрачности атмосферы влечет за собой уменьшение интенсивности прямой солнечной радиации и увеличение доли рассеянной радиации. Коэффициент прозрачности, зависящий от количества содержащихся в атмосфере водяных паров, аэрозолей и пыли, показывает, какая доля солнечной радиации доходит до земной поверхности при отвесном падении солнечных лучей.

Коэффициент (ρ) есть отношение потока прямой солнечной радиации, прошедшей через атмосферу при массе атмосферы, равной 1 ($I_{m=1}$), т.е. при отвесном падении солнечных лучей, к потоку солнечной радиации на верхней границе атмосферы (I_0):

$$\rho = I_{m=1} / I_0. \quad (2.5)$$

В идеально чистой атмосфере этот коэффициент равен около 0,9, в реальных условиях он варьирует в пределах 0,60...0,85. Более высокие значения коэффициента отмечаются зимой, более низкие – летом за счет высокой запыленности воздуха.

Продолжительность светлого времени суток изменяется вследствие вращения Земли вокруг своей оси, наклона этой оси к плоскости земной орбиты, географической широты местности, склонения Солнца и, соответственно, зависит от сезонов и месяцев года. Соотношения продолжительности светлой части суток в самый короткий зимний день и самый продолжительный летний день на разных широтах от экватора (Э) до Северного полюса (П) наглядно иллюстрирует рис 2.7.

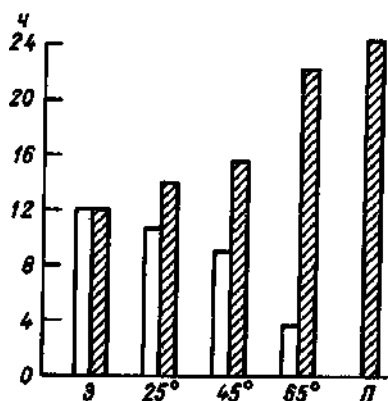


Рис. 2.7. Продолжительность дневной части суток (ч) в самый короткий зимний и в самый длинный летний день под разными широтами

Весьма информативным климатическим показателем степени освещенности территории является продолжительность солнечного сияния (ПСС), представляющая собой суммарное число часов, когда светило Солнце. Иногда этот показатель называют *числом часов солнечного сияния*. Продолжительность солнечного сияния зависит от географической широты, продолжительности светлой части суток (изменяющейся по сезонам и месяцам года) и от режима облачности в пункте наблюдения.

На территории бывшего СССР минимальная продолжительность солнечного сияния приходится на декабрь, максимальная – на июль. Иногда этот максимум смещается на июнь, в зависимости от режима облачности. В отличие от большей части названной территории, в Дальневосточном регионе максимум ПСС наблюдается в марте, поскольку в летние месяцы там преобладают пасмурные дни, обусловленные господством летнего муссона (Климат России, 2001). В условиях горного

рельефа ПСС заметно уменьшается, особенно в долинах и котловинах за счет особенностей горно-долинной циркуляции воздушных потоков и режима облачности.

На территории Российской Федерации средняя многолетняя продолжительность солнечного сияния варьирует от 1200 часов на севере (Кольский полуостров, Таймыр) до 2200 часов на юге (Северокавказский регион) и до 2400...2600 часов на юге Сибири, Забайкалья и в Приморском крае (рис. 2.8).

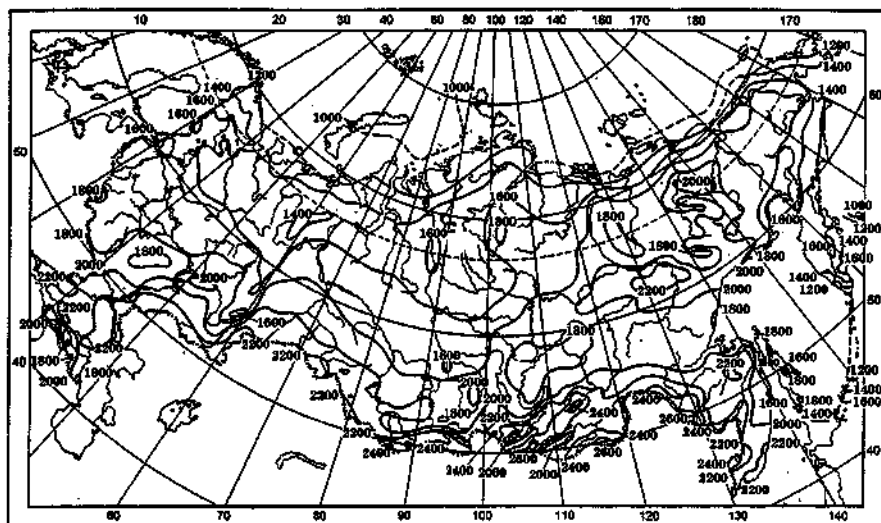


Рис. 2.8. Продолжительность солнечного сияния, ч/год

Постоянные и экстремальные, эпизодические изменения состояния атмосферы определяют различия в величине прихода к земной поверхности суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной).

Физическая сущность солнечной радиации, трансформации ее потоков, приходящих к Земле, является предметом исследования метеорологов и актинометристов. Результаты изучения опубликованы в их многочисленных работах, выполненных несколькими поколениями ученых, и изложены в учебных курсах метеорологии (актинометрии) и физики атмосферы. В настоящем учебном пособии эти работы использованы во второй и третьей частях только с позиций влияния солнечной радиации на растения.

2.2. Земельные ресурсы и землепользование

Общая поверхность земного шара составляет 509,6 млн км², значительную часть которой занимают океаны (71 %). Суммарная площадь континентов планеты составляет 29 % или 148 млн км², или 14,8 млрд га.

Из этой площади пахотными землями и многолетними насаждениями (плодовые, масличные, ягодные и другие культуры) занято 1,5 млрд га, или примерно 10,1 %. Сенокосы и пастбища занимают около 3 млрд га (20,2 %), леса всех типов – немногим более 4 млрд га (27 %). Прочие земли, относящиеся к категории не удобных для хозяйственного освоения, – болота, «голые» пески, скалы, «бедленд»¹, ледники и т.п. – занимают около 4,9 млрд га (33,1 %). Значительная часть поверхности континентов (около 10 %) занята населенными пунктами, промышленными объектами, коммуникациями, водными объектами и т.п. Приведенные цифры характеризуют лишь общую картину землепользования, которая широко варьирует по континентам и странам в зависимости от комплекса природных условий и действующей социально-экономической системы в государствах.

Однако основные изменения в структуре землепользования происходят в результате расширения хозяйственной деятельности растущего населения Земли, роста числа и размеров городов, других населенных пунктов, строительства промышленных объектов, дорог, коммуникаций и т.п. Ежегодные потери земельных угодий в мире для сельскохозяйственного производства составляют от 5–6 до 8–9 млн га.

По различным оценкам специалистов, потребность в территории, обеспечивающей поддержание жизни одного «среднего» человека, составляет от 1,75 до 2,0 га, в том числе 0,46 га – сельскохозяйственных полей (для питания продуктами земледелия), 1,2 га – пастбищ и сенокосов (получение животноводческой продукции), 0,07 га – лесных угодий (для поглощения выделяемой углекислоты и получения кислорода). Кроме того, человек нуждается в жилых и производственных помещениях (0,01 га), столько же приходится под инфраструктуру жизнеобеспечения (дороги, линии электропередач, связи и другие коммуникации).

На Земле значительные территории остаются пока не затронутыми хозяйственной деятельностью человека. Так, по данным Института мировых ресурсов (1990), в Канаде – 65 % территории, в России – 60 %, в Северной Америке – 42 %, в Африке – 24 %, в Европе – всего 4 %.

В среднем в мире на одного жителя приходится 3 га земной поверхности, в России – 11,5 га, но по регионам страны распределение территории на душу населения оказывается весьма неравномерным: например, в европейской части – 3,65 га, в Уральском регионе – 9,3 га, в Сибири и на Дальнем Востоке – почти по 37 га. По данным Государственного комитета Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству (Москва, 1997), земельный фонд страны к началу 1997 г. составил 1 709,8 млн га. Сельскохозяйственные

¹ (badlands (англ.) – плохие земли – резко и сложно расчлененный низкорослый рельеф, практически лишенный почвенного горизонта, не пригодный для земледелия.

угодья занимают 221,6 млн га (13 % от общей площади), в том числе пашня – 128,9 млн га (7,5 %). На долю лесов всех типов приходится 786,0 млн га (46 %). Пастбища северных оленей занимают около 327 млн га (около 19 %). Остальные земли (14,5 %) заняты болотами, водными объектами, землями, не удобными для сельскохозяйственного использования, а также городскими строениями, хозяйственными постройками, коммуникациями и т.п. (рис. 2.9). Приведенные цифры распределения земельного фонда России, естественно, претерпевают изменения.

В других странах СНГ, вместе взятых, на одного жителя в среднем приходится более 3 га.

Площадь пашни на одного человека в США составляет 0,7 га, в Венгрии – 0,5 га, во Франции и Финляндии – по 0,3 га и т.п. Однако эффективность использования каждого гектара пашни в этих странах в 3...5 раз выше, чем в России. Причина такого разрыва заключается в уровне культуры земледелия: в частности в России недостаточно внесение минеральных удобрений в пересчете на 1 га пашни (табл. 2.3).

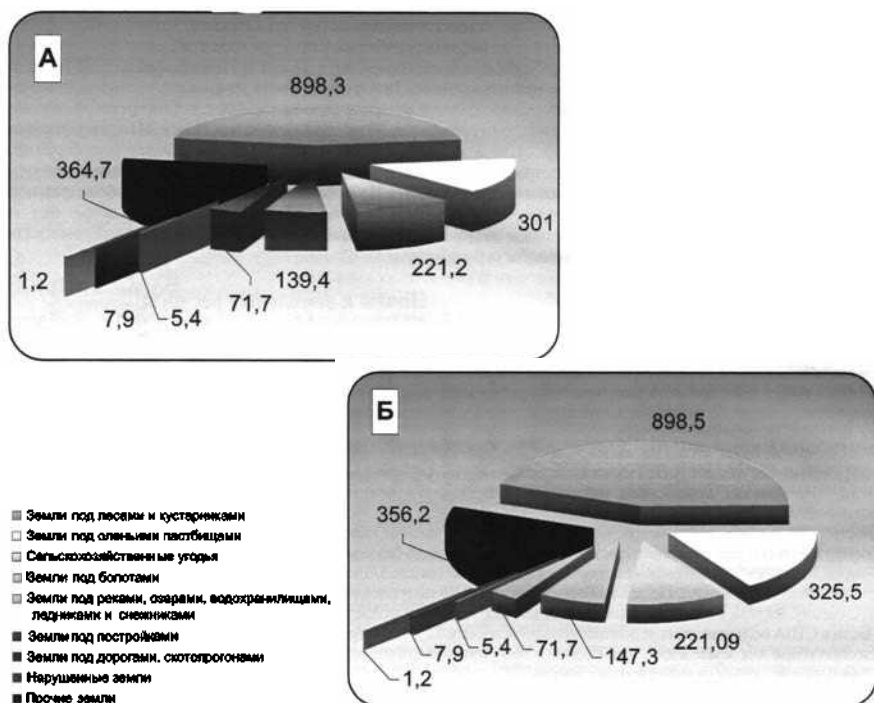


Рис. 2.9. Распределение земельного фонда Российской Федерации по угодьям в 1991 (А) и 2000 гг. (Б), млн га

Таблица 2.3

**Применение минеральных удобрений (в действующем веществе), кг/га
(Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000)**

Страна/год	1980	1990	1992	1994	1995	1997	1998
Россия	68	83	44	16	12	18	16
США	113	116	114	140	140	145	144
Канада	44	47	45	47	47	45	45
Франция	309	294	314	309	309	305	305

В годы распада СССР резко снизились удобряемые площади посевов: в 1990 г. – 66 %, 1993 г. – 45 %, 1994 г. – 29 %. Кроме того, для России характерна низкая эффективность вносимых минеральных удобрений: 1 кг туков обеспечивает получение 4...6 кг зерна, тогда как в зарубежных странах – 16...18 кг.

Серьезной эколого-хозяйственной проблемой является уменьшение содержания гумуса в пахотных горизонтах – основы плодородия почвы. Так, за последние сто лет запасы гумуса в российских черноземах уменьшились почти в два раза. В последние годы эти запасы в пахотных почвах России уменьшаются ежегодно на 0,3...0,7 % от общих запасов в слое почвы 25...30 см. За последнее десятилетие доля потерь органического вещества в незеродированных черноземах достигла 0,4...0,8 %; под влиянием возрастающей антропогенной нагрузки на пашню потери гумуса достигают 0,64 т с одного га (Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000).

Особенно чувствительными к различным формам антропогенного давления оказались хрупкие экосистемы жарких, засушливых, полусушливых регионов и холодных регионов в зоне тундры, лесотундры, а также в высокогорных районах с коротким вегетационным периодом.

Уровень воздействия на природные экосистемы (распашка целины, эрозия и дефляция почвы, ее засоление, иссушение, загрязнение химическими препаратами, и в том числе ядохимикатами, чрезмерное уплотнение тяжелыми механизмами в процессе обработки почвы и др.) в целом становится соизмеримым с другими мощными антропогенными воздействиями, такими, как вырубка лесов, загрязнение атмосферы, суши и вод Мирового океана (Каштанов А.Н., 1993).

Приведем несколько примеров. В мире на площади около 950 млн га или почти на трети обрабатываемых земель отмечено повышение концентрации солей; 120...150 млн га орошаемых земель подверглись вторичному засолению и заброшены (Египет, Индия, Иран, Китай, США, Мексика). Страны Африки в среднем теряют земли, пригодные для сельскохозяйственного производства почти в линейной зависимости от бурного роста населения.

Среди стран СНГ Россия и Казахстан обладают наибольшими земельными ресурсами: 1,7 млрд га и 270 млн га соответственно. Довольно

крупные ресурсы земли имеются в Украине, Туркменистане и Узбекистане. Остальные государства бывшего СССР занимают меньшие территории. Уровень сельскохозяйственного освоения территорий в этих странах различен из-за комплекса природных условий – барханные пески, высокогорья, лесистость среднегорных районов и т.п. Сельскохозяйственные угодья в странах СНГ, расположенные на засоленных землях, занимают более 100 млн га, основная их часть – под низкопродуктивными пастбищами. Кроме того, на засоленных почвах размещается около 30 млн га пашни, обладающей низким потенциалом продуктивности (табл. 2.4).

Таблица 2.4

**Засоленные пахотные земли в некоторых странах СНГ
по состоянию на 1993 г., млн га (Павловский Е.С., 1995)**

Государства	Все сельскохозяйственные угодья	Пашня		
		всего	в т.ч. засоленная	в процентах
Россия	218,9	134,1	12,90	9,6
Казахстан	196,6	35,7	12,10	33,8
Украина	41,8	34,2	1,25	3,6
Туркменистан	32,1	1,2	1,0	83,3
Узбекистан	26,5	4,5	1,58	35,1
Кыргызстан	10,0	1,3	0,32	24,5
Таджикистан	4,3	0,9	0,07	7,7
Азербайджан	4,2	1,6	0,57	35,4

На территории Туркменистана, Казахстана и Узбекистана деградация растительного покрова охватила более 37 % их общей площади; в горах Кыргызстана и Таджикистана в результате деградации естественных пастбищ их продуктивность снизилась на 30...40 и 40...60 % соответственно (Трофимов И.А., 1995). В Казахстане все пахотные земли утратили до 20...30 % гумуса, около 50 % пашни подвержено ветровой и водной эрозии, около 30 % пастбищ деградировано (Соболев В.В., 1996).

В России процессы деградации земель охватили площадь около 380 тыс. км²; ежегодно площадь эродированных земель увеличивается на 4...5 тыс. км²; деградация растительного покрова (пастбища, сенокосы) отмечена на площади около 700 тыс. км² (Глазовский Н.Ф., Орловский Н.С., 1996). Из 5,8 млн га орошаемых земель России около 12 % площадей находятся в неудовлетворительном состоянии, а более 75 % площадей требуют улучшения мелиоративного состояния в виде дренажа, промывки, химической мелиорации, планировки и реконструкции. Отрицательные последствия орошения достигают таких масштабов, что приводят к потере почв, как объекта земледелия (Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000).

Общая площадь деградированных оленьих пастбищ на севере и востоке России превышает 230 млн га (68 % их территории). Все виды

деградации – засоление, эрозия, истощение или оскудение почв – приводят к прогрессивной потере потенциала продуктивности сельскохозяйственных земель.

В то же время в ряде стран Западной Европы внесение сбалансированных доз органических и минеральных удобрений, проведение комплекса противоэрозионных мероприятий, использование севооборотов и т.п. позволило остановить процессы деградации почв и обеспечило поддержание условий, близких к оптимальному минеральному питанию сельскохозяйственных культур.

В современных условиях деградация (разрушение) почвенного покрова и естественных ландшафтов происходит примерно в 10 раз быстрее, чем их формирование в ходе эволюции природной среды (Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000). При этом следует помнить, что почвенный покров экосистем имеет определенный «запас устойчивости» к различным формам антропогенной нагрузки. Однако последняя может достигать такого предела, за которым перестройка свойств и функций почвы становится неуправляемой и необратимой, когда деградация почвенного покрова достигает катастрофического состояния, например последние стадии опустынивания в хрупких экосистемах.

Защита почв от эрозии и истощения питательных веществ в ней является неотложной задачей многих государств и регионов в мире, в том числе и в России (Развитие и окружающая среда..., 1995).

2.3. Водные ресурсы

Водная оболочка земного шара – гидросфера, по оценке специалистов, содержит примерно 1,5...1,6 млрд км³ свободной воды, 1,37 млрд км³ ее приходится на Мировой океан, занимающий около 71 % поверхности земного шара. На континентах – 90 млн км³ воды, из них 60 млн км³ приходится на подземные воды, большую часть которых представляют глубинные рассолы (вода соленая), около 4 000 км³ – пресные подземные воды, находящиеся в зоне активного водообмена. 24...27 млн км³ воды содержится в ледниках Антарктиды, Арктики и высокогорий. Эти огромные массы «законсервированной» в ледниках воды также участвуют в круговороте воды на Земле. На долю поверхностных пресных вод в гидросфере приходится относительно небольшой объем – около 360 тыс. км³ (0,25 % ее общего объема), в том числе 278 тыс. км³ – в реках и озерах и около 83 тыс. км³ – почвенная влага. Сравнительно невелик также объем паров атмосферы – 14 тыс. км³, или 0,001 % (Львович М.И., 1986). Вся эта вода сохраняется благодаря влагообороту, существующему в природе.

*Процесс непрерывного обмена влагой между атмосферой и земной поверхностью, включая поверхность Мирового океана, называется **влагооборотом**, или **большим гидрологическим циклом**. Основными*

звеньями этого цикла являются *испарение воды с поверхности океана и суши, перенос водяного пара в атмосфере и его конденсация* (образование облаков), *выпадение осадков в виде дождя и снега (града), просачивание влаги* (инфильтрация) в почвогрунты и *сток с континентов* (рис. 2.10). Важнейшим свойством круговорота воды является его взаимодействие с литосферой, атмосферой и биосферой, благодаря которому все части гидросферы связываются воедино: океан, поверхностные воды, почвенная влага, подземные воды и атмосферная влага. Движущими силами круговорота воды являются солнечная энергия и сила тяжести. Под влиянием солнечного тепла происходит испарение, конденсация водяных паров и другие процессы. Выпадение всех видов осадков, течение воды в реках, перемещение влаги в почвенных горизонтах и грунтах происходит под влиянием силы тяжести. При этом почвенному покрову принадлежит особая роль в круговороте воды, поскольку он является своего рода посредником между климатом, рельефом, растительностью, геологическим строением местности, с одной стороны, и речным стоком – с другой (Львович М.И., 1986).

Обычно средняя межгодовая величина испарения (E) определяется как разность между суммой осадков (r) и речного стока (f):

$$E = r - f. \quad (2.6)$$

Для более короткого периода осреднения – для расчетов годового хода испарения, вычисления испарения за отдельные годы и месяцы – используется общее выражение:

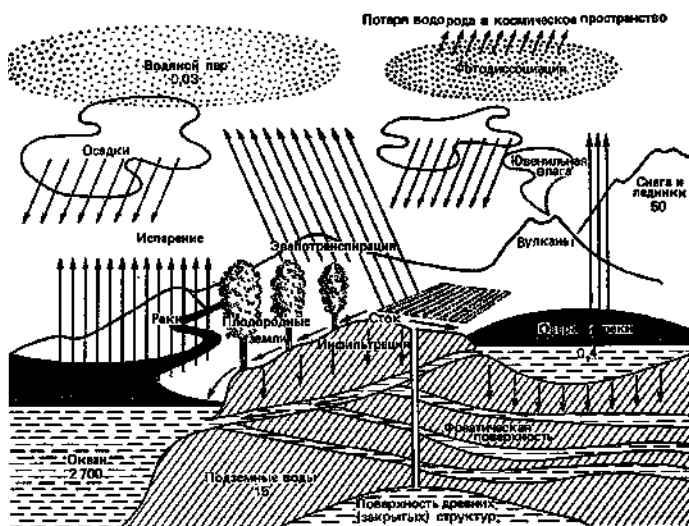


Рис. 2.10. Общая схема круговорота воды. Цифры – толщина слоя в метрах

$$E = r - f - \Delta w, \quad (2.7)$$

где Δw – изменение влагосодержания (динамика) в верхних слоях почвы (Будыко М.И., 1971).

Средняя интенсивность испарения с поверхности океана составляет 1200 мм/год, что примерно на 100 мм/год больше количества выпадающих осадков. На суше выпадение осадков, составляющее в среднем 710 мм/год, превышает испарение приблизительно на 240 мм/год. Поэтому происходит перенос воды с поверхности океанов и морей на сушу в форме водяного пара и с суши в океаны (моря) в виде речного стока (Будыко, 1971; Андерсон, 1985). При этом считается, что эвапотранспирация (суммарное испарение с подстилающей поверхности и транспирация растений) и количество выпадающих осадков в биосфере должны быть равны.

Соотношение между количеством осадков и испаряемостью по континентам приведено в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Водный баланс континентов (Будыко М.И., 1971)

Континенты	Осадки мм·год ⁻¹	Испаряемость мм·год ⁻¹	Сток	
			мм·год ⁻¹	10 ⁹ т·год ⁻¹
Африка	690	430	260	7 700
Азия	600	310	290	13 000
Австралия	470	420	50	380
Европа	640	390	250	2 200
Северная Америка	660	320	340	8 100
Южная Америка	1630	700	930	16 600

Как видно из данных этой таблицы, соотношения испаряемости и осадков на отдельных континентах резко различаются. Разность годовых сумм осадков и испаряемости на континентах равна величине речного стока. Только в Австралии величина испаряемости близка к сумме осадков, что объясняется незначительными значениями речного стока на континенте.

Распределение водных ресурсов на планете крайне неравномерно, что связано с комплексом физико-географических условий. Общее представление о распределении условий увлажнения на земном шаре дают карты некоторых элементов водного баланса, составленные М.И. Львовичем (1986), и карта годовых значений испарения с подстилающей поверхности.

На следующих трех рисунках представлены карты, характеризующие не только часть круговорота воды в мире, но и различные источники ресурсов пресных вод. При этом ресурсы полного речного стока (рис. 2.11) наиболее широко используются в практике водного хозяйства. Ресурсы подземного стока в реки представляют наиболее ценный источник пресных вод зоны активного водообмена (рис. 2.12), в первую очередь для целей питьевого и

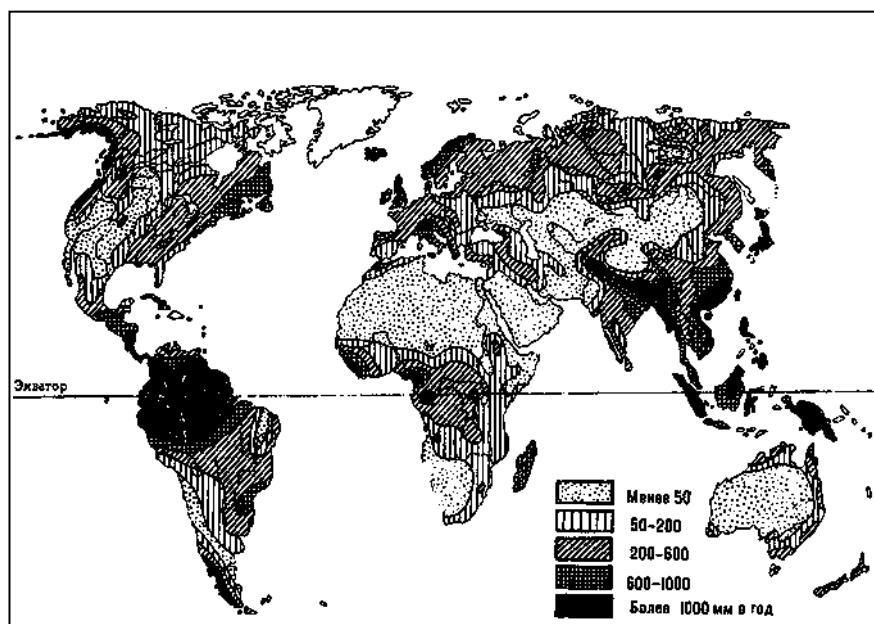


Рис. 2.11. Полный речной сток, мм

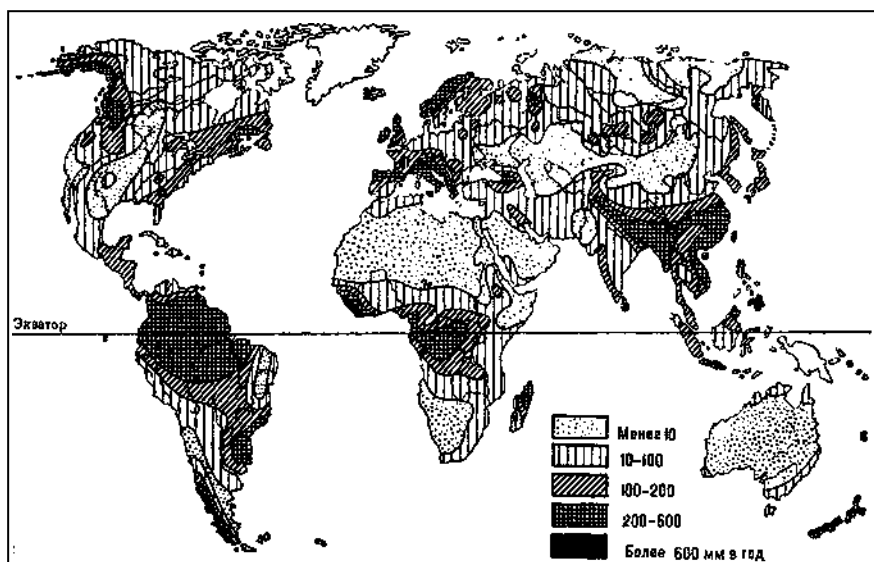


Рис. 2.12. Подземный сток в реки, мм

бытового водоснабжения, поскольку он менее подвержен загрязнению. По мнению М.И. Львовича, валовое увлажнение территории характеризует воду, усваиваемую в течение года почвой и расходуемую на питание подземных вод и испарение, поэтому оно является обобщенной характеристикой ресурсов почвенной влаги (рис. 2.13). На карте (рис. 2.14) приведены средние годовые суммы (мм/год) испарения с подстилающей поверхности.

Максимальным поверхностным стоком рек и подземных вод на единицу площади характеризуется южно-американский континент: только сток р. Амазонки составляет седьмую часть всего мирового стока. Полный и подземный стоки этого материка почти в четыре раза больше, чем в Европе, занимающей второе место по водным ресурсам. Далее следуют Северная Америка, Азия и Африка. Наиболее низкая обеспеченность речным стоком характерна для Австралии. От разности между осадками и испаряемостью зависит количество воды, доступное для сельскохозяйственных и бытовых нужд человека.

Пресная вода относится к числу важнейших лимитированных, но возобновляемых ресурсов биосферы. Пресной считается вода, в одном литре которой содержится не более 1 г растворимых солей, т.е. ее солесность равна 0,1 %.

Степень обеспеченности человека пресной водой зависит от многих факторов: природных (в первую очередь климатических) условий, численности населения, в том числе в городах и сельской местности, уровня развития промышленности, масштабов развития орошаемого

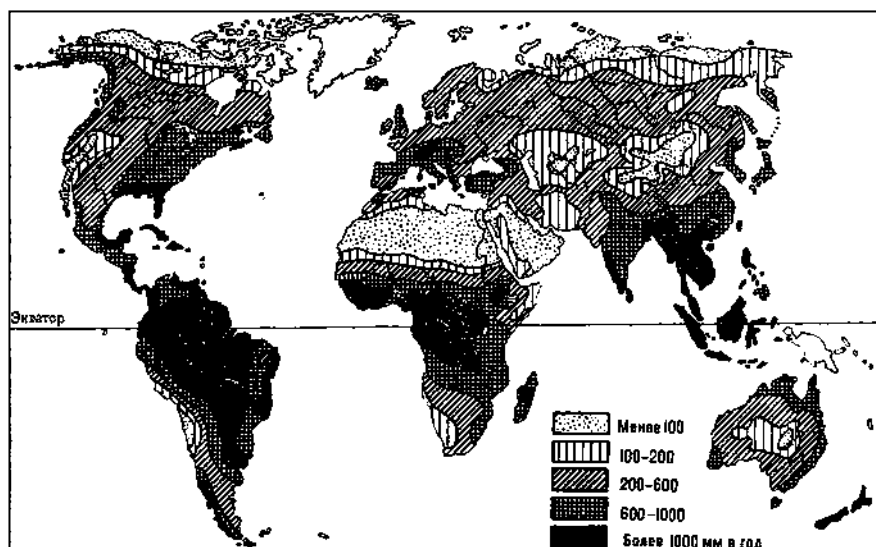


Рис. 2.13. Валовое увлажнение территории, мм

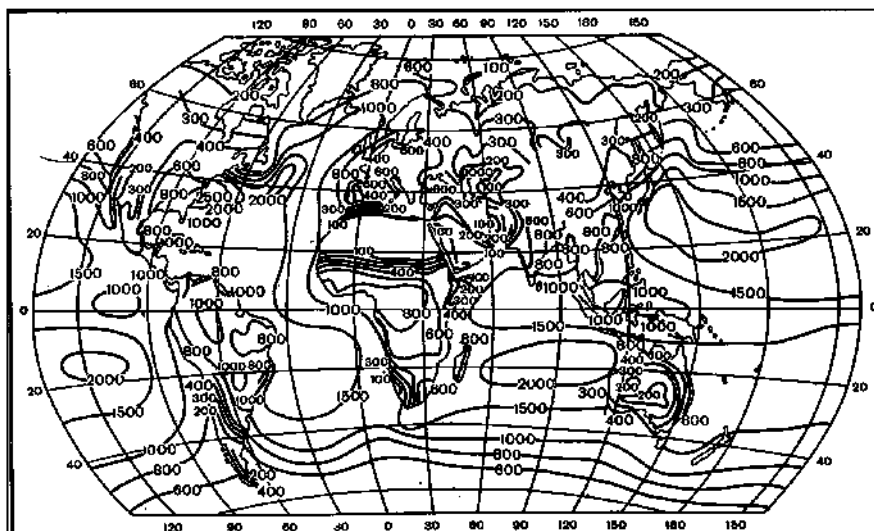


Рис. 2.14. Средние годовые значения (мм/год) испарения с подстилающей поверхности

земледелия, являющегося наиболее емкой расходной частью водного баланса территории.

Известно, что пресноводные объекты неравномерно распределены по континентам и странам, это создает различные возможности для хозяйственного использования всего комплекса природных ресурсов на национальном и региональном уровнях. Продолжающийся рост численности населения на Земле (см. 2.6) также вносит изменения в расчеты средней обеспеченности человека пресной водой. Обеспеченность ресурсами речного стока и подземного стока на душу населения приведена на картах-схемах (рис. 2.15 и 2.16) по данным о численности людей на Земле в 1979 году.

Около 35 % суши земного шара занято засушливыми и полусухими территориями. Более 14 % пахотных земель мира находятся в таких регионах, где растениеводство возможно только при орошении. Известно также, что естественные колебания климата и экстремальные особенности погоды в отдельные годы приводят к изменениям в количестве выпадающих осадков и их неравномерному распределению во времени и пространстве, следствием чего являются засухи в одних районах и наводнения – в других, оказывающих серьезное влияние на экономику многих стран и регионов.

Из-за неравномерного распределения количества выпадающих осадков на поверхности планеты многие страны, расположенные в

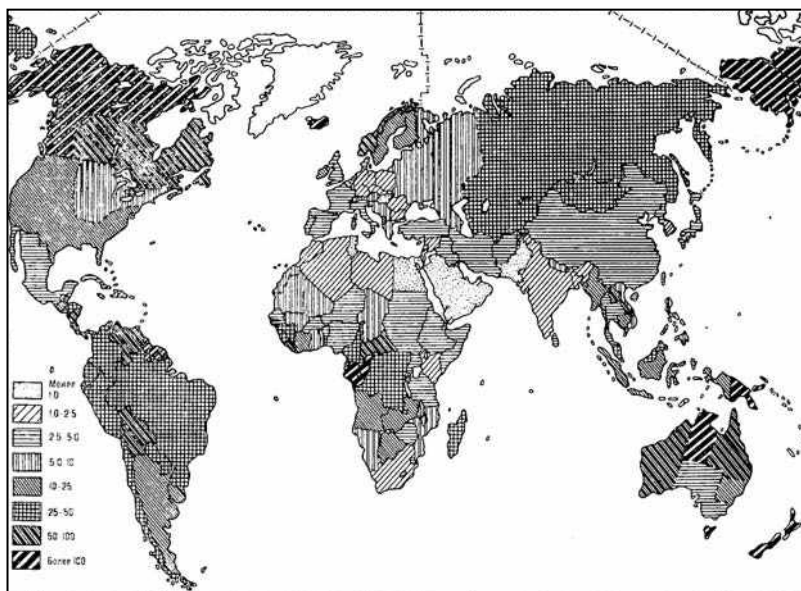


Рис. 2.15. Обеспеченность ресурсами полного речного стока стран мира, тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ на душу населения

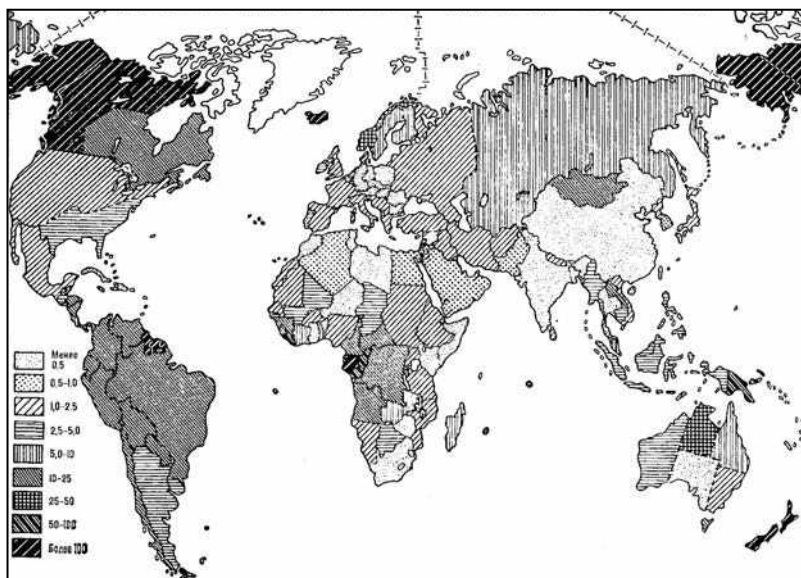


Рис. 2.16. Обеспеченность ресурсами подземного стока в реки стран мира, тыс. $\text{м}^3/\text{год}$ на душу населения

нетропических регионах Африки, на Ближнем Востоке, в некоторых регионах Азии, характеризуются засушливым и сухим климатом. В 22 странах мира возобновляемые водные ресурсы составляют менее 1 тыс. м³ в год в расчете на одного человека, что не обеспечивает его естественной потребности в воде. В 19 странах мира ресурсы пресной воды оцениваются в объеме 2 тыс. м³ воды в год в расчете на одного человека. В Китае 50 больших городов испытывают острую нехватку воды из-за ежегодного снижения уровня грунтовых вод на 1–2 м. В г. Мехико (Мексика) грунтовая вода выкачивается для питьевых и бытовых нужд темпами, на 40 % превышающими ее естественное пополнение (Развитие и окружающая среда..., 1995).

Общая картина ежегодно восполняемых ресурсов пресной воды в мире представлена в табл. 2.6.

В некоторых государствах дефицит питьевой воды приобретает характер национального бедствия. Так, на привозной пресной воде в значительной мере вынуждено жить население Алжира, Гонконга, Сингапура, прибрежных районов бывшей Югославии, ряда городов Туркменистана и др. Опресненную морскую воду используют жители стран Персидского залива, некоторых городов и поселков Казахстана и др.

Таблица 2.6

**Ежегодные ресурсы пресной воды в мире
(Развитие и окружающая среда..., 1995)**

Регионы	Ежегодные внутренние возобновляемые водные ресурсы	
	всего, тыс. км ³	на душу населения, тыс. м ³
Африка, южнее Сахары	3,8	7,1
Восточная Азия и острова Тихого океана	9,3	5,3
Южная Азия	4,9	4,2
Восточная Европа и бывший СССР	4,7	11,4
Страны остальной части Европы	2,0	4,6
Ближний Восток и Северная Африка	0,3	1,0
Латинская Америка и Карибский бассейн	10,6	23,9
Канада и США	5,4	19,4
Мир в целом	41,0	7,7

По оценкам экспертов ООН, в начале XXI в. ежегодное потребление пресной воды в странах Северной Африки и Ближнего Востока будет практически равно всем запасам воды этих регионов, а в странах Южной и Восточной Европы (кроме России), Центральной и Южной Азии приблизится к этому уровню.

В 1990 г. специальная рабочая группа по управлению водными ресурсами при Комитете ООН по планированию и развитию указала на необходимость выработки глобальной стратегии использования водных

ресурсов. Одним из путей долгосрочного решения проблемы дефицита пресной воды считаются технические проекты по утилизации покровных льдов Гренландии и Антарктиды, в которых содержится около 70 % мировых запасов пресной воды. Особенно высокой химической чистотой отличаются льды Антарктиды, талая вода которых отвечает характеристикам природной воды высшего качества. Например, айсберг размером $300 \times 150 \times 50$ м содержит более 2 млн т пресной воды; таких размеров айсберг может быть отбуксирован к месту назначения мощностью одного-двух современных ледоколов.

Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде (Дублин, Ирландия, 1992) охарактеризовала состояние глобальных водных ресурсов как критическое. В мире свыше 1 млрд человек страдают от недостатка чистой, питьевой воды. Для выживания многих миллионов людей необходимы немедленные и эффективные действия. В основе таких мер, предлагаемых Конференцией для разрядки критической ситуации с обеспечением населения пресной водой, должно лежать лучшее понимание взаимозависимости всех людей и их места в природе.

Основным источником водных ресурсов в России является речной сток, средняя многолетняя величина которого составляет $4\,300 \text{ км}^3$. На одного жителя России приходится 22,4 тыс. м^3 воды, однако водообеспеченность «среднего» жителя Европейской территории страны приблизительно в три раза ниже, чем в Сибири и на Дальнем Востоке. В среднем водозабор из поверхностных водных источников (рек, озер) по отношению к среднему годовому стоку невелик и составляет 2,5...2,7 %. В среднем на каждого жителя России затрачивается 2 тыс. м^3 (2000 т) пресной воды в год, что в 3–4 раза превышает среднемировые нормы расхода воды.

Загрязнение водных объектов сбросами неочищенных сточных вод в России происходит во все возрастающих объемах. Темпы роста сброса за последние годы превысили 1 км^3 в год. Поверхностные воды суши, частично подземные и морские воды используются также для разбавления и очищения загрязненных промышленными, сельскохозяйственными и бытовыми стоками вод. При этом для разбавления единицы загрязненных вод до их естественного уровня требуется от 10 до 100 и более единиц природных чистых вод. В России – одной из самых обеспеченных пресной водой стран мира – уже возникла проблема обеспечения населения качественной питьевой водой, соответствующей принятым в стране санитарным нормам.

Проблема возрастающего дефицита доброкачественной пресной воды в России является следствием нескольких основных причин: неравномерным ее распределением по территории, ростом потребления воды промышленностью, сельским хозяйством и для бытовых нужд, потерями воды при ее транспортировке, ухудшением ее качества благодаря загрязнению. Потери пресной воды растут с увеличением ее потребления

на душу населения и использованием на хозяйственные нужды. Обычно это происходит вследствие несовершенства технологий промышленного, сельскохозяйственного производства и коммунальных служб.

Приведем несколько примеров. Для переработки 1 т нефти необходимо затратить 60 т воды; для изготовления 1 т синтетического волокна требуется 5 000 т воды. Для выращивания и получения одной тонны зерна пшеницы расходуется 2 т воды, одной тонны зерна риса – 25 т воды. Масштабные мелиоративные мероприятия, как, например, осушение болот, приводят к уменьшению запасов подземных вод, нарушению векового баланса влаги и ее циркуляции; строительство каналов, каскада водохранилищ на крупных реках способствует быстрому росту объемов фильтрующейся влаги, резкому засолению почв на орошаемых полях, заболачиванию, огромным потерям пресной воды при испарении с водных поверхностей. Потери воды водонесущих коммуникаций (водопроводов) в городах России составляют 30...35 % (Черников В.А., Соколов О.А. и др., 2001).

Примером жестокой экологической катастрофы XX века регионального масштаба стала гибель Аральского моря. Главная причина гибели этого крупнейшего бессточного моря-озера – резкое сокращение речного стока в море, связанное с чрезмерным забором пресной воды из рек Амударьи и Сырдарьи, питающих Арал. Это произошло в 60...90-е гг. в результате непомерного наращивания площадей орошаемых земель под посевы главных сельскохозяйственных культур в республиках Средней Азии – хлопчатника и риса, строительства тысячекилометрового Большого Каракумского канала и других крупных ирригационных сооружений в Узбекистане и Туркменистане. При этом устаревшая технология орошения способствовала избыточным расходам поливной воды. Например, на Сырдарьинском рисовом массиве (Казахстан) на орошение 1 га расход воды был в 3 раза выше, чем при современных технологиях возделывания риса в Израиле (Агроэкология, 2004). Все названное, вместе взятое, привело к сокращению объема годового стока этих рек в море с 55 до 3–4 км³; в отдельные годы сток в Аральское море отсутствовал вообще. Известно, что для поддержания прежнего уровня моря необходим ежегодный сток названных рек в объеме 33...35 км³.

За 35...40 лет на глазах одного поколения людей, по сравнению с началом 60-х гг., объем морской воды в Арале уменьшился на две трети, уровень моря понизился на 23 м, площадь акватории уменьшилась в 5 раз, а средняя глубина – в 2,5 раза. Соленость воды увеличилась в 8–9 раз: примерно с 10 до 80 промилле на поверхности воды и более 90 промилле – в придонных слоях.

Практически оказались уничтоженными рыбные ресурсы региона, значительно сократилось биоразнообразие (растений и животных) во всем регионе. Промышленность, связанная с рыбным промыслом в акватории

Арала, и морской флот прекратили свое существование. В последние годы Казахстан построил плотину в проливе Берга, соединявшего воды Большого и Малого частей Аральского моря. Это обеспечило накопление пресной воды в Малом Арале, поступающей из р. Сырдарьи. Началось возрождение и оживление рыбного промысла в регионе.

По данным космической съемки к 2000 г. единый водоем моря распался на три независимых озера (рис. 2.17). На месте высохшего засоленного дна Аральского моря, простирающегося уже на 28 тыс. км², образовалась новая пустыня – Аралкум. Две трети этой территории теперь занимают солончаки и засоленные пески, с поверхности которых ветрами выносятся миллионы тонн соленой пыли, песка и мелкодисперсных солей на сотни километров вокруг. Это приводит к экологическим изменениям, обеднению почвенного и растительного покровов, к сокращению видового разнообразия животного мира. До критического уровня снизилось нормальное водоснабжение и здоровье почти 50 млн человек, проживающих в этом регионе.

По расчетам экспертов к 2030 г. потребность в пресной воде только в развивающихся странах Азии и Африки возрастет в шесть раз. Основной спрос на воду будет связан с ростом численности городского населения, которое к этому времени утроится. Потребуется более эффективные системы распределения воды в бассейнах рек, особенно трансграничных, т.е. протекающих по территориям нескольких независимых государств. Известны различные пути решения проблемы дефицита пресной воды в сельскохозяйственном производстве: переход орошаемого земледелия на современные водосберегающие технологии полива – капельное орошение; реализация научно обоснованных норм и сроков подачи воды сельскохозяйственным культурам, массовое внедрение технических

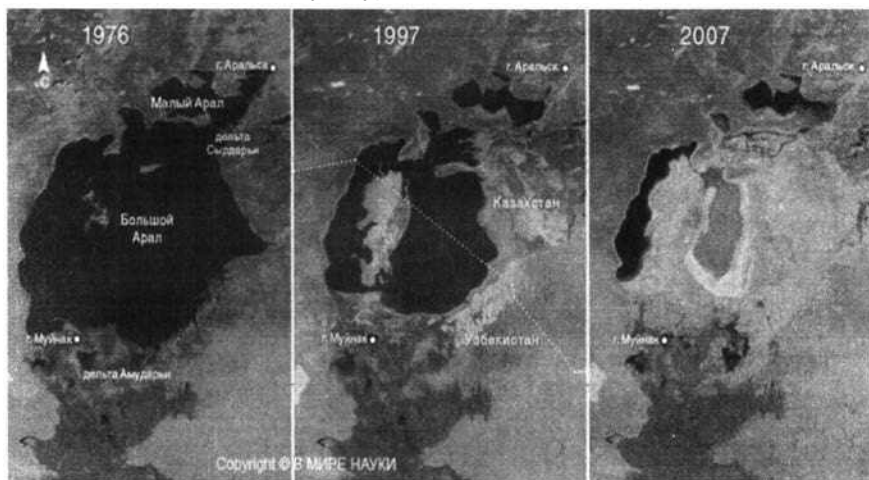


Рис. 2.17. Динамика гибели Большого Арала

решений по сокращению непродуктивного испарения и фильтрации воды из оросительных систем и др.

Естественно, что внедрение современных водосберегающих технологий потребует значительных материальных и финансовых затрат, однако в условиях быстро растущего населения и глобального потепления климата проблема дефицита пресной воды, особенно в странах с засушливым климатом, окажется наиболее важной для жизнеобеспечения поколений людей.

2.4. Лесные ресурсы

Лес – составная часть биосферы, это тип растительности, состоящий из совокупности древесных, кустарниковых, травянистых и других растений (мхи, лишайники, грибы), с присущими каждой лесной формации и специфическими типами животного мира. Каждый тип объединяет растительные сообщества, в которых господствующим ярусом является более или менее сомкнутый древостой. Лесные экосистемы, занимающие на Земле около 30 % суши (около 40 млн км²), распространены на всех континентах, кроме Антарктиды. Лесные сообщества размещаются неравномерно в зависимости от комплекса климатических условий: средних годовых значений температуры воздуха и суммы осадков (рис. 2.18). В своей работе «О

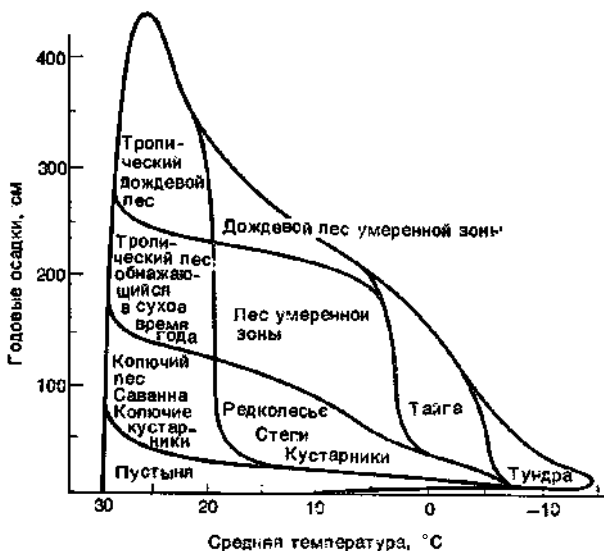


Рис. 2.18. Система классификации типов растительности по Уиттэкеру, наложенная на распределение климатов по широте.

В зонах, расположенных между лесом и пустыней, развиваются лесные массивы, луга и кустарники, в зависимости от пожаров, типа почвы или сезонных изменений климата.

периодическом законе географической зональности» акад. А.А. Григорьев и проф. М.И. Будыко (1956) проанализировали пределы распространения географических поясов и зон, показали зависимость их границ от соотношения радиационного годового баланса (R) и годовой суммы осадков (r), названного *радиационным индексом сухости* R/L_r . Физический смысл индекса сухости заключается в том, что он одновременно характеризует как степень увлажнения, так и степень засушливости природных зон. В этой формуле L – скрытая теплота испарения, необходимая для испарения годовой суммы осадков. Если, например, $R/L_r = 0,5$, то это означает, что на изучаемой территории остаточная радиация (радиационный баланс) в два раза меньше того количества тепла, которое необходимо для испарения годовой суммы осадков. Следовательно, если осадков выпадает больше, чем их может испариться, то образуется избышек влаги, происходит заболачивание почв, увеличивается сток рек, формируется влажный и холодный климат.

Если это соотношение равно 5, то это означает, что остаточная радиация R в 5 раз превосходит количество тепла, которое тратится на испарение выпадающих осадков, т.е. возникают условия, характерные для засушливых зон. На таких территориях с избытком тепла почвенный покров пересыхает, а растения испытывают постоянный или сезонный недостаток влаги. Таким образом, для характеристики общих зональных условий природных процессов достаточно использовать R/L_r , а для характеристики абсолютных значений интенсивности природных процессов следует использовать значения радиационного баланса R . Связь зональных типов растительности и их распределение в зависимости от приведенных параметров показаны на рис. 2.19. Сплошная линия ограничивает область реально встречающихся значений R и R/L_r (кроме горных районов), в пределах которой определенные значения параметра R/L_r , изображенные вертикальными линиями, разграничивают природные зоны: тундру, лес, степь, полупустыню, пустыню.

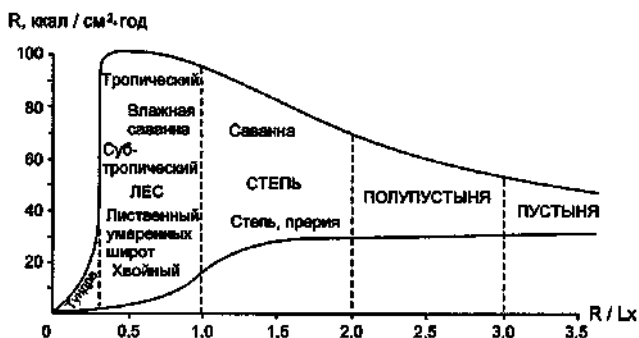


Рис. 2.19. График геоботанической зависимости (Григорьев, Будыко, 1956).
 $1 \text{ ккал/см}^2 = 41,9 \text{ МДж/м}^2$

Наименьшим значениям индекса сухости соответствует тундра ($R/L_r = 0,3$), значениям от 0,3 до 1,0 – лесная зона, от 1,0 до 2,0 – степная, больше 2,0 – полупустыня и более 3,0 – пустынная зона.

Большие различия в значениях радиационного баланса лесной зоны соответствуют различным типам лесных сообществ, распространенных в разных широтах планеты. Эти различия связаны с тем, что энергетическая база природных процессов, которую можно охарактеризовать величиной радиационного баланса (R), на разных широтах неодинакова и обусловлена изменениями тепловых и влажностных энергетических условий.

Лесные сообщества, произрастающие в различных почвенно-климатических зонах, различаются по видовому составу, степени сложности лесной «архитектуры», ярусности и плотности древостоя. Растения, образующие лесные экосистемы, находятся во взаимодействии друг с другом и с окружающей средой: атмосферой, почвой, животными и микроорганизмами, их населяющими. Влажные тропические леса, занимающие около 7% суши, особенно богаты различными видами растений и животных. Такие леса являются не только средой обитания примерно половины всех известных современной науке видов растений и животных, но и источником средств к существованию приблизительно 140 млн человек.

Леса являются естественной лабораторией, в которой совершаются процессы аккумуляции и трансформации энергии, слагающиеся из многих разнообразных физиологических, биохимических и физических процессов, происходящих в растениях, почве и приземном слое атмосферы. Процессы фотосинтеза и дыхания, протекающие в лесных экосистемах, особенно в тропических, являются основным источником «производства» кислорода. Так, по данным специалистов, в солнечный день 1 га леса поглощает из воздуха 220...280 кг углекислого газа (CO_2) и выделяет 180...220 кг кислорода. Известно, что леса в возрасте 80 лет, растущие в зоне умеренного климата, поглощают около 2,7 т углерода на площади 1 га в год. Велика роль лесных экосистем в очищении атмосферного воздуха от пыли, дыма, сажи и других твердых частиц природного и промышленного происхождения. Подсчитано, что лесные сообщества улавливают до 70...80 % аэрозолей и пыли из приземного слоя атмосферы; 1 м² зеленых насаждений в городских условиях задерживают от 1,5 до 10 г пыли. Именно поэтому лесные экосистемы справедливо называют «легкими планеты».

Кроме того, леса являются глобальным аккумулятором солнечной энергии и биологической биомассы – это важнейшие функции леса в экологическом равновесии биосферы. Поглощая и отражая поступающую солнечную энергию, лесной полог уменьшает нагрев воздуха и почвы в лесу, в ночные часы уменьшает потерю тепла. Суточная и годовая амплитуда температуры воздуха в лесу меньше, чем на открытом

пространстве, поэтому летом, по сравнению с зимой, и днем, по сравнению с ночью, в лесу прохладнее, чем в поле.

Велика роль лесных экосистем в перераспределении осадков (накопление зимой и постепенное таяние в теплое время года), в регулировании стока талой воды, в защите почвы от водной и ветровой эрозии. Леса, относящиеся к важнейшим возобновляемым природным ресурсам, представляют большую ценность как источник разнообразного сырья для промышленности, строительства, для питания людей и народного промысла. Средняя ежегодная продуктивность тропических лесов составляет 28 т органического вещества на 1 га, тогда как смешанные леса умеренных широт производят до 10 т/га.

Общая площадь лесов на Земле составляет 4,26 млрд га, в том числе около 3 млрд га – сомкнутые леса. Около половины площади всех лесов – это тропические и субтропические леса (Лесная энциклопедия, т. 2, 1986). На территории бывшего СССР леса занимали более одной третьей части страны. Количественные характеристики лесных и древесных ресурсов представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Лесные и древесные ресурсы мира (Лесная энциклопедия, т. 2, 1986)

Континент, страна, мир в целом	Площадь лесных угодий, млн га	Лесистость, %	Запас древесины, млрд м ³	Годовой прирост древесины, млрд м ³	Обеспечение древесиной, м ³ /чел.	Заготовка древесины, млн м ³ в год
Бывший СССР	938	37,8	85,9	906	3,4	356
Европа (без СССР)	175	31	14,9	460	0,95	334,3
Северная Америка	620	31	41,7	851	3,4	483,6
Латинская Америка	939,5	34	102,9	230	0,63	362,4
Африка	751,2	7,5	50,2	100	0,21	433,9
Азия (без СССР)	522,1	16,7	54,4	630	0,25	1017,1
Австралия	190,4	9,7	6,7	40	1,7	33
Всего в мире	4136,2	22,8	356,7	3217	0,72	3020,3

В среднем на одного жителя Земли приходится 0,67 га сомкнутых лесов. В последние десятилетия антропогенное давление на лесные экосистемы значительно возрастает. Высокими темпами увеличиваются объемы заготовок деловой древесины для экспорта, производства строительных материалов, бумаги, для топлива. Продолжается сведение лесов с целью расширения площадей пахотных земель, пастбищных и сенокосных угодий, под населенные пункты, прокладки различных коммуникаций и т.п.

В конце 80-х гг. скорость вырубки тропических лесов составила 17...20 млн га в год. В странах Африки полностью уничтожается около 0,8 % лесных площадей в год, в Латинской Америке – 0,9 %, в странах Юго-Восточной Азии – от 2 до 8 % (Развитие и окружающая среда..., 1995).

В XX столетии площадь тропических лесов сократилась на одну пятую часть. Расчеты показывают, что при таких темпах вырубки тропических лесов их полное исчезновение может наступить: в Индонезии – через 50 лет, в Таиланде – через 20 лет, на Филиппинах – через 12–15 лет и т.п.

По расчетам специалистов, такие леса, растущие на площади 400 млн га (для сравнения – площадь лесов в США равна 300 млн га), могут поглощать до 1 млрд т углерода из 3–4 млрд т, ежегодно накапливающихся в атмосфере в результате современной хозяйственной деятельности людей. Одна тонна углерода соответствует 3,7 т CO_2 . Наибольшие выбросы в атмосферу поступают из США (20 %), стран ЕЭС (20 %), России (13 %), Китая (11 %) от величины суммарного выброса в год во всем мире (Лосев К.С., Горшков В.Г., Кондратьев К.Я. и др., 1993).

Сокращение площадей, занятых лесами, чревато серьезными экологическими и экономическими последствиями: локальными изменениями климата, исчезновением естественной защиты территорий водосборов речных бассейнов, особенно в горных регионах, разрушением береговой линии рек, побережий морей и океанов. К числу негативных последствий сведения лесов на планете относится также обмеление рек и озер, снижение запасов грунтовых вод, масштабное развитие эрозионных процессов. По мере уничтожения лесных массивов происходит сокращение биологического разнообразия видов флоры и фауны, безвозвратно теряется генофонд растительного и животного миров.

В России леса занимают площади, равные около одной пятой части лесного фонда мира; по запасам древесины (75...80 млрд м^3) – приблизительно пятую часть ее мировых запасов. Основная часть залесенных территорий в России расположена в Сибири и на Дальнем Востоке; около 25 % лесов находится на европейской части страны и в Уральском регионе. В российских лесах ежегодно вызревает до 2 млн т кедрового ореха, 2 млн т брусники, 1,5 млн т черники, 0,3 млн т клюквы, много других ягод, а также 0,8 млн т различных грибов. Ресурсы побочных продуктов лесных экосистем России представлены на рис. 2.20.

Ежегодно в России лес вырубается на площади около 2 млн га. При этом несоблюдение технологии рубки и транспортировки леса приводит к уничтожению молодых деревьев (подлесок). В местах заготовок допускаются потери до 10...15 % древесины, еще больше – в процессе сплава леса по рекам; в деревообрабатывающей промышленности в отходы списывается более 20 % древесины. В то же время лесовосстановительные посадки проводятся на площади лишь около 600 тыс. га (1989 г.).



Рис. 2.20. Ресурсы отдельных продуктов побочного лесопользования (грибов и дикорастущих ягод) на территории Российской Федерации (по оценкам на 1999 г.)

Особую опасность для лесных (и степных) экосистем представляют пожары, охватывающие в засушливые периоды значительные пространства.

Согласно данным Г.Н. Коровина и А.С. Исаева (1998), на заселенных территориях до 98 % случаев пожары возникают по вине человека; в малонаселенных районах в 50 % случаев возгорания происходят из-за гроз. Это разрушает исторически сформировавшиеся биоценозы, нарушает экологический баланс лесных сообществ, приносит неисчислимые экономические убытки. Такие пожары ежегодно возникают в таежных массивах Восточного и Западного полушарий, в эфиромасличных и хвойных редколесьях Средиземноморского региона (Испания, Португалия, Италия, Франция, Греция), в Австралии и других странах.

В России в среднем за 1988...1993 гг. отмечалось около 20,5 тысяч пожаров, уничтожающих ежегодно лесные биоценозы на площади около 1,5 млн га (Государственный доклад..., 1994). По данным 2003 г., площадь выгоревших лесов на территории лесного фонда России в пять раз превысила площадь хозяйственной вырубki леса. При этом размеры ежегодного ущерба от лесных пожаров соизмеримы с величиной доходов от лесного хозяйства, а в отдельные годы значительно превышает его.

Усредненные по пятилетиям (1985...1989, 1990...1994, 1995...1999, 2000...2004, 2005...2009 гг.) данные государственной статистики о площадях пожаров (по наземным оценкам) приведены на рис. 2.21. Как видно, площадь пожаров на покрытых лесом землях значительно стала увеличиваться с 1995...1999 гг. и к 2005...2009 гг. выросла почти в два раза (с 760 тыс. га до более 1500 тыс. га).

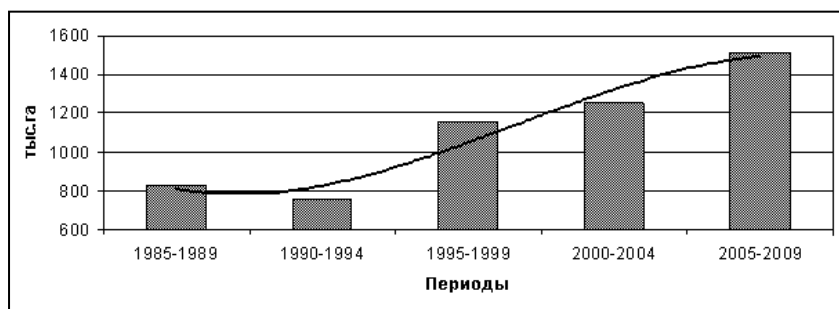


Рис. 2.21. Усредненные площади, ежегодно проходившие пожарами на покрытых лесом землях

Средняя площадь лесных пожаров, рассчитанная по данным статистики за 20 лет (1990...2009 гг.), составляет 1170 тыс. га в год, или 0,15 % от всех покрытых лесом земель.

Более точные данные получены Российской информационной системой дистанционного мониторинга (ИСДМ) лесных пожаров, которая применяется в Рослесхозе. Эта система позволяет оценить пройденную огнем площадь с погрешностью до 30 % при площадях пожара от 100 до 1000 га и с погрешностью 5 % – при площади более 1000 га (Авиалесоохрана, 2008). Средняя площадь лесов, охваченная пожарами, по данным дистанционного мониторинга за 14 лет (1996...2009 гг.), составляет 8 300 тыс га в год. Это означает, что около 1,1 % от всех покрытых лесом земель ежегодно поражается пожарами. За эти годы, по данным дистанционного мониторинга, площади пожаров на покрытых лесом землях увеличились почти в три раза.

Помимо пагубного воздействия пожаров лесные экосистемы страдают от влияния продолжительных засух, повреждений насекомыми-фитофагами, такими, как различные виды гусениц шелкопряда, пилильщики, златогузки, хрущи и т.п. Например, в 2000 г. массовое размножение сибирского шелкопряда в Якутии (Республика Саха (Якутия)) привело к гибели леса на площади 6 263 тыс. га (Панкеев И.А., Рыбальский Н.Г. и др., 2003).

Все перечисленное наносит серьезный экологический ущерб и подрывает реальные возможности лесного воспроизводства.

По сравнению с 1980 г., площади восстановления лесов сократились к началу 90-х гг. почти на четверть (Лосев К.С., Горшков В.Г., Кондратьев К.Я. и др., 1995). В 2000 г. лесовосстановительные работы (посадка, посев) были проведены на площади 263 тыс. га. При этом важнейшим показателем восстановления лесных экосистем должен быть уровень приживаемости посадок леса, который достигается соблюдением нормативов лесотехнического ухода за посадками.

Только при условии строго регламентированной хозяйственной деятельности человека в лесах, сбалансированного использования и восстановления лесных ресурсов может быть обеспечено формирование биологической продукции (в среднем до 23 млрд т в год), сохранение биоразнообразия лесных экосистем и созданы благоприятные возможности для жизни людей на Земле.

2.5. Ресурсы Мирового океана

Роль Мирового океана в функционировании биосферы как единой системы трудно переоценить. Водная поверхность океанов и морей, как отмечалось выше, занимает около 71 % поверхности нашей планеты и является мощным аккумулятором тепла и влаги. При взаимодействии с атмосферой океанические течения в значительной мере определяют формирование климата и погоды на Земле. Все океаны, включая замкнутые и полузамкнутые моря, имеют непреходящее значение в жизнеобеспечении населения земного шара продуктами питания.

Морское рыболовство ежегодно дает от 80 до 90 млн т рыбы и моллюсков. С 1950 по 1990 г. объемы добычи рыбы увеличились в пять раз, мировой вылов рыбы на душу населения возрос с 8...9 до 18 кг. В 1998 г. Россия занимала четвертое место в мире по уровню добычи рыбы и морепродуктов после Китая, Чили и США (рис. 2.22).

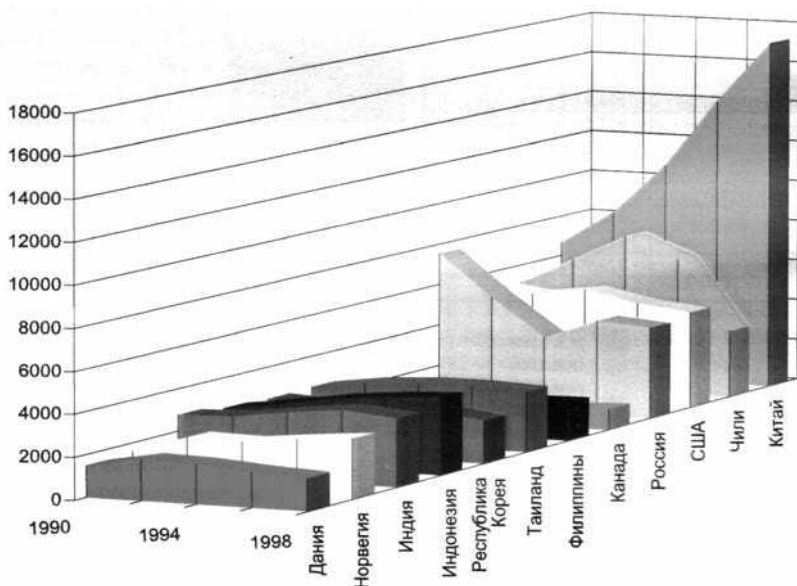


Рис. 2.22. Вылов рыбы и добыча морепродуктов ведущими странами мира (без аквакультуры, морских млекопитающих и водорослей), тыс. т

Чрезмерный вылов морепродуктов с помощью современных навигационных и научно-технических средств, в том числе использования спутниковой информации, ведет к стремительному сокращению мировых рыбных ресурсов и деградации водных экосистем.

Значительный ущерб биологическим ресурсам океанов и морей наносит увеличивающееся антропогенное загрязнение, на 70 % обусловленное наземными источниками, включая большие и малые города, сбросы промышленных и строительных отходов, сельского, лесного хозяйства и т.п. Немалую долю в загрязнение вносит быстро развивающееся судоходство за счет сброса с кораблей бытовых отходов в воду. Около 600 тыс. т нефтепродуктов ежегодно попадает в океаны и моря в результате морских перевозок, аварий и незаконного их слива. Особую угрозу для биологических объектов океанов и морей создают техногенные катастрофы, связанные с быстро развивающимися системами добычи нефтепродуктов в зоне континентальных шельфов – затопленных морем окраин материков. Загрязняющие вещества создают главную угрозу для всех обитателей морской среды. Под воздействием различных форм загрязнения водной среды Мировой океан испытывает все возрастающий экологический стресс. Кроме того, хищнический вылов рыбы и моллюсков, разрушение исторически сформировавшихся мест нерестилищ рыбы, ухудшение состояния берегов и коралловых рифов приводит к сокращению морских биологических ресурсов и их биоразнообразия.

В результате чрезмерного вылова оказались истощенными запасы рыбы многих видов. По оценкам ФАО, для четырех видов они практически исчерпаны, а для девяти – полностью использованы. К началу 80-х гг. прошлого века в 11 основных районах лова рыбы (5 – в Тихом океане и 6 – в Атлантическом) популяции некоторых видов были практически полностью уничтожены.

Надежным способом сохранения морских популяций животных является развитие так называемой *аквакультуры* – промышленного разведения, выращивания и содержания различных рыб и других водных животных и растений под контролем человека с целью пополнения промысловых запасов водных биоресурсов и получения товарной продукции.

Известно, что в последние 20...25 лет многие развитые государства частично заменяют традиционный вылов рыбы и морепродуктов их производством. Например, в Китае, Норвегии и Японии успешно функционируют комплексы и фермы, где выращивают краба, осетровых и лососевых рыб, трепанга, гребешка и других полезных морских обитателей. Если в 1970 г. на разведение товарной аквакультуры в этих странах приходилось 3,9 % мирового улова, то в последние годы – около 48 %. В Китае таким образом, производят около 39 млн т продукции в год, или 70 % общего улова. В Норвегии в 2010 г. фермерские хозяйства аквакультуры поставили на рынок

свыше 700 тыс. т рыбной продукции. В России за эти же годы, по данным Министерства сельского хозяйства и Росрыболовства, производство аквакультуры сократилось почти в пять раз: с 500 до 114 тыс. т.

Прибрежная зона морей России включает участки площадью 400 тыс. км², пригодные для искусственного выращивания рыб и морепродуктов. В Российской Федерации разработана и принята стратегия развития аквакультуры на период до 2020 г., которая определяет основные направления долгосрочной политики государства в этой области экономики.

2.6. Население

В течение многих тысячелетий хозяйственная деятельность людей приспосабливалась к естественным климатическим условиям. Когда население земного шара было относительно небольшим, а уровень энергетической и технической вооруженности людей низким, влияние всей хозяйственной деятельности на окружающую природу было незначительным. Однако объемы изъятия природных ресурсов для нужд быстро растущего населения постоянно увеличиваются. В результате научно-технического прогресса, создания мощных технологий и стремительного роста промышленного производства масштабы антропогенного загрязнения земель, водных объектов и атмосферы достигли в последние десятилетия глобальных размеров. Воздействие техники, созданной человеческим разумом, стало соизмеримым с разрушительными силами природы.

Мощным фактором давления на природные экосистемы становится интенсивное развитие хозяйственной деятельности людей, численность и темпы роста которой на Земле неуклонно возрастают. Наглядное представление об ускорении темпов роста населения нашей планеты дает табл. 2.8.

Таблица 2.8

Динамика численности населения Земли (Baade F., 1968)

Периоды лет	Рост «от – до», млн чел.	Время удвоения численности (лет)
7000–4500 до н. э.	10 – 20	2 500
4500 – 2500 до н. э.	20 – 40	2 000
2500 – 1000 до н. э.	40 – 80	1 500
1000 – 0 до н. э.	80 – 160	1 000
0 – 900 н. э.	160 – 320	900
900 –1700	320 – 600	800
1700 – 1850	600 – 1 200	150
1850 – 1950	1 200 – 2 500	100
1950 – 1990	2 500 – 5 000	40

К середине XX в. (1965–1970 гг.) темп роста населения на планете достиг беспрецедентного в истории человечества пика – 2,1 % в год. Специалисты-демографы связывают это с успехами здравоохранения, улучшением санитарно-гигиенических условий жизни в развивающихся странах,

отсутствием в эти годы крупных военных конфликтов. Следствием стало снижение смертности и увеличение продолжительности жизни людей. Все это вело к нарушению процессов саморегулирования и равновесия, свойственных биосфере.

Фактическая динамика численности населения планеты за сорока-летний период (1950–1990 гг.) представлена в табл. 2.9.

Таблица 2.9

**Динамика численности людей на Земле, млн чел.
(Brown, Kane et al., 1994)**

Регион / годы	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990
Мир в целом	2 555	2 779	3 038	3 345	3 704	4 086	4 457	4 856	5 295
СССР	182	198	216	232	242	256	267	277	290
Россия	103	113	121	127	131	135	139	144	148

В 1982 г. население планеты увеличивалось со средней скоростью 146 человек в минуту, или 210 тыс. в день, или 77 млн в год. В 1986 г. общая численность людей на Земле достигла 5 млрд человек, в 1993 г. – 5,5 млрд. В 90-е гг. темп прироста населения на планете снизился до 1,7 % в год. Однако расширенное производство (рождаемость минус смертность = естественный прирост) в конце 90-х гг. XX столетия составляло 6 человек на 1000 жителей, т.е. среднегодовой прирост населения составлял 0,6 % в США и Канаде, во Франции, Нидерландах, Норвегии, Ирландии и Швейцарии этот показатель был равен 0,2–0,3 %. Нулевой прирост был отмечен в ряде стран Европы: Австрии, Бельгии, Испании, Португалии, Дании и Хорватии.

По прогнозам демографов, к 2000 г. ожидалось, что годовое увеличение численности людей составит 96...100 млн человек и на Земле будет жить 6,2–6,3 млрд человек (по факту численность составила 6,5 млрд человек). К концу 2009 г. население планеты составило 6,6 млрд человек. Общая оценочная численность населения планеты Земля по состоянию на 2011 г. составила 7,0 млрд человек.

Согласно демографическим исследованиям, численность населения Земли продолжает быстро увеличиваться, хотя прирост населения сократился почти вдвое, по сравнению с показателями 1963 года. По прогнозам демографов, к 2025 г. на Земле будут жить 8,5 млрд человек; к 2050 г. население планеты превысит 9,2 млрд человек, а к концу XXI века – 10,1 млрд человек.

В 1990 г. большинство людей в странах мира еще жили в сельской местности. По данным ФАО, в 70-е гг. XX столетия заметно усилился процесс сокращения сельского населения за счет постоянно возрастающего перемещения людей в города. Так, в странах Азии в среднем сокращение составило 0,8 % в год, в Африке – 0,7 %, в Европе – 0,6 %, а в странах

Северной и Центральной Америки – по 0,2 %. В ближайшие 30 лет рост городского населения в мире составит в среднем на 1,6 % в год. К 2030 г. городское население в мире будет в два раза превышать по численности сельское. В то же время в некоторых странах Африки, Ближнего Востока и Центральной Америки в течение жизни следующего поколения сельское население увеличится на 50 % (Развитие и окружающая среда..., 1995).

К 2100 г., по некоторым данным, население стран Африканского континента увеличится, по сравнению с 1985 г. в шесть раз, стран Южной Азии – в 3,5 раза, Латинской Америки – в 3,2 раза, Северной Америки – в 1,3 раза, Европы – в 1,1 раза (Ковда В.А., 1971). Однако темпы роста мирового населения в среднем начали снижаться с 1,7 % в 1990 г. до приблизительно 1,0 % в 2030 году. Около 95 % прироста населения будет происходить за счет развивающихся стран (Развитие и окружающая среда..., 1995).

Снижение темпов роста населения планеты специалисты связывают обычно с объективными причинами: ростом общечеловеческой культуры, возрастанием доли городских жителей, сокращением площади земли (в том числе пашни), приходящейся в среднем на одного человека, качественным ухудшением окружающей среды, истощением ископаемых энергетических ресурсов и эпидемиями (Бялко А.В., 1995).

По данным В.П. Максаковского (2010), в последние два десятилетия в странах Прибалтики, Восточной Европы, а также в Италии, Греции, Словении и Швеции при средней рождаемости 8...10 человек на каждые 1000 жителей страны смертность составила 11...14 человек. Таким образом, общий коэффициент естественного прироста населения оказался с минусом 1...6, в России – минус 4.

Население России в 1980 г. составляло 138,8 млн человек, при рождаемости 15,9 детей на 1000 человек. По данным переписи 1989 г. население составило 147,4 млн человек, 73,6 % проживали в городах и 26,4 % – в сельской местности. С 1990 г. в стране рождаемость сократилась до 13,4 детей на 1000 человек. К 1999 г. численность населения достигла 148,3 млн человек при продолжающемся снижении рождаемости до 8,4 детей.

По данным Российской академии медицинских наук (2007 г.), рассмотревшей сложившуюся в стране демографическую ситуацию, продолжительность жизни в России составила 65,3 года (2004 г.). В последующие годы продолжительность жизни мужчин не превышала 55–56 лет, а в целом по стране составляла 59 лет, т.е. на 15...20 лет меньше, чем в Японии, Швеции, Великобритании, Франции, Германии и США. Показатель общей смертности в России (16,1 человека на 1000 человек населения) превысил аналогичные показатели в Европе и США в два раза и в полтора раза – средние показатели по миру. Количество умерших в целом по стране превосходит количество родившихся в 1,7 раза, а в 27 регионах даже в два-три раза.

Возникновение демографического кризиса в нашей стране произошло под влиянием изменившихся социально-экономических и медико-санитарных условий, сказалось также изменение нравственных факторов в вопросах создания семей. Возросло количество разводов в расчете на 1000 браков. Доля внебрачных детей увеличилась в пять и более раз. Это показатель кризиса семьи в обществе.

Для устойчивого роста населения любой страны необходимо воспитание в каждой семье более двух детей. В бывшем СССР в среднем на каждую семью было 2,2 ребенка. В России к концу 90-х гг. в среднем на семью воспитывалось 1,24 ребенка. К 2015 г., по расчетам демографов, в России будет проживать 138 млн человек.

Среди 10 крупнейших по численности населения государств мира Россия обладает самой большой территорией (17,08 млн км²) и самой низкой плотностью населения – 8 человек на 1 км². Средняя плотность населения по регионам России различна: например, в европейской части страны – 27 человек на 1 км², на Урале – 10,7, в Сибири и на Дальнем Востоке – менее 3 человек, а на Севере страны – всего 0,8 человека на 1 км².

Основная часть населения сосредоточена в зонах, почвенно-климатические условия которых наиболее благоприятны для жизни людей. Главным ограничивающим фактором для проживания человека является температура. Согласно исследованию Е.П. Борисенкова (1982), верхним пределом для относительно постоянного проживания человека является максимальная температура около 55 °С, а нижним – около минус 60 °С.

Зоной климатического комфорта для человека считается довольно узкий интервал температур воздуха – около 20...25 °С, который зависит также от воздействий на температуру влажностного и ветрового режимов. Для проживания выше и ниже зоны комфорта необходимо создание дополнительных биоклиматических условий путем строительства зданий по климатически обоснованным нормативам (постоянное утепление или охлаждение кондиционированием воздуха в помещениях, сезонная одежда и др.) и обеспечение нормативов питания человека, особенно в части калорийности пищи и т.п.

Природные ресурсы, обеспечивающие формирование наибольших величин первичной биологической продукции, весьма различны. Так, если в зонах тундры и южных пустынь в среднем за год формируется 0,15...0,25 т/га растительной массы, в зоне тайги – 1,0–2,0 т/га, то в зоне широколиственных лесов, относящейся к зоне биоклиматического комфорта, – до 3,75 т/га.

Интенсивный рост населения Земли, особенно в развивающихся странах Африки и Азии, стал причиной тревожных прогнозов о скором перенаселении нашей планеты и гибели человека. Однако значительные пространства тундры, лесотундры, тайги, полупустынь и пустынь, а также

горных территорий являются резервным ареалом для более равномерного расселения человека на Земле. Естественно, что это потребует высоких затрат материальных ресурсов на строительство благоустроенного жилья, искусственного отопления, развития орошения и т.п.

В 90-е гг. XX столетия заметно обострились проблемы продовольственной безопасности людей.

2.7. Проблемы питания людей и продовольственная безопасность

Во все времена проблема обеспечения людей продуктами питания оставалась важнейшей задачей постоянно растущего населения Земли. И хотя производство продовольствия в мире количественно и качественно непрерывно возрастает, эта проблема остается острой во многих странах.

Из сотен тысяч видов растений и животных, населяющих Землю, лишь немногие сотни видов, сортов и гибридов сельскохозяйственных культур и пород животных используются людьми при производстве продуктов питания. Зависимость удовлетворения потребностей человека в продовольствии от сравнительно узкого набора сельскохозяйственных растений и животных повышает уязвимость систем производства продуктов питания от случайных явлений. К экстремальным явлениям погоды относятся интенсивные и длительные засухи, суховеи, губительные заморозки, наводнения и др. Возникающие периодически эпизоотии среди сельскохозяйственных животных, массовая гибель посевов сельскохозяйственных культур от вредителей и болезней, загрязнение окружающей среды выше допустимых (пороговых) значений и т.п. оказывают серьезное влияние на уровень обеспечения питанием населения каждой конкретной страны.

Рост населения планеты (рис. 2.23), с одной стороны, вызывает необходимость в значительном увеличении количества продуктов питания, с другой – усиливает антропогенное давление на естественные экосистемы.

Сельскохозяйственная деятельность человека – древнейшая форма использования природных ресурсов, поскольку продовольствие является основополагающей потребностью людей. Переход древних людей от собирательства к примитивным, а в последующем и к более совершенным системам земледелия, к технически более эффективному сельскохозяйственному производству благоприятствовал не только интенсивному росту численности населения, но и увеличению массы «среднего» человека.

В своем стремлении взять от природных ресурсов как можно больше для обеспечения растущих потребностей общества человек в процессе аграрной деятельности все энергичнее вторгается в сложившееся тысячелетиями экологическое равновесие в природе, привнося дополнительную энергетику в производство растительной и животноводческой продукции (рис. 2.24).

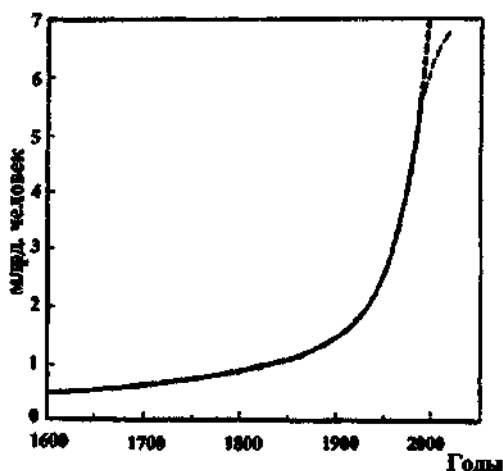


Рис. 2.23. Рост населения Земли за последние 400 лет.

«Расщепление» верхней части кривой обозначает отклонение от гиперболической зависимости, наметившееся за последнее десятилетие XX века

По мнению акад. А.А. Жученко (1994), состояние сельского хозяйства в мире и в России характеризуется устойчивой тенденцией к экспоненциальному росту затрат невозобновимой энергии на каждую дополнительную единицу продукции, высокой зависимостью величины и качества урожая от погодных условий, все возрастающей опасностью глобального загрязнения и разрушения природной среды.

XX век знаменателен резким ускорением и усилением антропогенного давления на экосистемы: масштабная вырубка лесов, увеличение площадей распаханых территорий, чрезмерные нагрузки выпасаемого поголовья на единицу пастбищных угодий (перевыпас), строительство гигантских гидротехнических сооружений, изменяющих экологические условия существования биоты, возрастающие объемы применения химических препаратов в растениеводстве (удобрения, ядохимикаты) и т.п. В результате активное развитие получили процессы деградации почвенного и растительного покровов. Так, площадь пустынь ежегодно увеличивается на 6 млн га (опустынивание), а площадь лесов в среднем уменьшается на 11 млн га в год. Происходит сокращение биологического разнообразия, возрастает загрязнение воздуха, почвы, водоемов, участились техногенные катастрофы различных масштабов и т. п. Яркими примерами экологических катастроф прошлого века на территории бывшего СССР, вызванных деятельностью человека, стали гибель Аральского моря и авария на Чернобыльской атомной электростанции. Последствия этих катастроф, коснувшиеся судеб и здоровья сотен

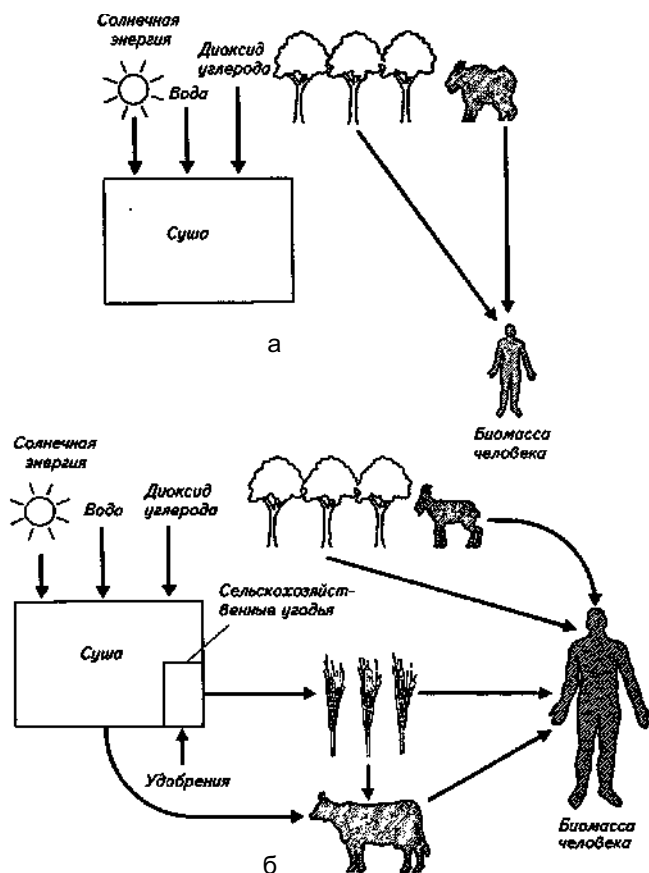


Рис. 2.24. Изменение соотношения между человеком и биосферой в результате появления и развития сельскохозяйственного производства: а – период охоты и собирательства; б – агрокультурная эпоха (Браун, 1972)

тысяч людей, проживающих в этих регионах, окажутся, к сожалению, долговременными.

Природные условия конкретных территорий в форме ресурсов солнечной энергии, тепла, влаги, земельных угодий составляют первооснову продукционного процесса формирования органического вещества, часть из которого используется человеком в виде продуктов питания.

В материалах Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992) приводятся данные о том, что в мире живут 1,1 млрд человек, доход которых составляет менее 1 доллара США в день. В то же время модель национального развития, приведшая к

нынешнему благополучию развитые страны, была признана на Конференции гибельной для планеты.

Выше отмечалось, что число жителей планеты удваивается каждые 40 лет, а потребность в ресурсах питания – каждые 20...30 лет. Согласно данным ФАО, за последние 35 лет производство всех видов сельскохозяйственной продукции увеличилось с 3,8 до 6,9 млрд т. Количество продовольствия, произведенного в среднем на одного человека в год, осталось неизменным (1,23 т/чел.). Хронически голодают около 1,5 млрд человек, сотни тысяч погибают от голода. Это связано с экспоненциальным ростом численности населения, использованием не возобновляемых ресурсов биосферы и с традиционной инертностью смены существующих систем земледелия. Высокая консервативность систем ведения сельского хозяйства является главной причиной того, что его история сопровождалась кризисами, обусловленными неспособностью обеспечить население продуктами питания (Жученко А.А., 1994).

Всемирная встреча представителей 186 стран по проблеме продовольствия (Рим, ноябрь, 1996), принявшая Римскую декларацию и «План действий по борьбе с голодом», отметила, что более 800 млн человек, особенно в развивающихся странах, питаются на уровне ниже биологических потребностей в пище. Систематическое недоедания является одной из главных причин ежегодной смерти миллионов людей.

Известно, что в странах, достигших высоких результатов в сельскохозяйственном производстве, проживает около 15 % населения Земли. В то же время на их долю приходится не только значительная часть используемых ресурсов (в расчете на одного жителя в 50 раз больше среднемировых показателей), но и 77 % всех выбрасываемых в биосферу загрязнителей.

В различных регионах земного шара условия для жизни людей складываются неодинаково, поскольку исторически сформировавшиеся почвенно-климатические зоны и высотные пояса в горах обладают не адекватными возможностями продукционного процесса растений и производства биологической продукции. Вполне очевидно, что получение необходимого количества и качества продовольствия является сложной функцией сложившихся почвенно-климатических и погодных условий, освоенных технологий производства продуктов питания и принятых в каждой стране социально-экономических и политических систем их распределения. Последние в значительной степени определяют развитие производительных сил и производственных отношений, уровень научно-технического прогресса, объем и качество выпускаемой продукции, а также характер их распределения между членами общества. Фактические различия в уровне питания людей на Земле весьма велики, что подтверждается данными табл. 2.10 и 2.11.

Таблица 2.10

Распределение мирового дохода и питания (Ковда В.А., 1991)

Показатели	Развитые страны	Развивающиеся страны
Доля мирового дохода	5/6	1/6
Национальный доход на душу населения (доллары США)	1000...2800	136
Питание (ккал)	3000...3500	2000...2500
Годовое потребление белков, млн т	14	6
Суточное потребление белков, чел./г	45...50	5...7

Таблица 2.11

**Характеристика питания людей в различных регионах мира
(Агроэкология, 2000)**

Регион	Потребление на душу населения в сутки	
	Продуктов в целом, ккал	белка, г
Азия	2244 / 161	55,3 / 9,6
Африка	2238 / 171	56,8 / 12,2
Западная Европа	3327 / 1042	95,2 / 51,8
США	3514 / 1301	105 / 71,0
Южная Америка	2541 / 453	65,5 / 27,9

Примечание. В числителе – общее количество продуктов и белка, в знаменателе – то же животного происхождения.

По данным президента Комиссии по сельскохозяйственной метеорологии ВМО Д. Селинджера (2006...2010 гг.), в реальности темпы роста производства продовольствия в развивающемся мире сократились: если за период с 1991 по 1995 г. ежегодный прирост продовольствия составлял 4,2 %, то за 1996...2000 гг. он оказался равным лишь 3,5 %. В то же время в условиях наступившего изменения климата, по расчетам ВМО, к 2020 г. фермерам придется производить на 40 % зерна больше, чтобы прокормить все население мира.

При условном равномерном распределении между всеми людьми земельных ресурсов планеты на каждого жителя пришлось бы около 3 га, а валовой сбор всех зерновых культур в мире дал бы возможность обеспечить биологические потребности человека в пище.

Если бы сельскохозяйственный прогресс наиболее развитых стран распространить на все страны мира, то продуктов питания хватило бы для удовлетворения биологических потребностей в пище 9,5...10,0 млрд человек, а при орошении всех засушливых земель планеты и обеспечении передового уровня земледелия на орошенных землях полученной сельскохозяйственной продукции хватило бы для ежегодного полного удовлетворения в пище 50...60 млрд человек (Федоров Е.К., 1977). Однако еще в 80-х гг. прошлого столетия стала сокращаться площадь орошаемых земель в мире в расчете на одного человека с 0,053 га в 1980 г. до 0,049 га в 1990 году.

Хорошо известно, что урожайность основных зерновых культур определяется складывающимися условиями погоды, в первую очередь условиями увлажнения, а также уровнем применяемой агротехники, включая селекцию и др. Установлено, что границей рискованного земледелия является изогипета годового количества осадков, равное 500 мм в год. На рис. 2.25 представлен график среднегодового количества осадков по основным зернопроизводящим регионам мира и территориям России.

Производство зерновых культур в мире, СССР и России приведено в табл. 2.12.

Таблица 2.12

Производство зерновых культур в мире, СССР и России
(Brown et al., 1994, с дополнением данными Госкомстата России)

Регион	Годы											
	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Мир в целом	<u>1.06</u> 631	<u>1.18</u> 759	<u>1.28</u> 847	<u>1.34</u> 878	<u>1.58</u> 1055	<u>1.771</u> 218	<u>1.96</u> 1408	<u>2.19</u> 1570	<u>2.40</u> 1665			
СССР	<u>0.79</u> 82	<u>0.84</u> 107	<u>1.09</u> 125	<u>0.95</u> 121	<u>1.56</u> 187	<u>1.09</u> 141	<u>1.39</u> 176	<u>1.51</u> 178	<u>1.99</u> 218	—	—	—
Россия	<u>0.72</u> 47	<u>0.77</u> 59	<u>1.07</u> 76	<u>0.90</u> 70	<u>1.56</u> 113	<u>1.01</u> 77	<u>1.29</u> 97	<u>1.45</u> 99	<u>1.85</u> 117	<u>1.20</u> 63,4	<u>1.40</u> 65,4	<u>1.80</u> 78,2

Примечание. В числителе – урожайность, т/га; в знаменателе – валовой сбор, млн т.

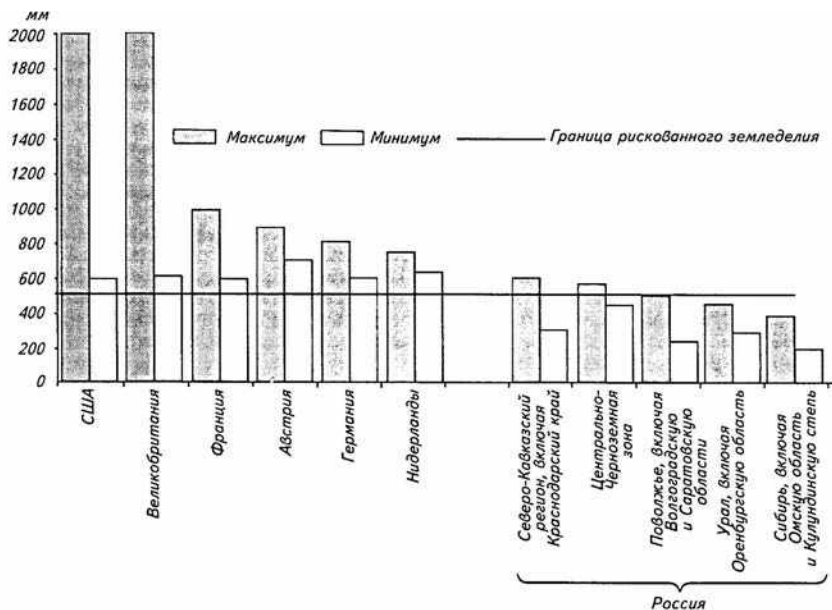


Рис. 2.25. Среднегодовое количество осадков (500 мм) по основным земледельческим территориям (Кондратенко, Бекетов, 1999, с изменениями)

В 2010 г. в России урожайность составила 1,4 т/га, а валовой сбор составил 61 млн т, что было связано с интенсивной и длительной засухой.

Как видно из табл. 2.12, мировое производство зерна с 1950 по 1990 г. увеличилось более чем в 2,6 раза, осредненная урожайность основных зерновых культур (пшеницы, риса, ячменя, сои, проса и сорго) также возросла, но темпы роста замедлились. Этот рост обеспечивался интенсивным применением удобрений в сочетании с развитием ирригации и достижениями селекции сельскохозяйственных культур, наиболее отзывчивых к орошению и минеральным подкормкам. Однако, по мнению специалистов, эффективность использования удобрений в мире близка к своему пределу; кроме того, суммарная площадь, занятая зерновыми культурами, стабилизировалась на уровне 80-х гг. XX века.

По данным ФАО, рост валовых сборов зерна в мире на 75 % обеспечивался за счет роста урожайности сельскохозяйственных культур и только на 25 % – благодаря расширению посевных площадей (ФАО, 1981). В последующие 25 лет удвоение производства продуктов питания было получено на 90 % за счет повышения урожайности культур и лишь на 10 % путем увеличения посевных площадей. При этом стало очевидным, что «односторонняя ориентация на химико-техногенную интенсификацию сельскохозяйственного производства оказалась бесперспективной в мировом масштабе не только вследствие продукционных, но также ресурсосберегающих и экологических ограничений» (Жученко А.А., 1994). Интенсивная химизация растениеводства создает новые экологические проблемы, связанные с загрязнением почвы, водоемов, атмосферы (особенно при использовании сельскохозяйственной авиации), вследствие которых гибнет биота и снижается качество продуктов растениеводства, животноводства и рыбного хозяйства.

Известно, что на планете резервы земель, пригодных для пашни, иссякают. Освоение новых земель сдерживается неблагоприятными для растениеводства природными условиями: например на сибирских равнинах из-за влияния вечной мерзлоты, в пампасах Южной Америки – из-за засушливости климата, в ряде регионов мира – из-за сильно пересеченного рельефа и т.п.

В то же время Россия располагает значительными сельскохозяйственными площадями, по сравнению со многими развитыми странами, с учетом численности населения (табл. 2.13).

В России, даже в условиях сокращения численности населения, происходит снижение количества человек, которых обеспечивает сельскохозяйственной продукцией один работник сельского хозяйства. Так, если в 1990 г. один работник обеспечивал 12,4 человека, то в 1994 г. – только 8,7 человека (снижение на 30 %). Для населения России характерен углеводный тип питания, а не белково-витаминный, характерный для большинства развитых стран. Приведем данные, характеризующие потребление продуктов питания в России, по сравнению с некоторыми развитыми странами, на период конца 80-х – начала 90-х гг. прошлого века (табл. 2.14).

Таблица 2.13

**Обеспеченность сельскохозяйственными площадями
(на 100 чел. населения), га (Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000)**

Страна	Площадь сельхозугодий		Площадь пашни	
	1985 г.	1992 г.	1985 г.	1992 г.
Россия	152	142	93	87
Великобритания	32	31	12	11
Канада	297	268	183	94
Франция	62	53	32	31
Япония	4	4	3	3

Таблица 2.14

**Потребление основных продуктов питания на душу населения, кг
(Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000)**

Страна	Мясо	Молоко	Яйцо, шт.	Рыба	Хлеб	Картофель	Фрукты	Овощи
Россия	53	278	234	10	124	122	29	65
Германия	92	330	227	14,8	73	76	159	82
Италия	84	297	217	14,5	129	38	139	168
США	115	256	234	10,4	107	61	98	116
Франция	96	394	253	17,8	84	81	81	125
Япония	40	85	314	55,1	119	103	58	120

В среднем за 1995...1997 гг. энергетическая ценность суточного рациона населения России составляла 2228 ккал (из них животного происхождения – 664 ккал); в среднем россиянин потреблял 58 г белков, 75 г жиров и 327 г углеводов.

Согласно расчетам демографов, с 1990 по 2030 г. население мира увеличится на 3,7 млрд человек, что потребует удвоения производства продовольствия, а выпуск промышленной продукции и выработку энергии необходимо будет увеличить в три раза.

В то же время при существующих технологиях сельскохозяйственного производства увеличение затрат антропогенной энергии (удобрения, вода, топливо для обработки посевов и т.п.) не приводит к ожидаемому росту количества и качества продуктов питания за счет огромных потерь урожая и непроизводительной траты энергоносителей. Например, ресурсные затраты на каждую дополнительную пищевую калорию составляют около 20...60 % азотных, 70...80 % фосфорных, свыше 50 % калийных удобрений, до 60...90 % поливной воды, при этом потенциальная урожайность сортов и гибридов реализуется лишь на 20...30 % (Жученко А.А., 2001). За последние 15...20 лет XX в. затраты энергии на единицу производимой сельскохозяйственной продукции возросли в 10...15 раз, однако урожайность в растениеводстве увеличилась только на 20...30 %.

Снижение валовых сборов зерновых культур сразу отражается на продуктивности животноводства, поскольку в среднем на производство

1 кг мяса затрачивается 6...8 кг кормового зерна, а суммарно в мире для откорма скота расходуется более 600 млн т.

Снижение объемов продуктов питания для людей за последние годы объясняется комплексом причин. Назовем основные из них, это:

- сокращение пригодных для производства зерна земель;
- недостаток пресной воды для орошения;
- снижение эффективности минеральных удобрений;
- падение содержания гумуса в корнеобитаемых горизонтах почвы;
- медленное развитие новых сельскохозяйственных технологий, в том числе по созданию высокоурожайных и неприхотливых сортов;
- значительное сокращение биологических ресурсов океанов и морей;
- глубокая деградация окружающей среды (загрязнение, эрозия почв, опустынивание, аридизация климата, т.е. усиление его засушливости и др.).

По подсчетам экспертов только из-за деградации сельскохозяйственной среды, без учета других причин, ежегодный недобор урожая зерновых культур составляет 14 млн т (Лосев К.С., Горшков В.Г., Кондратьев К.Я. и др., 1993).

В целом за последние 40...50 лет увеличение численности живущих на нашей планете людей, научно-технический прогресс в мире, экономические различия между странами привели к углублению экологического кризиса на Земле. Происходит разрушение биоты, сокращение биологического разнообразия, интенсивно растет потребление возобновляемых и невозобновляемых ресурсов биосферы, масштабно деградирует среда обитания живых организмов и человека.

2.7.1. Биологическое разнообразие и его роль в природе и жизни людей

Для биосферы характерно огромное разнообразие растений, животных и микроорганизмов, экосистем и протекающих в них процессов. Живые организмы – основной фактор формирования пространственно-временной и функциональной структуры биосферы. *Биологическое разнообразие* – это число различных типов биологических объектов и частота их встречаемости на фиксированном интервале пространства и времени, в общем случае отражающие сложность живого вещества, способность его к саморегуляции своих функций и возможность его разностороннего использования (Толковый словарь по охране природы, 1995). Биологическое разнообразие мира представляет собой большую ценность по экологическим, генетическим, социальным, экономическим, научным, образовательным и эстетическим качествам. Биологическое разнообразие важно для эволюции и сохранения систем жизнеобеспечения биосферы.

Видовое разнообразие отражается числом видов и встречаемостью их особей на конкретной площади. Показателем видового разнообразия

принято считать соотношение между числом видов и показателями их удельного значения (численность, биомасса, продуктивность и т.п.) или отношение числа видов к единице площади. В этой связи одной из основных характеристик любого биоценоза является его видовой состав или общее число видов растений, животных и микроорганизмов на конкретной площади или в определенном объеме жидкости. Известно, что состав и численность видовых популяций не остаются постоянными на фоне природных и антропогенных воздействий. Интенсивный рост численности населения, начавшийся в XX столетии, оказывает все возрастающее давление на экосистемы, проявляющееся, в частности, на сокращении видов, т.е. снижении биологического разнообразия растений и животных, совместно обитающих с человеком на Земле (рис. 2.26).

Теоретически популяции живых организмов при воспроизведении себе подобных сохраняют свои наследственные свойства. Однако при различных воздействиях происходят так называемые мутации (от лат. *mutation* – изменения), вызывающие стойкие изменения наследственных структур. Поэтому первостепенной задачей становится сохранение видов в биоценозах, их инвентаризация, а вторая по значимости задача – их восстановление и сохранение (Агроэкология, 2004).

Снижение видового и генетического разнообразия, происходящее вследствие хозяйственной деятельности человека, ставит на грань риска возможность будущих адаптаций как в природных экосистемах, так и в агроэкосистемах. Редкие и исчезающие виды растений и животных – исключительно важные носители генофонда – хранят в себе информацию о произошедших ранее переменах в биосфере. Поэтому предупреждение утраты редких видов, характерных и экзотических сообществ, считается важнейшим условием сохранения биоразнообразия на Земле.



Рис. 2.26. Плотность населения и степень утраты биологического разнообразия (Коптюг и др., 1998)

Важнейшим средством сохранения биоразнообразия является система особо охраняемых природных территорий. В России, согласно Федеральному закону (1995), к ним относятся:

- государственные природные заповедники – главная форма территориальной охраны природы. К началу 2000 г. их насчитывалось 99 с общей площадью 33,3 млн га. Из этого числа 22 имеют статус биосферных, входящих в международную систему заповедников и удостоенных сертификата ЮНЕСКО (Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры);

- национальные парки, их в России насчитывается 35 общей площадью около 7 млн га;

- национальные природные парки, их 20 общей площадью около 13 млн га;

- государственные природные заказники, их общее число в стране составляет 4065 площадью около 59 млн га;

- памятники природы, всего их в России более 8,5 тыс. общей площадью около 2,4 млн га.

В то же время утрата биологического разнообразия на Земле продолжается главным образом из-за разрушения человеком среды обитания растений и животных, путем преобразования естественных ландшафтов, чрезмерной эксплуатации сельскохозяйственных и биологических ресурсов (см. 2.2–2.5), загрязнения окружающей среды, привнесением новых видов и сортов на территории, где они ранее не произрастали.

Сохранение и рациональное природопользование – ключевое условие обеспечения безопасности биосферы и существования человеческой популяции. В Конвенции о биологическом разнообразии (Рио-де-Жанейро, 1992) предложены основные пути использования и сохранения биоразнообразия на планете Земля. В стране была разработана и принята «Национальная стратегия сохранения биоразнообразия в России» (2001 г.), ставшая основным документом долгосрочного планирования, определяющим принципы, приоритеты и основные направления политики в области сохранения биологического разнообразия.

Цель Национальной стратегии сохранения биоразнообразия сформулирована так: «Сохранение разнообразия природных биосистем на уровне, обеспечивающем их устойчивое существование и неистощительное использование, а также сохранение биоразнообразия одомашненных и культивируемых форм живых организмов и созданных человеком сбалансированных природно-культурных комплексов на уровне, обеспечивающем развитие эффективного хозяйства и формирование оптимальной среды для жизни человека». В этом документе сформулированы социально-экономические механизмы ее реализации, выделены главные направления действий по сохранению видов, экосистем и отдельных регионов. Отмечена

также необходимость доработки ряда действующих федеральных законов, например «О животном мире», «Водного кодекса», «Лесного кодекса Российской Федерации» и др., с целью обеспечения экологической безопасности страны, сохранения и устойчивого использования биоресурсов и биоразнообразия как национального достояния.

Таким образом, к началу XXI в. человечество подошло с обострившимися проблемами деградации экосистем, усугубляющих нищету и увеличивающих неравенство между промышленно развитыми и развивающимися странами.

Серьезным международным актом озабоченности мирового сообщества развитием экологического и социально-экономического кризисов на Земле стала Конференция Организации Объединенных Наций по окружающей среде и развитию (КООНОСР), состоявшаяся в Рио-де-Жанейро в июне 1992 года. Конференция четко сформулировала главный тезис – о единстве окружающей среды и социально-экономического развития человеческого сообщества на Земле. Декларация, принятая в Рио-де-Жанейро, содержит основополагающие принципы, на которых государства должны основывать свои будущие решения и политику, касающиеся последствий социально-экономического развития для окружающей среды.

«Повестка дня на XXI век», выработанная на Конференции представителями 179 государств мира, – это программа всемирного сотрудничества, направленная на гармоничное достижение двух целей: высокого качества окружающей среды и здоровой экономики для всех народов мира.

2.7.2. Продовольственная безопасность

На рубеже столетий многие исследователи заняты разработкой модели будущего социально-экономического развития и возможных экологических последствий для отдельных регионов и для мира в целом. Например, Международный институт прикладного системного анализа разрабатывает проект такого развития для Европы на период до 2030 года. Если до 2000 г. ежегодный прирост урожайности зерновых культур составлял примерно 1 %, то на период до 2030 г., по расчетам этого института, среднегодовой прирост составит 0,5 %. Предполагается, что из сельскохозяйственного оборота будет изъято более 40 млн га земель (3 % площади, занятой посевами зерновых в конце 90-х гг. прошлого века). Это произойдет, по мнению авторов проекта, за счет развития новых биотехнологий, что сделает сельскохозяйственные культуры более устойчивыми к вредителям и болезням, к изменениям климата. Предусмотрено значительное сокращение применения всех видов пестицидов и минеральных удобрений.

Жизнедеятельность человека как биологического вида зависит от следующих факторов:

- количества потребляемых основных пищевых веществ (белков, жиров, углеводов, минеральных веществ и витаминов);
- калорийности (энергетической ценности) питания;
- потребления опасной продукции, содержащей токсические вещества в количествах, превышающих уровни предельно допустимых концентраций (ПДК);
- психологического состояния общества;
- погодных и экологических стрессов, влияющих на здоровье и продуктивность сельскохозяйственного производства;
- уровня и продолжительности употребления алкоголя и различных видов наркотиков, включая никотиносодержащие вещества (Моисеев Ю., Родина Н., Марков А., 1996).

В первую очередь жизнедеятельность человека связана с потреблением определенного количества энергии, получаемой им с продуктами питания, и характеризуется двумя важнейшими параметрами: степенью работоспособности и продолжительностью жизни. Специалисты выделяют три уровня жизнедеятельности человека в зависимости от количества потребляемой в сутки энергии: оптимальный – 3500...2500 ккал²; недостаточный – до 1500 ккал; критический – до 1000 ккал. Неизбежным следствием последнего уровня питания является снижение продолжительности жизни и летальный исход. В среднем при потреблении энергии менее 1000 ккал в сутки продолжительность жизни людей составляет 35...55 лет, при потреблении более 2000 ккал в сутки – до и более 80 лет (рис. 2.27).

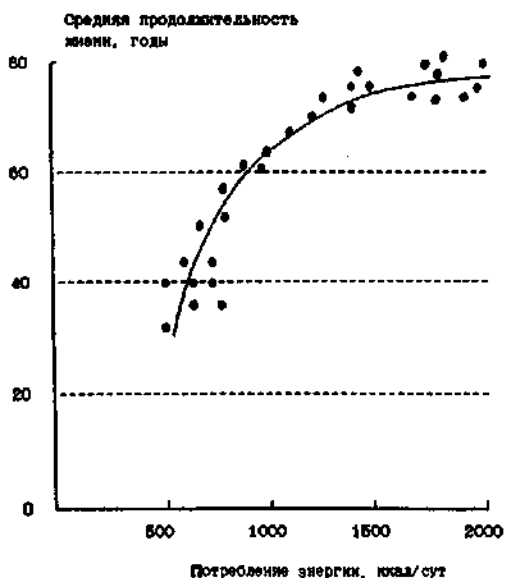
В группу основных продуктов, обеспечивающих 90 % калорийности питания, входят молочные, мясные, хлебные изделия, а также картофель, жиры, сахар. Самой острой, по-прежнему, остается проблема дефицита белка. Удовлетворение потребности человека в белке, потенциально пригодном в пищу, составляет по медицинским нормам: в сутки – 100 г; оптимальная годовая норма – 35 кг, в том числе 21 кг животного белка. Мировое производство белка, по данным ФАО, возросло с 1961 по 1978 г. со 177 до 262 млн т, в том числе животного с 37 до 52 млн т. Однако производство животного белка в мире отстает от производства зерновых культур.

Зачастую продукты питания становятся аккумуляторами токсичных для человека веществ. Основными источниками токсикантов в продуктах являются (Моисеев Ю. и др., 1996):

- почва, особенно в местах, зараженных радионуклидами; в районах, прилегающих к промышленным предприятиям, крупным автомагистралям и т.п.;
- почва, зараженная в результате нарушения агрохимических норм при использовании химических средств борьбы с сорняками, вредителями и болезнями сельскохозяйственных посевов на больших площадях;

² (1 ккал = 41,9 мДж)

Рис. 2.27. Зависимость средней продолжительности жизни от потребления энергии в сутки. Каждая точка – средняя продолжительность жизни и калорийность питания среднего человека в одной из стран мира в 1988 году



- превышение норм внесения минеральных удобрений на единицу площади, в основном фосфатов, калия и др.;
- навоз, содержащий тяжелые металлы и органические токсиканты;
- атмосферные аэрозоли и вода, зараженная сбросами промышленных и других предприятий и используемая в сельскохозяйственном производстве;
- осадки, содержащие химические вещества, попадающие в атмосферу при выбросах от промышленных предприятий, так называемые «кислотные дожди» и др.

Длительное употребление алкоголя приводит к резкому снижению трудоспособности человека, а при массовом развитии алкоголизма – к деградации нации. Уровнем безопасного употребления алкоголя считается 8 л на одного человека в год. По данным на 1995 г., потребление в России алкоголя составило 22 л в среднем на одного человека, превысив уровень безопасности в 2,7 раза.

Продовольственная безопасность определяется также долей импорта продуктов питания в страну. Критическим пределом продовольственной безопасности в отношении импорта продовольствия признана 50-процентная доля импорта, поскольку прекращение импорта по тем или иным причинам приведет к более чем двукратному сокращению потребления продуктов питания людей. На российском рынке, например, она возросла с 22 % в 1992 г. до 45 % в 1996 году.

На Всемирной встрече на высшем уровне по проблеме продовольствия (Рим, 1996) было отмечено, что уровень современных научных знаний о погоде, климате, водных ресурсах и агрономии позволяет в значительной степени решать проблему продовольственного питания в подавляющем большинстве стран мира. Показателен в этом отношении опыт Китая, где проживает более 1,3 млрд человек (22 % населения планеты), тогда как доля пахотных земель составляет всего 7 % всей пашни в мире. После многих лет застоя в сельскохозяйственном производстве страна за короткий период вышла на первое место в мире по производству пшеницы (100 млн т в год).

Устойчивое развитие общества обеспечивается многими факторами, среди которых стабильное обеспечение человека продовольствием и оптимальное состояние окружающей среды являются наиболее важными (Милащенко З.Н., Соколов О.А. и др., 2000). В середине 90-х гг. XX в., после распада СССР, впервые прозвучал тревожный вопрос о продовольственной безопасности России в связи с падением производства зерна (рис. 2.28), ростом импорта продовольственных товаров и снижением потребления продуктов питания населением страны.

За 90-е гг. в России произошло резкое снижение поголовья сельскохозяйственных животных и производство животноводческой продукции (табл. 2.15).

Таблица 2.15

Динамика поголовья сельскохозяйственных животных и мясомолочной продукции (Милащенко З.Н., Соколов О.А. и др., 2000)

Годы	Поголовье крупного рогатого скота, млн голов		Свиньи, млн голов	Овцы и козы, млн голов	Производство (млн т)	
	всего	в т.ч. коров			мяса	молока
1990	58,8	20,8	40,0	61,3	10,1	55,7
1991	57,1	20,5	38,3	58,2	9,4	51,9
1992	54,7	20,6	35,4	55,3	8,3	47,2
1993	53,2	20,2	31,5	51,4	7,5	46,5
1994	48,9	19,8	28,6	43,7	6,8	42,2
1995	43,3	18,4	24,9	34,5	5,8	39,2
1996	39,7	17,4	22,6	28,0	5,3	35,8
1997	31,5	14,5	17,3	18,8	4,8	34,1
1998	28,6	13,5	16,7	16,0	4,6	33,2

В трудном положении оказалось и рыбное хозяйство страны. Переход к рыночным отношениям привел к переориентации рыболовецких организаций на экономически более выгодную работу с зарубежными партнерами. Произошло резкое снижение поставок высококачественного белкового рыбопродукта на внутренний рынок.

Таким образом, ослабление сырьевой базы поставило производство продуктов питания в стране в неблагоприятные условия. На российском

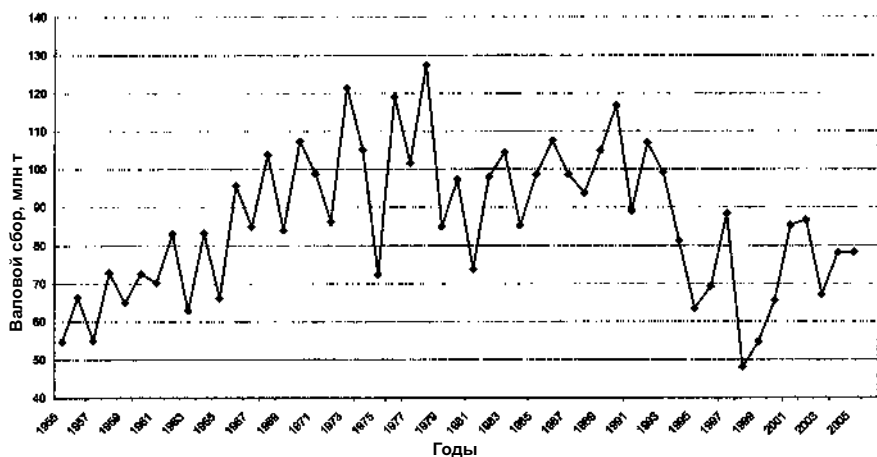


Рис. 2.28. Динамика валового сбора всех зерновых культур за период с 1995 по 2005 г.

рынке стала стремительно увеличиваться доля импорта различных продуктов питания: в 1992 г. – 22 %, в 1996 г. – 45 % (Моисеев Ю. и др., 1996). В то же время, по некоторым данным, с импортом по отдельным видам продукции поступает до 80 % недоброкачественной продукции. Кроме того, импорт продовольствия не столько возмещает недостаток продовольствия, сколько сдерживает развитие отечественного производства продуктов питания.

Продовольственная безопасность – это система экономически и экологически обоснованного стабильного функционирования агропромышленного комплекса (АПК) с целью производства и устойчивого удовлетворения населения экологически безопасными продуктами питания по научно обоснованным нормам (Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000).

В среднем считается, что государство не может гарантировать продовольственную безопасность населения, если суммарный импорт продуктов питания превышает 25 %. Критическим пределом продовольственной безопасности страны условно считается 50-процентная доля импорта продуктов. В экономически развитых странах поддерживается высокий уровень самообеспечения продуктами питания: США и Франция – 100 %, Германия – 93 %, Италия – 78 % и т.п. В этих странах состояние продовольственной безопасности признается важнейшим показателем национальной безопасности.

Продовольственная безопасность для человека предполагает не только физическую, но и экономическую доступность продукции по физиологическим нормам. По данным В.П. Зволинского и Д.М. Хомякова (1998) в 1997 г. уровень потребления продуктов питания в России

снизился, по сравнению с 1990 г., на 30...60 %. Общее количество продуктов питания на душу населения в год составляет в нашей стране порядка 700 кг, в то время как в развитых зарубежных странах – 900...1000 кг.

По уровню питания населения страна за период реформ передвинулась с 7-го места в мире на 42-е. Потребность населения России в продовольственных товарах отечественного производства удовлетворяется на 50...60 %. По оценкам специалистов Департамента пищевой промышленности Министерства сельского хозяйства России, примерно 40 % населения страны испытывают белково-калорийную недостаточность энергии и белка в среднем 15...20 % нормы. Резко возросла витаминная недостаточность, уменьшилось потребление углеводов в виде овощей и фруктов. По ряду объективных показателей Россия по уровню продовольственной безопасности находится не только в области недостаточной, но и критической (Моисеев Ю. и др., 1996).

Согласно мнению специалистов Московского университета прикладной биотехнологии, проблема дефицита белка может быть решена в России путем использования ценных растительных белков. Например, производство соевых бобов требует в несколько раз меньше энергозатрат, чем производство эквивалентного (по содержанию белка) количества мяса, птицы и молока. Годовая потребность населения России в соевом белке для обогащения хлебной продукции составляет 100 т, в то время как закупают (по импорту) всего 12...14 т. Собственное производство соевых бобов в России пока ограничено.

По расчетам специалистов, будущее российского аграрного сектора связано с ростом и укреплением частного подворья, которое уже к 1996 г. дает около 55 % валовой продукции сельского хозяйства (Моисеев Ю. и др., 1996; Савченко Е., 1998).

Для количественной оценки продовольственной безопасности возможно использование методологии, предложенной доктором химических наук Ю. Моисеевым и др. (1996), краткое изложение которой приводится ниже. Нормальная жизнедеятельность человека поддерживается потреблением набора продуктов, доступных ему в соответствии с его возрастом, материальными возможностями и местом проживания. С продуктами питания человек получает энергию и необходимые пищевые вещества. Общая энергетическая ценность продуктов питания выражается:

$$G = \sum m_i g_i, \quad (2.8)$$

где m_i – масса i - продукта; g_i – энергетическая ценность i -продукта.

Оптимальная энергетическая ценность лежит в пределах $2500 < G_{opt} < 3500$ ккал/сутки.

С набором продуктов, имеющих G_{opt} , человек получает оптимальное количество основных пищевых веществ:

$$\sum_k \Pi k = \sum_{k,i} m_i Pk_i, \quad (2.9)$$

где Πk – общее количество k -пищевого вещества; Pk – удельное содержание k -пищевого вещества в i -продукте. Авторы рассматривают два варианта при дефиците питания.

Первый вариант. Человек не меняет набор продуктов, а уменьшает потребляемое количество:

$$G_{onm} = \sum_i m_i g_{ionm}, \quad (2.10)$$

$$\sum_k \Pi k = \sum_{k,i} (m_i Pk_i)_{onm}, \quad (2.11)$$

$$m_{\sum_{onm}} = \sum_i (m_i)_{onm}, \quad (2.12)$$

где $m_{\sum_{onm}}$ – общее количество продуктов, необходимое для оптимальных потребностей среднего человека в энергии и основных пищевых веществах.

В этом случае критическая жизнеспособность наступает при потреблении половины количества пищи от оптимального:

$$m_{\sum_{(крит)}} \leq 1/2 m_{\sum_{(onm)}}, \quad (2.13)$$

где $m_{\sum_{(крит)}}$ – общее количество продуктов, при котором наступает критическая жизнеспособность (резкое снижение трудоспособности, продолжительности жизни).

Второй вариант. Человек меняет набор продуктов с целью компенсировать энергетический дефицит и недостаток пищевых веществ за счет более дешевых и более экологически опасных продуктов питания. Такая ситуация пока наиболее типична, когда количество и качество потребляемых продуктов зависит только от доходов групп населения, а не от характера их трудовой деятельности.

Для оценки продовольственной безопасности в целом по России и в регионах авторы предлагают следующие принципы.

1. Определить перечень продуктов, наиболее достоверно отражающих структуру рациона питания основных групп населения. Этот перечень должен удовлетворять следующим условиям:

- по каждому из выбранных продуктов должны быть достоверные статистические данные по производству и потреблению в границах административных территорий (район, область, регион, государство);
- в рационе питания продукты должны иметь наиболее высокий рейтинг и при этом не быть взаимозаменяемыми;
- количество продуктов должно быть минимальным, но обеспечивать при этом более чем на 80% потребность в калориях и в основных пищевых веществах.

На этом основании были выбраны следующие продукты из пяти групп: I – молоко и молочные продукты, II – мясо и яйца, III – хлеб, хлебобулочные изделия и картофель, IV – животное, растительное масло, V – сахар. Авторы выбрали 8 видов продуктов, которые в рационе питания населения России обеспечивают на 90 ± 5 % потребность в калориях и на 85 ± 5 % – в основных пищевых веществах. Для расчетов из пищевых продуктов были выбраны белки, жиры и углеводы. Минеральные вещества и витамины в достаточном количестве содержатся в продуктах I, II и III групп. Отсутствие в перечне групп овощей, фруктов и ягод связано с тем, что не существует статистически достоверных сведений об их потреблении, поскольку в большинстве регионов страны высок процент самообеспечения ими за счет возделывания на приусадебных участках (дачах) и реализации через рынки и торговлю на лотках.

2. Для каждой территории необходимо определить следующие базовые параметры:

- душевое производство (потребление) по каждому продукту m_i ;
- индекс производства (потребления) продукта, равный доле произведенного (потребленного) продукта от его физиологической нормы:

$$J_i = m_{(i)} / m_i^0, \quad (2.14)$$

- интегральный индекс производства (потребления) выбранных 8 видов продуктов, равный сумме индексов производства (потребления):

$$J_{\Sigma} = 1/8 \sum_i J_i, \quad (2.15)$$

- интегральный индекс импорта (экспорта), равный разности:

$$J_{\Sigma(\text{нормеб})} - J_{\Sigma(\text{произв.})}, \quad (2.16)$$

- интегральный индекс энергетической ценности, равный сумме индекса потребления продуктов, умноженной на их энергетическую ценность:

$$J_{\Sigma}^g = 1/8 (J_{(\text{нормеб})} g) i, \quad (2.17)$$

- интегральный индекс пищевой ценности равный сумме индексов потребления продуктов, умноженный на удельное содержание в них пищевых веществ (белков, жиров, углеводов):

$$J_{\Sigma}^n = \sum [J_{\text{нормеб}} (a + b + c)] i, \quad (2.18)$$

где a , b , c – удельное содержание белков, жиров, углеводов соответственно;

- коэффициент дефицита калорий в рационе питания:

$$K_g = 1 - J_{\Sigma}^g, \quad (2.19)$$

- коэффициент дефицита белка в рационе питания:

$$K_b = 1 - J_{\Sigma}^b, \quad (2.20)$$

– среднесуточное потребление калорий человеком:

$$Q_{\text{сред}} = \sum_i (J_{\text{потреб}} \cdot g) i. \quad (2.21)$$

Для оценки продовольственной безопасности авторы предложили единый обобщенный показатель:

$$J_{\Sigma}^{\text{жс}} = 1/2(J_{\Sigma}^{\text{ж}} + J_{\Sigma}^{\text{н}}). \quad (2.22)$$

Интегральный индекс жизнеспособности населения в общем виде выражается функцией, связывающей $J_{\Sigma}^{\text{жс}}$ с факторами, влияющими на жизнеспособность во времени:

$$J_{\Sigma}^{\text{жс}} = \varphi(\Phi, t), \quad (2.23)$$

где Φ – факторы, влияющие на жизнеспособность, t – время.

С помощью этой функции можно оценивать текущее состояние и будущие изменения уровня продовольственной безопасности во времени.

Основная задача по обеспечению продовольственной безопасности России сводится к приостановке спада отечественного сельскохозяйственного производства и его восстановление. В этой связи приоритетными направлениями являются поддержание и повышение плодородия почвы, сохранение генофонда растений и животных, формирование материально-технической базы, создание оптимальных условий жизнеобеспечения отечественному производителю, разработка и реализация обособованных региональных систем земледелия, а также целевых программ обеспечения продовольственной безопасности на государственном и региональном уровнях (Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000).

Полноценное, сбалансированное питание людей в условиях нарастающего загрязнения биосферы, зависит не только от количества потребляемых продуктов, но и в значительной мере от их качества. Здоровье и благосостояние людей, надежное обеспечение их продуктами питания, социально-экономическое развитие человеческого общества, а также состояние экосистемы планеты Земля подвергаются все возрастающему риску.

Как было отмечено выше, Россия обладает самым большим в мире земельным потенциалом. С учетом наступившего инструментально зафиксированного потепления климата это создает благоприятные условия не только для решения собственной продовольственной безопасности, но и для вхождения страны в число основных экспортеров сельскохозяйственной натуральной продукции, дефицит которой наметился в ряде государств мира.

Решение экологических проблем, особенно в условиях изменения климата, равно как и способы обеспечения устойчивого развития сообщества людей на национальном, региональном и мировом уровнях, остаются актуальными задачами для нынешнего и будущих поколений людей на Земле.

ГЛАВА 3

ПОНЯТИЕ ОБ ЭКОСИСТЕМАХ И АГРОЭКОСИСТЕМАХ

Сложившееся в процессе эволюции Земли неравномерное распределение континентов, океанов, континентальных и морских водоемов, горных массивов, различных почвенно-климатических зон и высотных поясов является особенностью биосферы. Необыкновенное разнообразие сред биосферы способствовало развитию эволюционных связей. В свою очередь это привело к генезису многообразия видов растений и животных на Земле.

Согласно закону единства организма и среды В.И. Вернадского, жизненные процессы в биосфере развиваются в результате постоянного обмена веществом и информацией на базе потоков энергии в совокупном единстве среды и населяющих ее организмов. Успешное выживание и размножение любого организма возможно только в конкретной среде, характеризующейся относительно узкими диапазонами радиационного, теплового, влажностного режимов и наличием условий питания организмов.

В современной экологии сложилась следующая классификация понятия среды (Агроэкология, 2000). **Природная среда** – это совокупность неорганических (абиотических) и органических (биотических) факторов по отношению к растениям, животным и другим организмам вне зависимости от контактов с человеком. **Окружающая среда** – это вещество, энергия и пространство, окружающие организмы и воздействующие на них как положительно, так и отрицательно.

Антропогенная среда – это природная среда, прямо или косвенно, намеренно или непреднамеренно измененная людьми.

При более детальном изучении среды выделяют среду обитания и условия существования. **Среда обитания** – это часть природной среды, окружающая живые организмы, с которой они взаимодействуют. Составные элементы и свойства среды обитания разнообразны и изменчивы: при этом одни из них могут быть необходимыми организму, другие – оказывают отрицательное воздействие, иные – нейтральны для жизнедеятельности живых организмов. **Условия существования** – это совокупность необходимых организмам элементов среды, с которыми они находятся в неразрывном единстве и без которых их существование невозможно.

Среда обитания и условия существования включают в себя понятие «экологический фактор». **Экологический фактор** (от лат. *factor* – делающий, производящий) – это любой изменяющийся элемент окружающей среды, вызывающий у живых организмов при своих повторных

изменениях ответные приспособительные эколого-физиологические реакции, наследственно закрепляющиеся в процессе эволюции. Это внешние и внутренние силы, определяющие направление и скорость процессов, совершающихся в живых организмах и экосистемах (Быков Б.А., 1983). Направление изменения экологических факторов происходит на протяжении различных отрезков времени, например развитие эрозионных процессов, зарастание водоемов, похолодание или потепление климата и т.п.

Разнообразие экологических факторов чрезвычайно велико, их различают по среде возникновения (атмосферные, водные, почвенные и др.), по степени воздействия (экстремальные, лимитирующие, летальные и др.), по времени действия (эволюционные, сезонные и др.), по характеру действия (геофизические, географические, биогенные и др.).

В сельском и лесном хозяйствах в совокупности всех экологических факторов обычно выделяют три группы: абиотические, биотические и антропогенные.

Абиотические факторы (от греч. *a* – отрицательная приставка и *bionicos* – жизненный, живой) – это факторы (элементы) неорганической (неживой) природы, влияющие на живые организмы. В наземных условиях к ним относятся уровень солнечной радиации, световой и тепловой режимы, газовый состав, атмосферное давление и движение воздушных потоков, особенности рельефа местности, влага (различные формы осадков, влажность воздуха, почвы и т.п.). Почвенно-грунтовые факторы (гранулометрический и химический состав, физические свойства – теплоемкость и влагоемкость и др.) относятся к абиотическим факторам весьма условно, поскольку в почвах концентрируются органические остатки – основа плодородия почв. В своей работе «Живое вещество и биосфера» (1994) В.И. Вернадский отмечал: почва – «это область наивысшей геохимической энергии живого вещества, важнейшая по своим геохимическим последствиям лаборатория идущих в ней химических и биохимических процессов» (с. 396). Все организмы испытывают влияние комплекса экологических факторов. По-существу, для каждого вида растений, животных, для каждого индивидуума человека существует *оптимум*, *зоны угнетения (стрессовые зоны)* и *пределы выживания*, определяемые каждым фактором окружающей среды (рис. 3.1). В биологической литературе эту закономерность называют *законом факторного оптимума*. В действительности критерии оптимума жизнедеятельности организмов формируются под влиянием комплекса окружающей его среды, среди которых важнейшим является температура (при равном влиянии остальных факторов). Весь диапазон температуры – от минимальной до максимальной, при котором еще возможна жизнедеятельность, определяет нижние и верхние пределы устойчивости (выносливости) организма. Оценки температуры с наиболее благоприятными условиями формируют

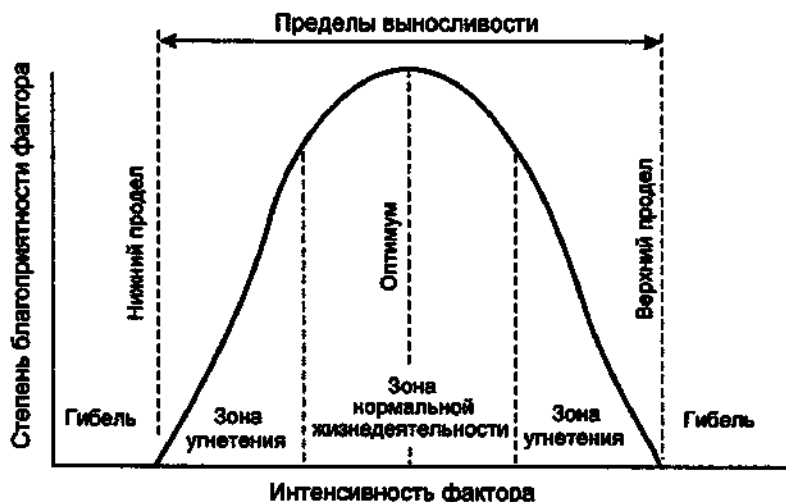


Рис. 3.1. Классическая схема действия экологического фактора на жизнедеятельность организмов

оптимум жизнедеятельности организма. При этом известно, что суммарный эффект совместного влияния не является простой суммой реакций на действие отдельных факторов. Оптимум и пределы устойчивости организма по отношению к одному из факторов среды зависят от уровня благоприятности и интенсивности других факторов. Например, при оптимальной температуре повышается выносливость к неблагоприятной влажности воздуха или недостатку питания (Исаев А.А., 2001).

Биотические факторы – это совокупность влияний, оказываемых на живые организмы жизнедеятельностью других организмов. Такое влияние одних живых существ на другие может быть прямым и косвенным. К прямым формам воздействия относится широко распространенное в природе использование одних организмов другими в качестве источника питания (хищничество), обеспечивающего выживание в борьбе за существование. К этим формам относятся также механические контакты животных и растений (поедание и вытаптывание растений животными при выпасе и т.п.); *паразитизм* одних высших растений на других (повилика полевая, заразиха и др.) и грибов; *симбиоз* – длительное сосуществование различных организмов, приносящее им взаимную пользу, например лишайники, состоящие из водоросли и гриба. Еще примеры – насекомые-опылители растений содействуют размножению последних; зачастую распространение семян растений происходит с помощью животных и птиц; подавление популяций насекомых-вредителей на посевах с помощью *энтомофагов* – насекомых, питающихся вредителями полей

или откладывающих свои личинки в их теле, используя последние в качестве питания для развивающихся личинок.

Косвенное воздействие биотических факторов выражается в изменении условий среды обитания для других живых организмов. Например, благодаря затенению, перехвату запасов почвенной влаги и питательных веществ быстрорастущими сорняками ухудшаются условия освещения, влагообеспеченности посевов и уровня плодородия почвы, в результате которых происходит снижение продуктивности культурных растений. К этому также относится выделение растениями химических веществ, например фитонцидов, угнетающих развитие близко растущих растений других видов (или пород). Например, под зелеными кронами грецкого ореха многие растения испытывают сильное угнетение, слабо вегетируют и не плодоносят.

Антропогенные факторы (от греч. *anthropos* – человек, *genos* – рождение) отражают влияние настоящей или прошлой, случайной или планируемой хозяйственной деятельности человека на окружающую среду. В главе 2 – «Ресурсы биосферы и проблемы продовольствия» – были показаны конкретные примеры масштабного воздействия хозяйственной деятельности человеческого сообщества на окружающую среду и природные ресурсы.

Все живые существа (растения, животные, микроорганизмы) занимают определенное место в пространстве и обычно находятся в состоянии конкурентной борьбы за участки этого пространства. Пространство экологических факторов имеет свою классификацию: экотоп, биотоп, экологическая ниша, экотип (Агроэкология, 2000). **Экотоп** (от греч. *oikos* – дом, жилище и *topos* – место) – внешние условия жизни, не относящиеся к биологическим объектам или их сообществам. **Биотоп** (от греч. *bios* – жизнь и *topos* – место) – местообитание биологического индивида или сообщества, весьма однородное по комплексу абиотических факторов среды.

Экологическая ниша – это определенное пространство, место, занимаемое растительным или животным организмом, обусловленное его потребностью в питании, территории и в функции воспроизводства, например приуроченность организма к определенным ландшафтам, ярусу растительного покрова, типу почвы или субстрата, высоте над уровнем моря, к режимам увлажнения, освещенности, к тепловому режиму среды обитания и т.п. В более широком понимании экологическая ниша характеризуется совокупностью всех факторов окружающей среды, в пределах которой возможно существование вида в природе.

Экотип – это экологические расы и разновидности растений и животных, приспособленных к определенным условиям местообитания и обладающие наследуемыми, экологически обусловленными признаками. На основе различных признаков экотипов составляются экологические

коллекции по каждой сельскохозяйственной культуре, например коллекция, созданная во Всероссийском научно-исследовательском институте растениеводства им. Н.И. Вавилова (г. Санкт-Петербург).

Понятие «*сообщество*» относится к совокупности взаимодействующих живых существ любого ранга. Наименьшей таксономической единицей сообщества является *биоценоз* (от греч. *bios* – жизнь + *koinos* – общий). Биоценоз – это естественное сообщество живых организмов (растений, животных, микроорганизмов), населяющих конкретную территорию (биотоп), характеризующееся определенными отношениями между собой (пищевые цепи, экологические ниши, конкуренция и т.п.) и с абиотическими факторами среды. Формируют биоценоз межвидовые связи, создающие структуру биоценоза: видовой состав, численность особей каждого вида, их распределение в пространстве и т.п., зависящие от условий окружающей среды. Структурной основой биоценоза, его «каркасом» пространственного размещения других структурных элементов всего сообщества является растительный компонент – **фитоценоз** (от греч. *phyton* – растение + *koinos* – общий). Это более или менее устойчивая, исторически сложившаяся совокупность растительных организмов (сообщество) одного или многих поколений на относительно однородном участке, образовавших собственную внутреннюю среду (фитоклимат, обмен веществом и энергией), находящихся в сложных взаимоотношениях друг с другом (борьба за свет, влагу, зону питания) и с другими компонентами биотической и абиотической среды. Другими структурными элементами биоценоза являются устойчивые сообщества животных – *зооценозы* и сообщества микроорганизмов – *микробоценозы*.

В специальной экологической и геоботанической литературе весьма часто используется понятие «*биогеоценоз*», концепция которого предложена акад. В.Н. Сукачевым (1942). **Биогеоценоз** (от греч. *bios* – жизнь + *ge* – Земля + *koinos* – общий) – это эволюционно сложившаяся, относительно ограниченная пространственно, внутренне однородная природная система функционально взаимосвязанных живых организмов с окружающей их абиотической средой, характеризующаяся определенным энергетическим состоянием, типом и скоростью обмена веществом, энергией и информацией (рис. 3.2). Это определение в системно-таксономическом смысле близко к понятию «*экосистема*» (см. ниже). Однако экосистема обеспечивает круговорот вещества «любого ранга», распространяясь и на водные объекты, тогда как биогеоценоз – понятие территориальное, сугубо наземное и относится к таким участкам суши, которые заняты фитоценозами, зооценозами и микробиоценозами. Экосистема, как более широкое экологическое понятие, может включать несколько биогеоценозов (Агроэкология, 2000).

В каждом биоценозе в процессе исторического развития складываются пищевые (так называемые трофические) связи между различными

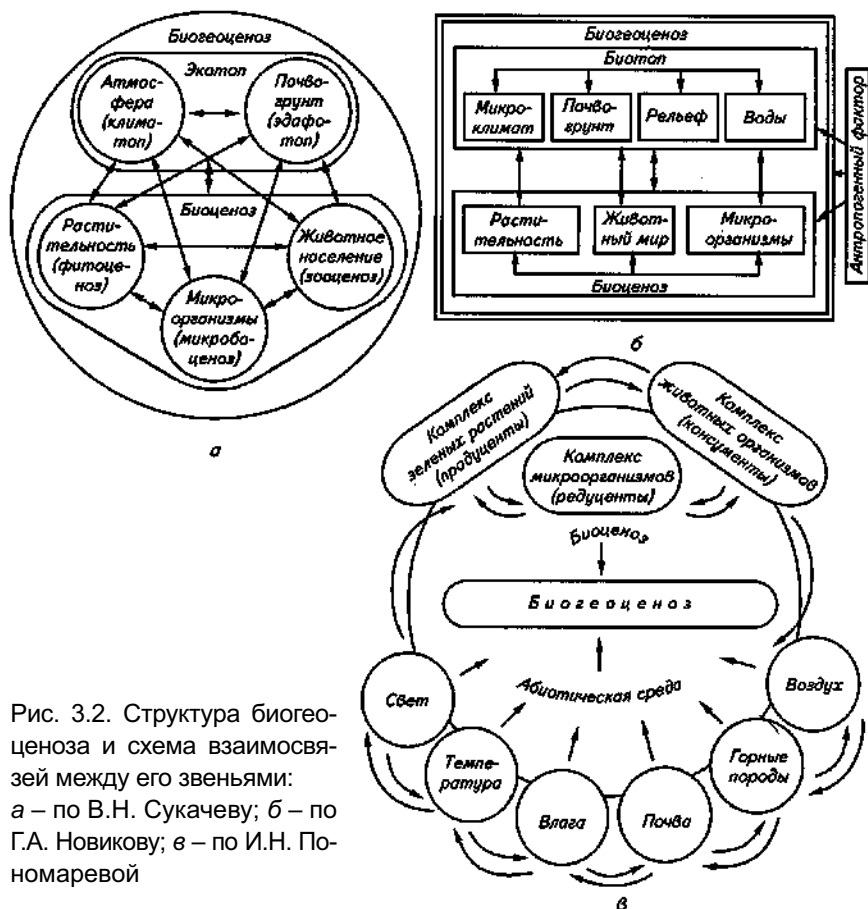


Рис. 3.2. Структура биогеоценоза и схема взаимосвязей между его звеньями:
 а – по В.Н. Сукачеву; б – по Г.А. Новикову; в – по И.Н. Пономаревой

биологическими видами, обеспечивающие между ними непрерывный обмен веществом и энергией.

Такое сообщество состоит из **автотрофов** (от греч. *autos* – сам + *trope* – пища) или **продуцентов** (от лат. *producentis* – производящий), т.е. организмов, самостоятельно создающих органическое вещество из неорганических элементов. К продуцентам относятся все зеленые, фотосинтезирующие растения (включая водоросли), использующие и аккумулирующие энергию солнечного света, влагу и неорганические элементы при создании органического вещества. В сообществе непременно присутствуют **гетеротрофы** (от греч. *heteros* – другой), т.е. организмы, питающиеся органическим веществом, произведенным другими организмами. Все живые существа являются объектами питания других, т.е. связаны между собой энергетическими отношениями. Первую группу гетеротрофов

составляют **консументы** – это в основном представители животного мира, питающиеся растительной (травоядные) или животной пищей (плотоядные). Вторую группу гетеротрофов составляют **деструкторы** (от лат. *destruction* – разрушение) или **редуценты** (от лат. *reduction* – возвращение) – микроорганизмы, бактерии и грибы, разлагающие и перерабатывающие в процессе своей жизнедеятельности органические остатки растений и животных (мертвая органика) в неорганические вещества – источник питания для продуцентов. Общая схема пищевых и энергетических связей выглядит следующим образом:

Автотрофы (или продуценты) → Гетеротрофы (или консументы) → Гетеротрофы-деструкторы (или редуценты) → Автотрофы (продуценты).

Таким образом, перечисленные категории организмов составляют три функциональных и взаимосвязанных механизма природы, характеризующих различными типами питания и собственными источниками энергии (Рамад Ф., 1981).

Что же представляет собой *экологическая система*?

В процессе длительного исторического развития различных форм жизни на Земле, в результате естественного отбора и борьбы за существование сложились сообщества живых организмов, приспособленных к жизни в конкретных природных условиях. Любое естественное сообщество живых организмов и среда их обитания, исторически сложившиеся в функциональное единство на основе взаимозависимости и обмена между собой потоками вещества и энергии, относится к категории экологической системы.

Экосистема – это исторически сложившаяся в биосфере совокупность биотических и абиотических элементов, связанных пространственно и функционально, в результате взаимодействия которых создается стабильная, целостная система, где происходит непрерывный круговорот вещества и обмен энергией между живыми и неживыми ее частями. Экосистема представляет собой сложную, относительно устойчивую совокупность множества видов живых организмов, приспособленных к жизни, накоплению и многократному использованию вещества и энергии, к саморегуляции и динамическому равновесию в постоянно меняющихся условиях окружающей среды.

Понятие «*экосистема*» (от греч. *oikos* – дом + *systema* – целое, составленное из частей) было предложено в 1935 г. английским ботаником А. Дж. Тенсли, который писал, что в экосистему входит «...не только комплекс организмов, но и весь комплекс физических факторов, образующих то, что мы называем средой биота – факторы местообитания в самом широком смысле. Хотя главным, интересующим нас объектом могут быть организмы, однако, когда мы пытаемся проникнуть в самую суть вещей,

мы не можем отделить организмы от их особой среды, в сочетании с которой они образуют некую физическую систему». Он представлял ее, как сочетание биотопа и биоценоза, взаимно влияющих друг на друга, благодаря непрерывному обмену веществом и энергией как между двумя составляющими, так и внутри каждого из них:

Экосистема = Биотоп + Биоценоз.

В современной трактовке экосистема – это функциональная система, включающая в себя сообщество живых организмов и их среду обитания. Таким образом, она сочетает биом (фито-, зоо- и микроценозы) и совокупность факторов среды, т.е. экотоп (Полуэктов Р.А., Пых Ю.А., Швытов И.А., 1980).

Обязательным условием существования и функционирования любой экосистемы является наличие всех звеньев трофической цепи: продуценты – консументы – редуценты, благодаря жизнедеятельности которых осуществляется непрерывный обмен веществом и энергией (круговорот), обеспечивающий продолжение жизни. Однако этот круговорот возможен только при условии постоянного притока солнечной энергии.

Экосистема – понятие безразмерное. Различают экосистемы различных уровней: например микроэкосистемы – ствол гниющего дерева, грядка, теплица и др.; мезоэкосистемы – лес, горная система, болото, степь, пустыня и др.; макроэкосистемы – океан, континент; к глобальной экосистеме обычно относят всю биосферу.

К важнейшим свойствам экосистемы относится также способность восстанавливаться после незначительных нарушений, поддерживать экологическое равновесие. Однако глубокое нарушение такого равновесия приводит к необратимым последствиям. Так, например, чрезмерный водозабор из рек Амударья и Сырдарья для расширения поливных земель в Среднеазиатском регионе и на юге Казахстана в конце XX–начале XXI вв. привел к гибели экосистемы Аральского моря, к образованию новой пустыни Аралкум на месте дна бывшего моря и к экологической катастрофе всего Приаральского региона. Другие примеры: следствием строительства плотин и создания крупных водохранилищ на водных артериях (реках) является затопление окрестных территорий в долинах и горных котловинах, приводящих к полной гибели мезоэкосистем. Промышленные разработки полезных ископаемых также сопровождаются полным уничтожением мезоэкосистем, существовавших до вмешательства человека.

Известно, что сельскохозяйственное производство относится к одному из древнейших и масштабных видов деятельности сообщества людей на Земле. Экстенсивное ведение сельского хозяйства (развитие этой отрасли за счет освоения новых земель путем распахивания целины, сведения лесов под посевы сельскохозяйственных культур, сады, пастбища и т.п.) стало главной причиной разрушения природных (естественных)

экосистем на значительных площадях. В результате долговременного воздействия человека на месте природных экосистем сформировались разнообразные антропогенные сельскохозяйственные образования – пашни, сады, виноградники, плантации чая и кофейного дерева, окультуренные луга и пастбища. Это искусственные экологические системы одностолетного и многолетнего использования – **агроэкосистемы**.

В отличие от природных экосистем, агроэкосистемы характеризуются неустойчивостью, но значительно более высокой продуктивностью, поскольку их состав, структура и режим жизнедеятельности возделываемых культур создаются, регулируются и поддерживаются трудом человека с целью получения максимального урожая высокого качества. По мнению известного эколога Ю. Одума (1987), агроэкосистемы – это одомашненные экосистемы, которые во многих отношениях занимают промежуточное положение между природными экосистемами (леса, степи, луга и т.п.) и искусственными (города). Агроэкосистемы играют существенную роль в круговороте энергии, воды и минеральных веществ на Земле.

Все агротехнические мероприятия, осуществляемые на сельскохозяйственных угодьях, направлены на получение *первичной продуктивности* агроэкосистем. Естественный отбор в результате борьбы за существование, характерный для экосистем, заменяется человеком на искусственный отбор. В агроэкосистемах слабо выражена способность к саморегулированию. При ослаблении систематического ухода и контроля со стороны человека за растениями (поддержка агроэкосистемы) происходит обострение конкурентной борьбы между культурными и сорными растениями за ресурсы света, влаги и минерального питания. Как правило, в этой борьбе за выживание побеждают сорные растения, более приспособленные к изменяющимся условиям существования. В результате наступает снижение устойчивости сельскохозяйственных культур, падение их продуктивности, а при более длительном отсутствии ухода за посевами происходит их гибель.

Смена растительных сообществ на заброшенных полях – длительный, многолетний процесс, конечной фазой которого является постепенное восстановление ранее существовавших на этих ландшафтах природных экосистем. Например, нарушенные экосистемы тундры под влиянием наземного гусеничного транспорта (вездеходы), восстанавливаются через 30...35 лет, при условии отсутствия повторных проездов транспортных средств. Заброшенные мелиорированные земли в южных регионах подвергаются интенсивному засолению почвы и формированию солеустойчивых фитоценозов, а в зоне умеренного климата – заболачиванию.

Особой формой сельскохозяйственного производства является получение *вторичной* биологической продукции – животноводческой. Она создается путем разведения и содержания различных видов и пород

одомашненных животных, выращиваемых под присмотром и управлением человека. В то же время процесс целенаправленного производства первичной и вторичной биологической продукции на промышленной основе тесно связан с природными закономерностями: почвенно-климатическими условиями конкретной территории, сменой сезонов года и др.

Период существования агроэкосистем различен. Так, посевы зерновых культур существуют не более одного года, посевы многолетних трав – 3–4 года, плодовых культур – от 6–7 лет (персики) до 20...30 лет (яблони, груши), по истечении которых они стареют и подлежат реставрации или замене. Одной из форм агроэкосистем являются полевые полосы, лесные полосы (например в степной зоне), стабильное произрастание их отмечается в пределах 30 лет. Без ухода со стороны человека (расчистка, рубка загущенных посадок и т.п.) они постепенно «дичают», превращаясь в естественные лесостепные экосистемы.

Своеобразной формой агроэкосистем считаются парниковые и оранжерейные культуры, существование которых возможно только при создании особых почвенных, водных, воздушных условий и поддержании необходимого светового, водного и теплового режимов, управляемых человеком.

При возделывании разнообразных сельскохозяйственных культур человек вносит в агроэкосистемы дополнительную энергию за счет обработки почвы и посевов сельскохозяйственной техникой, искусственных поливов, внесения удобрений, а также ядохимикатов для подавления популяций вредителей и болезней растений и т.п. (рис. 3.3). В процессе интенсификации сельскохозяйственного производства вклад энергозатрат, расходуемых человеком на обработку почвы, внесение удобрений и защиту посевов от болезней и вредителей, а также средств на оплату труда земледельцев и т.п., неизмеримо возрастает.

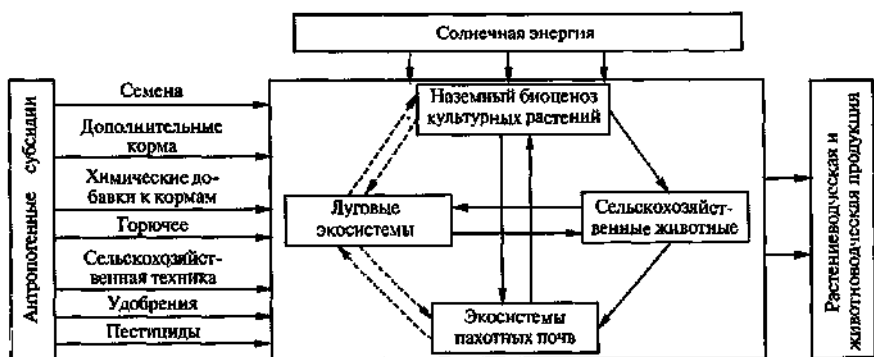


Рис. 3.3. Схема функционирования агроэкосистемы (Миркин, Хазиахметов, 1995)

Однако эта дополнительная, так называемая антропогенная энергия, играет лишь роль катализатора, стимулирующего более интенсивное использование растениями солнечной энергии в процессе фотосинтеза, запасов почвенной влаги и питательных веществ. Хорошо известно, что примерно 90...95 % сухого вещества растений создается за счет фотосинтетической аккумуляции энергии Солнца, благодаря свободно происходящим в растениях и почве биологическим процессам.

Нельзя забывать, что следствием обеспечения устойчивости продукционного процесса растений и животных является серьезное воздействие всей сельскохозяйственной деятельности человека на окружающую природную среду. В условиях быстро растущего населения Земли и расширения сельскохозяйственного производства агроэкосистемы стали значительными элементарными единицами биосферы.

Структура любой агроэкосистемы состоит из биотических сообществ *агрофитоценозов*, характеризующихся ограниченным количеством видов растений (и присущих им представителей животного мира) и абиотических компонентов, составляющих среду обитания растений и животных. Поддерживаемая человеком среда обитания используется ими как жизненное пространство, источник энергии и минерального питания (рис. 3.4).

Известно, что растительное сообщество развивается в двух средах – в верхних слоях литосферы (почва, грунт) и в приземном слое атмосферы. Корневые системы растений контактируют и взаимодействуют с почвой. Жизнедеятельность растений в значительной мере определяется физическими и химическими свойствами почвы: механическим составом, плотностью, пористостью, содержанием органических веществ (гумуса) и минеральных солей и т.п. В процессе взаимодействия почвы с атмосферой и растительным покровом в почвенных горизонтах формируется тепловой, водный и воздушный режимы, определяющие запасы влаги и минерального питания, характерные для конкретных типов почвы, сезонов года и применяемого агротехнического комплекса в агроэкосистемах.

Физиологами растений и агрохимиками установлено, что процессы обмена веществом и энергией между средой обитания и растениями происходят в корнях и надземных органах одновременно, они не разделены функционально.

Состав и режим воздушной и почвенной сред обитания растений, находясь под непосредственным и определяющим воздействием внутренних компонентов агроэкосистемы, прежде всего растительности, испытывает значительное влияние внешних атмосферных и почвенных процессов. Происходящие в растительном покрове обменные процессы между веществом и энергией изменяют воздушную и почвенную среду своего обитания, смягчая в известной степени резкие колебания внешних условий.

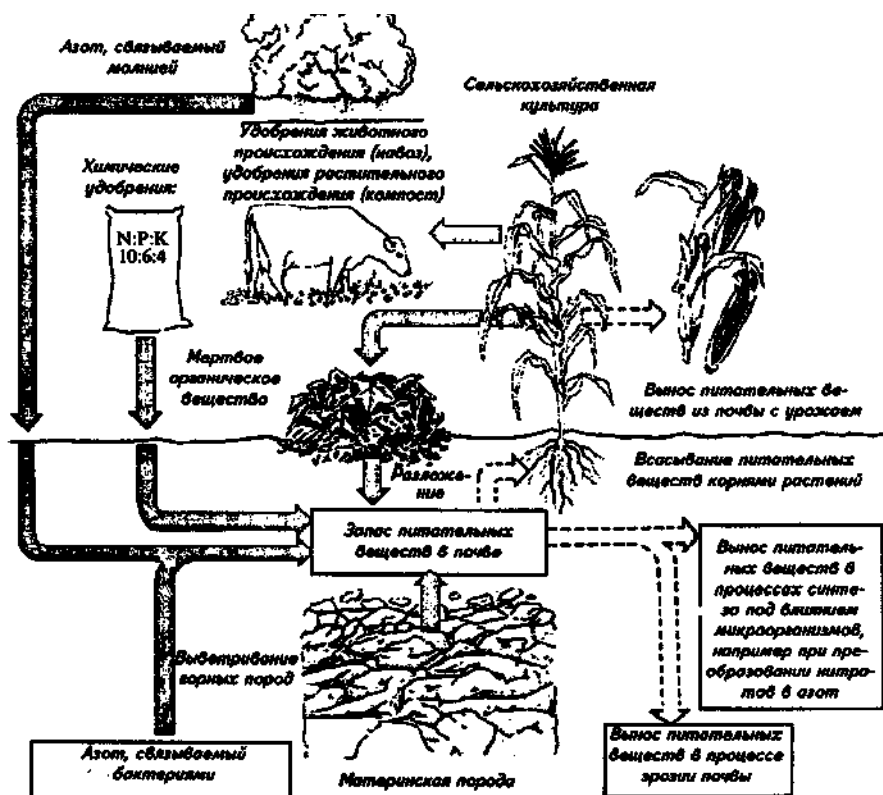


Рис. 3.4. Упрощенная схема поступления питательных веществ в почву и выноса их из почвы (Небел, 1993)

В воздушной среде эти изменения охватывают следующие процессы: перенос солнечной радиации в среде растений, ее поглощение, отражение и рассеяние надземными органами растений и почвой; изменение воздушных потоков в среде растений и над растительным покровом; испарение влаги с поверхности растений (транспирация) и почвы, перенос тепла и влаги над растительным покровом. Под влиянием этих процессов, а также теплового излучения атмосферы формируются температурные режимы верхних слоев почвы, внутри растительного покрова и над растительностью. В надземных органах растений – листьях, побегах и репродуктивных органах – осуществляются процессы фотосинтеза и дыхания. Эти процессы определяют углекислотный режим, охватывающий выделение CO_2 из почвы, его перенос в воздухе, поглощение растениями днем и выделение его ночью. Противоположно переносу CO_2 происходит перенос кислорода (O_2): его поглощение почвой, выделение днем и поглощение растениями ночью.

Почвенная среда агроэкосистемы связана со всеми другими ее компонентами и поддерживает ее функционирование. Разнообразные свойства этой среды специалисты делят на две группы. Первая из них объединяет относительно консервативные свойства, которые в каждом отдельном типе почвы изменяются незначительно, отражая исторические условия формирования (генезис почвы) и современный комплекс экологических факторов конкретной агроэкосистемы. Это основные физические и химические свойства почвы и подстилающих пород – механический состав, плотность, пористость, валовой химический состав, кислотность, количество органических остатков (гумус), а также содержание и распределение живых организмов в почвенных горизонтах.

Вторую группу свойств объединяют достаточно изменчивые характеристики почвенных горизонтов, определяемые процессами взаимодействия почвы с атмосферой и растительным покровом. Под влиянием этих процессов формируется годовая и сезонная динамика теплового, водного и воздушного режимов, а также содержание и уровень доступности растениям минерального и органического питания.

По образному выражению проф. О.Д. Сиротенко (1981), растения в своем развитии как бы «связывают» почву и атмосферу. Отсюда и появился термин – система «почва – растение – атмосфера». Эта система условно подразделяется на 6 горизонтальных слоев (рис. 3.5). По вертикали

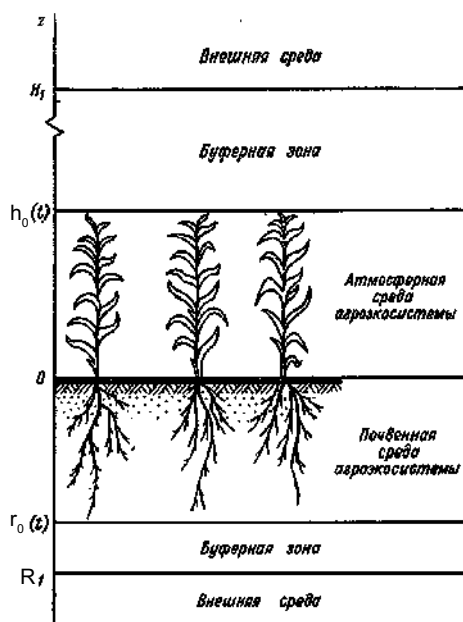


Рис. 3.5. К определению системы «почва–растение–атмосфера»

от поверхности почвы до верхней границы растительного покрова $h_0(t)$ и до нижней границы распространения корней $r_0(t)$ выделяется внутренняя среда – неотъемлемая составная часть агроэкосистемы. Это, соответственно, атмосферная и почвенная среды агроэкосистемы. Выше и ниже внутренней среды расположены переходные, буферные зоны, в которых отсутствуют элементы фитомассы, но физические характеристики этих зон благодаря процессам обмена сохраняют определенное влияние на характер и структуру агрофитоценоза (фитоценоза). Атмосферная и почвенная буферные зоны граничат с внешней средой агроэкосистемы.

Свойства внутренней атмосферной и почвенной сред агроэкосистемы, охватывающих приземный слой атмосферы и верхние слои почвы, определяются особенностями взаимодействия с другими физическими и физиологическими процессами, протекающими в компонентах агроэкосистемы (теплообмен и влагообмен в среде растений и почвы, фотосинтез, дыхание растений и др.).

Свойства внешней среды агроэкосистемы ($z > H_1$ и $z < R_1$) формируются под влиянием крупномасштабного влияния атмосферных процессов, а также процессов, происходящих в подстилающих почву породах, независимо от размеров агроэкосистемы. Границы внешней и внутренней среды агроэкосистемы весьма динамичны во времени и пространстве, они определяются сезонными особенностями роста и развития возделываемых сельскохозяйственных культур и, естественно, характером складывающихся агрометеорологических условий конкретных лет. Эти границы могут варьировать от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров.

3.1. Понятие об устойчивом развитии экосистем и агроэкосистем

В последние десятилетия XX века произошло заметное обострение проблем, охватывающих сложный комплекс взаимоотношений быстро растущего населения Земли с природой – ресурсами биосферы. Стала насущной необходимостью выработка новых путей оптимизации этих взаимоотношений и взаимодействия сообщества людей и природы.

В 1987 г. Международная комиссия по окружающей среде и развитию (МКОСР) опубликовала доклад «Наше общее будущее». В нем впервые была сформулирована концепция экологически устойчивого развития. Это *развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности*. «Устойчивость» – одно из фундаментальных понятий в функционировании экосистем, противоположное понятию «стабильность», характеризующему качество пассивной системы. Живые системы относительно стабильны, так как обладают способностью к частичным изменениям в процессе адаптации к меняющимся условиям внешней среды; незначительная нестабильность (флуктуации) – неперемнное условие истинной стабильности, устойчивости системы.

Упомянутый доклад был положен в основу концепции экономического развития человеческого сообщества: «Экономика не ограничивается созданием материальных ценностей, а экология не относится только к охране природы: оба эти понятия в равной мере касаются улучшения судьбы человечества». На Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992) в качестве новой парадигмы (принципиального характера) развития цивилизации была провозглашена концепция устойчивого развития, принятая всеми государствами (в том числе и Россией), в качестве национальной стратегии движения по этому пути. В развитие программных документов Конференции ООН (1992) в Российской Федерации была разработана Концепция и Стратегия перехода Российской Федерации к устойчивому развитию, закреплённая Указом Президента страны (01.04.1996 г. № 440).

Понятие «устойчивое развитие» имеет различные аспекты: экологический, экономический и социальный. Эти аспекты предполагают выработку новой идеологии паритетного развития экономики и природы, в первую очередь это экологическое нормирование использования природных ресурсов и внедрения в практику эффективного и рационального природопользования. Сущностью экологического нормирования является выявление предельно допустимых нагрузок (ПДН) на отдельные компоненты биосферы, экологически обоснованных и допустимых отклонений при различных антропогенных воздействиях, пределов устойчивости экосистем и агроэкосистем в целом (Милащенко Н.З., Соколов О.А. и др., 2000).

Совершенно очевидно, что в дальнейшем, с продолжающимся увеличением численности населения Земли и ростом объемов изъятия природных ресурсов, экологический аспект существования сообщества людей будет возрастать. Для этого экологизация экономического развития должна развиваться в направлении структурной перестройки экономики, изменения экспортной политики, развития энерго- и ресурсосберегающих технологий, малоотходных производств, а также прямых природоохранных мероприятий – строительства необходимых очистных сооружений, организации охраняемых природных территорий, реабилитации нарушенных экосистем, рекультивации земель и др. Индикаторы устойчивого развития должны разрабатываться для различных уровней: глобального, регионального, национального, локального, отраслевого и точечного, в том числе индикаторы интегрального типа (Агроэкология. Методология, технология, экономика. Т. 2, 2004).

К числу индикаторов устойчивого развития относятся площади, не нарушенные хозяйственной деятельностью людей, величина потребления природных ресурсов (минеральное сырьё, вода, земля, флора, фауна и др.), динамика потребления и потери чистой биологической продукции;

темпы истощения природных ресурсов, сокращение биоразнообразия, динамика объемов вредных выбросов в окружающую среду, затраты на природоохранные мероприятия и т.п.

Экологический аспект устойчивого развития сельскохозяйственного производства предусматривает систему ограничений и запретов. Например, применительно к почвам должны проводиться мероприятия, направленные на сохранение и повышение почвенного плодородия, исключение процессов физической, химической и биологической деградации, применение органических и минеральных удобрений на уровне бездефицитного баланса и оптимального количества, доступных для растений элементов питания, поддержание в почве токсикантов не выше предельно допустимых концентраций (ПДК) и допустимых остаточных концентраций (ДОК) и т.п.

Применительно к растениям – охрана и рациональное использование растительных ресурсов, не имеющих прямого отношения к сельскохозяйственному производству (биоразнообразие фитоценозов); внесение всех видов удобрений в дозах, оптимизирующих продуктивность и качество урожая возделываемых культур.

Известно, что накопление избытка нитратов в растительной продукции выше ПДК способствует развитию болезней и полегаяемости зерновых культур, загрязнению окислами азота почвы, открытых водоемов и грунтовых вод; применение пестицидов в дозах, не вызывающих аккумуляцию загрязнителей и вредных метаболитов (веществ, образующихся в растениях в процессе обмена веществ); оптимизация продуктивности и качества кормовых угодий и др.

Экологические системы обладают различной экологической емкостью в отношении антропогенных нагрузок. Поэтому экологические нормативы должны разрабатываться применительно к каждой почвенно-климатической зоне с учетом региональных особенностей сельскохозяйственного производства.

В процессе интенсивной сельскохозяйственной деятельности необходимы организация и ведение агроэкологического мониторинга – важной составляющей общей системы мониторинга состояния природной среды. Содержание агроэкологического мониторинга и схема мониторинга земель приведены на рис. 3.6 и 3.7.

Наблюдаемые в сельскохозяйственном производстве России негативные экологические, экономические и социальные проблемы проявились не в последние десятилетия. Они накапливались исторически, принимая различные социально-политические и экономические формы. Акад. А.А. Никонов, будучи президентом ВАСХНИЛ в течение восьми лет, в своей книге «Спираль многовековой драмы: аграрная наука и политика России» (1995) дал глубокий анализ исторических судеб крестьянства и аграрного сектора, изложил свои мысли по возрождению российской деревни во имя продовольственной безопасности всего населения страны.

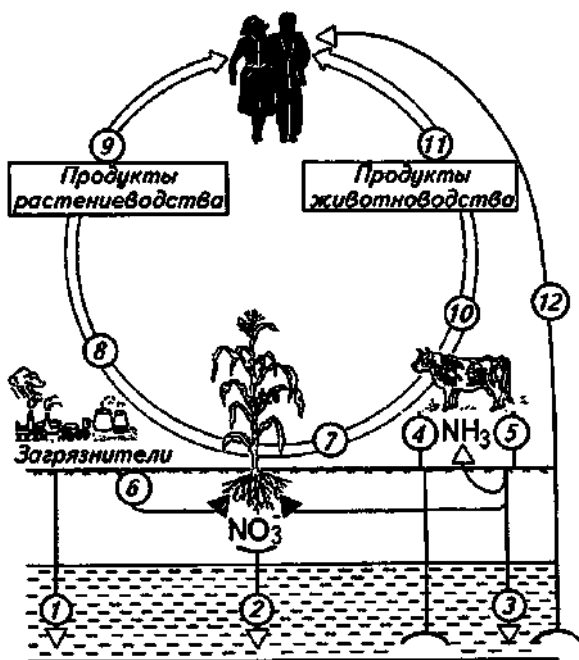


Рис. 3.6. Содержание агроэкологического мониторинга: 1–3 – сточные и грунтовые воды; 4, 12 – питьевые воды; 5 – выделения; 6 – токсиканты; 7 – корма; 8–11 – продукты питания

Следствием обострения проблем взаимодействия человеческого сообщества и природы и сопутствующих ему негативных последствий бесконтрольной эксплуатации ресурсов биосферы стала разработка и принятие в 1970 г. ЮНЕП (Программа ООН по окружающей среде) и ЮНЕСКО Международной программы «Человек и биосфера» (МАБ – Man and Biosphere). Целью этой программы стала организация в разных регионах мира комплексных многолетних наблюдений за последствиями воздействия хозяйственной деятельности человека на естественные процессы в биосфере и изучение обратного влияния этих процессов на человека. В выполнение программы МАБ включилось более 90 государств, в том числе и Россия. По убеждению президента Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина (ВАСХНИЛ) А.А. Никонова: «Общество будет процветать лишь в условиях свободы человека, господства здравого смысла, справедливости и согласия с природой» (1995).

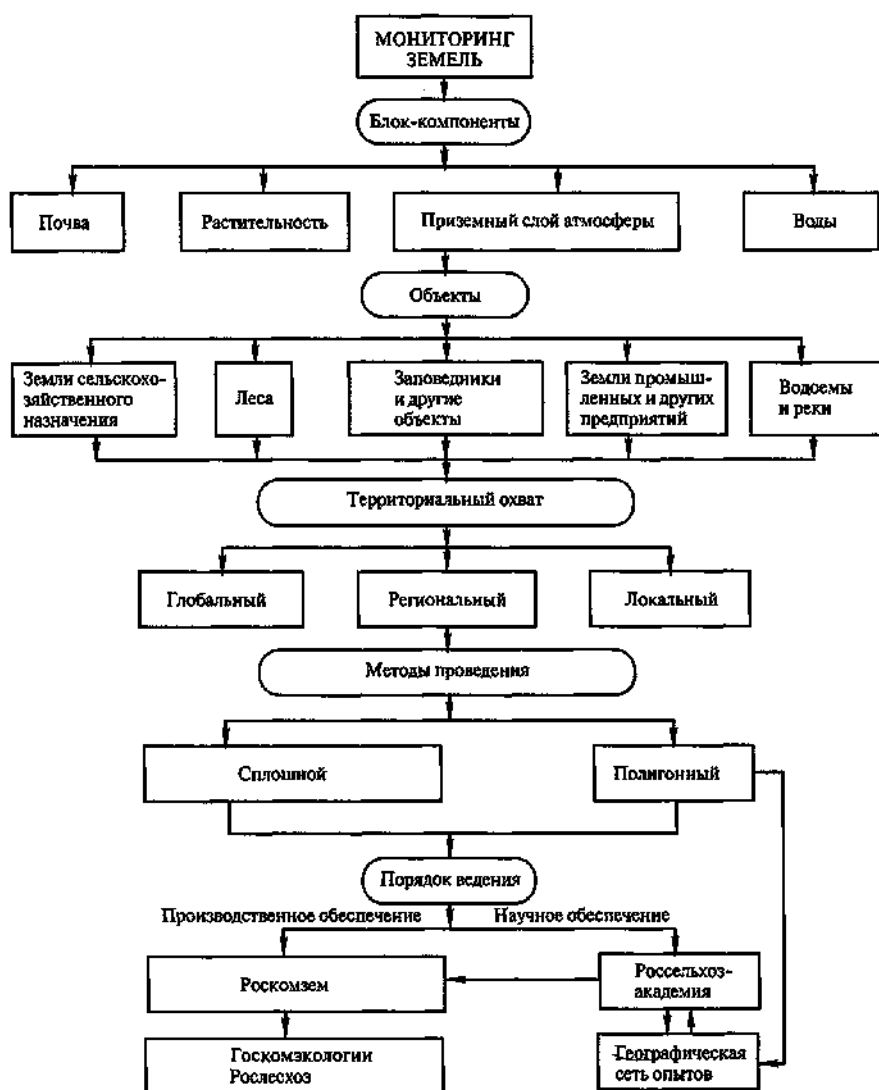


Рис. 3.7. Мониторинг земель и порядок его ведения

ГЛАВА 4

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ И ЕЕ МЕСТО СРЕДИ НАУЧНЫХ ДИСЦИПЛИН О ЗЕМЛЕ

*Наука самостоятельна только тогда,
когда предмет ее изучения, задачи и
конечные результаты, с которыми она
выходит в производство, не совпадают
с предметом, задачами и целями других наук.*

Ф.Ф. Давитая (1952),
акад. АН Грузинской ССР

На стыке различных областей знаний о природе в конце XIX столетия в России под влиянием передовых идей профессоров А.И. Воейкова и П.И. Броунова, сформировалась новая наука – **сельскохозяйственная метеорология**, – это наука, изучающая метеорологические, климатические, гидрологические и почвенные условия в их взаимодействии с объектами и процессами сельскохозяйственного производства (ГОСТ 17713–89). Еще в 1894 г. проф. А.В. Клоссовский – один из основоположников этой науки – писал: «Границы сельскохозяйственной метеорологии начинаются там, где объектом изучения являются параллельно погода и сельскохозяйственные явления. Прототипом подобного параллельного изучения могут служить наблюдения над периодическими явлениями в жизни животных и растений, или так называемые фенологические наблюдения». Почти 100 лет спустя почетный академик Российской сельскохозяйственной академии наук (до распада СССР – ВАСХНИЛ), известный ученый-агроном, Герой Социалистического Труда Т.С. Мальцев отмечал: «Работа крестьянина напоминает мне шахматную партию, в которой погода имеет преимущество первого хода. Своевременный ответный ход возможен в том случае, если к нему он подготовлен».

Сельскохозяйственная метеорология, как прикладная, научно-практическая область человеческих знаний, входит в состав географических наук.

За вековой путь своего становления и развития сельскохозяйственная метеорология впитала достижения метеорологии и климатологии, почвоведения, растениеводства и агрономии, экологии и физиологии растений и животных, математики, статистики и других наук. *Объектами исследования* сельскохозяйственной метеорологии являются растения, животные и среда их обитания (возделывания), а *предметом изучения* – их взаимодействие с погодой и климатом в географическом разрезе, при условии,

что организм и условия его существования рассматриваются, как неразрывное целое, как единство формы и содержания (Давитая Ф.Ф., 1952).

Сельскохозяйственная метеорология является комплексной наукой, включающей в себя самостоятельные научные разделы: агрометеорологию, агроклиматологию, агрогидрологию и зоометеорологию (ГОСТ 17713–89).

Агрометеорология – это наука, изучающая метеорологические и почвенные условия в их взаимодействии с процессами роста, развития, формирования урожая сельскохозяйственных культур, сенокосно-пастбищной растительности и агротехническими мероприятиями.

Агроклиматология – это наука, изучающая климатические условия в их взаимодействии с объектами и процессами сельскохозяйственного производства.

Агрогидрология – это наука, изучающая состояние, водно-физические свойства и водный режим почвы сельскохозяйственных угодий в их взаимодействии с метеорологическими условиями, объектами и процессами сельскохозяйственного производства.

Зоометеорология (зооклиматология) – это наука, изучающая влияние метеорологических (и климатических) условий на состояние и продуктивность сельскохозяйственных животных.

Агрометеорология, агроклиматология, агрогидрология и зоометеорология (зооклиматология) представляют собой стройные системы научных знаний, объединенных законами и понятиями, принципами, методами и средствами исследований.

Сельскохозяйственная метеорология, впитавшая достижения многих смежных наук, относится к разряду междисциплинарной науки, имеющей собственный объект исследований: сельскохозяйственные растения и животные в их взаимосвязи с физическими факторами окружающей среды и в зависимости от хозяйственной деятельности человека. Вековой опыт становления и развития сельскохозяйственной метеорологии убедительно показал возрастающую потребность в практическом использовании ее научных достижений в аграрном секторе России, многих стран мира и на международном уровне.

4.1. Принципы и методы агрометеорологических и зоометеорологических наблюдений (измерений) и исследований

Агрометеорологические наблюдения (измерения) производятся в **пунктах наблюдений** – это постоянные места, где производятся наблюдения за отдельными гидрометеорологическими величинами или их комплексом, атмосферными явлениями и другими показателями

состояния окружающей среды (РД 52.04.567–96). В системе Росгидромета – это **сетевая наблюдательная организация (СНО)** – организационная единица наземной сети наблюдений, осуществляющая наблюдения и руководство выполнением измерений в закрепленных пунктах, а также обработку результатов наблюдений в соответствии с программой работ (РД 52.04.567–96). Ранее подобные пункты наблюдений назывались станциями и постами, совокупность которых по той или иной территории представляла собой *сеть станций и постов*.

К категории пунктов (маршрутов) наблюдений условно можно отнести также временные пункты, создаваемые, например, при производстве микроклиматических наблюдений на сельскохозяйственных угодьях, при изучении микроклиматических особенностей различных ландшафтов почвенно-климатических зон и высотных поясов в горах, при изучении биогеоценозов, а также при проведении маршрутно-стационарных экспедиционных обследований различных территорий.

Ежегодно каждой СНО вышестоящими территориальными организациями – Управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) или Центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) – устанавливается план-задание по производству комплекса метеорологических, агрометеорологических и других наблюдений, сроки и методы проведения которых регламентируются действующими наставлениями и инструкциями.

Наземная сеть наблюдений Росгидромета является также базой экспериментальных наблюдений, опытной эксплуатации новых технических средств измерений, апробации новых методик наблюдений, проведения производственной практики студентов вузов и учащихся средних специальных учебных заведений (гидрометеорологических техникумов).

Основная (федерального уровня) сеть СНО, являющаяся корреспондентом Гидрометеорологического центра России (ГМЦ России), финансируется из федерального бюджета, дополнительная (территориального уровня), предназначенная для решения локальных задач в интересах местных потребителей информации, финансируется из местного бюджета или за счет заинтересованных организаций.

Агрометеорологические станции организуются, как правило, на базе действующих метеорологических станций, расположенных в зонах интенсивного сельскохозяйственного производства. Одной из особенностей наземных агрометеорологических наблюдений является большое количество характеристик, которые определяются визуально (без измерений) и представляют собой качественные оценки, например определение фаз развития растений и процент охвата растений наблюдаемой фазой, балловая оценка состояния поверхности почвы, оценка состояния сельскохозяйственных животных, находящихся на выпасе, оценка степени

полегания зерновых посевов и т.п. Естественно, что точность и полнота визуальных качественных наблюдений находится в прямой зависимости от опыта и добросовестности наблюдателя.

Научно-методическое руководство сетью пунктов наземных агрометеорологических наблюдений осуществляет Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ), с 2011 г. – Федеральное государственное бюджетное учреждение (ФБГУ) «ВНИИСХМ», являющееся головным институтом в этом научно-практическом направлении в системе Росгидромета.

Первым и основным принципом наземных агрометеорологических наблюдений является сопряженность (параллельность) наблюдений за условиями погоды, состоянием почвы, за ростом, развитием и формированием продуктивности сельскохозяйственных культур. В число объектов наблюдений также включают сеяные травы, естественную пастбищную растительность, а также плодово-ягодные и дикорастущие древесно-кустарниковые породы. Этот принцип достигается тем, что наблюдения за растениями и состоянием почвы проводятся, как правило, на небольшом расстоянии от метеорологической площадки. В отдельных случаях наблюдения за некоторыми параметрами окружающей среды, такими, как осадки, температура почвы на глубине залегания узла кущения озимых зерновых культур, глубина промерзания почвы, температура в среде растений и т.п., проводятся непосредственно в поле.

Вторым принципом является сопоставимость агрометеорологических наблюдений, достигаемая едиными сроками их проведения по единым методикам, формам записи результатов и правилам обработки материалов наблюдений. Техника и сроки проведения наблюдений, порядок записи и обработки материалов изложены и регламентируются в действующих руководящих и нормативных документах: Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11, ч. I, II. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000 и в ряде других.

Третьим принципом агрометеорологических наблюдений является выбор репрезентативных (т.е. характерных, представительных) участков или полей для наблюдений, типичных для территории деятельности станции (поста). Столь же репрезентативными должны быть объекты наблюдений: отдельные растения сельскохозяйственных культур, в том числе плодово-ягодных и дикорастущих пород растений. Выбранные растения должны соответствовать средним характеристикам таковых по состоянию, высоте, фазе развития и т.п., произрастающим на наблюдательном участке или на поле.

Четвертый принцип требует проведения всех инструментальных наблюдений типовыми средствами измерений, поверенными метрологическими организациями Росгидромета или Госстандарта России; при

этом метрологические поверки должны проводиться в определенные контрольные сроки.

Пятый принцип агрометеорологических наблюдений предполагает оперативную передачу результатов наблюдений и измерений (в контрольные сроки после завершения первичных данных наблюдений) в центры сбора информации – кустовые метеорологические станции, Главный радиометеорологический центр (ГРМЦ), Главный вычислительный центр (ГВЦ), центры по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) и др.

Шестой принцип предусматривает возможность сочетания при использовании данных наземных агрометеорологических наблюдений с результатами дистанционных (самолетных, космических) измерений и оценок состояния почвы и растительного покрова (состояния, фазы развития растений, биомассы и т.п.).

Работники ряда метеорологических станций, расположенных в районах пастбищного животноводства, привлекаются для проведения *зоометеорологических наблюдений*, – это комплекс сопряженных наблюдений за погодными условиями и специальных наблюдений за состоянием выпасаемых сельскохозяйственных животных и за проведением основных мероприятий в животноводстве в теплый и холодный периоды года. К основным мероприятиям относятся летний и зимний выпас животных, перегоны скота весной и осенью (в горах), стрижка животных, подвоз кормов и подкормка животных, расплодная кампания (окот) и т.п. Весь комплекс наблюдений регламентируется действующими нормативными документами: Инструкция по производству агрометеорологических и зоометеорологических наблюдений. Л.: Гидрометеоиздат, 1978 и Наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 11. Специализированные агрометеорологические наблюдения. Кн. 1. Агрометеорологические наблюдения в районах Северного оленеводства. 2007 (РД 52.33.681–2006).

К числу основных методов агрометеорологических наблюдений и исследований относятся:

1. Метод сопряженных (параллельных) наблюдений за состоянием, ростом, развитием и формированием урожайности растений и агрометеорологическими условиями, в которых возделываются и произрастают объекты наблюдений. С помощью этого метода на материалах полевых (и лабораторных) наблюдений устанавливаются количественные и качественные связи между условиями погоды и состоянием, ростом, развитием и формированием продуктивности растений. Выявляются потребности растений в основных факторах среды – количестве света, тепла, влаги, питательных веществ; определяются пороговые (критические) значения этих факторов для жизнедеятельности различных культур, сортов и естественной пастбищной и сенокосной растительности.

2. Метод учащенных сроков сева. Агрометеорологические исследования объектов растениеводства неизбежно связаны с сезонным развитием природы. Для выявления закономерностей роста и развития растений необходим многолетний ряд наблюдений. С целью ускорения периода исследований в агрометеорологии широко используется метод учащенных сроков сева изучаемых растительных объектов. При этом высеваемые растения (например, через каждые 5–10 дней, начиная с весны и до конца вегетационного периода) попадают в неодинаковые условия освещенности, тепла и влаги. Сопряженные наблюдения за метеорологическими условиями, ростом и развитием растений позволяет собрать разнообразные сведения о реакции растений на изменяющиеся условия их произрастания. Этот метод применяется на делянках одного поля или в лабораторных условиях.

3. Метод географических посевов в различных почвенно-климатических зонах страны или, реже, одновременно в различных странах и даже на разных континентах. Последний вариант применяется очень редко в связи с большими организационными трудностями. Этот метод предусматривает использование идентичного посевного материала, соблюдения единообразия агротехнических приемов возделывания и методики наблюдений. Только при соблюдении этих правил различия в почвенно-климатических условиях отразятся на особенностях роста, развития и формирования урожая изучаемых растений (культур, сортов и гибридов).

По существу, этот метод позволяет решать ту же задачу, что и метод учащенных сроков сева, поскольку исследуемые растения возделываются в различных условиях продолжительности и интенсивности освещенности, теплового и водного режимов. Метод позволяет, в частности, определить районы, наиболее благоприятные для выращивания той или иной культуры (сорта, гибрида), где она дает наиболее высокие, стабильные урожаи хорошего качества.

4. Экспериментально-полевой метод измерений предусматривает использование различных стационарных и передвижных камер искусственного климата (фитотронов), газометрических экологических камер, низкотемпературных шкафов (камер), специальных камер, позволяющих изменять продолжительность светового дня теплиц и т.п. устройств, регулирующих по программам опытов агрометеорологические условия. Такие эксперименты позволяют наблюдать за реакцией растений на заданные параметры и режимы света, тепла, влаги, газового состава и питательных элементов.

5. Метод дистанционного (неконтактного) определения параметров подстилающей поверхности (почвы, посевов сельскохозяйственных культур, растительного покрова), фенологического состояния и плотности растений на единице площади, надземной биомассы или отдельных элементов растений – площади листьев, элементов

продуктивности растений, а также за температурой и влажностью подстилающей поверхности и т.п. Метод предусматривает использование специальной аппаратуры, устанавливаемой на различных видах наземного транспорта, на самолетах, вертолетах или искусственных спутниках Земли. Этот метод измерения и исследования применяется для получения информации об изучаемых объектах на больших площадях.

6. Картографический метод исследования используется при составлении климатических, агроклиматических карт и атласов различных территорий, микроклиматических карт землепользования отдельных хозяйств с целью оценки агроклиматических ресурсов, проведения климатического и агроклиматического районирования, а также наиболее рационального размещения сельскохозяйственных культур и гибридов.

7. Метод математической статистики, позволяющий обрабатывать материалы массовых наблюдений с целью выявления надежных количественных связей роста, развития и формирования продуктивности растений с агрометеорологическими условиями.

8. Метод физико-математического моделирования позволяет с помощью математического аппарата и выявленных физических закономерностей среды обитания растений и физиологических процессов жизнедеятельности самих растений (фотосинтез, дыхание, водный режим и др.) описывать влияние комплекса агрометеорологических условий на рост, развитие и формирование продуктивности растений, а также исследовать процессы обмена теплом, влагой и энергией в сложной и динамичной системе «почва – растение – атмосфера».

9. Сравнительно-исторический метод базируется на сравнении климатических, агроклиматических (агрометеорологических) условий и соответствующих характеристик сельскохозяйственного производства прошлых лет (временных периодов) с текущими или ожидаемыми изменениями этих условий и ожидаемым состоянием сельскохозяйственного производства. В качестве источника информации о состоянии объектов сельскохозяйственного производства в их взаимодействии с климатическими и агрометеорологическими условиями прошедших лет используются результаты прошлых наблюдений, зафиксированные в разное время в виде различных документов, например каталогов опасных явлений погоды – засух, неурожайных лет, суровых зим, их текстовых описаний, картографического материала и т.п.

Сельскохозяйственная метеорология представляет собой научную систему специфических знаний, объединенных законами, понятиями и методологией, исследующей во времени и пространстве метеорологические, климатические, гидрологические и почвенные условия в их взаимодействии с агроэкосистемами, процессами их культивирования, а также с биоценозами естественных экосистем.

4.2. Основные биологические и экологические законы, используемые в сельскохозяйственной метеорологии

Перечисленные методы агрометеорологических исследований базируются на использовании основных биологических и экологических законов.

1. Закон неравноценности факторов среды для растений. Сущность закона заключается в том, что не все факторы среды оказывают одинаковое воздействие на растительный организм. По своему влиянию на растения они подразделяются на основные и второстепенные. *Основные факторы – свет, тепло, влага, воздух, питательные вещества и субстрат*, оказывающие непосредственное прямое влияние на рост, развитие и формирование продуктивности в течение всего периода жизни растений на всей территории их произрастания. К *второстепенным (дополнительным) факторам* относятся такие, которые лишь корректируют (усиливают или ослабляют) воздействие основных факторов только в отдельные периоды жизни растений и, как правило, на локальных территориях – ветер, облачность, ориентация и крутизна склонов в горах и т.п. Например, облачность ослабляет интенсивность солнечной радиации, снижает температуру подстилающей поверхности и воздуха; ветер усиливает испарение с поверхности почвы (воды) и транспирацию растений, турбулентность приземного слоя воздуха и теплообмен в среде растений и т.п.

2. Закон равнозначности (или незаменимости) основных факторов жизни. Жизнедеятельность растений обеспечивается такими факторами среды, как свет, тепло, влага, воздух, питательный субстрат (почва). Их роли равнозначны, поскольку ни один из факторов не может быть исключен или заменен другим из перечисленных. Совокупность воздействия на растения этих факторов обеспечивает то или иное состояние, интенсивность роста, развития и формирования продуктивности растений.

3. Закон критических периодов в жизни растений был сформулирован проф. П.И. Броуновым: «В отдельные периоды жизни растения особо чувствительны к определенным количественным значениям основных факторов среды – к уровню температуры, количеству влаги в почве, освещенности и др.». В жизни растений – это временной промежуток биологического цикла (обычно вегетационного периода), в течение которого растению присуща максимальная чувствительность к определенным количественным значениям факторов среды, например почвенная засуха в фазы кущения, выхода в трубку или молочно-восковой спелости зерна у злаков, или критические температуры почвы на глубине залегания узла кущения зимующих злаков при отсутствии или незначительной высоте снежного покрова. Следствием неблагоприятных условий, совпадающих по времени с критическим периодом в жизни растений, является значительное снижение урожайности сельскохозяйственных культур.

4. Закон минимума (или лимитирующего фактора). Даже единственный фактор за пределами своего оптимума приводит к стрессовому состоянию организма, а в экстремальных величинах – к его гибели, следовательно, состояние растения, его конечная продуктивность определяются фактором, находящимся в минимуме при оптимальных прочих условиях. Таким фактором, например, может стать недостаток почвенной влаги или пониженная температура (в том числе заморозок) в критические периоды жизни растений; низкая освещенность, нарушающая длительное время процессы фотосинтеза растений. В экологии и агрометеорологии этот закон называют также по имени его автора – немецкого химика Ю. Либиха (1840).

5. Закон толерантности (от лат. *tolerantia* – терпение) был сформулирован американским зоологом В. Шелфордом (1913): существование вида определяется как недостатком, так и избытком любого из ряда факторов, имеющих уровень, близкий к пределу выносливости (переносимости) данным организмом. В связи с этим все факторы, уровень которых приближается к пределам выносливости организма или превышает ее, называются *лимитирующими*. Таким образом, организмы характеризуются *экологическим минимумом* и *экологическим максимумом*, реагируя сходным образом на оба наихудших значения факторов, а их выносливость к воздействиям в диапазоне между этими крайними величинами названа *пределом толерантности вида*.

6. Закон оптимума (или совокупного действия факторов). Максимальная продуктивность растений формируется только при оптимальном количественном сочетании основных и второстепенных факторов в жизни растений в критические периоды в условиях оптимального применения агротехники возделывания сельскохозяйственных культур.

По-существу, этот закон является частным случаем фундаментального биологического принципа, называемого *законом факторного оптимума*. Его сущность состоит в том, что для каждого вида растений, животных и человека существует оптимум, зоны угнетения (стрессовые зоны) и пределы выживания, определяемые каждым фактором окружающей среды. На рис 3.1 (см. главу 3) представлена общая схема влияния экологического фактора на жизнедеятельность организма.

7. Закон максимума. Количественное увеличение параметров экологических условий не может увеличить биологическую продуктивность организма или хозяйственную производительность посева (агроценоза), или экосистемы сверх вещественно-энергетических лимитов, определенных наследственными свойствами биологических объектов и их сообществ.

8. Закон последовательного прохождения фаз развития. Фазы развития растений (и периоды развития животных) могут следовать лишь в эволюционно закреплённом (исторически, экологически

обусловленном) порядке, обычно от относительно простого строения (состояния) к более сложному. Как правило, промежуточные фазы (или этапы) не выпадают в процессе развития, но в отдельных случаях складывающихся агрометеорологических условий возможно ускоренное их прохождение. Этот закон – логическое следствие диалектики развития природных процессов: ничто не может индивидуально пройти развитие от старости к молодости.

9. Закон фотопериодической реакции (или физиологических часов). Растения реагируют на продолжительность дня и ночи, ускоряя или замедляя развитие при изменении светлой части суток (Шульгин А.М., 1978).

10. Закон плодосмены. Чередование сельскохозяйственных культур в пространстве и во времени (севооборот) при прочих равных условиях обеспечивает получение более высоких урожаев, по сравнению с многократным посевом одной и той же культуры на одном поле (монокультура).

11. Закон убывающего (естественного) плодородия. В условиях многолетних посевов монокультуры, вследствие изъятия питательных веществ из почвы при формировании урожая и вывозе его с полей, а также выноса питательных веществ при обильных и длительных осадках в глубокие горизонты почвы и речную сеть, на культивируемых землях происходят нарушения процессов почвообразования и снижение естественного плодородия почв. Этот процесс частично нейтрализуется накоплением биомассы подземных частей культурных растений, но главным образом – внесением удобрений (созданием искусственного плодородия). Общая интенсификация сельскохозяйственного производства позволяет частично нейтрализовать проявление этого закона.

12. Закон совокупности или закон совместного действия природных факторов. Величина урожайности зависит не от отдельного, пусть даже лимитирующего фактора, а от всей совокупности факторов среды одновременно. Вклад каждого отдельного фактора в их совокупном влиянии различен и может быть определен количественно. Иногда этот закон называют *законом совместного действия природных факторов* или законом Митчерлиха Э. – Тинемана А. – Бауле Б.

13. Закон периодической географической зональности. Тепловой и водный балансы земной поверхности в природной географической среде, как правило, являются тем главным механизмом, который определяет интенсивность и характер всех форм обмена энергией и веществом между основными процессами и компонентами географической среды. Это наглядно обнаруживается при сравнении физико-географических поясов Северного и Южного полушарий, а также при их сравнении по широте, с юга на север, с вертикальной зональностью в горных системах: от предгорий до высокогорий.

Со сменой физико-географических поясов аналогичные ландшафтные зоны и их некоторые общие свойства периодически повторяются. Установленная законом периодичность проявляется в том, что величины индекса сухости (отношение испаряемости к осадкам за год или часть года) меняются в разных зонах от 0 до 4–5; трижды между полюсами и экватором они близки к единице – этим значениям соответствует наибольшая биологическая продуктивность ландшафтов (А.А. Григорьев, М.И. Будыко).

14. Законы Фурье (распространения тепла в почве).

Первый закон. Чем больше плотность и влажность почвы, тем лучше она проводит тепло, тем быстрее распространяется в глубину и тем глубже проникают колебания температуры. Независимо от типа почвы период колебаний температуры не изменяется с глубиной. С увеличением последней амплитуда колебаний температуры уменьшается.

Второй закон. Возрастание глубины почвы в арифметической прогрессии приводит к уменьшению амплитуды ее температуры в прогрессии геометрической.

Третий закон. Сроки наступления максимальных и минимальных температур, как в суточном, так и в годовом ходе, запаздывают с увеличением глубины почвы пропорционально глубине.

Четвертый закон. Глубины слоев постоянной суточной и годовой температуры относятся между собой как корни квадратные из периодов колебаний, т.е. как 1: $\sqrt{365}$ (Хромов С.П., Петросянц М.А., 1994).

В исследовательской работе научных учреждений Росгидромета и в других национальных гидрометеорологических службах стран СНГ широко используются перечисленные методы исследований и законы, разрабатываются новые подходы при решении теоретических и прикладных задач. Успехи агрометеорологической науки и уровень подготовки специалистов-агрометеорологов во многом определяют характер и полноту оперативного агрометеорологического обеспечения аграрного сектора страны.

ГЛАВА 5

КРАТКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Многомиллионная крестьянская Россия, расположенная в суровых климатических условиях для сельскохозяйственного производства, постоянно испытывала недостаток продовольствия для основной массы населения. Примитивное ведение земледелия и, как результат, низкие урожаи крестьянских хозяйств не могли обеспечить быстро растущий экспорт хлеба, потребность внутреннего рынка в хлебе и на сельскохозяйственное сырье для развивающейся промышленности России.

С древнейших времен крестьянское земледелие в России испытывало тяжелые последствия опустошительных засух, суховеев, черных бурь, чрезмерно обильных дождей, градобитий, поздних весенних и ранних осенних заморозков, неблагоприятных условий перезимовки озимых культур и других стихийных бедствий, обрекавших людей на нищету и голод. Полная зависимость от складывающихся погодных условий заставляла земледельца наблюдать за явлениями погоды и их влиянием на посевы.

Многолетние наблюдения земледельцев, обобщенные в форме народных примет, передавались из поколения в поколение. Назовем лишь некоторые из них: «Коли в марте дождь льет, плохие надежды подает»; «С Евдокии (1 марта) погоже, все лето пригоже»; «Ни в марте воды, ни в апреле травы»; «Апрель теплый, май холодный – год хлебородный»; «Кто по календарю сеет, тот плохо веет»; «На Егория (6 мая) мороз – будет просо и овес, на Егория роса – будут добрые овса»; «Кукушка закуковала – пора лен сеять»; «Земляника красна – не сей овса напрасно»; «Сырое лето и теплая осень – к долгой зиме»; «Смотри день по Мокриде (19 июля): Мокрида мокра и осень мокра (и наоборот, Мокрида суха и осень сухая)»; «Снег на полях – хлеб в закромах» и многие другие. Знание народных примет помогало земледельцу снизить степень риска в получении урожая.

По существу, крестьянская мудрость, накопленная веками в различных регионах России, стала источником народной агрометеорологии – началом зарождения нового научного направления. Многие поколения передовых ученых-агрономов стремились поднять уровень культуры земледелия в стране, избавить крестьянское хозяйство от страшных недородов – предвестников голода и гибели людей.

Первые дошедшие до нас высказывания о необходимости изучения влияния погоды на сельскохозяйственное производство принадлежат

великому русскому ученому М.В. Ломоносову. В 1758 г. в одном из выступлений на заседании Российской академии наук он говорил: «Предсказание погоды сколь нужно и полезно на земле, ведаёт больше земледелец, которому во время сеяния и жатвы ведро, во время рашения – дождь, благодетельнейший теплою надобен».

В конце XVIII – начале XIX вв. передовые ученые А.Т. Болотов и И.М. Комов проводили систематические наблюдения за условиями погоды и состоянием посевов с целью выявления влияния погодных условий на произрастание сельскохозяйственных культур.

В 1854 г. Д. Реутович выпустил первую оригинальную книгу «Сельскохозяйственная метеорология», аналогов которой в мире еще не было. В ней были рассмотрены главным образом вопросы предсказания погоды и использования их в сельском хозяйстве.

Становление сельскохозяйственной метеорологии как науки произошло только в конце XIX столетия, ее основоположниками были выдающиеся русские ученые Александр Иванович Воейков (1842–1916) и Петр Иванович Броунов (1852–1927). В 1884 г. в своей знаменитой книге «Климаты земного шара, в особенности России» проф. А.И. Воейков впервые оценил и практически показал важность использования климатических данных в сельскохозяйственном производстве. Он дал оценку климатических ресурсов страны для нужд сельского хозяйства, в частности кукурузы на зерно и фураж, разработал агроклиматическое обоснование возделывания субтропических культур (чая, цитрусовых и др.) на юге России, обосновал развитие орошаемого земледелия в южных районах страны, развитие хлопководства в Туркестане (ныне Центрально-азиатские суверенные государства). А.И. Воейков сделал важный вывод о роли снежного покрова, показал целесообразность проведения снегозадержания как агротехнического приема для улучшения условий влагообеспеченности посевов и перезимовки озимых культур. Многие его исследования посвящены проблемам облесения степной и лесостепной зон, доказал роль лесопосадок в улучшении водного режима почв в засушливых регионах.

Катастрофические засухи 1881, 1882, 1885 гг., тяжелейшие последствия жестоких засух 1891–1892 гг. в Украине и России обратили внимание ученых и широкой общественности на значение климата и погоды для сельскохозяйственного производства.

В 1883–1886 гг. известный физик и метеоролог, проф. Новороссийского университета А.В. Клоссовский (1846–1917) организовал метеорологическую сеть на юге Украины.

В 1884 г. Метеорологическая комиссия Русского географического общества под председательством А.И. Воейкова разработала первую программу метеорологических наблюдений в сельском хозяйстве. В этой программе были заложены основополагающие принципы проведения

полевых наблюдений, не потерявшие своего методологического значения и в наши дни. В 1885 г. А.И. Воейков организовал первые в России 12 агрометеорологических станций. С этого момента Россию принято считать родиной сельскохозяйственной метеорологии.

Проф. П.И. Броунов в начале 90-х гг. XIX в. начал создавать Приднепровскую метеорологическую сеть, в программу наблюдений которой были включены наблюдения за сельскохозяйственными культурами. В 1897 г. по инициативе и при активном участии П.И. Броунова при Департаменте земледелия России было организовано Метеорологическое бюро Ученого комитета Министерства земледелия и государственных имуществ – первое в России и в мире научное агрометеорологическое учреждение. Руководителем этого бюро был назначен проф. П.И. Броунов.

В 1894 г. адъюнкт-профессор Московского сельскохозяйственного института В.А. Михельсон приступил к организации Среднерусской метеорологической сети, а спустя четыре года передал все станции Метеорологическому бюро с целью объединения всей наблюдательной сети и подчинения станций единому методическому центру.

С 1901 г. бюро стало издавать «Труды по сельскохозяйственной метеорологии» под редакцией П.И. Броунова. В «Трудах...» публиковались научно-методические вопросы организации наблюдательной агрометеорологической сети, обобщения результатов работы станций, а также научные исследования в области сельскохозяйственной метеорологии. За 28 лет вышло в свет 24 выпуска «Трудов...», 19 из них под его редакцией.

П.И. Броунов опубликовал несколько монографий, в одной из них – «Полевые культуры и погода» (1912) – он обобщил первые итоги агрометеорологических исследований. Ему принадлежит открытие закона о критических периодах в развитии растений, им были установлены критерии засушливости, определены вероятности наступления засушливых декад в европейской части России, выделены климатические и сельскохозяйственные районы России.

Роль и значение сельскохозяйственной метеорологии в расширении и укреплении сельскохозяйственного производства в России из года в год повышались. За рубежом агрометеорологические исследования начались во второй половине XIX века. Убедительным подтверждением полезности сельскохозяйственной метеорологии для нужд сельскохозяйственного производства явилось учреждение постоянной технической Комиссии по сельскохозяйственной метеорологии (КСХМ) на X сессии Международной метеорологической организации (ММО) в апреле 1913 г. в г. Риме. В числе организаторов этой комиссии от России был проф. П.И. Броунов.

В годы Первой мировой и Гражданской войн агрометеорологическая сеть России, созданная усилиями А.И. Воейкова, А.В. Клоссовского и П.И. Броунова, сократилась на две трети.

Новый этап в развитии сельскохозяйственной метеорологии начался в апреле 1921 г., когда было подписано Постановление Совета Труда и Оборона РСФСР, предусматривающее создание агрометеорологической службы – Метеорологическая часть Народного Комиссариата земледелия (Наркомзем) РСФСР. Такая служба создавалась «в целях организации планомерного наблюдения за состоянием посевной площади, своевременного получения сведений об условиях и ходе произрастания хлебов и о размерах ожидаемого урожая ...». Впервые в истории в государственном масштабе была организована сельскохозяйственная метеорологическая служба, называемая в первое время Служба урожая – Метеорологическая часть Наркомзема РСФСР.

В тяжелые для молодого советского государства годы заново создавалась сеть станций агрометеорологических наблюдений. При этом были использованы основные принципы организации сети, разработанные А.И. Воейковым и П.И. Броуновым.

В 1921 г. агрометеорологическая информация поступала в Главное метеорологическое управление (Главмет) почти со 100 станций, по данным которых весной 1922 г. Главмет составил и опубликовал первый «Сельскохозяйственный бюллетень» № 1 (август 1921 г. – апрель 1922 г.). Эта оперативно-информационная форма представления данных потребителям сохранилась до настоящего времени в Гидрометеорологическом центре России, в гидрометеорологических центрах республиканских и территориальных УГМС. Таким образом, вскоре после установления советской власти в России одновременно с развитием исследовательской работы в области сельскохозяйственной метеорологии возникла и начала развиваться другая ее отрасль – оперативная агрометеорологическая служба.

В 1923 г. на базе Ученого комитета Департамента земледелия был организован Государственный институт опытной агрономии (ГИОА), реорганизованный впоследствии во Всесоюзный институт растениеводства (ВИР), в котором функционировал отдел сельскохозяйственной метеорологии. Оперативная агрометеорология развивалась быстрыми темпами, поэтому возникла потребность в создании научного центра по сельскохозяйственной метеорологии. В 1932 г. по инициативе П.И. Броунова на базе отдела сельскохозяйственной метеорологии ВИР в г. Ленинграде был организован Агрогидрометеорологический институт (АГМИ), объединивший всю научно-исследовательскую работу в этой области.

Несколько позже, в 1934 г., на базе Метеорологического бюро г. Саратова и отдела сельскохозяйственной метеорологии Саратовской опытной сельскохозяйственной станции был создан Институт засухи и суховеев, который возглавил проф. Р.Э. Давид (1887–1939). Организация этого института была связана в первую очередь с частыми, порой катастрофическими засухами, поражавшими зерновые районы Поволжья и других регионов страны.

В АГМИ и в Институте засухи и суховеев была развернута широкая программа агрометеорологических исследований: разрабатывалась теория агрометеорологических прогнозов, проводились полевые эксперименты, изучалась динамика запасов почвенной влаги на территории СССР, влияние снегозадержания на формирование запасов почвенной влаги с целью оценки влагообеспеченности посевов. Впервые был разработан и опубликован «Мировой агроклиматический справочник», продолжалось изучение засух и суховеев, были разработаны основы агрометеорологического обслуживания сельскохозяйственного производства. Первый учебник – «Сельскохозяйственная метеорология» (1936) – был подготовлен академиком ВАСХНИЛ Р.Э. Давидом и его коллегами.

Академик Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина (ВАСХНИЛ) Р.Э. Давид внес значительный вклад в укрепление и развитие сельскохозяйственной метеорологии как науки, нацеленной на конкретную научно-информационную помощь сельскохозяйственному производству. Большая заслуга в развитии и применении этих исследований принадлежит Г.Т. Селянинову, С.Н. Небольсину, П.И. Колоскову и другим исследователям.

Значительные структурные преобразования произошли в 1936 г. при создании Главного управления гидрометеорологической службы (ГУГМС) при Совете Народных Комиссаров. В 1937–1938 гг. АГМИ был реорганизован в отдел агрометеорологии ВИР (г. Ленинград), а Институт засух и суховеев – в отдел агрометеорологии Института земледелия Юго-Востока (г. Саратов); отдел агрометеорологии Центрального института погоды был реорганизован в Агрометеорологическое бюро Гидрометеослужбы с функциями проведения научно-исследовательской и оперативной работы (1940).

С началом Великой Отечественной войны вся агрометеорологическая служба в июле 1941 г. была выделена из состава ГУГМС и передана Наркомзему СССР, в составе которого было организовано Главное управление агрометеорологической службы. В период войны это Управление делало все возможное для сохранения и развития работ по агрометеорологии; на территориях, освобожденных от оккупантов, восстанавливалась наблюдательная сеть, организовывались отделы агрометеорологии во всех областных и краевых земельных отделах, а в наркоматах союзных республик – управления агрометеорологической службы.

В суровые военные годы продолжалась и научно-исследовательская работа: С.А. Вериге выполнила обобщение материалов по влажности почвы, А.А. Шиголев разрабатывал методы фенологических оценок и прогнозов, А.В. Процеров дал характеристику влагообеспеченности посевов в европейской части СССР, Е.А. Цубербиллер исследовала влияние суховеев на сельскохозяйственные посевы. Д.И. Шашко с коллективом

сотрудников составил агроклиматическую характеристику ряда регионов страны. Л.Н. Бабушкин исследовал влияние агрометеорологических и микроклиматических условий на рост и развитие хлопчатника в Узбекистане. В Украине В.П. Попов разработал методики наблюдений за испарением с поверхности почвы, предложил несколько конструкций почвенных испарителей. М.С. Кулик разработал критерии засушливости, П.И. Колосков завершил агроклиматическое районирование Казахстана и т.п.

В 1943 г. Центральный институт погоды был переименован в Центральный институт прогнозов (ЦИП), в котором были отдел агрометеорологии с функциями исследований и научно-методического руководства сетью и отдел агрометеорологических прогнозов.

В 1948 г. агрометеорологическая служба была вновь возвращена в систему Главного управления гидрометеорологической службы СССР. В этом же году в Одесском гидрометеорологическом институте (ОГМИ) было создано агрометеорологическое отделение, преобразованное впоследствии в агрометеорологический факультет. Более 40 лет, вплоть до распада СССР, этот факультет был всесоюзной «кузницей кадров», выпускающий инженеров-агрометеорологов для всей страны. Многие агрометеорологи – выпускники ОГМИ – стали в последующие годы ведущими учеными и специалистами в области сельскохозяйственной метеорологии.

В 50-е–70-е гг. в системе ГУГМС были организованы региональные (зональные) научно-исследовательские институты: в Казахстане (г. Алма-Ата), в Средней Азии (г. Ташкент), в Украине (г. Киев), в Закавказье (г. Тбилиси), в Западной Сибири (г. Новосибирск) и на Дальнем Востоке (г. Владивосток). Во всех этих институтах были созданы отделы агрометеорологических исследований, выполняющие в основном региональные работы.

В эти годы в Гидрометеорологическом центре СССР (бывший ЦИП), в региональных гидрометеорологических институтах были разработаны и внедрены в оперативную практику многие методы агрометеорологических прогнозов, в том числе урожайности (впоследствии и валового сбора) основных сельскохозяйственных культур, прогнозов перезимовки озимых и плодовых культур (Е.С. Уланова, В.А. Моисейчик, К.В. Кириличева, М.С. Кулик, Ю.И. Чирков и др.). Методы прогнозов запасов влаги в почве и методы оптимизации водного режима сельскохозяйственных полей были разработаны А.М. Алпатьевым, С.А. Вериго, Л.А. Разумовой, А.Р. Константиновым, Ф.А. Муминовым, А.М. Шульгиным, С.И. Харченко и др.

Ученики и последователи проф. Г.Т. Селянинова активно продолжали агроклиматические исследования (И.А. Гольцберг, Ф.Ф. Давитая, А.И. Руденко, С.А. Сапожникова, С.М. Смирнов, Н.Н. Яковлев и др.). Они заложили основы агро- и микроклиматологии, районирования отдельных сельскохозяйственных культур, влагооборота культурных растений, исследовали засухи, заморозки и т.п.

В 1972 г. был впервые разработан и опубликован «Агроклиматический атлас мира» (под редакцией И.А. Гольцберг). Большой вклад в агроклиматологию 60–80-х гг. внесли труды П.И. Колоскова, Ф.Ф. Давитая, Д.И. Шашко, А.М. Шульгина, Ю.И. Чиркова, Л.Н. Бабушкина, Л.С. Кельчевской и многих других.

В эти годы получили широкое развитие исследования в области нового научно-практического направления – пастбищной агрометеорологии и зоометеорологии. Эти работы позволили создать систему оперативного агрометеорологического (и зоометеорологического) обеспечения пастбищного животноводства в пустынных и горных районах Казахстана и республики Средней Азии. Большой вклад в научные разработки и оперативное обслуживание животноводства внесли А.П. Федосеев, И.Г. Сабинаина, И.Г. Грингоф, С.А. Бедарев, Е.Н. Коробова, А.И. Чекерес, З.И. Волосюк, А.Ф. Брудная и др. В 80-е гг. пастбищная агрометеорология и зоометеорология получили развитие применительно к северному оленеводству.

В описываемые годы большое практическое значение имели исследования по агрометеорологическому обоснованию проведения агротехнических мероприятий в растениеводстве (С.М. Кулик, А.П. Федосеев и др.).

По инициативе акад. Е.К. Федорова в 1964 г. отдел агрометеорологии ЦИП был переведен в г. Обнинск Калужской области и включен в состав Филиала Института прикладной геофизики (ИПГ), в структуре которого стал называться отделом сельскохозяйственной метеорологии. Руководителем отдела был назначен В.В. Синельщиков. По существу, организация этого отдела явилась первым шагом в создании будущего Всесоюзного научно-исследовательского института сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ).

В конце 1964 г. при Филиале ИПГ в г. Обнинске была организована Полевая экспериментальная агрометеорологическая база. Среди важнейших задач, поставленных перед ее коллективом, были: проведение полевых и лабораторных экспериментов по широкой программе изучения влияния агрометеорологических условий на рост, развитие и формирование продуктивности основных сельскохозяйственных культур; усовершенствование технических средств и методов агрометеорологических наблюдений и измерений. Крупным достижением базы стала организация совместно с сотрудниками отдела сельскохозяйственной метеорологии агрометеорологического полигона.

Обнинский агрометеорологический полигон – одна из форм ведения полевых экспериментов – был организован по инициативе В.В. Синельщикова. Полигон был размещен в Калужской области на площади 3600 км², хорошо оснащен осадкомерами и другими измерительными средствами. Детальные агрометеорологические наблюдения, выполненные на полигоне в 1966–1972 гг., позволили, в частности, изучить

закономерности пространственной статистической структуры полей агрометеорологических элементов и их изменчивость, испытать и рекомендовать к внедрению новые физические методы агрометеорологических измерений, решить ряд новых научно-методических агрометеорологических проблем и т.п. На полигоне функционировали 60 агрометеорологических постов и несколько опорных пунктов, собиравших разнообразную информацию о сельскохозяйственных культурах и условиях их произрастания по единой программе наблюдений. В 1969 г. Полевой экспериментальной агрометеорологической базе было присвоено имя В.В. Синельщикова.

Большой вклад в выполнение программы исследований на полигоне внесли работы А.П. Федосеева, М.С. Кулика, В.В. Вольвача, А.Д. Пасечнюка, А.Н. Полевого и многих других.

С 1968 по 1972 г. отдел сельскохозяйственной метеорологии, переданный в состав нового института – Института экспериментальной метеорологии (ИЭМ), возглавлял проф. А.И. Коровин. В конце 1972 г. этот отдел был реорганизован в сектор сельскохозяйственной метеорологии, включающий несколько отделов по различным научным направлениям. Сектор возглавил кандидат физико-математических наук Ю.А. Хваленский, под руководством которого успешно развивались основные направления сельскохозяйственной метеорологии.

Исследования в различных областях сельскохозяйственной метеорологии проводились в региональных и территориальных научно-исследовательских институтах в Западной Сибири, в Средней Азии, в Казахстане, в Украине, в Закавказье и на Дальнем Востоке. К этим работам были привлечены также ряд УГМС и агрометеорологических станций и некоторые институты других ведомств.

В 1968 г. по решению Президиума ВАСХНИЛ была организована секция агрометеорологии под председательством проф. Ю.И. Чиркова (1919–1988). Секция объединила ведущих ученых-агрометеорологов, ученых-агрономов и специалистов, работающих в области научной и оперативно-производственной сельскохозяйственной метеорологии в различных учреждениях ГУГМС, системы ВАСХНИЛ, в МГУ и в республиканских и территориальных УГМС.

Несмотря на положительную, многогранную деятельность секции, идея создания научно-методического центра всесоюзного масштаба продолжала развиваться. Благодаря усилиям акад. Е.К. Федорова и многих ведущих ученых-агрометеорологов в 1977 г. был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ) на базе сектора сельскохозяйственной метеорологии ИЭМ в г. Обнинске. Его первым директором был назначен кандидат биологических наук И.Г. Грингоф, в последующие годы – доктор биологических

наук, профессор; заместителем директора по научной работе – кандидат физико-математических наук – Ю.А. Хваленский. На ВНИИСХМ были возложены функции главного научно-методического центра в стране, головного института по научно-исследовательской работе в области сельскохозяйственной метеорологии и методическому руководству агрометеорологической сетью.

В последующие годы в институте получили широкое развитие основные научные направления сельскохозяйственной метеорологии, ориентированные на развитие и усовершенствование всей системы оперативного агрометеорологического обеспечения сельскохозяйственного производства, включающей мониторинг состояния посевов, прогнозы урожайности и валового сбора урожая основных сельскохозяйственных культур и пастбищ, оценку агроклиматических ресурсов и влияния изменений климата. В этой связи развивались работы по созданию компьютерных технологий сбора, обработки и хранения агрометеорологической информации, сбора, обработки и интерпретации спутниковой информации, разработки и создания новых современных технических средств и автоматизации наблюдений, разработки методов активных воздействий на заморозки и т.п.

Эти научные направления возглавили ведущие ученые ВНИИСХМ – профессора А.П. Федосеев, О.Д. Сиротенко, А.Д. Клещенко, А.Н. Полевой, И.Г. Грингоф; доктора наук – В.М. Пасов, В.В. Вольвач, В.А. Жуков, Е.К. Зоидзе, кандидаты наук – М.В. Никифоров, А.Д. Пасечнюк и др.

Значительна была роль созданного в 1981 г. Межведомственного научного совета по проблеме «Агрометеорология», в состав которого вошли и активно работали ученые и специалисты ВНИИСХМ, других научно-исследовательских институтов Государственного комитета СССР по гидрометеорологии, институтов ВАСХНИЛ, Всесоюзной сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева, некоторых УГМС. Научный совет разрабатывал генеральные направления развития современной сельскохозяйственной метеорологии.

После распада СССР в 1992 г. Всесоюзный НИИСХМ был переименован во Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии. В рамках созданного Межгосударственного совета по гидрометеорологии стран СНГ была учреждена Рабочая группа № 15 «Сельскохозяйственная метеорология» (1993), ее возглавил представитель Росгидромета В.Н. Страшный. Членами были назначены представители различных национальных гидрометеорологических служб (Республики Беларусь, Республики Грузия, Республики Казахстан, Российской Федерации, Республики Узбекистан, Украины и др.). Эта группа выполнила ряд крупных проектов, содействовала координации и обмену достижениями в агрометеорологических работах. В настоящее время руководителем группы является проф. А.Д. Клещенко.

В конце 1993 г. ВНИИСХМ возглавил доктор географических наук, профессор А.Д. Клещенко.

За прошедшие со дня организации ВНИИСХМ более трех десятилетий коллектив института разработал и внедрил десятки новых методов наземных и дистанционных агрометеорологических наблюдений, в частности были внедрены новые методики оценки и прогноза состояния, роста, развития и формирования урожайности и валового сбора основных сельскохозяйственных культур, созданы новые оценки агроклиматических ресурсов страны, оценено влияние глобальных изменений климата на сельскохозяйственное производство в России. Решены многие технико-технологические вопросы по созданию автоматизированной информационно-прогностической системы оперативного агрометеорологического обеспечения потребителей, включая разработку систем оперативного агрометеорологического мониторинга состояния посевов, на основе наземной и спутниковой информации различного пространственно-временного разрешения.

Весной 2002 г. в качестве оперативного подразделения во ВНИИСХМ был организован «Центр мониторинга засух и засушливых явлений» с зоной ответственности по территории России и стран СНГ. Его руководство было поручено директору ВНИИСХМ проф. А.Д. Клещенко.

Важным достижением последних лет является разработанная во «ВНИИСХМ» (Т.А. Гончарова, Т.И. Русакова и др.) специализированная информационно-прогностическая система (ИПС), которая позволяет осуществлять обработку декадных телеграмм и проводить расчеты оценок условий вегетации и прогнозов урожайности по территории Российской Федерации в автоматическом режиме.

Разработаны новые методы прогноза валового сбора группы зерновых и зернобобовых культур в целом по субъектам Российской Федерации, федеральным округам и России в целом (В.П. Зинченко, Т.И. Русакова), метод долгосрочного прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по федеральным округам и в целом по России (с заблаговременностью до 6 месяцев); долгосрочный (на начало марта) метод прогноза теплообеспеченности вегетационного периода (В.М. Лебедева и др.).

Основу первого метода прогноза составляют динамико-статистические модели продукционного процесса группы зерновых и зернобобовых культур. В основу двух последних методов положены достаточно устойчивые связи между характеристиками общей циркуляции атмосферы, а также тепловыми количественными значениями подстилающей поверхности океанов в осенне-зимний период в Северном полушарии и ожидаемой продуктивностью сельскохозяйственных культур.

Весьма перспективной для оперативного слежения за состоянием посевов сельскохозяйственных культур стала спутниковая информация,

получаемая с метеорологических спутников NOAA и МЕТЕОР. В Институте разработана и функционирует технология обработки и интерпретации спутниковой информации применительно к проблемам агрометеорологии и сельского хозяйства, основанная на использовании данных этих спутников. Решаются задачи оценки состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур и ведение мониторинга засух (А.Д Клещенко, О.В. Вирченко и др.). Проводится работа и с более перспективным поколением спутниковых систем, в числе которых – американские – MODIS и AQUVA и российский – МСУ-СК. Очень хорошими по качеству являются изображения с природно-ресурсных спутников типа американского LANDSAT, французского – SPOT и российского – РЕСУРС, имеющие высокое пространственное разрешение (от 100 до 1 м). Хотя применение информации последних спутников сдерживается не достаточной оперативностью ее получения.

Разработаны дистанционные методы ежедекадного мониторинга состояния посевов зерновых культур на территории ряда УГМС в осенний и весенний периоды вегетации, которые внедрены в оперативную практику. При этом в качестве спутниковой информации используется так называемый «вегетационный индекс»(NDVI), оказавшийся весьма чувствительным к изменениям состояния почвы и растительного покрова. Значения NDVI используются также в качестве входных параметров в разработанных ранее динамических моделях «погода–урожай». В качестве примера представлены результаты оценки состояния посевов в Волгоградской области (рис. 5.1). Спутниковая информация также успешно используется и при мониторинге засух.

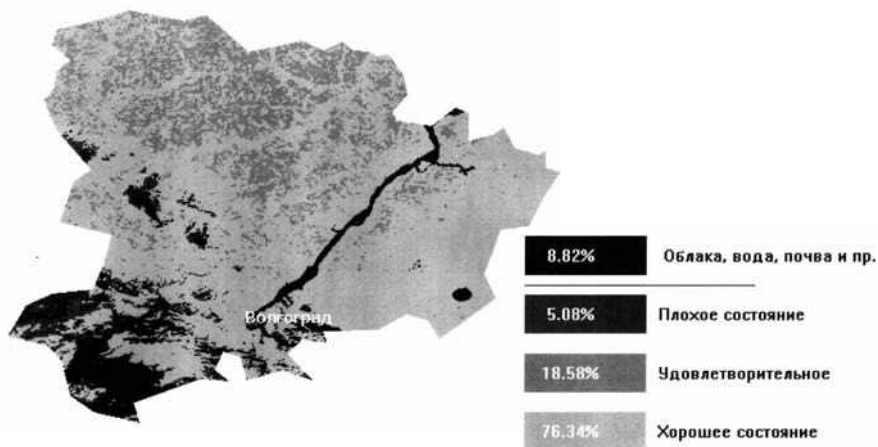


Рис. 5.1. Оценка состояния посевов. Волгоградская область. Съемка 03.05.2009 года

В области агроклиматологии была предложена новая методология оценки агроклиматических ресурсов. Важным результатом ее стал расчет климатически обеспеченной урожайности сельскохозяйственных культур на конкретной территории при условии своевременного и правильного проведения агротехнических мероприятий. В рамках этой методологии были получены средние областные значения климатически обеспеченной урожайности основных сельскохозяйственных культур в регионах России. Такая информация используется при решении различных научно-прикладных задач при агроклиматическом обеспечении сельскохозяйственного производства, в частности как целевая функция для оптимизации структуры посевных площадей сельскохозяйственных культур (В.А. Жуков и др.).

В ГУ «ВНИИСХМ» в последние годы разработано использование Web-технологий для повышения эффективности агрометеорологического и агроклиматического обеспечения сельскохозяйственного производства. С этой целью в Интернете размещен сайт www.agromet.ru «Система информационной поддержки производителя сельскохозяйственной продукции» (отдельные хозяйства, фермеры Московского региона и др.), который призван оказывать информационное обеспечение в процессе принятия хозяйственных решений на основе сложившихся и ожидаемых погодных ситуаций. На сайте можно найти также разнообразную информацию о природно-ресурсном потенциале территории хозяйства, о климате и текущей погоде, о наблюдающихся на территории хозяйства неблагоприятных погодных явлениях. Предлагается ряд рекомендаций, направленных на уменьшение влияния неблагоприятных факторов и на повышение отдачи от благоприятных погодных ситуаций (В.А. Жуков, Е.К. Зоидзе и др.).

В области создания новых технических средств измерений в ГУ «ВНИИСХМ» совместно ГУ «НПО «Тайфун» разработан метеорологический комплекс МК-30 Agro, позволяющий осуществлять эффективную информационную поддержку технологий производства сельскохозяйственной продукции для повышения их производительности и экологической безопасности (В.В. Вольвач, В.Т. Мильченко).

Совместно с рядом институтов Российской академии наук (РАН), Российской академии сельскохозяйственных наук (РАСХН), ФГБУ «ВНИИСХМ» в рамках научного проекта Министерства сельского хозяйства (МСХ) Российской Федерации был собран и проанализирован значительный теоретический и экспериментальный материал, суммирующий результаты многолетних научных и практических работ, связанных с уточнением сути и понятийного аппарата биоклиматического потенциала территорий, с разработкой рекомендаций по их применению. Были проведены исследования по расчету биоклиматического потенциала (БКП) в условиях меняющегося климата с привлечением современных моделей формирования продуктивности сельскохозяйственных культур. Большое внимание

в данной работе уделено процедурам и подходам к учету климатических и агроклиматических особенностей территории при решении ряда социально-экономических задач (А.В. Гордеев, А.Д. Клещенко, Б.А. Черняков, О.Д. Сиротенко, Е.К. Зоидзе и др.).

В трех монографиях (2006–2008) приведены методы и результаты оценки биоклиматического потенциала территорий сельскохозяйственного производства на основе современных качественных и количественных теорий продуктивности агроэкосистем. Предложены соответствующие рекомендации и адаптационные меры, направленные на повышение производительности сельскохозяйственного производства за счет нивелирования неблагоприятных и использования положительных изменений окружающей среды.

Для сравнительной оценки биоклиматического потенциала разных стран использовался специальный коэффициент, который учитывает долю почвенно-климатических факторов в формировании урожайности, в частности в Великобритании он равен 45 %, в Германии – 38 %, во Франции – 33 %, в Венгрии – 29 %, в Польше – 22 %, в России – 15 %. Как видно, доля использования природных ресурсов (солнечной радиации, тепла и влаги) в развитых странах Европы значительно выше, чем в России и в странах ближнего зарубежья. Поэтому в России есть достаточный ресурс для роста производительности растениеводства.

В последние десятилетия, в связи с наблюдаемыми изменениями климата, актуальной задачей стала разработка методологии оценки изменений основных климатообразующих факторов (по различным сценариям) и их воздействия на сельскохозяйственное производство. В ФГБУ «ВНИИСХМ» был выполнен обширный комплекс исследований, позволивший получить ожидаемые количественные величины изменения урожайности основных зерновых культур и сеяных трав в перспективе на 10...30 лет (О.Д. Сиротенко, В.Н. Павлова, Е.В. Абашина и др.).

В результате проведенных исследований получены следующие выводы:

- в целом для 85 % территории России наблюдающиеся и ожидаемые изменения климата (потепление) благоприятны для сельскохозяйственного производства при условии своевременного проведения соответствующих агротехнических мероприятий;

- в сельскохозяйственном производстве России биоклиматический потенциал территории используется в 2–3 раза менее эффективно, по сравнению со странами Западной Европы;

- с учетом ожидаемых изменений климата, одним из важнейших регионов сельскохозяйственного производства в России может выступить Нечерноземная зона страны при обязательном условии принятия своевременных адаптационных мер.

За комплекс исследований по влиянию изменений климата на сельскохозяйственное производство, выполненных в отделе математического моделирования продуктивности агроэкосистем ГУ «ВНИИСХМ», заведующий отделом доктор физико-математических наук, проф. О.Д. Сиротенко был удостоен диплома лауреата Нобелевской премии мира в 2007 г. в числе группы ведущих российских и зарубежных ученых.

Серьезный вклад в развитие и совершенствование системы оперативного агрометеорологического обеспечения федерального и регионального (областного) уровней страны вносят агрометеорологи Гидрометеорологического центра России (Гидрометцентр России). За последние десятилетия была разработана и внедрена современная автоматизированная подсистема сбора, обработки сетевых данных, подготовки и выдачи потребителям разнообразной агрометеорологической (и гидрометеорологической) информации в доступной для потребителя форме. Эта подсистема базируется на разработке новых и усовершенствовании методов агрометеорологических оценок и прогнозов, на использовании современных технических средств и технологий, выполненных совместно с другими специалистами в Гидрометцентре России и агрометеорологами ФГБУ «ВНИИСХМ».

Так, в течение 90-х гг. прошлого столетия и в первом десятилетии XXI века в Гидрометцентре России были разработаны и внедрены *новые статистические и вероятностные методы прогноза* урожайности основных зерновых культур. Назовем несколько из них в качестве примера: озимой пшеницы, возделываемой в Черноземной зоне (Е.С. Уланова), яровой пшеницы – по административным субъектам Поволжского и Уральского регионов (С.Л. Плучек); кукурузы – по субъектам Черноземной зоны и Северного Кавказа (Л.В. Комоцкая); зерновых и зернобобовых культур – по областям Центрально-Черноземного и Поволжского регионов (А.И. Страшная).

Разработан и внедрен новый метод прогноза сроков сева озимых зерновых культур по Центральному и Приволжскому федеральным округам (Т.А. Максименкова, А.И. Страшная, О.В. Чуб). Предложена новая методика оценки снижения средней областной урожайности яровых культур от воздействия атмосферных засух (А.И. Страшная).

Были разработаны и испытаны и задействованы в оперативной деятельности агрометеорологов новые *вероятностные методы поэтапного прогноза* урожайности и валового сбора зерновых и зернобобовых культур по территории основных экономических регионов и в целом по Российской Федерации (А.И. Страшная, Е.С. Уланова, Т.А. Максименкова, Л.В. Комоцкая и др.).

В течение этого периода в Гидрометцентре России проводилась работа и по *усовершенствованию* некоторых из действующих методов прогноза урожайности культур: озимых зерновых по ряду областей и регионов,

кукурузы, семян подсолнечника (Т.А. Максименкова, Л.В. Комоцкая, Х.Х. Тебугев и др.); динамико-статистическая модель условий перезимовки озимых культур (В.А. Моисейчик, Н.А. Богомолова). Необходимость усовершенствования методов связана не только в связи с периодической сменой высеваемых сортов, но и с потребностью увеличения заблаговременности составления прогнозируемой урожайности; с включением новых предикторов, например таких, как учет темпов уборки и динамики намолотов зерна (Е.С. Уланова, А.И. Страшная).

Несколько методов прогноза продуктивности возделываемых культур было разработано по территории Республики Беларусь в рамках программы Союзного государства «Россия–Беларусь» (А.И. Страшная).

Помимо разработки новых и усовершенствования действующих методов агрометеорологи Гидрометцентра России подготовили «Каталог сильных почвенных засух под ранними яровыми культурами в Черноземной зоне страны», переработали и ввели в действие новый код КН-21 для составления ежедневных и декадных агрометеорологических телеграмм (Н.С. Игнатов, А.И. Страшная); выполнили исследования по определению рисков атмосферных засух и других неблагоприятных условий в период уборки зерновых культур, по изменению сроков сева озимых культур в условиях потепления климата (А.И. Страшная, Т.А. Максименкова, О.В. Чуб).

Важными разделами оперативной деятельности агрометеорологов Гидрометцентра России являются подготовка и выпуск:

- прогнозов с использованием информационно-прогностической системы (ИПС), разработанной специалистами ФГБУ «ВНИИСХМ»;
- информационных аналитических материалов, потребность в количестве и качестве которых постоянно возрастает со стороны федеральных и региональных руководящих и хозяйственных органов.

Это связано с увеличением в последние годы повторяемости неблагоприятных и опасных для сельскохозяйственного производства гидрометеорологических и агрометеорологических явлений: сильными региональными и обширными засухами, лесными и торфяными пожарами, охватывающими значительные площади и др.

В отделе систем информационного обеспечения Гидрометцентра России был разработан и внедрен программно-технологический комплекс обработки гидрометеорологической информации «PROMETEI», ориентированный на получение и доведение до конечных пользователей всех видов гидрометеорологической информации и прогностической продукции. К этому комплексу всеми подразделениями Гидрометцентра России, ведущими оперативное гидрометеорологическое обеспечение секторов экономики страны, были разработаны приложения, обеспечивающие автоматизированный сервис рабочих мест специалистов-гидрометеорологов, в том числе и агрометеорологов.

Для участия в работе комплекса «PROMETEI» агрометеорологи Гидрометцентра создали новую технологию, обеспечивающую полный цикл обработки поступающей сетевой информации по новому коду КН-21, включая многоуровневую обработку и формирование архивов. Была выполнена дополнительная настройка системы приема «PROMETEI»-сервера, в текстовые архивы были включены файлы с текстами декадных и ежедневных телеграмм. Теперь рабочие места агрометеорологов автоматически формируют архивы поступающей информации.

Ответственным этапом стала разработка и внедрение собственных процедур формирования агрометеорологических карт по территории России, поскольку картографические материалы, являясь наиболее информативной и компактной формой, наиболее востребованы на федеральном уровне. На рис. 5.2 в качестве примера приведена карта распределения минимальной температуры воздуха во второй декаде марта 2011 года. Подобные карты готовятся в векторном графическом формате, что позволяет без существенной потери четкости изображения переносить графические образы в различные форматы хранения и отображения, включая цветную и черно-белую печать. Работы в этом направлении постоянно развиваются: к 2011 г. в Гидрометцентре страны внедрено автоматизированное построение около 70 видов карт по территории Российской Федерации. Благодаря этому внедрению агрометеорологам стали доступными необходимые наглядные материалы для составления аналитической информации. Все эти новшества позволили агрометеорологам заметно повысить оперативность и полноту выдачи информационных и аналитических материалов в различные уровни потребителей.

Учитывая важность ведения мониторинга засушливых условий и оценки их влияния на урожайность возделываемых культур, агрометеорологи Гидрометцентра России совместно со специалистами ФГБУ «ВНИИСХМ» проводят исследования по разработке комплексного метода мониторинга засух по наземным данным и спутниковой информации (А.Д. Клещенко, А.И. Страшная, Е.К. Зоидзе, Т.В. Хомякова и др.).

Таким образом, выполненные разноплановые агрометеорологические и агроклиматические исследования в институтах и УГМС страны открыли возможность создания комплексной системы оперативного агрометеорологического мониторинга в масштабах страны. Такой мониторинг, базирующийся на современных динамических и динамико-статистических моделях продуктивности агроэкосистем, на комплексном использовании разноуровневых видов информации (наземной, самолетной, спутниковой, статистической и др.), различного пространственного и временного разрешения и геоинформационных систем, является основой функционирования будущей оперативно-прогностической системы обеспечения агрометеорологической информацией аграрного сектора страны.

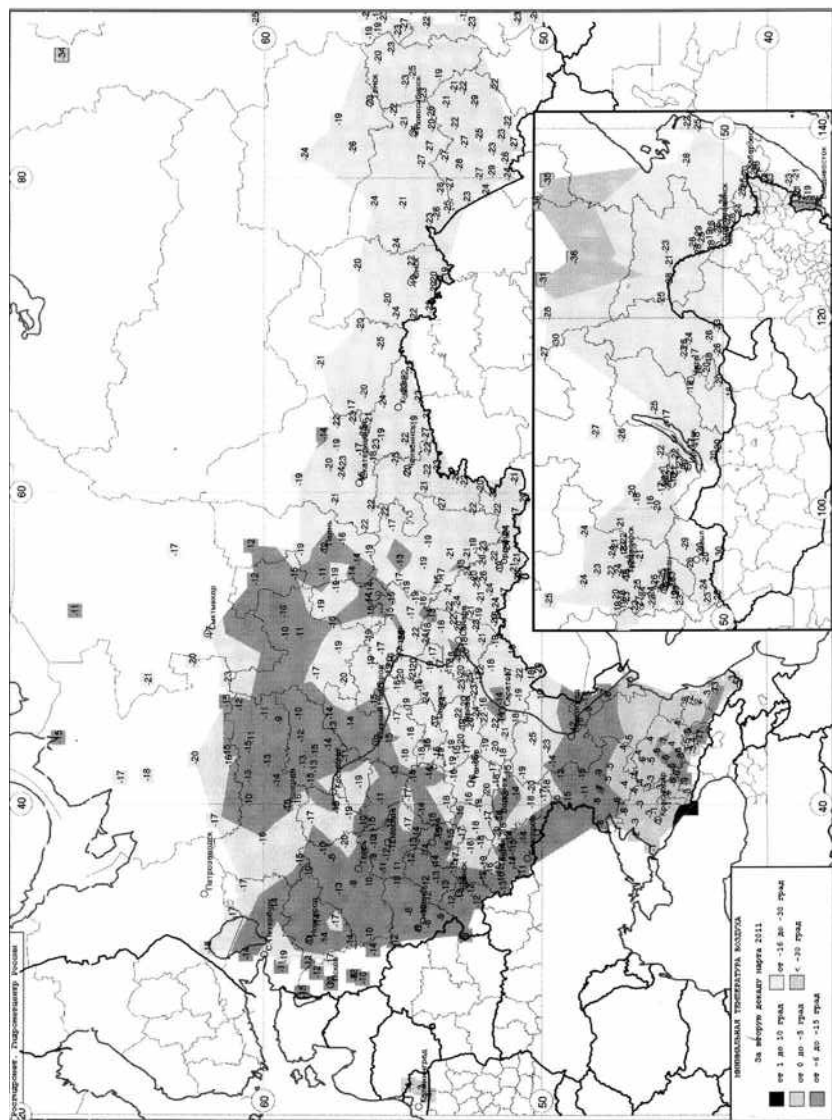


Рис. 5.2. Карта распределения минимальной температуры воздуха во второй декаде марта 2011 г.

Система оперативного агрометеорологического обеспечения различных органов аграрного сектора страны позволяет выдавать агрометеорологическую продукцию с учетом интересов разных уровней потребителей. Поскольку страховые структуры потребителей заинтересованы в получении целевых видов информации, в последние годы оперативные агрометеорологические подразделения страны проводят достаточно планомерную работу со страховыми структурами государства.

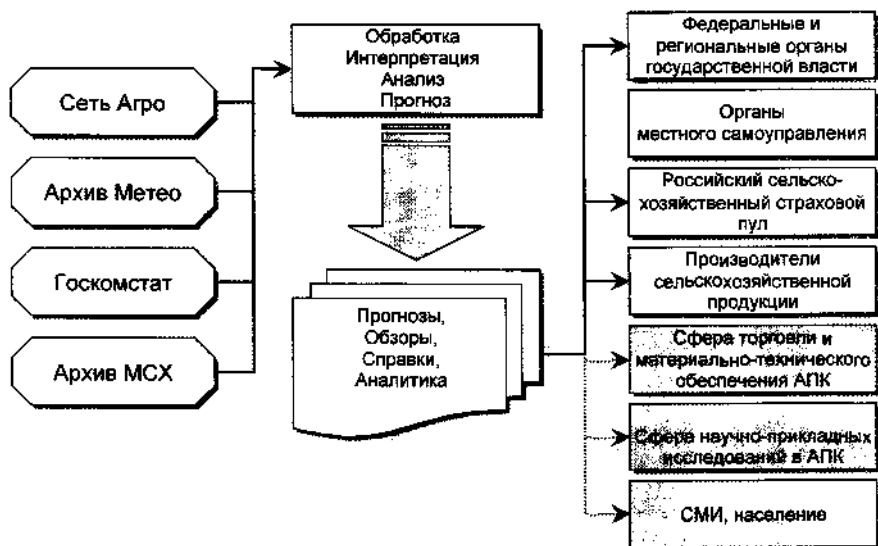


Рис. 5.3. Схема оперативного агрометеорологического обеспечения потребителей различного уровня

На рис. 5.3 представлена современная схема оперативного обеспечения агрометеорологической информацией аграрного сектора страны и средств массовой информации в стране.

Международный вклад российских и советских ученых и специалистов в становление и развитие научно-практической сельскохозяйственной метеорологии обширен, разнообразен и значителен. Российские ученые-агрометеорологи продолжают активно участвовать в деятельности Комиссии по сельскохозяйственной метеорологии (КСХМ) Всемирной метеорологической организации (ВМО), а также осуществляют деловое сотрудничество с агрометеорологами национальных гидрометеорологических служб стран СНГ и стран дальнего зарубежья.

5.1. Важнейшие современные задачи сельскохозяйственной метеорологии

На разных этапах развития сельскохозяйственной метеорологии, под влиянием меняющихся и возрастающих потребностей аграрного сектора в оперативной гидрометеорологической информации изменялись и задачи, которые сельскохозяйственная практика ставила перед этой наукой⁴.

Общими задачами сельскохозяйственной метеорологии являются:

- изучение количественных и качественных причинно-следственных связей между погодными (гидрометеорологическими) условиями и состоянием, ростом, развитием и формированием урожайности сельскохозяйственных культур и сенокосно-пастбищной растительности;
- изучение закономерностей формирования гидрометеорологических условий сельскохозяйственного производства в пространстве и во времени;
- разработка методов количественной и качественной оценки влияния гидрометеорологических факторов на состояние почвы, растений, на рост, развитие и формирование продуктивности агрофитоценозов, развитие и распространение вредителей и болезней сельскохозяйственных культур;
- разработка всех видов агрометеорологических прогнозов;
- разработка методов оценки, прогноза и борьбы с неблагоприятными опасными для сельского хозяйства гидрометеорологическими явлениями, в том числе методов активного воздействия на эти явления;
- изучение проблемы устойчивости сельскохозяйственного производства в зависимости от складывающихся гидрометеорологических условий, влияния глобального изменения климата и воздействия человеческого сообщества на агрофитоценозы;
- совершенствование всех видов агрометеорологических наблюдений и создание комплексного агрометеорологического мониторинга;
- изучение и прогнозирование спроса на агрометеорологическую информацию в переходных условиях к рыночной экономике, популяризация агрометеорологических знаний.

К числу важнейших задач современной сельскохозяйственной метеорологии относятся:

В области теоретических исследований:

— углубление количественной теории влияния гидрометеорологических условий на рост, развитие и формирование продуктивности посевов сельскохозяйственных культур и создание на этой основе нового поколения динамико-статистических моделей типа «погода – почва – урожай», «климат – почва – урожай», «погода–пастбище–животное» и др;

⁴ Подробнее см.: Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России. Изд. 2-е, переработанное, расширенное / под ред. проф. А.Д. Клещенко и проф. И.Г. Грингофа). Обнинск, 2009. С. 570.

– разработка проблемы устойчивого развития сельскохозяйственного производства в зависимости от гидрометеорологических условий, глобального изменения климата и растущего воздействия человеческого сообщества на экосистемы и агроэкосистемы.

В области прикладных задач с целью совершенствования агрометеорологического обеспечения аграрного сектора экономики страны:

– создание систем комплексного агрометеорологического мониторинга оценки состояния почвы, динамики состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур и пастбищной растительности, включая методы и автоматизированные технологии агрометеорологического прогнозирования урожайности и валовых сборов урожая сельскохозяйственных культур, а также технологии обработки и интерпретации спутниковой информации для оценки состояния и продуктивности возделываемых культур; разработка рекомендаций нового поколения по агрометеорологическому обоснованию технологий возделывания этих культур;

– создание оперативной системы оценки агроклиматических ресурсов для составления и выдачи рекомендаций по их рациональному использованию и разработки режимно-справочных пособий; развитие методов оценки влияния изменений климата, концентрации парниковых газов и других характеристик глобальной природной среды на продуктивность агроэкосистем; разработка и выдача рекомендаций по устойчивому развитию аграрного сектора экономики и обеспечению продовольственной безопасности страны;

– совершенствование подсистемы агрометеорологических наблюдений (и измерений) для создания комплексного агрометеорологического мониторинга, включая методы и технологии автоматизированной обработки сетевых наблюдений, обработки и интерпретации спутниковой и наземной информации, разработка новых автоматизированных, измерительных средств для сети станций, научно-методической документации и т.п.;

– изучение и прогнозирование спроса на агрометеорологическую информацию, проведение маркетинговых исследований, а также разработка новых методов оценки экономической эффективности при использовании агрометеорологической информации в сельскохозяйственном секторе экономики.

Эти и другие задачи решаются агрометеорологической наукой и практикой с целью проведения и усовершенствования всех форм оперативно-агрометеорологического обеспечения информацией аграрного сектора страны в новых условиях рыночной экономики.

ЧАСТЬ II

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АГРОМЕТЕОРОЛОГИИ

ВВЕДЕНИЕ

По определению классика экологии растений академика Б.А. Келлера (1874–1945): «Жизнь – это движение, изменение, преобразование материи, которое происходит на основе борьбы двух противоположностей – ассимиляции и диссимиляции» (1951, с. 126).

Растительный организм представляет собой качественно своеобразную форму живой материи, жизненный процесс которой определяется особенностями способа питания. Именно растения питаются за счет минеральных веществ окружающей среды, в том числе углекислого газа и воды при использовании энергии солнечного света в процессе фотосинтеза.

Растения находятся в чрезвычайно тесной взаимосвязи и взаимодействии с окружающей их динамично меняющейся средой. Сменяются дни и ночи, времена года, условия погоды (освещенность, температура, количество доступной влаги и т.п.), наконец, происходят более медленные климатические изменения в атмосфере и в почвенном покрове. В атмосфере и в приземном слое воздуха время от времени происходят и экстремальные, резкие, периодические изменения, оказывающие значительное влияние на состояние, рост, развитие и формирование продуктивности растений.

В процессе своего роста и развития растения, в свою очередь, изменяют окружающую их среду, создавая своеобразный микроклимат в среде растительного покрова (температура, влажность воздуха и почвы, изменения в количестве солнечной радиации, проникающей в среду растений, на поверхность почвы и т.п.) и одновременно сами оказываются в этой измененной среде. Корни растений, проникая в различные горизонты почвы, попадают в новую, в том числе создаваемую корнями среду. При этом вокруг всасывающих частей корневых систем под влиянием физико-химического воздействия выделений корней формируются, так называемые, *ризосферы* (от греч. *rhiza* – корень + *sphaira* – шар) с определенным видовым составом микроорганизмов и грибов.

При формировании растительной массы, и в том числе полезной ее части для человека – урожая, растения выносят определенную долю

питательных веществ из корнеобитаемых горизонтов почвы. Растительные остатки после уборки урожая сохраняются в почве вместе со спорами, семенами и личинками болезней и вредителей сельскохозяйственных культур. Эти процессы, вместе взятые, оказывают на растения огромное влияние, масштабы которого весьма существенно различаются от года к году. Понимание основных закономерностей жизнедеятельности растений в их взаимодействии с окружающей средой (в том числе с агрометеорологическими условиями) немыслимо без изучения основ физиологии растений.

Термин *физиология* произошел от греческих слов: *physis* – природа и *logos* – понятие, учение. Различают физиологию растений и физиологию животных. *Физиология* – это наука о жизнедеятельности организмов, о процессах, протекающих в их системах, органах, тканях и в клетках, о регуляции их функций, о законах функционирования организма как целого в его единстве и взаимодействии с окружающей средой, в его непрерывном приспособлении к меняющимся условиям среды и непрерывном развитии.

Физиология растений изучает процессы роста и развития организмов, их питания (воздушного и почвенного), дыхания, обмена веществ, т.е. совокупности всех процессов, которыми обеспечивается способность организма строить свое тело и производить потомство (Рубин Б.А., 1971). Все это разнообразие процессов сводится к явлениям превращения вещества и энергии, изменения и развития форм растительных организмов. Каждый орган непосредственно влияет на деятельность организма в целом, зависит и взаимосвязан со строением и деятельностью других органов.

Растительные организмы, как и все другие живые системы, подчиняются законам превращения вещества и энергии, а их особенности заключаются в способах взаимодействия с окружающей средой (см. рис.).

Физиология растений – наиболее развитая отрасль экспериментальной ботаники – тесно связана с химией, физикой, биохимией, биофизикой, микробиологией, молекулярной биологией, экологией, эволюцией органического мира и другими научными дисциплинами. Круг вопросов, составляющих предмет физиологии растений, определяется в основном специфическими особенностями зеленых растений.

Среди всех других форм живой материи только зеленые растения обладают способностью использовать солнечную энергию и преобразовывать ее в свободную (химическую) энергию разнообразных органических соединений. Именно эта энергия позволяет зеленым растениям использовать в качестве пищи неорганические соединения, лишенные запасов форм свободной энергии. Зеленые растения создают материальную и энергетическую базу, необходимую для существования всех других организмов, населяющих нашу планету, в том числе и для человека.

Главной задачей физиологии растений является расширение знаний о закономерностях жизнедеятельности растительного организма

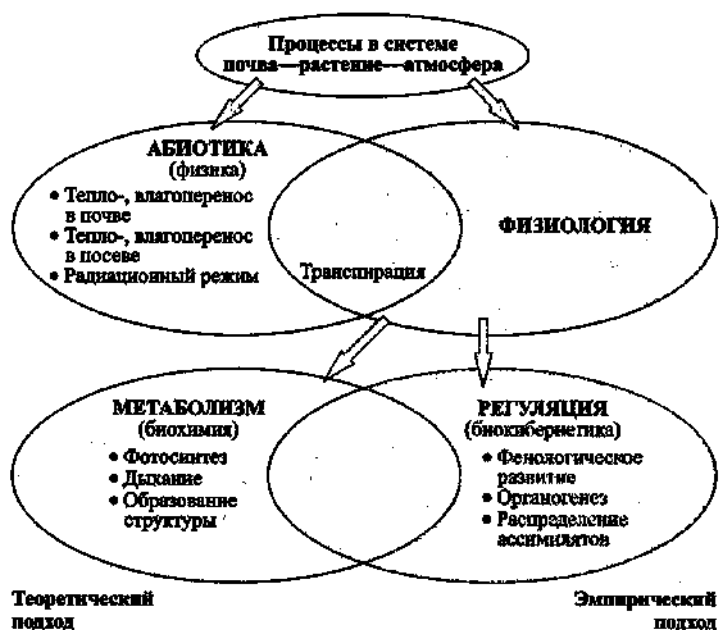


Рис. Области использования эмпирического и теоретического подходов для описания различных процессов при моделировании динамики агро-экосистем (Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И. и др., 2006)

(механизмы питания, роста, размножения, движения и т.п.) в процессе его развития в различных условиях среды. Знание таких закономерностей позволяет считать физиологию растений теоретической основой рационального и высокоэффективного земледелия.

Отсюда – *вторая важная задача* этой науки – разработка теоретических основ получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. Эта задача напрямую связана с интенсивным ростом населения планеты Земля, с его проблемами *урбанизации* (от лат. *urbanus* – городской), т.е. процесса повышения роли городов в жизни и развитии общества.

К таким проблемам относятся: сокращение численности сельского населения; необходимость расширения посевных площадей, в том числе и за счет сведения лесных массивов; борьба с неотвратимой при этом деградацией почвенного и растительного покровов, загрязнением атмосферы, почвы и водных объектов, включая мировой океан; с сокращением естественного биоразнообразия, и, наконец, с развитием процессов опустынивания, оказывающих большое влияние на уровень сельскохозяйственного производства и жизни людей на земном шаре.

В этом ключе определяется и *третья задача* – разработка теоретических и индустриальных основ для осуществления процессов фотосинтеза в искусственных условиях закрытого грунта, расширение возможностей выращивания овощей, грибов, цветов; развитие селекционных работ в течение года (особенно в осенне-зимне-весенний период) во имя удовлетворения естественных потребностей быстро растущего населения в продуктах питания и создания дополнительных ресурсов для промышленного и химического производства.

Развитие исследований в области влияния складывающихся погодных (и климатических) условий на состояние, рост, развитие, на формирование продуктивности посевов и урожайности сенокосно-пастбищной растительности, а также практическая реализация их результатов в сельскохозяйственном производстве немыслимы без знания физиологических основ жизнедеятельности растений. Именно поэтому авторы сочли необходимым включение настоящего раздела в первый том учебного пособия «Основы сельскохозяйственной метеорологии».

ГЛАВА 6

СТРОЕНИЕ И ФУНКЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЗМА

6.1. Органы, ткани, функциональные системы высших растений

6.1.1. Растительная клетка, строение и функции

Выдающийся ученый-физиолог К.А. Тимирязев утверждал: «Для того чтобы понять жизнь растения... необходимо прежде ознакомиться с его формой; для того, чтобы понять действие машины, нужно знать ее устройство».

Впервые клеточное строение растительной пробковой ткани обнаружил английский ботаник Роберт Гук в 1665 г., рассматривая тонкий срез пробки при помощи усовершенствованного им микроскопа.

В 1839 г. немецкие биологи М.Я. Шлейден и Т. Шванн сформулировали клеточную теорию, которая оказалась универсальной для строения всего органического мира.

Термин «клетка» (от греч. *cytos* – клетка, или лат. *cellula* – полость) был предложен Р. Гуком. Ныне существует наука *цитология*, изучающая строение, химический состав и функции, индивидуальное и историческое развитие животных и растительных клеток.

Клетка лежит в основе строения, функциональных процессов развития и роста растительных и животных организмов. Новые клетки могут возникать только в результате деления ранее существовавших клеток. Все существующие клетки имеют непрерывную «родословную», восходящую к древнейшим временам.

Растительная клетка – сложное образование, включающее различные микроскопические структуры, обладающие высокой динамичностью изменяться под влиянием условий существования.

Клетка окружена плотной эластичной оболочкой целлюлозно-пектиновой природы. С помощью современных электронных микроскопов обнаружена ее сетчатая структура. Сосредоточенные в клеточных оболочках ферменты выполняют важные функции в биохимических процессах первичного связывания и дальнейшего продвижения поступающих в клетку веществ. Клеточные стенки пронизаны отверстиями: мембранами (до 1 мкм), через которые осуществляются межклеточные контакты обмена. Основным регулирующим механизмом мембран служит их проницаемость. Мембраны выполняют разнообразные функции: защиту содержимого клетки от повреждений или избыточной потери воды (*тургор*), а также барьерные, транспортные, энергетические, секреторные,

электрические, пищеварительные, регуляторные (на биохимическом, ионном уровне) функции. Напомним, что *тургор* (от лат. *turgere* – быть набухшим, наполненным) – это напряженное состояние оболочек клеток растений, вызванное давлением их внутреннего содержания.

Внутри клетки содержатся *органоиды* – постоянно присутствующие в растительной (и животной) клетке включения, выполняющие определенные жизненные функции (рис. 6.1).

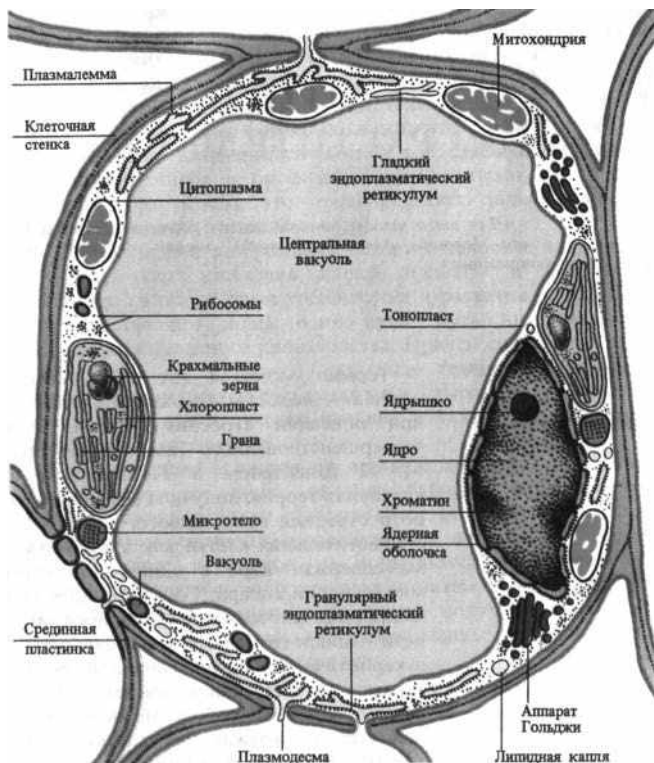


Рис. 6.1. Анатомическое строение растительной клетки (Полевой В.В., 1989)

Протоплазма – сложная в химическом и морфологическом отношении система, в основе которой – белки и нуклеиновые кислоты, а также полисахариды, липиды и другие органические вещества, осуществляющие жизненные процессы.

Ядро (с несколькими *ядрышками* внутри) выполняет функции «программирования» синтеза белков и передачи наследственной информации. Состоит из оболочки, внутри – *цитоплазма*, в которой локализованы

участки *хроматина*, состоящего из *дизоксирибонуклеиновой кислоты* (ДНК), *рибонуклеиновой кислоты* (РНК) и белков. Количество ДНК в одном ядре постоянно для каждого вида. В целом, ядро является местом хранения генетической информации, т.е. исторической родословной, указывающей на происхождение отдельных родов, видов организмов и, следовательно, клетки. Во взаимодействии с цитоплазмой ядро участвует в обеспечении генетической информации и контролирует процессы жизнедеятельности клетки.

Рибосомы – внутриклеточные частицы, состоящие из белка и рибонуклеиновой кислоты, свободно лежащие в цитоплазме и осуществляющие синтез белка. При воздействии неблагоприятных факторов (засухи, недостатка кислорода и т.п.) рибосомы разрушаются, что тормозит рост и развитие растения.

Пластиды – наличие их в клетке является отличительной особенностью высших растений; размеры пластид от 3...5 до 15...20 мк. В растительных клетках существуют пластиды трех типов:

- *хлоропласты*, имеющие зеленую окраску за счет пигмента *хлорофилла*;

- *хромопласты*, содержащие *каротиноиды* – пигменты желтого, красного и коричневого цвета; с их образованием в клетках происходит цветовая окраска плодов и листьев растений;

- *лейкопласты*, не содержащие пигментов, лишенные окраски (например, ростки, выросшие в темноте), при попадании на них света – зеленеют за счет образования хлорофилла. Например, клубни картофеля на свету начинают зеленеть, а в темноте хлорофилл исчезает.

Хлоропласты меняют свое положение в клетках листьев в зависимости от интенсивности и угла падения солнечных лучей. На ярком свете они располагаются по бокам клеток, что помогает им избежать вредного действия прямых лучей, разрушающих хлорофилл. На слабом и рассеянном свете хлоропласты располагаются на стенках клеток, расположенных перпендикулярно падающим лучам.

Вакуоли – типичный органоид взрослой растительной клетки, занимающий ее большую часть. Вакуоль наполнена клеточным соком, в котором содержатся продукты жизнедеятельности протоплазмы: различные органические и неорганические соединения. К ним относятся: кислоты, свободные аминокислоты, алкалоиды, ферменты, растворимые белки, глюкозы, танины – дубильные вещества, антоцианы и т.п. Вакуоль – место отложения аминокислот, запасных белков – обеспечивает осмотические свойства клетки, регулирующие процессы поступления и передвижения воды и минеральных солей.

Митохондрии – органоиды клеток, обеспечивающие систему аэробного дыхания и окисления и энергетические потребности клеток.

Аппарат Гольджи – специализированная часть внутри плазматической мембранной сети, состоящая из мельчайших пузырьков (цистерн), которые участвуют в ряде синтетических процессов образования клеточных оболочек.

Таким образом, клетка, ее анатомическое строение и физиолого-биохимические функции, обеспечивает все процессы жизнедеятельности: рост, развитие, плодоношение и старение растения.

6.1.2. Органы растения: побег, лист, корень, вегетативные и генеративные органы, строение и функции (рис. 6.2)

Главную ось высшего растения составляют побег и корень. Побег включает: *стебель, листья, вегетативные почки, цветы и плоды.*

Стебель выполняет основные опорные и проводящие функции. Он обладает двигательной активностью (зона растяжения), в нем откладываются запасные вещества; в некоторых случаях выполняет функции *вегетативного* (неполового) размножения, например усы, *столоны* (от лат. *stolo, stolonis* – корневой побег) у картофеля, стебли, стелющиеся по земле и дающие корни у земляники и др. В процессе эволюции возникли многообразные модификации стебля: подземные корневища, клубни, луковицы, выполняющие функции вегетативного размножения, хранения запасных питательных веществ в неблагоприятных, сезонных условиях.

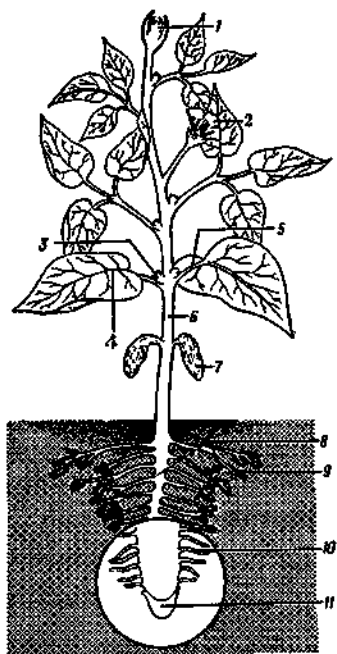


Рис. 6.2. Схематическое изображение проростка фасоли, имеющего корни, стебель и листья:

1 – верхушечная почка; 2 – цветок; 3 – пазушная почка; 4 – листовая пластинка; 5 – черешок; 6 – стебель; 7 – семядоля; 8 – главный корень; 9 – боковой корень; 10 – корневой волосок; 11 – корневой чехлик.

В ряде случаев стебли выполняют фотосинтезирующие функции, например у растений *суккулентов* (от лат. *succulentus* – сочный) – алоэ, агавы, кактусы, некоторые молочаи, молодые побеги саксаула и других растений жаркого климата, связанные с необходимостью выживания в условиях жесткого дефицита влаги. Другой формой модификации стеблей являются усики у винограда, тыквенных культур, обеспечивающие подъем основных стеблей, несущих плодозлементы. У некоторых растений стебель выполняет и защитные функции – колючки у гледичии, боярышника и др.

Лист – специализированный орган воздушного питания, осуществляющий фотосинтез, газообмен и транспирацию. Формы листьев у растений весьма разнообразны, но в основном они плоские для обеспечения максимальной поверхности, воспринимающей солнечные лучи и выполняющей обмен углекислотой (CO_2), кислородом (O_2) и водяным паром (H_2O). У некоторых растений часть листьев видоизменена, это – усики (горох, чина и др.). Продолжительность жизни листьев различна: от нескольких недель (эфимеры в пустынях), нескольких месяцев (у большинства листопадных деревьев и кустарников) до 3–4 лет (у вечнозеленых тропических форм).

Лист состоит из черешка и листовой пластинки (простой или сложной). Черешок, подобно стеблю, анатомически в поперечном сечении представляет собой пучок сосудов, распределяющихся по листовой пластинке в виде различной конфигурации сетки листовых жилок. Строение листа представлено на рис. 6.3. Он состоит из клеток различного вида и назначения. Наружные клетки верхней и нижней поверхности листа представляют собой бесцветный, крепкий, защитный слой – *эпидермис*

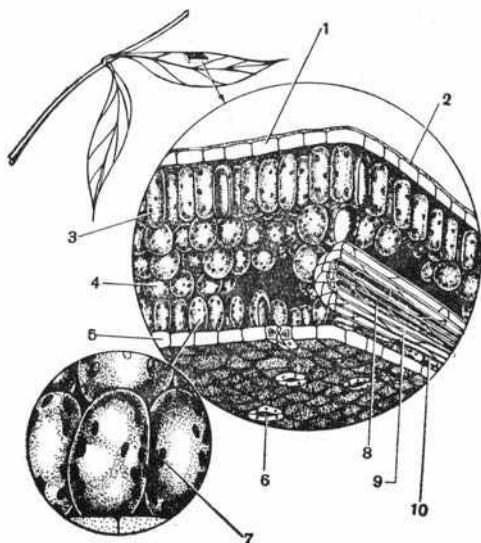


Рис. 6.3. Схематическое изображение микроскопического строения листа (справа видна часть небольшой жилки):

- 1 – верхний слой эпидермиса;
- 2 – кутикула; 3 – палисадные клетки; 4 – губчатый мезофилл;
- 5 – нижний слой эпидермиса;
- 6 – устьице; 7 – хлоропласт;
- 8 – ксилема; 9 – флоэма;
- 10 – обложка жилки.

(от греч. *epi* – над, сверх и *derma* – кожа), т.е. *кожица* – наружная покровная ткань высших растений, состоящая обычно из одного слоя клеток, выполняющих также функцию газообмена, снижения потери воды, но пропускающих свет. Клетки эпидермиса сверху покрыты воскоподобным веществом – кутикулой. Вся эта поверхность в виде тонкой пленки получила название *кутикула*. На поверхности эпидермиса расположены мелкие поры – *устыица* с замыкающими клетками, содержащими хлоропласты; эти клетки, благодаря изменению устьичной щели, регулируют газообмен и расход воды при транспирации. На 1 мм² листа находится у разных видов от 50 до 500 устьиц, причем их больше на нижней поверхности листа. Устьица, как правило, открываются на свету и закрываются в темноте благодаря изменению тургорного давления внутри замыкающих клеток. Повышение тургора происходит при накоплении осмотически активных веществ (глюкоза), при этом замыкающие клетки изгибаются и щель открывается; и наоборот. Накопление глюкозы происходит за счет фотосинтетически активных хлоропластов в замыкающих клетках. На свету тургорное давление замыкающих клеток возрастает в 3 и более раз. Открывание устьиц обеспечивает поступление углекислого газа (CO₂) в лист, что необходимо для процесса фотосинтеза. В темноте фотосинтез прекращается, тургорное давление снижается и устьица закрываются.

При недостатке влаги в растении тургор замыкающих клеток также снижается, устьица закрываются, происходит экономия воды для физиологических процессов.

Часть листа, расположенная между верхним и нижним слоями эпидермиса, заполнена тонкостенными, рыхло расположенными клетками – *мезофиллом* или *паренхимой*. Они составляют основную ткань листа, наполненную хлоропластами, в которых содержится хлорофилл.

Между эпидермисом и мезофиллом находится слой плотно сидящих палисадных клеток, также несущих хлоропласты.

Тонкая сеть жилок пронизывает лист. Наружный слой жилки – *ксилема* (от греч. *xylon* – дерево) – основная проводящая ткань наземных растений, состоящая из различных клеток, обеспечивающих восходящий поток питательных веществ, поступающих от корня; у многолетних стеблей и корней она называется древесиной. Внутренний слой жилки – *флоэма* (от греч. *phloios* – кора, лыко) или *луб* – волокнистая, быстро растущая ткань растения, по которой перемещаются питательные вещества по нисходящему току.

У основания листового черешка в поперечном направлении развивается отделительный слой клеток. Клетки, ближайшие к стеблю, при старении «пробковеют» и образуют защитный слой, защищающий стебель после опадения листа. В период вегетации черешок удерживает лист только эпидермисом и сосудистыми пучками, но при порывах ветра происходит отрыв листьев.

Изменение окраски листьев осенью происходит при разрушении хлорофилла (при этом становятся заметными желтый пигмент – *ксантофилл* и оранжевый – *каротин*), а также благодаря синтезу красного и пурпурного пигментов (антоциану), находящихся в клеточном соке листьев.

Корень – специализированный орган почвенного питания растения, выполняющий разнообразные функции: закрепление в почве (субстрате), поглощение и подача воды с растворенными в ней минеральными элементами в стебель (или ствол кустарника, дерева). У некоторых сельскохозяйственных культур *корнеплодов*, таких как: морковь, свекла, батат, репа, редька, дайкон или у цветов (георгины, орхидеи) – корень выполняет и функции запасаания питательных веществ. Корень обладает двигательной активностью (растяжением при проникновении в почвенные слои). Известны корни-подпорки (баньян – индийский вид фикусов), ходульные корни – у мангровых вечнозеленых лесов, дыхательные корни – у болотных растений (лотос), корни-прищепки (плющ), воздушные корни – у орхидейных. Глубина распространения корней у растений различна, как правило, она меньше высоты главного стебля, но боковые корни достигают большей длины, чем боковые ветви. Различают два основных типа корневых систем: *мочковатые*, состоящие из многочисленных ответвлений, примерно одинаковых по размерам; *стержневые*, представленные мощным главным корнем, растущим обычно вертикально вниз с большим количеством более мелких вторичных корней (рис. 6.4).

Кончик каждого корня покрыт *корневым чехликом*, защитной наперстковидной оболочкой, состоящей из грубых, прочных клеток, закрывающих быстрорастущую зону меристемы – точку роста, длина которой около 1 мм (рис. 6.5).

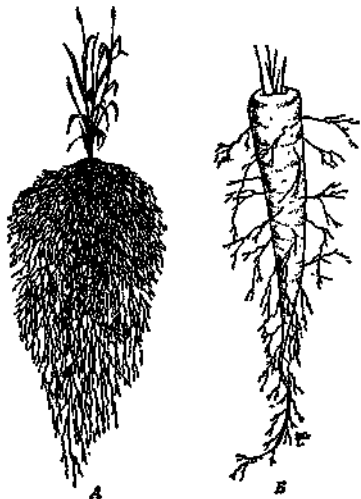


Рис. 6.4. Типы корневых систем растений: А – мочковатый корень злака; В – стержневой корень моркови.

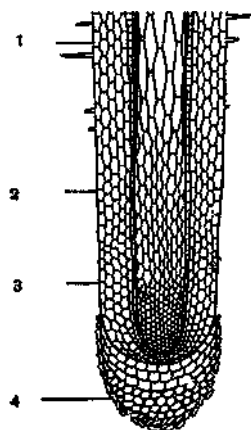


Рис. 6.5. Схематическое изображение кончика молодого корня. Продольный разрез корня, показывающий его внутреннее строение:

1 – зона дифференцировки (зона корневых волосков); 2 – зона растяжения; 3 – меристематическая зона (точка роста); 4 – корневой чехлик

Выше точки роста расположена *зона растяжения* – недифференцированные клетки, быстро растущие за счет поглощения воды. Длина зоны растяжения около 3...5 мм (до 10 мм). Для сравнения: длина растущей зоны у надземных побегов (стеблей) варьирует от 2...4 см до 30 см, редко больше.

Выше находится *зона корневых волосков*, в которой происходит дифференциация клеток в постоянные ткани корня. Через корневые волоски, длина которых достигает 8 мм, происходит наиболее активное поглощение основной массы влаги с растворенными в ней питательными веществами; благодаря корневым волоскам значительно увеличивается всасывающая поверхность влаги из почвы.

При прорастании семян вначале появляется корешок с мельчайшими корневыми волосками, через которые и происходит первичное соприкосновение нового растения с почвой. Рост корешка обеспечивается энергией и питательными веществами, накопленными в эндосперме семени. В начальный период корешки растут значительно интенсивнее, чем надземные органы растения (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Сравнительная длина надземных и подземных органов (см) некоторых растений

Растения	Огурец (10 суток)	Огурец (20 суток)	Тыква	Арбуз	Лен
Длина побега	3	8	5 (семядоли)	5	10...15
Длина корня	9,5	17	22 (и 23 – боковые)	15...20 (7...8 – боковые)	Более 2 тыс. корневых окончаний

Сами корневые волоски недолговечны, они постоянно заменяются новыми образованиями. Корневыми волосками покрыта незначительная часть корня – около 1...6 см. В «поисках» влаги и питательных веществ

корни многих растений проникают в почву на значительную глубину. Так у картофеля – до 1,6 м, у пшеницы – до 2 м, у подсолнечника и свеклы – до 3 м, у хлопчатника – до 6 м, у пустынной многолетней травы – верблюжьей колючки (*Alhagi sp. sp.*) – до 15 (22) м (рис. 6.6). Корни растений растут не только в глубину, но и в ширину. Например, у картофеля – на 115 см, у пшеницы – на 122 см, у свеклы – на 133 см, у пустынных кустарников и многолетних трав – до 15...20 м (рис. 6.7).

Согласно К.Е. Овчарову (1973), на площади 1 га взрослых посевов люцерны сухая масса корней составляет порядка 5 т, а в травосмеси люцерны с житняком – 10 т.

Подсчитано, что общее число корневых волосков у взрослого растения ржи, выросшего в оптимальных условиях, достигает большой величины – около 14,5 млрд (шт.) с площадью поверхности 399 м². При этом суммарная площадь корней и корневых волосков составила 631 м², и они размещались в 0,05 м³ почвы. На число корней и занимаемую ими площадь влияет густота стояния растений. Так при расстоянии между растениями 3 м общая длина корней одного растения пшеницы достигает 70 км и всего 1 км при расстоянии между ними 15 см. Общая поверхность всей корневой системы в 130 раз превышает поверхность надземных органов того же растения благодаря очень плотному ветвлению корней. Исключительно высока способность корней к ветвлению, которая в тысячи раз превышает таковую у надземных органов. Подсчитано, что у однолетнего сеянца яблони, имеющего 5...7 ветвей, число корней (разных порядков) достигало 50 000.

Непрерывно ветвясь, корни способны проникать в мельчайшие поры почвы и поглощать содержащуюся в почвенных частицах влагу и минеральные вещества. Еще пример. У озимой ржи (в фазе колошения) надземная часть растений на 1 м² состояла из 80 побегов с общим числом листьев 480, площадь которых оказалась равна 4,5 м². На одном таком растении находилось 143 корня первого порядка, 35 тыс. корней второго порядка, 2,3 млн корней третьего порядка и 11,5 млн корней четвертого порядка с общей длиной корней 600 км и общей поверхностью 225 м². На этих корнях находилось около 15 млрд корневых волосков общей длиной около 10 тыс. км и общей площадью 400 м².

Рассмотрим анатомическое строение корня. Наружный слой корня состоит из клеток эпидермиса (рис. 6.8), который защищает от повреждений внутренние слои корня. Из эпидермиса вырастают корневые волоски на определенном участке корня. У однолетних растений под эпидермисом расположена кора, состоящая из тонкостенных, округлой формы клеток. По коре передвигаются вода с растворенными в ней минеральными веществами; в ней же происходит отложение питательных веществ. Далее следует *эндодерма* – внутренний слой клеток в первичной

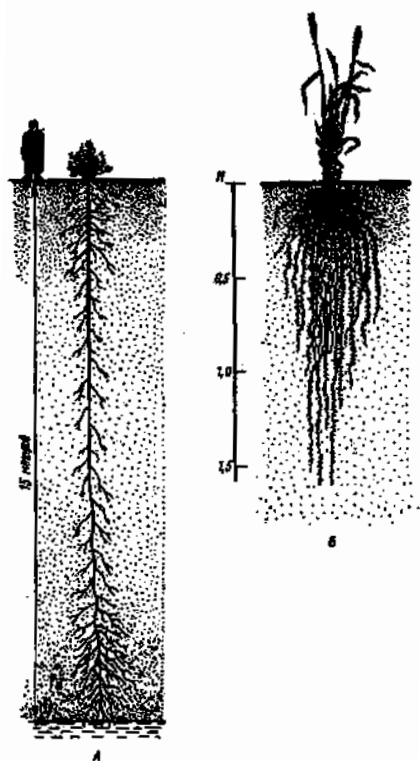


Рис. 6.6. Различные типы корневых систем: А — экстенсивный (верблюжья колючка *Alhagi camelorum*); Б — интенсивный (пшеница)

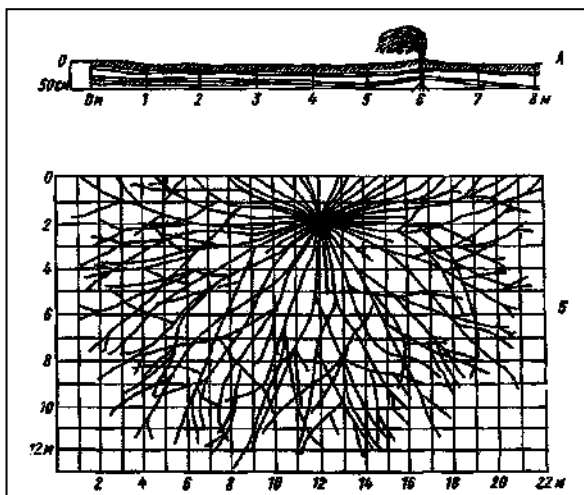


Рис. 6.7. Корневая система пустынного злака — *Aristida karelini* (Петров М. П., 1950): А — профиль, Б — план

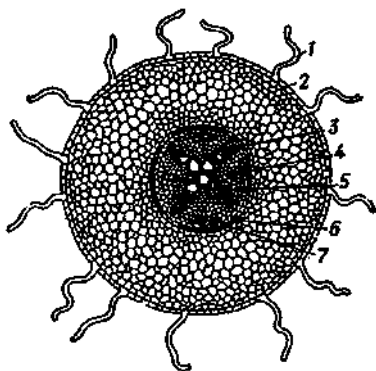


Рис. 6.8. Поперечный разрез корня вблизи его кончика в зоне корневых волосков:

1 – корневой волосок; 2 – межклетник; 3 – пропускная клетка; 4 – ситовидные трубки флоэмы; 5 – сосуды ксилемы; 6 – эндодерма; 7 – перицикл.

коре стеблей и корней, расположенный между проводящей тканью и основной тканью – *паренхимой*. К эндодерме прилегает еще один слой клеток – *перицикл* (или *перикамбий*), образовательная ткань, окружающая проводящие ткани в стеблях и корнях растений и состоящая из нескольких слоев клеток паренхимы. Эти клетки способны продуцировать образование боковых (вторичных) корней. Внутри перицикла находится *ксилема*, в поперечнике напоминающая форму звезды или спиц колеса и состоящая из толстостенных, удлинённых проводящих клеток сосудов. Между соседними лучами ксилемной звезды расположены клетки *флоэмы*, представляющие собой специализированные ситовидные трубки. Транспортные системы флоэмы обеспечивают перенос органических и некоторых минеральных веществ из надземной части растения в корни. В корнях древесных пород между флоэмой и ксилемой расположен еще один слой клеток *камбия*, в результате деления которых образуются дополнительные слои флоэмы и ксилемы, и происходит рост корня в толщину.

Перицикл и находящиеся внутри него ткани ксилемы, флоэмы и паренхимы называют *центральным цилиндром*. У голосеменных растений (это в основном хвойные) функцию проведения воды выполняют *трахеиды* – длинные (1 мм...12 см) остроконечные клетки, сообщающиеся через окаймленные поры в косых стенках. У покрытосеменных растений преобладают сосуды, представляющие собой полые трубки из клеточных стенок, расположенных вертикальными рядами. Средняя длина сосудов около 10 см (у дуба – до 2 м, ширина их до 0,3...0,5 мм). Вода и растворенные в ней вещества из клеток паренхимы диффундируют в полость сосуда через клеточную стенку и продвигаются по сосудам благодаря диффузии.

Общепризнанно, что поглощение воды и ее подъем вверх происходит под влиянием двух факторов: корневого давления (нижнего конечного «двигателя») и всасывающей силы транспирации (верхнего конечного «двигателя»).

Сила корневого давления у различных растений неодинакова: у травянистых она, как правило, не превышает 1...1,5 атм, у древесных пород – несколько больше. Это хорошо заметно на поперечных срезах травянистых стеблей, на которых появляются капли жидкости, называемые *соком «плача»* (или *пасокой*). Весной, при переходе растений от зимнего покоя к активной вегетации, из надрезов коры у березы, дуба, клена, винограда, ореха и др. наблюдается интенсивное соковыделение («плач» растения). Явление «плача» свидетельствует о значительном корневом давлении, достигающем 1,013 мПа (10 атм).

Березовый сок часто собирают в специальные сосуды и используют в качестве питательного напитка, богатого органическими веществами, преимущественно сахарами (до 3...4 % у березы)⁴, белками, органическими кислотами и имеющего приятный вкус. Скорость движения сока у одного и того же растения неодинакова в разные фазы развития, в течение дня и в различные периоды вегетации в течение года. Интенсивность соковыделения снижается также при снижении запасов почвенной влаги и повышении концентрации почвенного раствора.

Через корневые волоски, через клетку коры и перицикла вода поступает в сосуды ксилемы. На первых этапах поглощения вода поступает в сосуды благодаря механизму *осмоса* (от греч. *osmos* – толчок, давление) – медленное проникновение раствора через тонкую перегородку – мембрану, благодаря разности в концентрации растворов. Если во внешней среде создать осмотическую концентрацию, равную внутриклеточной, то вода в клетки поступать не будет; если осмотическая концентрация в среде выше, то вода выходит из клеток, если ниже – идет ее поглощение клетками. Накопление в сосудах осмотически активных веществ создает сосущую силу, способствующую осмотическому транспорту воды в ксилему. В результате активной «работы ионных насосов» в корне и осмотического (пассивного) поступления воды в сосуды развивается гидростатическое давление, называемое *корневым давлением*. Оно обеспечивает поднятие ксилемного раствора по сосудам ксилемы из корня в надземные части растения.

Однако только корневого давления для подъема воды по сосудам растения на большую высоту было бы недостаточно. «Присасывающая сила» транспирации (верхний концевой «двигатель»), исчисляемая многими десятками атмосфер, оказывает основное воздействие на водный слой, непосредственно прилегающий к клеткам листьев, испаряющим воду. Распространение действия «верхнего концевого двигателя» на всю содержащуюся в сосудах воду обеспечивается тем, что вода в капиллярных сосудах находится в состоянии непрерывных (сплошных) нитей. Силы сцепления молекул воды в них достигает 200...300 и более атмосфер.

⁴ Весной сок американского сахарного клена содержит до 8 % сахара.

Именно этот мощный фактор, сочетающийся с действием сил «нижнего и верхнего концевых двигателей», обеспечивает поднятие воды вверх по стволу деревьев на десятки метров (тополя, дубы, секвойи и др.).

Для поглощения из почвы влаги и минеральных веществ корень обладает способностью «ориентироваться в пространстве», и реагировать на градиенты влаги в почве. Так, при прорастании семян корень первоначально ориентируется в гравитационном поле, направляя свой рост к центру Земли (положительный геотропизм). Еще в опытах Ч. Дарвина и др. была доказана чувствительность корня к направлению действия силы тяжести, локализованная в клетках корневого чехлика. Эти клетки также очень чувствительны к механическому сопротивлению почвы (субстрата), поэтому корень растет в длину в рыхлых участках почвы. В условиях недостатка почвенной влаги корень начинает реагировать на градиент влаги, при этом корень растет в сторону более влажных участков почвы.

В определенных условиях капельно-жидкая влага наблюдается и у растений с неперерезанным стеблем. Если накрыть стеклянным колпаком молодые проростки злаков, то вскоре на кончиках листьев появляются капельки жидкости. Это явление называется *гуттацией* (от лат. *gutta* – капля) – выделение растениями капельно-жидкой воды через устьица, наблюдаемой в теплом, насыщенном парами воды воздухе, когда затруднено испарение влаги (транспирация) с поверхности растения. Явление гуттации у наземных растений наблюдается во всех случаях, когда происходит нарушение диспропорции между поступлением воды в растение и его расходом путем нормального испарения. У тропических и водных же растений гуттация осуществляется непрерывно, поскольку это единственный путь поддержания необходимого уровня водного баланса растения. Например, у тропического растения *тарро древнего* верхушка каждого листа выделяет до 200 капель в минуту. В умеренной зоне активно гуттируют некоторые виды ивы. Скорость передвижения воды по сосудам растений зависит от многих факторов. По измерениям методом «меченых атомов» она достигает 1...2 м в час, иногда несколько больше.

Второй причиной подъема воды вверх по сосудам растений является всасывающая сила транспирации (или верхнего концевого «двигателя»). Напомним, что *транспирация* (от лат. *trans* – сквозь, через; и *spirare* – дышать) – это испарение воды растением. Основным органом, транспирирующим воду у растения, является лист. Суммарное потребление воды растениями значительно и, естественно, изменяется в широких пределах в зависимости от вида (сорта) растения, фазы его развития, возраста, условий существования и проч. Например, растение озимой пшеницы при формировании среднего урожая зерна испаряет за период вегетации 300...320 мм воды, что в некоторых зонах ее возделывания превышает количество выпадающих осадков за такой же период. Большинство

растений развивают мощный листовой аппарат, общая поверхность которого превышает занимаемую теми же растениями земельную площадь (табл. 6.2).

Таблица 6.2

**Листовая поверхность некоторых растений и растительных сообществ
(Рубин Б.А., 1971, с. 335)**

Растения и сообщества	Количество растений (тыс. шт. на 1 га)	Общая листовая поверхность (га)
Зерновые злаки	5 000	около 8
Бобовые травы	200	около 12
Хлопчатник, сахарная свекла	100	около 5
Плодовые деревья	0,200	около 2
Лиственный лес	3...5	около 6

Эффективность использования воды – важнейшее биологическое свойство растительного организма. Количество воды, расходуемое растением на построение каждой единицы сухого вещества, называется *транспирационным коэффициентом* (синоним – коэффициент транспирации). Согласно ГОСТ 17713–89, *коэффициентом транспирации* называется отношение массы воды, расходуемой растением на транспирацию, к массе сухого вещества за вегетационный или межфазный период.

Коэффициент транспирации неодинаков у различных растений: в пределах одного вида (сорта) он изменяется в зависимости от условий их произрастания (минерального питания, интенсивности освещения, обеспеченности водой), фазы развития, применяемой агротехники и других причин.

Амплитуда коэффициента транспирации меняется в широких пределах у различных сельскохозяйственных культур: просо – 27 %, кукуруза – 31 %, пшеница – 41 %, хлопчатник – 45 %, люцерна – 48 %, сорго – 60 %, сахарный тростник – 276 % (Алпатов А.М., 1954).

Периодичность суточного хода транспирации наблюдается у всех растений. Так у деревьев, теневыносливых растений, многих злаков испарение воды достигает максимума незадолго до наступления максимума дневной температуры. В полуденные часы с повышением температуры, снижением влажности воздуха происходит усиление водного дефицита, поэтому устьица закрываются и транспирация снижается. В предвечерние часы (с понижением температуры среды устьица открываются) транспирация несколько повышается, но в ночные часы оказывается минимальной. Такой ход транспирации приводит к незначительным суточным изменениям осмотического давления и содержания воды в листьях. Естественно, что в течение суток интенсивность транспирации изменяется. Под *интенсивностью транспирации* понимают количество испарившейся воды (g) за единицу времени (s , мин, ч) с единицы площади (cm^2 , m^2) или массы

листа (г). У большинства растений интенсивность транспирации составляет 15...250 г · м⁻² · ч⁻¹ днем и 1...20 г · м⁻² · ч⁻¹ ночью.

Величиной, обратной транспирационному коэффициенту, является *продуктивность транспирации*, показывающая количество граммов сухого вещества, образуемого при расходовании посредством транспирации каждых 1000 г воды. У растений умеренного климата продуктивность транспирации составляет от 1 до 8 г (в среднем 3 г) сухого вещества на каждые 1000 г испарившейся воды. При этом на долю водорода и кислорода воды приходится лишь 2/3 этой величины (3 г), т.е. около 2 г. Следовательно, согласно расчетам физиологов, в среднем на синтез своей массы растение использует лишь 0,2 % пропускаемой воды, а 99,8 % тратится на испарение (Рубин Б.А., 1971; Полевой В.В., 1989). Известно, что различные растения используют неодинаковое количество минеральных элементов при создании своей органической массы. Например, при создании урожая озимой пшеницы в 30 ц/га растения берут из почвы 100 кг азота, 35 кг фосфора и 30 кг кальция (Овчаров К.Е., 1973).

Активность корневых волосков возрастает в условиях оптимальной температуры почвы и ее достаточной влажности. Кроме того, для нормальной жизнедеятельности корней анаэробных растений необходим кислород. Воздушный режим почвы определяется количеством влаги, находящейся в ее корнеобитаемых горизонтах. Это количество почвенной влаги зависит не только от атмосферного увлажнения (количество и режим выпадения осадков, режим орошения), но и от водно-физических свойств почвы, т.е. от водоудерживающей способности почвы. Чем выше насыщенность почвы влагой, тем в большей степени тормозится поступление кислорода в ткани растения. В экстремальных условиях наступает кислородное голодание растения. Недостаточное поступление кислорода в ткани, в свою очередь, тормозит интенсивность поступления влаги в растение, что связано с уменьшением интенсивности дыхания всего растения.

При недостатке кислорода нарушаются и другие стороны обмена веществ в растении: при дефиците кислорода органические кислоты не окисляются, а накапливаются в тканях в значительных количествах. В таких условиях задерживается образование белковых соединений, увеличивается количество аминокислот, снижается поступление в растения азота. В результате этого тормозятся процессы роста надземных органов, на листьях развивается *хлороз* (от греч. *chloros* – бледно-зеленый), когда листья приобретают пеструю, бело-зеленую окраску. Это происходит при неблагоприятных почвенно-климатических условиях, в результате нарушения ферментной системы питания растений. Следствием этого заболевания становится разрушение хлорофилла, часто наблюдаемое при недостатке железа и др. элементов, причем величина и качество урожая снижаются. Внешние признаки хлороза: преждевременное пожелтение и

опадение листьев, усыхание верхушек побегов. Наиболее часто хлороз развивается на посевах табака, махорки, среди посадок малины, других плодово-ягодных культур и среди домашних цветов. Мерой борьбы с этим заболеванием является внесение органических и минеральных удобрений, микроэлементов, а также борьба с вредителями (тли, трипсы и др.), являющимися переносчиками инфекционного вируса, также вызывающего заболевание хлорозом.

У растений водной среды обитания, например обитающих в болотах, на затопляемых низинах и побережьях водных объектов, когда их корневые системы постоянно находятся в условиях избыточного увлажнения, имеются специальные «приспособления», выработанные в процессе эволюции растительного мира. Такие растения, как лотосы, кувшинки, камыши, многие виды осок, а также кустарники и деревья имеют в корнях, тканях побегов и в листьях полые межклетники «аэренхимы», наполненные воздухом (кислородом). Благодаря таким тканям кислород поступает из листьев в корни, а из корней углекислый газ (CO_2) – в листья.

Дождевая вода, проходя через атмосферу, обычно растворяет находящиеся в ней газы (азот, кислород), а также аммиак и окислы азота (образующиеся в атмосфере при грозовых разрядах), сернистый газ, различные соли и др. примеси, поступающие вместе с ней в почвенные горизонты. Особенно сильно дождевая вода загрязняется в районах, связанных территориально с крупными промышленными центрами и транспортными магистралями. Как только вода попадает в почву, она вступает в химические реакции с различными органическими и минеральными веществами, обогащаясь при этом некоторыми растворимыми соединениями. Поэтому влага в почве представляет собой не чистую воду, а *почвенный раствор*. Его состав и степень концентрации сильно различаются в зависимости от типа почвы, климатических особенностей территории, условий погоды. При разложении органических остатков в почве образуются разнообразные водорастворимые органические кислоты, передающие почвам кислую реакцию. Например, основная масса лесных почв имеет кислую реакцию, что отражается на многих свойствах таких почв и, следовательно, на видовом составе растительного покрова. Растения через корневые волоски чутко реагируют на кислотность почвы. Почвенный раствор может иметь *кислую, нейтральную или щелочную реакцию*.

Кислыми растворами называются такие растворы, в которых концентрация свободных водородных ионов больше, чем концентрация свободных гидроксильных ионов (т.е. группы кислород-водород – $[\text{OH}]$). Гидроксильные группы входят в состав воды, которая распадается (диссоциирует) на ионы: $[\text{H}^+] + [\text{OH}]$. Как видно, получается одинаковое количество водородных и гидроксильных ионов, т.е. незагрязненная вода имеет нейтральную реакцию. Степень диссоциации воды очень мала.

При обычной комнатной температуре из одного миллиарда молекул воды только две диссоциируют на ионы: $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow [\text{H}^+] + [\text{OH}^-]$.

Концентрации ионов $[\text{H}^+]$ и $[\text{OH}^-]$ в чистой воде равны: $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$. Гидроксильная группа входит также в качестве оснований в состав, например, спиртов ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) и многих других соединений. *Щелочными растворами* являются растворы, в которых концентрация свободных гидроксильных ионов превышает концентрацию свободных водородных ионов.

Кислотность почвы – один из ее важнейших агрохимических показателей – определяется по концентрации ионов водорода в почвенном растворе. Реакция его зависит не от общего содержания в нем кислоты или щелочи, а от соотношения концентраций свободных водородных и гидроксильных ионов. Для удобства было предложено выражать концентрацию свободных водородных ионов (так называемая активная реакция) не в абсолютных величинах, т.е. в грамм-ионах на 1 л, а в виде отрицательных логарифмов этих величин. Кислотность $[\text{H}^+]$ или щелочность $[\text{H}^-]$ раствора (жидкости) выражают символом pH (отрицательный логарифм величины концентрации свободных ионов водорода). Таким образом, принято, что в нейтральных растворах $\text{pH}=7$, в кислых растворах $\text{pH}<7$, в щелочных растворах $\text{pH}>7$. Различная степень кислотности (щелочности) выражается с десятками долями этой градации. Естественно, что различные типы почвы обладают различной кислотностью.

В нормальных условиях (влажность, питательность, обеспеченность кислородом, кислотность почвенных растворов) развитие корневых волосков, активность всей корневой системы яблони увеличивается в 2...6 раз, а у гороха в 5...12 раз.

Итак, постоянное движение воды от корневой системы к надземным органам:

- служит средством транспортировки и накопления в надземных органах минеральных веществ и органических соединений, поступающих из корней;

- обеспечивает восходящий ток нормального водоснабжения всех клеток, поддерживает их тургор;

- при этом транспирация является надежным способом защиты растений от перегрева.

Напомним, что испарение происходит только при затрате тепла; так при температуре воды 0°C затрачивается 2,50 кДж тепла (597 ккал). Процессы транспирации и усвоения углекислого газа связаны между собой. Чтобы получить CO_2 (открытие устьиц), растение вынуждено отдавать воду, а уменьшение потери воды (закрывание устьиц) снижает приток CO_2 .

Вегетативные органы (см. рис. 6.2) – это стебли (побеги), листья, корни, выполняющие функции питания и роста растения и не имеющие органов семенного (полового) размножения.

Вегетативные почки – это зародышевые побеги растения, служащие для нарастания побега и его ветвления.

Генеративные органы обеспечивают процесс полового размножения растений.

Цветок – это видоизмененный неразветвленный побег с ограниченным ростом, приспособленный для полового размножения с последующим образованием семян и плода. Органы цветка являются видоизмененными листьями: покровные листья формируют чашелистики и лепестки, а спорообразующие листья дают начало тычинкам и пестикам. На рис. 6.9 показан цикл развития яблони, центральное место в котором принадлежит цветку. Особенности строения цветков, а также их окраска, нектарники связаны со способом опыления: перекрестное опыление насекомыми, ветроопыляемые растения и др. Эти вопросы подробно рассматриваются в разделе ботаники – морфология растений.

Плод – это орган покрытосеменных растений, развивающийся из завязи после оплодотворения яйцеклетки. Функции плода – в защите семян и их рассеивания. Рис. 6.10. показывает основные этапы образования некоторых сочных плодов. В образовании плода принимают участие *завязь* и *цветоложе*. После оплодотворения из завязи развивается плод, при этом из семязачатков формируются семена, а из стенки завязи – околоплодник (перикарий). Примером сухих плодов являются: боб, листовка, стручок, коробочка, орех, семянка, зерновка и др. Сочные плоды – ягоды, яблоко, тыква, костянка и др.

Таким образом, у растений развито несколько единых для всего организма функциональных систем: система автотрофного (листья) и почвенного (корни) питания, сосудистая проводящая система (ксилема и флоэма, выполняющие те же функции, что и кровеносная система животных, кроме транспорта кислорода), опорная система (механические и др. ткани), двигательная система (зоны растяжения, изменяющийся тургор клеток). Диффузный характер имеют дыхательная и выделительная системы (газообмен с помощью устьиц, межклеточников и т.п.). Защитная система растений реализуется за счет содержания в клеточном соке и выделении жгучих веществ, благодаря формированию специальных морфологических структур (например, колючки у гледичии, акации, шиповника, верблюжьей колючки и многих др.).

В отличие от животных у растений практически отсутствуют органы чувств и нервная система. Растения не передвигаются в поисках пищи, поскольку свет, вода, CO_2 , минеральные соли находятся в окружающей среде повсюду. Растения лишь развивают (удлиняют) свои осевые органы и развивают поверхность соприкосновения (побеги, листья, корни, корневые волоски). Редкая способность к быстрым движениям известна у очень незначительного числа растений: мимозы, венериной мухоловки и др.

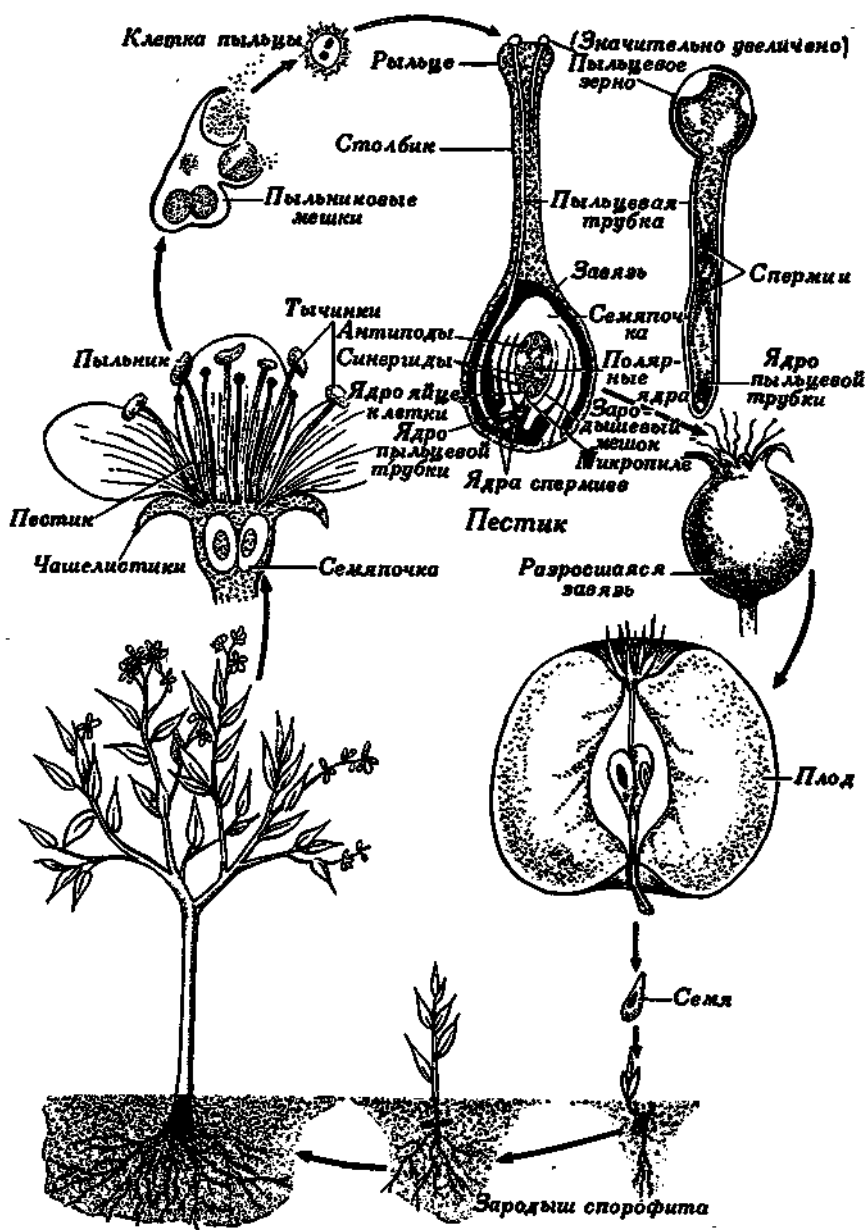


Рис. 6.9. Цикл развития яблони (Вилли К. Биология, 1968)

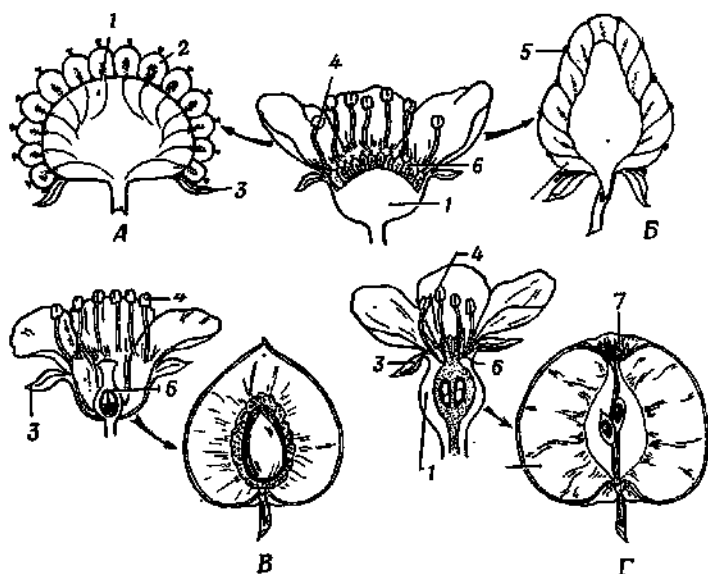


Рис. 6.10. Образование некоторых сочных плодов. Ягоды малины и земляники образуются из цветков сходного типа, но пестики малины превращаются в мясистые косточковые плоды, а пестики земляники превращаются в сухие семянки – желтые, похожие на семена пятна, разбросанные на поверхности плода: А – малина; Б – земляника; В – персик; Г – яблоко. 1 – цветоложе; 2 – слой мякоти; 3 – чашечка; 4 – пыльники; 5 – семянка; 6 – пестик; 7 – остатки чашечки

Главной особенностью большинства растений является *автотрофный (или фототрофный) тип питания*, то есть питания за счет фотосинтеза, который поддерживается корневым питанием – поглощением воды и минеральных солей. Однако растения питаются и *гетеротрофно*. Например, при прорастании семян, клубней картофеля и др. используются накопленные в них питательные вещества; этот же тип питания наблюдается ночью, когда фотосинтез отсутствует.

Подводя итог этого раздела, отметим, что «высшее растение – сложнейшая биологическая система, функциональную активность которой обеспечивают 10...15 органов, 3...4 десятка различных специализированных тканей, несколько десятков специализированных групп клеток» (Полевой В.В., 1989, с. 30).

ГЛАВА 7

ФОТОСИНТЕЗ РАСТЕНИЙ

Солнце своим лучистым светом дает жизнь.

Надпись на храме богини Дианы в Эфесе

Солнце – отец урожая, вода – мать урожая.

Индийская пословица

Источником энергии для всех метаболических процессов на нашей планете служит Солнце. Свет – это один из видов электромагнитного излучения. Любое электромагнитное излучение имеет волновые свойства и распространяется (в пустоте) с одной и той же скоростью, равной $3 \cdot 10^8$ м/с. Распределение лучистой энергии по длинам волн называют спектром электромагнитного излучения. При этом разные виды электромагнитного излучения различаются по длине волны, т.е. по расстоянию между ее соседними максимумами (вершинами).

Длины волн, соответствующие гамма-излучению и рентгеновским лучам, очень малы (менее 10^{-11} м), в то время как длины радиоволн могут составлять сотни метров. Длины волн видимого участка спектра принято выражать в нанометрах (нм) или микрометрах (мкм); $1 \text{ мкм} = 10^{-6}$ м, а $1 \text{ нм} = 10^{-9}$ м.

Плотность потока солнечной радиации обычно (до 1963 г.) выражали в Вт/см², кал/(см²·мин) и эрг/(см²·с). С 1 января 1963 г. (ГОСТ 9867-61) была введена новая Международная система единиц (СИ). Согласно этой системе, для потока (интенсивности) солнечной радиации используется единица Вт/м², а для сумм радиации – Дж/(см²·ч), Дж/см²·день) и т.д.

Поскольку в научной метеорологической и биологической литературе XX столетия встречаются количественные выражения потока солнечной радиации во внесистемных величинах и в СИ, для удобства усвоения материала приводится табл. 7.1

7.1. Общие сведения о фотосинтезе растений

Основные сведения о солнечной радиации, поступающей на верхнюю поверхность атмосферы и на поверхность Земли, описаны в части I (см. 2.1).

Хорошо известно, что солнечное излучение является источником света, а также движущей силой всех процессов жизнедеятельности зеленых растений и основным источником энергии, которая обеспечивает процесс фотосинтеза. Вода, поступающая из корневой системы, не только участвует в фотосинтезе, она поддерживает и регулирует температуру

Таблица 7.1

**Переводные множители между единицами измерения ФАР
(Тооминг Х.Г., 1977)**

Единица	Единица				
	эрг/с	кал/с	кал/м	кал/ч	Вт
эрг/с	1	$2,39 \cdot 10^{-8}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
кал/с	$4,19 \cdot 10^7$	1	60	3600	4,19
кал/м	$6,98 \cdot 10^5$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	1	60	$6,98 \cdot 10^{-2}$
кал/ч	$1,16 \cdot 10^4$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	1	$1,16 \cdot 10^{-3}$
Вт	$1,0 \cdot 10^7$	0,239	14,34	$8,6 \cdot 10^3$	1
эрг	1	$2,39 \cdot 10^{-8}$	$2,39 \cdot 10^{-11}$	10 ⁻⁷	–
кал	$4,19 \cdot 10^7$	1	0,001	4,19	–
ккал	$4,19 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^3$	1	$4,19 \cdot 10^3$	–
Дж	10^7	0,239	$2,39 \cdot 10^{-4}$	1	–

растения путем транспирации, обеспечивает перенос элементов питания по всем его тканям и клеткам.

Напомним, что в солнечном спектре различают три основные части: *невидимую ультрафиолетовую* (УФР) $\lambda < 0,40$ мкм, *видимую* ($0,40 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 0,76 \text{ мкм}$) и *невидимую инфракрасную* (ИФА) с длиной волны $\geq 0,76$ мкм.

У верхней границы атмосферы на видимую часть спектра приходится почти половина всей поступающей солнечной лучистой энергии – 47 %, на инфракрасную – 44 %, на ультрафиолетовую – 9 %. Видимая часть спектра создает освещенность, воспринимаемую глазом.

Со времен Исаака Ньютона (1643–1727 гг.) известно, что при прохождении через оптическую призму солнечный свет разлагается в спектр, цветовая гамма которого напоминает радугу. Эти лучи расположены по убывающей длине волны: от красных (0,62...0,75 мкм) до фиолетовых (0,40 мкм). Совместное действие всех этих лучей спектра воспринимается глазами человека как белый свет с длиной волны 0,34...0,76 мкм. Общий вид спектра электромагнитного излучения представлен на рис. 2.5 (см. главу 2). Невидимые инфракрасные лучи производят тепловой эффект. В табл. 7.2 показано деление спектра на отдельные участки в зависимости от длины волн и приведены их характеристики.

Спектр солнечной радиации в актинометрии подразделяется на две области: коротковолновую (или интегральную) с длинами волн 0,28...4,0 мкм и длинноволновую (или тепловую) с длинами волн > 4 мкм. Прямая, рассеянная и отраженная радиации относятся к коротковолновой части спектра, а тепловое излучение Земли и встречное излучение – к длинноволновой.

В процессе фотосинтеза используется не весь спектр солнечной радиации, а только часть коротковолновой радиации, находящейся в интервале 0,38...0,71 мкм, называемой *фотосинтетически активной радиацией* (ФАР).

Таблица 7.2

Биологическое значение различных участков спектра (Росс Ю.К, 1975)

Вид радиации	Область спектра, мкм	Процент солнечной радиации	Эффект действия радиации на растение		
			Тепловой	Фотосинтез	Рост и развитие
Ультрафиолетовая	0,29...0,38	0...4	Несущественный	Несущественный	Существенный
ФАР	0,38...0,71	21...46	Существенный	Существенный	Существенный
Ближняя инфракрасная	0,71...4,00	50...79	Существенный	Несущественный	Существенный
Дальняя инфракрасная	> 4,00	—	Существенный	Несущественный	Существенный

Для физиологических процессов, определяющих жизнедеятельность растений, наибольшее значение имеет коротковолновая радиация с длиной волны менее 4 мкм. По биологическому воздействию на растения диапазон коротковолновой радиации подразделяют на: *ультрафиолетовую, фотосинтетически активную и ближнюю инфракрасную*.

Ультрафиолетовая радиация, достигающая земной поверхности, уменьшается по мере снижения Солнца над горизонтом. В высокогорных районах, на высотах более 4 000 м над уровнем моря количество ультрафиолетовой радиации в 2...3 раза превышает таковую на равнине. Интенсивные потоки ультрафиолетовой радиации оказывают сильное биологическое воздействие на живые организмы, в том числе на человека и животных, вызывая ожоги кожи, свертывание белка и т.п. Эта радиация воздействует преимущественно на ростовые процессы растений, замедляя их. Например, растения, развивающиеся в парниках и теплицах, быстрее тянутся в высоту по сравнению с таковыми, произрастающими в открытом поле. Это происходит потому, что прозрачные покрытия значительно снижают проникновение ультрафиолета внутрь теплиц.

Ближняя инфракрасная радиация, активно поглощаемая водой листьев и стеблей растений, оказывает существенное тепловое воздействие на рост и развитие растений. Дальняя инфракрасная радиация оказывает только тепловое влияние на растения, ее воздействие на рост и развитие растений незначительно. Так в высокогорных районах энергия инфракрасных лучей заметно возрастает, что в значительной мере компенсирует растениям недостаточное количество тепла, убывающее с увеличением абсолютной высоты местности над уровнем моря (табл. 7.3).

С увеличением влажности воздуха интенсивность инфракрасных лучей уменьшается благодаря сильному поглощению их водяными парами воздуха.

Таблица 7.3

Длина волн и энергия потока в отдельных участках спектра солнечной радиации (Тверской П.Н., 1962 г.)

Участок спектра	Интервал длин волн, мкм	Энергия потока		Примечание
		Вт/м ²	%	
Ультрафиолетовая область	0,20...0,39	97,7	7	Не проникают до земной поверхности, поглощаясь в основном в слое озона. Достигают земной поверхности
С	0,20...0,28	5,6	0,4	
В	0,29...0,32	17,4	1,2	
А	0,32...0,39	74,7	5,4	
Видимая область	0,40...0,75	635,2	46	Фиолетовые, синие, голубые лучи Зеленые, желтые, оранжевые лучи Красные лучи
А	0,40...0,52	364,3	18	
В	0,52...0,62	209,4	15	
С	0,62...0,75	181,5	13	
Инфракрасная область	0,76...24,00	649,1	47	Ближняя инфракрасная область
А	0,75...1,40	446,7	32	
В	1,40...3,00	174,5	13	
С	3,00...24,00	27,9	2	
В целом	0,20...24,00	1382,0	100	

Итак, процесс трансформации поглощенной растением энергии света в химическую энергию органических (и неорганических) соединений называется *фотосинтезом* (от греч. *photos* – свет и *synthesis* – составление). Это сложный цикл биохимических и биофизических процессов, в ходе которых растения, поглощая солнечную энергию в форме *фотосинтетически активной радиации (ФАР)*, создают с помощью зеленого пигмента – *хлорофилла* – из углекислого газа (CO_2) и воды (H_2O) высокоэнергетические углеводы (крахмал, сахара, глюкозу, клетчатку и др.), освобождая при этом кислород (O_2). Основная роль в этом процессе принадлежит использованию энергии света для восстановления CO_2 до уровня углеводов. Энергия света расходуется также на транспорт веществ через клеточные мембраны, а часть солнечной энергии запасается в высокоэнергетическом веществе – *аденозинтрифосфате (АТФ)*. Вода также является основным сырьем для растения, она необходима для фотосинтеза, транспорта элементов питания, для регуляции и поддержания температуры растения. Фотосинтез осуществляют высшие растения, низшие растения, в том числе водоросли и некоторые бактерии.

Исследования сущности фотосинтеза начались в 1630 г., когда голландский ботаник Ван Гельмонт доказал, что растения сами образуют органические вещества, а не получают их только из почвы. Не останавливаясь подробно на истории исследований фотосинтеза, отметим, что в 1782 г. швейцарский естествоиспытатель Ж. Сенебье установил, что растения на свету не только выделяют кислород, но и поглощают

«испорченный воздух», т.е. CO_2 . Ж. Сенебье назвал поглощение углекислоты растением «углеродным питанием».

Позднее, в 1804 г., швейцарский ученый Т. Соссюр установил, что нарастание сухой массы растений превышает прирост количества углерода. Это превышение было значительно более высоким, чем количество поглощенных минеральных веществ. Следовательно, органическая масса растения образуется не только за счет углекислоты, но и за счет воды, которая является таким же необходимым компонентом, как и диоксид углерода (CO_2). В своей докторской диссертации «Об усвоении света растением» (1875 г) выдающийся русский физиолог растений К.А. Тимирязев доказал (с помощью разработанного им чувствительного метода микроанализа), что интенсивность ассимиляции CO_2 оказывается максимальной при освещении листьев красным светом. Именно эти волны в наибольшей степени поглощаются хлорофиллом. Кстати, зеленый пигмент листьев *хлорофилл* (от греч. *chloros* – зеленый и *phyllon* – лист) был открыт французскими химиками П.Ж. Пельтье и Ж. Каванту в 1817 году.

К.А. Тимирязев установил также, что хлорофилл является тем «оптическим» веществом, которое увеличивает чувствительность к свету и непосредственно участвует в процессе фотосинтеза, необратимо переходя из восстановленного состояния в окисленное. К.А. Тимирязеву принадлежит идея о космической роли фотосинтеза: это единственный процесс, с помощью которого космическая солнечная энергия улавливается и остается на Земле, трансформируясь в другие формы энергии. По его мнению, в *хлоропластах* – зеленых пластидах растительной клетки, содержащих хлорофилловые зерна и другие пигменты, – лучистая энергия солнечного света превращается в химическую энергию углеводов. Крахмал, глюкоза, клейковина и другие соединения, консервирующие солнечную энергию в растительных клетках, служат человеку пищей. Освобождаясь в организме человека (и животных) в процессе дыхания, эта энергия солнечного луча согревает нас, приводит в движение, поддерживает мышление. Вот как писал об этом К.А. Тимирязев: «Когда-то, где-то на Землю упал луч Солнца, но он упал не на бесплодную почву, он упал на зеленую былинку пшеничного ростка, или, лучше сказать, на хлорофилловое зерно. Ударяясь в него, он потух, перестал быть светом, но не исчез. Он только затратился на внутреннюю работу, он рассек, разорвал связь между частицами углерода и кислорода, соединенными в углекислоте. Освобожденный углерод, соединяясь с водой, образовал крахмал. Этот крахмал, превратясь в растворимый сахар, после долгих странствий по растению отложился, наконец, в зерне в виде крахмала же или же в виде клейковины. В той или другой форме он вошел в состав хлеба, который послужил нам пищей. Он преобразился в наши мускулы, в наши нервы. И вот теперь атомы углерода стремятся в наших организмах вновь

соединиться с кислородом, который кровь разносит во все концы нашего тела; при этом луч Солнца, таившийся в них в виде химического напряжения (энергии), вновь принимает форму явной силы. Этот луч Солнца согревает нас. Он приводит нас в движение. Быть может, в эту минуту он играет в нашем мозгу». (Жизнь растения, 2006).

Известно, что энергия не исчезает, она только превращается из одной формы в другую, производя при этом работу. В процессе фотосинтеза эта работа заключается в разложении углекислоты (CO_2). «Таким образом, в разложении углекислоты и образовании органической массы растения мы имеем все условия какого-нибудь технического производства. Мы имеем двигатель – солнечный луч, машину, к которой прилагается этот двигатель – растение, сырой материал – углекислоту и воду, обработанный продукт – органическое вещество растения» (Тимирязев К.А., там же, с. 247).

По выражению великого английского естествоиспытателя Ч. Дарвина: «Хлорофилл, это, пожалуй, – самое интересное из органических веществ». Хлорофилл состоит из двух очень близких веществ: *хлорофилла «а»*, суммарный химический состав которого $\text{C}_{55}\text{H}_{72}\text{O}_5\text{N}_4\text{Mg}$, и *хлорофилла «б»* – $\text{C}_{55}\text{H}_{70}\text{O}_6\text{N}_4\text{Mg}$.

Хлорофилл «а» имеет несколько синеватый оттенок, а хлорофилл «б» – желтоватый. В пластидах растений количество хлорофилла «а» всегда больше, нежели хлорофилла «б», поэтому считается, что первый является основным поглотителем лучистой энергии. Хлорофилл «а» поглощает главным образом красные лучи, хлорофилл «б» – сине-фиолетовые. Пример структурной химической формулы хлорофилла «а» приведен на рис. 7.1.

Экспериментальным путем было установлено, что фотосинтез состоит из двух последовательных реакций: быстрой *световой реакции* и ряда более медленных, не зависящих от света этапов *темновой реакции*. Первая, *световая* (или *фотохимическая*) *фаза* фотосинтеза происходит при участии хлорофиллов и сопровождающих пигментов, поглощающих ФАР. На световой фазе фотосинтеза происходит поглощение света молекулами хлорофилла «а» с участием дополнительных пигментов (хлорофилла «б», каротиноидов и др.) и трансформация энергии света в химическую энергию аденозинтрифосфата (*АТФ*) и восстановленного никотинамидадениндинуклеотидфосфата (*NADPH*), являющихся конечными продуктами световой фазы фотосинтеза. Эти процессы осуществляются в фотохимически активных хлоропластах (в бурых и сине-зеленых водорослях – в хроматофорах) и представляют собой сложную систему фотофизических, фотохимических и химических реакций, которые здесь не рассматриваются.

В основе процесса лежат окислительно-восстановительные реакции, в которых «донором» водорода и источником выделяемого кислорода (O_2) служит вода (H_2O), а принимающим – водород и источник углерода – CO_2 .

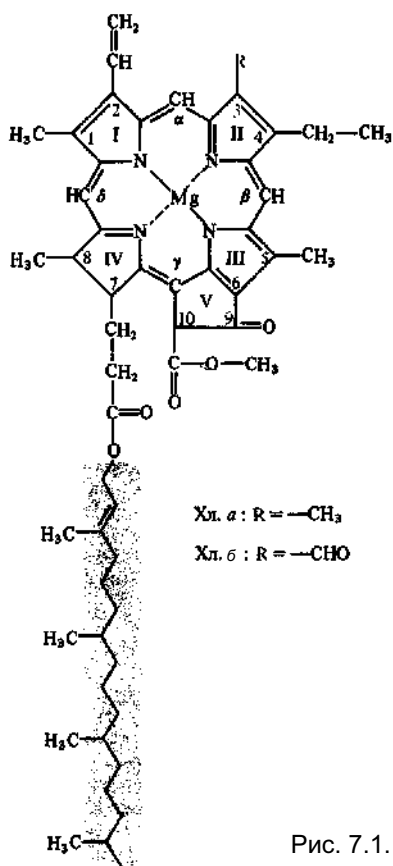
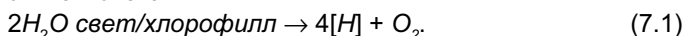
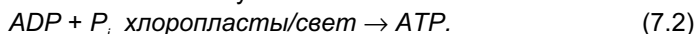


Рис. 7.1. Структурная формула хлорофилла «а»

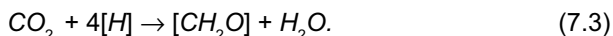
В простейшем изложении – это фотодиссоциация (диссоциация – от лат. dissociatio – разъединение, разделение) воды на более простые молекулы под действием света:



При этом в хлоропластах клеток под действием света происходит преобразование поглощаемой хлорофиллом энергии кванта света (восстановление NADP^+ и фосфорилирование аденозиндифосфата ADP) в энергию химических связей молекул ATP:



Конечные продукты световых фотохимических реакций в хлоропластах (ATP и NADPH) стоят на входе в *темновую* (или *ферментативную*) фазу фотосинтеза, не зависящую от света, где CO_2 восстанавливается до углевода:



Темновая фаза фотосинтеза тоже очень сложный биохимический процесс, включающий большое количество реакций. Наряду с основными конечными продуктами фотосинтеза – сахарозой и крахмалом – образуются некоторые аминокислоты и другие не углеводные соединения.

Таким образом, темновая фаза фотосинтеза является окислительно-восстановительной реакцией между двуокисью углерода (диоксид углерода) и водой, причем в процессе восстановления CO_2 до углеводов водородные атомы или электроны водорода переносятся от воды к углероду. Одновременно выделяется свободный молекулярный кислород воды.

Выявлены различные пути восстановления CO_2 . По биохимическим признакам растения подразделяются на три основных группы по типу восстановления CO_2 в процессе фотосинтеза. *Первая группа* – это « C_3 -растения», ассимилирующие CO_2 на свету с образованием трех атомов углерода, получившая название «*цикл Кальвина*» по имени американского биохимика М. Кальвина, открывшего этот путь восстановления углекислоты. К этой группе растений относится большинство сельскохозяйственных культур умеренного климата: пшеница, картофель, подсолнечник, фасоль, свекла и др.

Вторая группа включает « C_4 -растения», осуществляющие фиксацию CO_2 , при этом в клетках листьев образуются кислоты, содержащие четыре атома углерода. Такие растения способны осуществлять фотосинтез даже при закрытых устьицах – органах дыхания, используя для этого вещества (малат, аспаргат), накопленные ранее в *хлоропластах* листьев. К C_4 группе относятся многие виды растений засушливых регионов, где в дневные, жаркие часы суток у растений закрываются устьица, благодаря чему происходит сокращение потери влаги за счет испарения (транспирации), а доступная влага расходуется в физиологических процессах более рационально. Эффективность использования воды, т.е. отношение массы ассимилированного CO_2 к массе воды, израсходованной при транспирации, у C_4 -растений вдвое выше, чем у C_3 -растений. Эта группа растений устойчива также к засоленным почвам, т.е. к условиям, когда почвенная влага менее доступна сосущей силе корневых волосков. Поэтому C_4 -растения – кукуруза, сорго, просо, сахарный тростник и другие – имеют преимущества перед C_3 -растениями в засушливых местах возделывания благодаря более высокой интенсивности фотосинтеза при дефиците почвенной влаги.

Третья группа растений характеризуется способностью осуществлять фотосинтез в условиях резко засушливого климата, с длительными периодами почвенной засухи. К этой группе относятся: ананас, алоэ, агавы, молочаи, кактусы, многие растения пустынь и полупустынь умеренного и засушливого климата. Все эти растения-*суккуленты* (от лат. *succulentus* – сочный) или «толстянковые» относятся к сем. *Толстянковые* (*Crassulaceae*). Их ткани накапливают и содержат влагу, а благодаря

анатомическим и физиологическим механизмам, экономно расходуют ее. Для этих растений характерен суточный цикл метаболизма при открытых в темноте устьицах (темновая фиксация CO_2) с образованием яблочной кислоты ночью, восстанавливающейся на свету до уровня углеводов. В соответствии с английским выражением «*crassulacean acid metabolism*» (CAM), т.е. метаболизм кислоты у суккулентов, этот тип фотосинтеза сокращенно называют «CAM-метаболизмом», а растения этого типа – «CAM-растениями» (Полевой В.В., 1989).

Растения трех перечисленных групп обладают разными показателями фотосинтетической функции (табл. 7.4).

Таблица 7.4

Показатели фотосинтетической деятельности растений, характеризующие различные пути первичной фиксации CO_2 при фотосинтезе (Тооминг Х.Г., 1984)

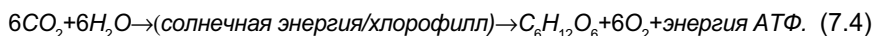
Показатель	C_3 -растения	C_4 -растения	CAM-растения
Продукт первичной фиксации CO_2 при фотосинтезе	C_3 -кислоты, фосфоглицериновая кислота (3-ФГК)	C_4 -кислоты (малат, аспаргат)	на свету 3-ФГК, в темноте малат
Температурный оптимум для фотосинтеза, °C	20...30	30...40	30...40
Световое насыщение фотосинтеза, клк*	40...50	60...90	10...15
Суточная продуктивность фотосинтеза, мг CO_2 /(дм ² -сут.)	70...100	150...200	30...50
Транспирационный коэффициент, г H_2O /г сухой массы	400...500	200...400	100
Компенсационная концентрация CO_2 при оптимальной температуре, мкл/л	30...70	10...20	На свету 0...200, в темноте < 5

* клк – килолюксы

Как видно из этой таблицы, растения, имеющие C_4 -цикл, обладают более высокими показателями фотосинтеза, чем C_3 и CAM-растения. Наиболее эффективно используют почвенную влагу CAM-растения и C_4 -растения. Существенны различия и в температурном оптимуме. Так для некоторых высокогорных C_3 -растений температурный оптимум около 10 °C, а некоторые C_4 -растения, обитающие в сухих и знойных пустынях, активно фотосинтезируют в диапазоне от -3 до +45 °C. Считается, что в условиях жаркого климата C_4 -растения лучше используют агрометеорологические условия летнего полугодия, а C_3 -растения приспособлены к зимним условиям (Тооминг Х.Г., 1984).

Итак, хлорофилл – зеленый пигмент, размещенный в хлоропластах – тельцах протоплазмы клеток, особенно обилен в листьях и однолетних побегах практически всех наземных растений, в том числе в

возделываемых сельскохозяйственных культурах и некоторых видах зеленых водорослей (например, хлорелла и др.). Упрощенная химическая формула фотосинтеза имеет вид:



Количественно эта энергия равна 674 ккал или 2874 кДж/моль.

Первичные продукты фотосинтеза в результате ассимиляции превращаются в органические вещества (называемые также ассимилятами), которые используются растением в ходе роста и развития для создания новых структурных единиц (клеток, тканей, органов) и формирования всей вегетативной и генеративной массы. Необходимые для биофизических процессов и развития живых структур минеральное питание и воду растение поглощает из почвы через корневую систему. В случае, когда производство ассимилятов превышает потребность ростовых процессов, растение запасает их в основном в виде крахмала, образуя, так называемый, «фонд ассимилятов».

Фотосинтез – сложный процесс, включающий большое количество биохимических реакций, которые достаточно подробно исследованы физиологами растений (Полевой В.В., 1989 и многие др.), но не рассматриваются в нашей программе курса.

При высоком стоянии Солнца на земную поверхность поступает максимум энергии в области желто-зеленого спектра лучей. Когда Солнце приближается к горизонту, максимальную энергию имеют дальние красные лучи, мало участвующие в процессе фотосинтеза растений. Рассеянная радиация более богата фотосинтетически активной радиацией, чем прямая.

Таким образом, ФАР является одним из важнейших факторов продуктивности растений, в т.ч. сельскохозяйственных культур. Знание о распределении ФАР, поступающей на посевы во времени и пространстве, имеет большое практическое значение. Интенсивность ФАР измеряют инструментально, но чаще пользуются расчетами по данным о приходе прямой, рассеянной или суммарной радиации (Тооминг Х.Г., Гуляев Б.И., 1967; Ефимова Н.А., 1977):

$$\sum Q_{\text{фар}} = 0,43 \sum S' + 0,57 \sum D, \quad (7.5)$$

где $\sum Q_{\text{фар}}$ – суммарная фотосинтетически активная радиация (Дж/м²); $\sum S'$ – сумма прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность (Дж/м²); $\sum D$ – сумма рассеянной солнечной радиации (Дж/м²). Для приближенного расчета ФАР используют также данные о суммарной радиации с коэффициентом 0,52:

$$Q_{\text{фар}} = 0,52 \sum Q. \quad (7.6)$$

Н.А. Ефимовой составлены карты распределения месячных и годовых сумм ФАР на территории России (см. рис. 2.3). Степень использования ФАР растительным покровом (сельскохозяйственными культурами) определяется обычно коэффициентом полезного использования или КПД:

$$КПД_{\text{фар}} = \left(\sum Q'_{\text{фар}} / \sum Q_{\text{фар}} \right) \cdot 100 \%, \quad (7.7)$$

где $\sum Q'_{\text{фар}}$ – сумма ФАР, затраченная на фотосинтез за период вегетации растений; $Q_{\text{фар}}$ – сумма ФАР, поступающая на верхнюю границу посева за этот период. При этом

$$\sum Q'_{\text{фар}} = q M, \quad (7.8)$$

где q – калорийность сухой растительной массы, кДж/г; M – биологический урожай общей сухой растительной массы, г/см².

Зависимость интенсивности фотосинтеза от величины прихода ФАР описывается, так называемыми, световыми кривыми фотосинтеза, имеющими на графиках форму гиперболы (рис. 7.2). С увеличением интенсивности солнечной радиации световая кривая фотосинтеза (поглощения CO_2) в $\text{мгCO}_2 / (\text{дм}^2 \cdot \text{ч})$ возрастает вначале почти линейно, затем постепенно выходит на «плато». Характеристики световой кривой зависят от вида (сорта) растения. Известно, что для накопления органического вещества растений необходима энергетическая освещенность, создаваемая солнечной радиацией, в количестве большем, чем затрачивается ее на процесс дыхания растений (выделение CO_2).

Угол наклона кривой фотосинтеза характеризует скорость фотохимических реакций и ферментативного аппарата: чем он больше, тем активнее используется световая энергия. Как правило, более высокая интенсивность присуща теневыносливым растениям, пигментный аппарат которых

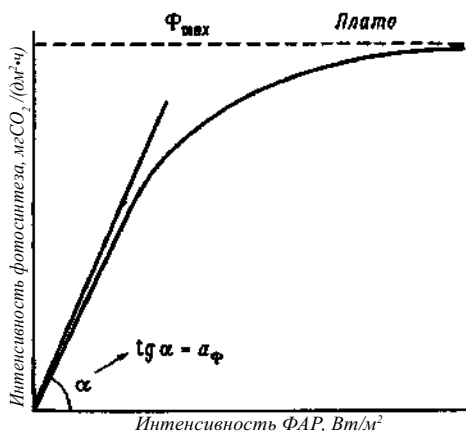


Рис. 7.2. Параметры световой кривой фотосинтеза

приспособлен к условиям слабого освещения. Прямая зависимость скорости процесса от притока энергии наблюдается только при низких интенсивностях света. Фотосинтез, заключающийся в образовании зерен крахмала в растительных клетках, начинается даже при слабом освещении, например от света керосиновой лампы. Это подтвердили опыты физиолога А.С. Фаминцына, проведенные еще в 1880 году.

У светолюбивых растений световое насыщение фотосинтеза достигается при значительно большей освещенности (в люксах – лк). Так у теневыносливого мха оно достигается при 1000 лк, у светолюбивых древесных растений – при 10...40 тыс. лк, у некоторых высокогорных растений Памира – при 60 тыс. лк и более.

В области светового насыщения интенсивность фотосинтеза, обеспечивающего при потреблении углекислоты накопление органического вещества, значительно выше интенсивности дыхания, при котором происходит выделение CO_2 . Уровень освещения, при котором потребление CO_2 в процессе фотосинтеза уравнивается выделением CO_2 в процессе дыхания, называется *световым компенсационным пунктом*. Эта точка соответствует минимальной величине освещенности, при которой поглощение CO_2 для процесса фотосинтеза равно его выделению при дыхании. При освещенности выше этой точки происходит накопление органического вещества в растениях. В агрометеорологической научной литературе принято следующее определение: точка, в которой интенсивность фотосинтеза (поглощение CO_2) равна интенсивности дыхания (выделение CO_2), называется *компенсационной точкой*. Она находится на пересечении световой кривой и осью абсцисс (рис. 7.3).

Для светолюбивых сельскохозяйственных культур значение компенсационной точки находится в пределах интенсивности ФАР 20...35 Вт/м². Ниже этих значений расход органического вещества при дыхании растения превышает его образование в процессе фотосинтеза. Как видно на этом рисунке, при увеличении интенсивности ФАР от компенсационной точки до 100 Вт/м² для теневыносливых и до 210...280 Вт/м² для светолюбивых растений продуктивность фотосинтеза возрастает. При дальнейшем увеличении ФАР (в условиях неизменного содержания в воздухе CO_2 в пределах 0,03 %) интенсивность фотосинтеза практически не растет, удерживается на одном уровне («плато» световой кривой) и наступает, так называемое, световое насыщение фотосинтеза.

Световые ассимиляционные кривые (или кривые насыщения), характеризующие интенсивность фотосинтеза в зависимости от интенсивности солнечной радиации, неодинаковы у разных культурных растений. По мере увеличения интенсивности ФАР в условиях обычного содержания в воздухе CO_2 продуктивность фотосинтеза возрастает, а затем снижается, сохраняясь на относительно одинаковом уровне (рис. 7.4).

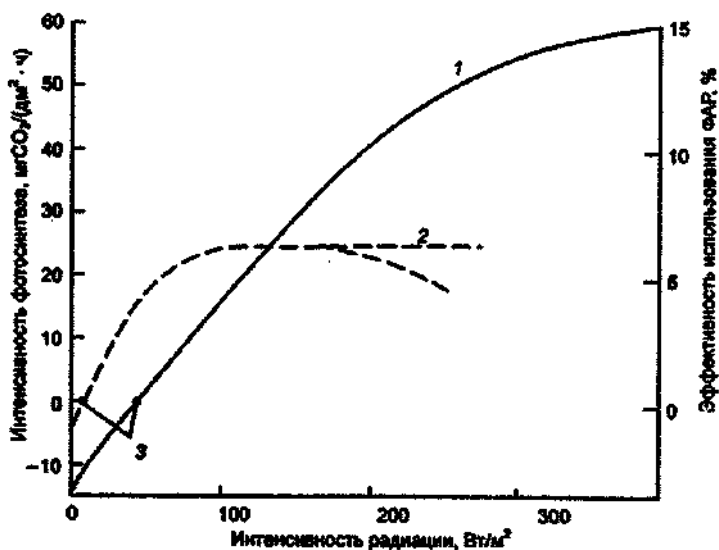


Рис. 7.3. Световые кривые фотосинтеза светолюбивых (1) и теневыносливых (2) растений; 3 – компенсационные точки (Шульгин И.А., 1973)

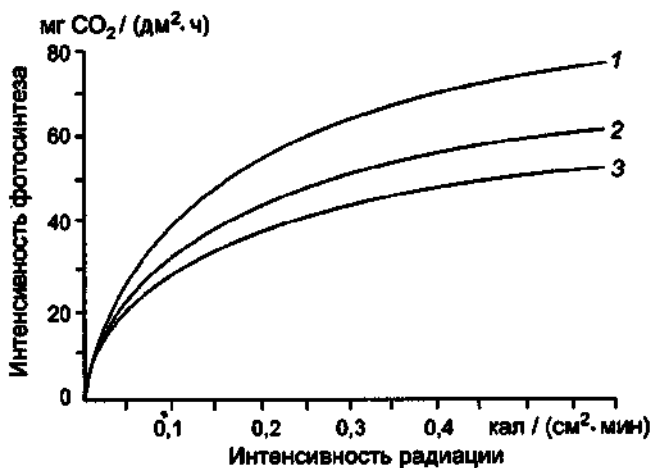


Рис. 7.4. Световые кривые интенсивности фотосинтеза различных растений (Чирков Ю.И., 1979): 1 – огурцы; 2 – свекла; 3 – кукуруза

Значительная часть поглощенной растительным покровом ФАР расходуется на транспирацию воды и конвективный обмен «лист–воздух» (70–95 %). На создание органического вещества расходуется лишь часть поглощенной радиации. Посевы, различные по структуре (густота стояния растений на единице площади, фаза развития, направление рядков посева к источнику лучистой энергии) и по применяемой агротехнике, неодинаково используют ФАР. Согласно классификации А.А. Ничипоровича, посевы различаются по их средним значениям КПД фар:

- обычно наблюдаемые в производстве – 0,5...1,5 %;
- хорошие – 1,5... 3,0 %;
- рекордные – 3,0...5,0 %;
- теоретически возможные – 6,0...8,0 %.

Повышение КПД производственных посевов сельскохозяйственных культур до уровня «хороших» представляет собой значительный резерв роста их продуктивности. Это достигается применением интенсивных технологий возделывания и созданием оптимальных агрометеорологических и микроклиматических условий.

От количества поступающей солнечной радиации на растительный покров зависит интенсивность многих процессов, протекающих в растениях, в частности фотосинтеза. Падающая на растительный покров суммарная радиация, вступая во взаимодействие с различными поверхностями растений (листья, побеги, генеративные органы) поглощается, отражается, рассеивается, создавая радиационный режим растительного покрова. Происходят изменения в плотности потока радиации, в его пространственной структуре и спектральном составе, зависящие от высоты Солнца, структуры посева. Поскольку на листья одного и того же растения в течение дня свет падает под разными углами, листовая пластинка лишь короткое время находится перпендикулярно к солнечным лучам, дающим ее максимальное освещение. Отдельные ярусы листьев затеняются в глубине растительного покрова (посева) соседними и листьями, расположенными выше, особенно в загущенных посевах. В результате чего интенсивность фотосинтеза в ассимиляционных поверхностях растений падает, снижается эффективность использования ФАР растениями.

Формирование оптимального радиационного режима в растительном покрове осуществляется своевременным применением разнообразных агротехнических приемов и селекционной работой по созданию сельскохозяйственных культур, адаптированных к условиям их возделывания.

Количественная теория продукционного процесса растений разрабатывалась в трудах многих отечественных и зарубежных ученых: А.А. Ничипоровича, А.И. Будаговского, Ю.К. Росса, Х.Г. Тооминга, О.Д. Сиротенко, А.Н. Полевого, М. Monsi, Т. Saeki и др.

Моделирование продукционного процесса сводится к количественному определению общей биомассы растений (сельскохозяйственных культур)

и биомассы их отдельных вегетативных и генеративных органов – листьев, стеблей, корней, колосьев, плодов

$$\Delta M^j / \Delta t = (\Phi^j - R^j) / \Delta t, \quad (7.9)$$

где $\Delta M^j / \Delta t$ – изменение биомассы растения или его органа за выбранный временной шаг – час, сутки, декада (г, кг, т на единицу площади: м², га); Φ^j – суммарный фотосинтез растения, (мг/СО₂ · дм² · ч⁻¹); j – выбранный шаг по времени; R^j – энергетические затраты на дыхание, (г·м² · сут⁻¹).

Как было отмечено выше, фотосинтез является основной составляющей продукционного процесса растений. Его интенсивность определяется степенью освещенности, условиями теплообеспеченности и влагообеспеченности посевов. При математическом описании процесса фотосинтеза используется уравнение:

$$\Phi_{oi}^j = \Phi_{max_i} \alpha_{\phi_i} I^j / \alpha_{\phi_i} I^j + \Phi_{max_i}, \quad (7.10)$$

где: Φ_{oi}^j – интенсивность фотосинтеза i -го органа при оптимальных условиях тепло- и влагообеспеченности в реальных условиях освещенности (мг/СО₂ · дм² · ч⁻¹); Φ_{max_i} – максимальная интенсивность фотосинтеза i -го органа при световом насыщении и нормальной концентрации СО₂ в воздухе (0,03 %); α_{ϕ_i} – начальный наклон световой кривой фотосинтеза (мг/СО₂ · дм² · ч⁻¹/(Вт · м⁻²); I^j – интенсивность ФАР (Вт · м⁻²); $i \in l, s, r, p$ – соответственно листья, стебли, корни, репродуктивные органы (колосья, плоды и др.); j – номер суток расчетного периода.

Установлено (Полевой А.Н., 1983), что максимальная интенсивность фотосинтеза различна для разных сельскохозяйственных культур и, например, составляет:

– для зерновых культур $\Phi_{max} = 25$ мг СО₂ · дм² · ч⁻¹, наклон световой кривой составляет: $\alpha_{\phi} = 0,883$ мг СО₂ · дм² · ч⁻¹/(Вт · м⁻²);

– для культуры картофеля соответственно

$\Phi_{max} = 28$ мг СО₂ · дм² · ч⁻¹; $\alpha_{\phi} = 0,430$ мг СО₂ · дм² · ч⁻¹/(Вт · м⁻²).

Как видно из формулы (7.10), эта группа параметров характеризует световую кривую фотосинтеза. Для расчета суммарного фотосинтеза в реальных условиях необходимо учитывать факторы тепла (теплообеспеченности), влаги (влагообеспеченности), а также фазы развития растений, обычно выражаемые через площадь листовой поверхности; эти параметры и составляют вторую группу, описывающие влияние условий внешней среды на скорость фотосинтеза:

$$\Phi^j = \varepsilon \Phi_{oi}^j \cdot \psi^j \cdot \gamma^j \cdot k_{\phi} \cdot L^j \cdot \tau^j, \quad (7.11)$$

где ε – коэффициент эффективности фотосинтеза; ψ^j и γ^j – функции влияния на фотосинтез тепла и почвенной влаги соответственно; k_{ϕ} – коэффициент, учитывающий изменение интенсивности фотосинтеза в онтогенезе (или онтогенетическая кривая фотосинтеза); L^j – площадь листовой поверхности; τ^j – продолжительность светлого времени суток (рис. 7.5; 7.6).

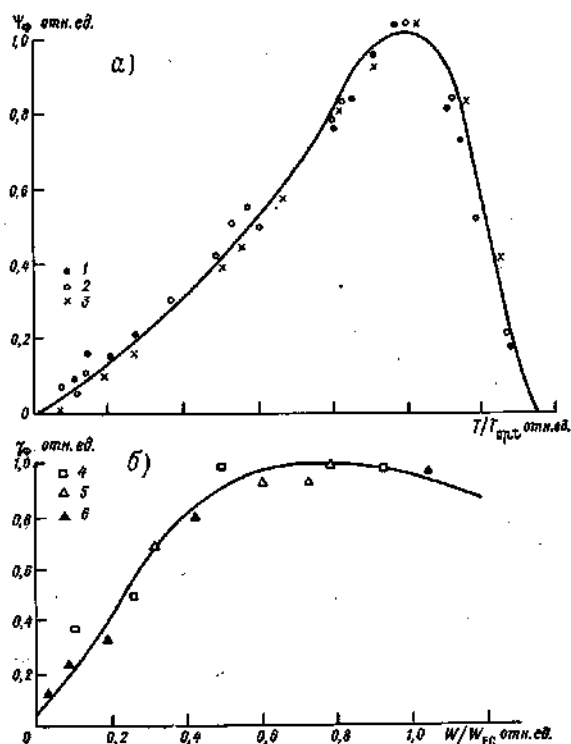


Рис. 7.5. Функции влияния температуры воздуха (а) и влажности почвы (б) на интенсивность фотосинтеза: 1 – томаты, 2 – картофель, 3 – огурцы, 4 – подсолнечник, 5 – сорго, 6 – кукуруза

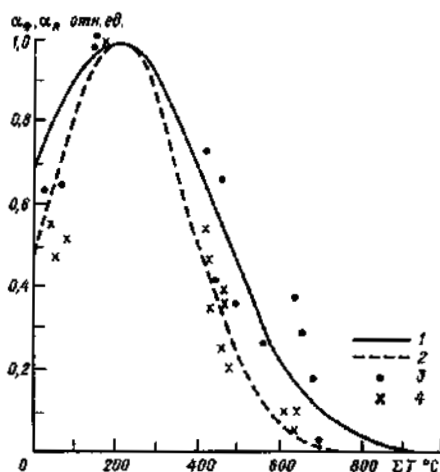


Рис. 7.6. Онтогенетические кривые фотосинтеза α_ϕ и дыхания α_R листьев озимой пшеницы: 1 – фотосинтез, 2 – дыхание, 3 – интенсивность фотосинтеза, 4 – интенсивность дыхания

Все многообразие условий обитания исторически способствовало формированию различных групп растений, адаптировавшихся к различным условиям освещенности: интенсивности солнечной радиации, продолжительности освещения растений, особенностям спектрального состава, пространственному и временному распределению света различной интенсивности. По отношению к свету экологи различают три основные группы растений: *светлюбивые* (или гелиофиты, от греч. *helios* – солнце, *phyton* – растение), *тенелюбивые* (или *сциофиты*, от греч. *skia* – тень) и *теневыносливые*.

В соответствии с этой классификацией каждая группа растений характеризуется «типовыми» особенностями анатомического строения листьев, морфологии листьев и их расположения в пространстве, а также световой кривой фотосинтеза (см. рис. 7.4).

7.2. Зависимость фотосинтеза от факторов окружающей среды

Продуктивность фотосинтеза зависит от таких факторов среды, как: интенсивность и спектральный состав (качество) света, концентрация CO_2 , температура воздуха и почвы, водный режим (в том числе тканей листа), минеральное питание и др.

7.2.1. Интенсивность и спектральный состав света

В среднем листья растений поглощают 80...85 % (от 70 до 95 %) фотосинтетически активной радиации (спектр 0,38...0,71 мкм или 400...700 нм) и 25 % энергии инфракрасных лучей, что составляет около 55 % от энергии общей радиации. Эта энергия расходуется на транспирацию воды и конвективный обмен «лист – воздух». На фотосинтез – создание органического вещества – расходуется 1,5...2 % ФАР. Общий энергетический баланс листа растения представлен на рис. 7.7.

У светлюбивых растений максимальная интенсивность (100 %) достигается при освещенности, составляющей около половины полной солнечной. Дальнейшее увеличение освещенности не увеличивает интенсивность фотосинтеза; это называется плато фотосинтеза, уровень которого различен у разных видов и сортов растений.

Величину компенсационной точки определяют при обычной концентрации CO_2 в воздухе (0,03 %) и температуре 20 °С. У теневыносливых растений компенсационный пункт составляет примерно 1 % от полного света, у светлюбивых растений – 3...5 % от полного света. Для светлюбивых сельскохозяйственных культур значение компенсационной точки находится в пределах интенсивности ФАР 20...35 Вт/м². Ниже этих значений расход органического вещества при дыхании превышает его образование в процессе фотосинтеза. При увеличении интенсивности ФАР от компенсационной точки до 100 Вт/м² для теневыносливых и до 210...280 Вт/м² для светлюбивых растений продуктивность фотосинтеза возрастает.

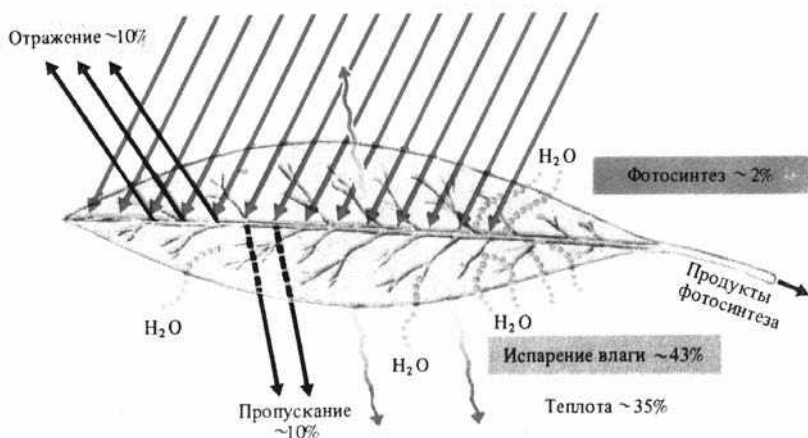


Рис. 7.7. Энергетический баланс листа растения. В процентах указаны траты поглощенной листом световой энергии на различные виды работ

При дальнейшем увеличении ФАР (в указанных пределах концентрации CO_2 и температуры среды) интенсивность фотосинтеза практически не растет и удерживается на одном уровне (*плато световой кривой*), поскольку происходит световое насыщение фотосинтеза.

Чрезмерно высокое освещение резко нарушает процесс биосинтеза пигментов, фотосинтетические реакции и ростовые процессы, что приводит к снижению общей продуктивности растений. В южных регионах перегрев листа солнечными лучами снижает интенсивность фотосинтеза, поэтому освещенные листья вместо поглощения CO_2 усиливают дыхание (выделение CO_2). С другой стороны, кратковременное снижение освещенности, связанное с облачностью, периодические сдвиги в освещенности, вызываемые ветром, затененностью от соседних растений, влияет на интенсивность фотосинтеза.

Плотность потока солнечной радиации, его пространственная структура и спектральный состав постоянно меняются. Они зависят от высоты Солнца над горизонтом, структуры посева, режима облачности, ветра и др.

В процессе эволюции растения приспосабливались к наиболее полному использованию солнечной радиации. Одним из таких путей адаптации явилось развитие розеток листьев, их ориентация в пространстве. Например, в посевах крупностебельных сельскохозяйственных культур (кукуруза, подсолнечник и др.) верхние листья расположены почти вертикально, нижние – горизонтально, а средние имеют промежуточную ориентацию, зависящую от густоты стояния растений на единице площади. В оптимальных условиях площадь листьев многих сельскохозяйственных

культур достигает 40, 50, 70 и даже 100 тыс. м², т.е. на 1 гектаре посева площадь листьев составляет соответственно 4, 5, 7, и 10 га. Важным показателем, определяющим поглощение и пропускание ФАР в посевах, является *листовой индекс* – отношение суммарной площади листовой поверхности листьев фитоценоза (или посева) к площади поля. Поглощение ФАР посевом возрастает с увеличением площади листовой поверхности. Наибольшее поглощение наступает при листовом индексе, равном 4, когда площадь листовой поверхности достигает 40 000 м² на 1 га (10 000 м²) (рис. 7.8).

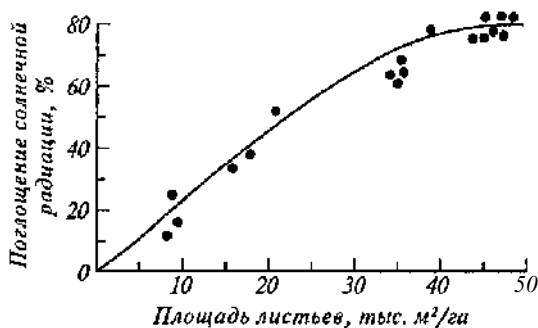


Рис. 7.8. Поглощение солнечной радиации посевом в зависимости от площади листьев

Оптимальной листовой поверхностью является такая поверхность, которая способствует наиболее полному поглощению ФАР, проходящей через весь листовой покров посева или фитоценоза. Следовательно, индекс листовой поверхности – важный показатель продуктивности растений.

Кроме того, лучшее поглощение и усвоение лучистой энергии достигается большим числом хлоропластов. Подсчитано, что общая поверхность хлоропластов одного листа бука в 200 раз превышает поверхность листа, а на одном столетнем дереве бука общая поверхность хлоропластов всех листьев достигает 2 га. При сильном освещении хлоропласты перемещаются внутри клеток, занимая пространства около боковых стенок клетки. Лучи света, попавшие на лист и не отраженные его поверхностью, несколько раз проходят через хлоропласты, поглощаются ими и частично выходят из листа, обедненные ФАР.

В глубину растительного покрова, имеющего различную плотность и высоту, фотосинтетически активная радиация проникает в ослабленном количестве по сравнению с ее величиной, поступающей на поверхность насаждения. Как видно на рисунках 7.9 (а, б, в, г), из величины ФАР, поступающей на поверхность растений и принятой за 100 %, отражается (R) от 6 до 12 %. Проникающая в глубину растительного покрова большая часть ФАР поглощается на уровне наиболее густого облиствения, а оставшаяся, незначительная ее часть достигает поверхности почвы. В зависимости от густоты фито- агроценоза и расположения листьев растения получают неодинаковое количество ФАР.

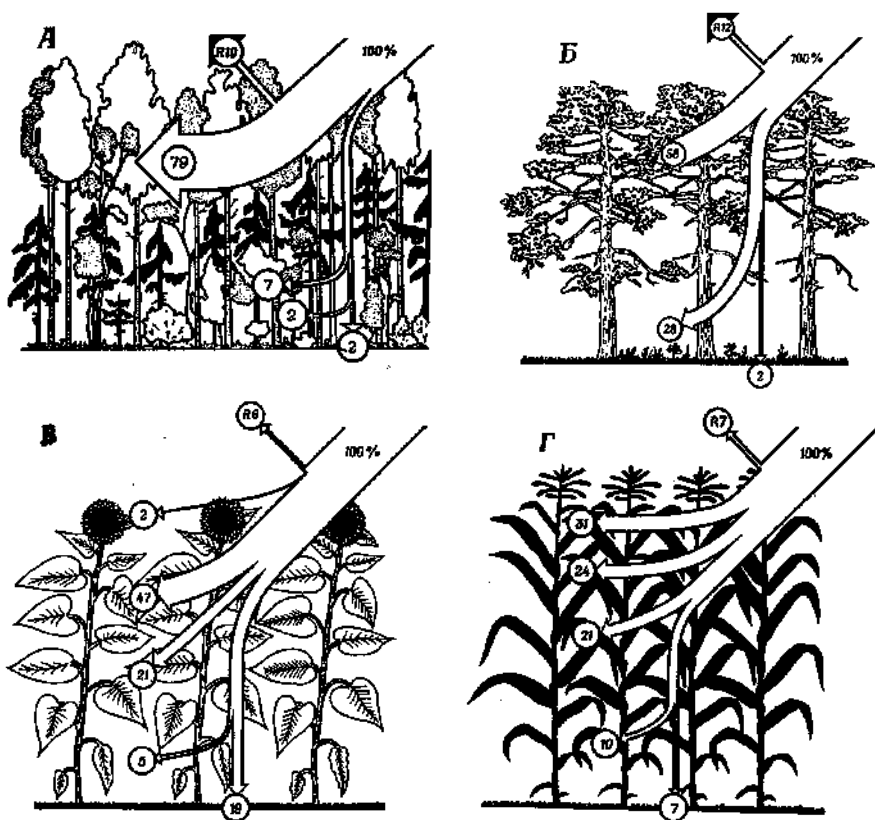


Рис. 7.9 Проникновение ФАР в растительный покров различной плотности и структуры. (Ларкер В. Экология растений, 1978)

Поскольку на листья одного и того же растения в течение дня свет падает под разными углами, листовая пластинка лишь короткое время находится перпендикулярно к солнечным лучам, дающим ей максимальное освещение. Отдельные ярусы листьев затеняются в глубине растительного покрова (посева) соседними и вышерасположенными листьями и более высокими растениями, особенно в загущенных посевах.

В плотных посевах крупностебельных растений (кукуруза, подсолнечник, кенаф и др.) из поступающей радиации 40...60 % поглощается верхним ярусом растений, часть радиации рассеивается внутри растительного покрова; в несомкнутых покрывах часть радиации достигает почвы. Например, в посевах подсолнечника в полдень поглощение ФАР листьями верхних ярусов составляет 47...50 %, а нижних – около 5 %, поступающей радиации.

Количество лучей, отраженных различными типами растительности (или различными сельскохозяйственными культурами), неодинаково. Травянистая растительность отражает больше солнечных лучей, чем древесная. Так листья древесных пород отражают красные лучи ($\lambda = 740 \dots 760$ нм): хвоя ели 19,7 %, листья ивы 27,4 %, березы 40,8 %; листья овса – 44,2 %, луговые растения 61,6 %. Количество радиации, проникающей в глубину растительного покрова, зависит от состава и густоты стояния растений, фазы их развития и от сезона.

Установлено, что процесс фотосинтеза в определенной мере подчиняется правилу Вант-Гоффа, т.е. с повышением температуры на каждые 10 °С (*температурный коэффициент* Q_{10}) фотосинтез усиливается в 2...3 раза (в пределах температур 5...35 °С).

Этот коэффициент определяют из следующего выражения:

$$\ln Q_{10} = 10 / T_2 - T_1 \cdot \ln k_2 / k_1, \quad (7.12)$$

где $T_2 - T_1$ – диапазон изменения температуры; $k_1 k_2$ – скорости реакции при температурах T_1 и T_2 соответственно. В небольшом диапазоне температур этот коэффициент остается сравнительно постоянным (1,4...2,0).

Дальнейшие исследования физиологов показали, что в ясные, солнечные дни при температуре 25...30 °С наблюдается полуденная депрессия интенсивности фотосинтеза, а некоторое понижение температуры способствовало росту интенсивности фотосинтеза. Оказалось, что интенсивность фотосинтеза зависит не только от температуры, но и от контраста (градиента) температуры «лист–воздух». Если алгебраическая величина разности температур «лист–воздух» больше, то интенсивность фотосинтеза меньше и наоборот (табл. 7.5).

Таблица 7.5

Зависимость интенсивности фотосинтеза от расположения листа кукурузы (Шайдунов В.С, 1965)

Расположение листа	Температура, °С		Разница температур «лист–воздух»	Интенсивность фотосинтеза	Примечание
	воздуха	листа			
Параллельно поверхности земли (в разные часы дня)	24,8	27,3	+ 2,5	4,7	Солнечно
	28,8	26,9	-1,9	19,1	
	24,8	26,4	+ 1,6	9,8	
Перпендикулярно лучам	25,6	26,4	+0,8	16,9	

Помимо интенсивности солнечной радиации для процесса фотосинтеза очень важен и качественный (спектральный) состав света.

Напомним, что в процессе фотосинтеза растениями используется не весь физиологический спектр солнечной радиации, а только часть, находящуюся в интервале 0,38...0,71 мкм (или 380...710 нм), называемой

фотосинтетически активной радиацией (ФАР). На территории России и сопредельных стран прослеживается широтное изменение количества ФАР, возрастающее в направлении с севера на юг, а точнее – с северо-востока на юго-запад. Карта распределения средних многолетних сумм ФАР на территории России и сопредельных государств приведена на рис. 7.10.

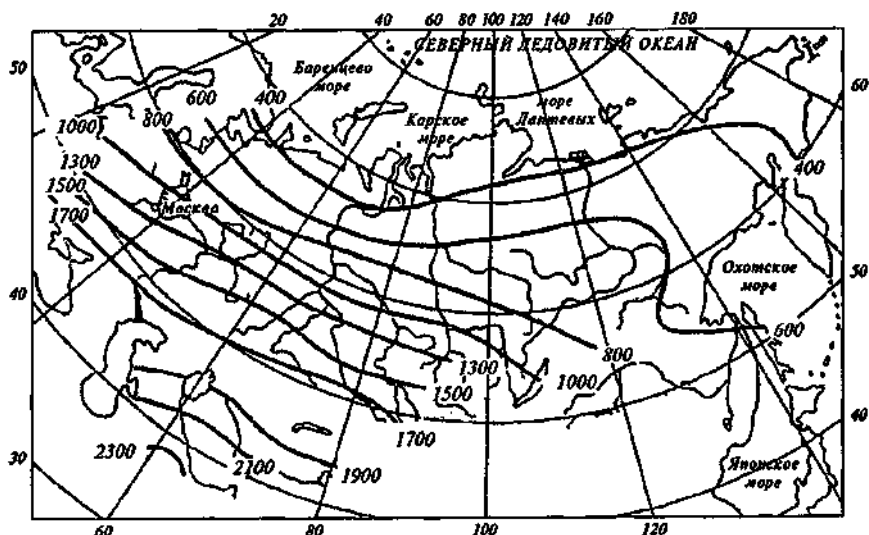


Рис. 7.10. Распределение средних многолетних сумм ФАР за период активной вегетации, мДж/м^2

Растения обладают селективным характером поглощения падающей на них ФАР.

Установлено, что максимальное поглощение лучистой энергии листом находится в области $0,30 \dots 0,48 \text{ мкм}$ (87...97 %) и $0,64 \dots 0,68 \text{ мкм}$ (80...93 %). В области $0,7 \dots 1,1 \text{ мкм}$ поглощение составляет всего 5...15 %. В области желто-зеленых лучей ($0,55 \dots 0,60 \text{ мкм}$) находится локальный минимум поглощения – 65...75 %. Начиная с $1,2 \text{ мкм}$ поглощение снова возрастает за счет воды, находящейся в клетках растения. В области $2 \dots 3 \text{ мкм}$ в целом лист поглощает до 96...98 % радиации. Зеленый лист поглощает в среднем 75 % падающей на него солнечной энергии. Однако коэффициент использования ее на фотосинтез составляет всего около 10 % при низкой освещенности и только 1...2 % – при высокой. Осредненная кривая поглощения зеленым листом спектральной солнечной энергии представлена на рис. 7.11. Остальная энергия переходит в тепловую, которая затрачивается на транспирацию (испарение) растений и

другие физиологические процессы. Сине-фиолетовые лучи в большей степени способствуют образованию белков, красно-оранжевые – углеводов. Характер поглощения ФАР примерно одинаков у преобладающего большинства растений.

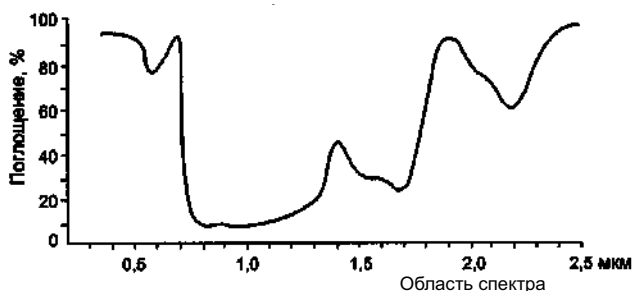


Рис. 7.11. Поглощение лучистой энергии «средним листом» в области спектра 0,3–2,5 мкм (Шульгин И.А, 1973)

Органические вещества, первично создаваемые в процессе фотосинтеза, составляют 90...95 % сухой массы зеленых растений. Усвоение элементов минерального питания, сухая масса которых составляет 5...10 %, возможно только при фотосинтезе, поскольку для поступления минеральных веществ из почвы в растения, для передвижения их в растении нужна энергия, первоисточником которой является фотосинтез. Привносимая в посевы дополнительная энергия в виде минеральных и органических удобрений не заменяет солнечную энергию, а выполняет функции своеобразного катализатора, стимулирующего более полноценное и активное использование этой энергии. Фотосинтез и минеральное питание «поддерживают» друг друга, составляя в целом единую систему питания растений (Ничипорович А.А. и др., 1961).

Скорость фотосинтеза в разных участках спектра, выравненных по количеству энергии, различна. Наиболее высокая интенсивность фотосинтеза отмечается в красных лучах. Физиологи объясняют это тем, что энергия 1 кванта красного света, составляющая 176 кДж/моль^5 (42 ккал/моль), вполне достаточна для прохождения фотохимической реакции. Энергия 1 кванта синего света (293 кДж/моль или 70 ккал/моль) оказывается избыточной для фотосинтеза, и этот «излишек» превращается в теплоту.

⁵ Квант – минимальное количество, на которое может изменяться по своей природе физическая величина;

моль – единица количества вещества в Международной системе единиц СИ, определяемая количеством тождественных структурных элементов (атомов, молекул, ионов).

Различная эффективность красного ($\lambda = 0,62...0,75$ нм) и синего ($\lambda = 0,40...0,52$ нм) света в фотосинтезе определяет не только количественную, но и качественную особенность образующейся биомассы. При одной и той же интенсивности преобладание в потоке синего света усиливает накопление в растении азотистых веществ (белковый азот) и уменьшает процентное содержание углеводов. В определенной мере различия в составе биомассы у растений, находящихся в естественных условиях, обусловлены различным соотношением красных и синих лучей в потоках солнечной радиации. Так у растений, обитающих в высокогорье, а также в южных регионах, содержание белковых веществ выше по сравнению с растениями северных широт, где в вегетационный период преобладает плотная облачность, благодаря которой растения получают меньше сине-фиолетовой радиации (Шульгин И.А., 1973).

Энергия инфракрасных лучей недостаточна для окислительно-восстановительных реакций, поскольку красный свет всегда присутствует в прямой солнечной радиации. Когда Солнце находится в зените (90°), красные лучи составляют примерно 25 % солнечного света. При низко стоящем Солнце красные лучи становятся преобладающими; так при его высоте 5° над горизонтом красный свет в спектре составляет примерно две трети (или 66 %) от полного света. Минимальной фотосинтетической активностью обладают зеленые лучи.

Формирование оптимального радиационного режима в растительном покрове осуществляется своевременным применением разнообразных агротехнических приемов и селекционной работой по созданию сельскохозяйственных культур, адаптированных к условиям их возделывания.

На ход световых кривых фотосинтеза заметное влияние оказывают и другие факторы: концентрация CO_2 , температура, водный режим, уровень минерального питания.

7.2.2. Влияние концентрации двуокиси углерода

Как отмечалось выше, углекислый газ является основным исходным материалом (наряду с водой) для процесса фотосинтеза. Его количество определяет, наряду с другими факторами, интенсивность фотосинтеза. Обычно в атмосфере его содержится 0,03 %. Подсчитано, что в слое приземного воздуха 100 м над гектаром пашни содержится 550 кг CO_2 . Из этого количества в сутки растения поглощают в среднем 120 кг CO_2 .

Зависимость интенсивности фотосинтеза от концентрации CO_2 представлена на рис. 7.12. Так при концентрации 0,03 % интенсивность фотосинтеза составляет лишь 50 % от максимальной интенсивности, которая достигается при 0,3 % CO_2 . Повышение концентрации CO_2 с увеличением освещенности приводит к возрастанию скорости фотосинтеза (рис. 7.13). Это свидетельствует о том, что в эволюции биосферы

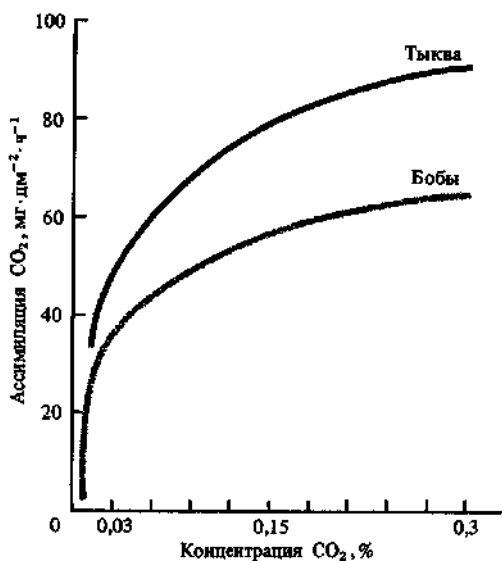


Рис. 7.12. Зависимость интенсивности фотосинтеза от концентрации CO_2 (Чесноков В.А., 1955)

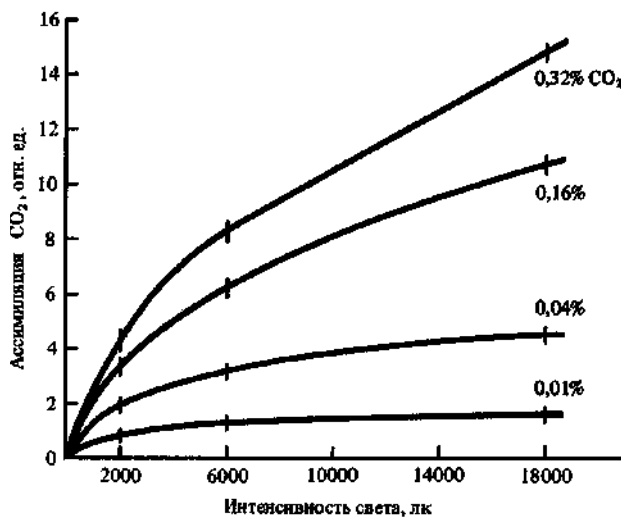


Рис. 7.13. Взаимовлияние интенсивности света и концентрации CO_2 на скорость фотосинтеза у мха (Рубин Б.А., Гавриленко В.Ф., 1977)

процесс фотосинтеза формировался при бóльшей концентрации углекислоты в атмосфере. В опытах физиологов показано, что процесс фотосинтеза начинается при концентрации CO_2 в воздухе 0,008...0,01 %. Следовательно, при обычной концентрации углекислого газа (0,03 %) в воздухе его количества достаточно для повышения интенсивности фотосинтеза. Поэтому в парниковом хозяйстве при проведении углекислотных подкормок в оптимальных условиях освещенности, температурного режима и влажности почвы продуктивность выращиваемых культур с C_3 -типом ассимиляции CO_2 (таких как томаты, огурцы, болгарский перец и др.) существенно возрастает. Известны эксперименты по искусственному увеличению концентрации CO_2 в парниковом хозяйстве. Для этого на грядках раскладывают кусочки «сухого льда» (твердой углекислоты), при естественном испарении которой в воздухе значительно повышается концентрация CO_2 . Это способствует более активному использованию и накоплению солнечной энергии растениями и, соответственно, увеличению их продуктивности (акад. Келлер Б.А., 1951).

Интенсивность ассимиляции CO_2 зависит от скорости его поступления из атмосферы в хлоропласты, которая определяется скоростью диффузии CO_2 через устьица, межклетники и в цитоплазме клеток мезофилла листа. В открытом состоянии устьица занимают лишь 1...2 % площади листа, остальная поверхность покрыта плохо проницаемой для газов кутикулой. На процессы открывания и закрывания устьиц влияют CO_2 , насыщенность тканей водой, свет, фитогормоны и др. факторы.

7.2.3. Влияние температуры среды

Общая зависимость фотосинтеза от температуры выражается одномоноотонной кривой (рис. 7.14). Температурный оптимум у растений с C_3 -типом фотосинтеза лежит в пределах 25...35 °С. При низких температурах (12 °С) повышение интенсивности света оказывается малоэффективным для процесса фотосинтеза (рис. 7.15).

Нижняя температурная граница для фотосинтеза у растений северных широт находится в пределах минус 15 °С (сосна, ель) и минус 0,5 °С – у прочих растений. У тропических растений эта граница находится в зоне низких положительных температур 4...8 °С.

У растений умеренного климата максимальная интенсивность фотосинтеза отмечается в пределах 20...25 °С. При дальнейшем повышении температуры воздуха до 40 °С происходит быстро нарастающее замедление фотохимических реакций, и при 45 °С растения погибают. Однако известны примеры, когда у растений южных широт, например в знойных, сухих пустынях, фотосинтез осуществляется при температуре 55...58 °С.

По отношению к температурному фактору сельскохозяйственные культуры условно разделены агрометеорологами и экологами на несколько групп:

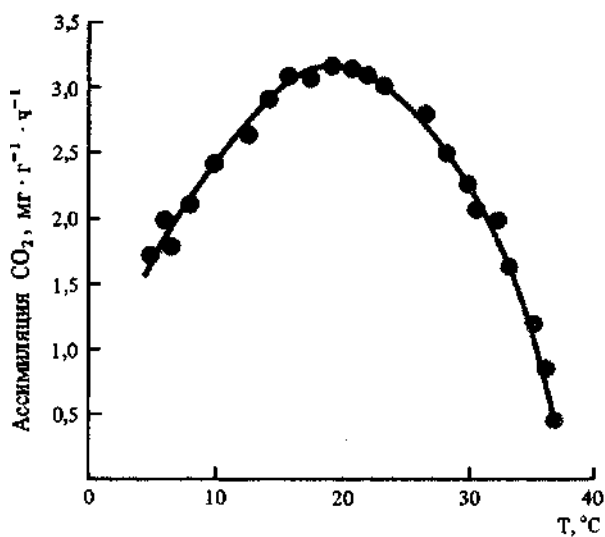


Рис. 7.14. Зависимость интенсивности фотосинтеза у ели от температуры (Рубин Б.А., Гавриленко В.Ф., 1977)

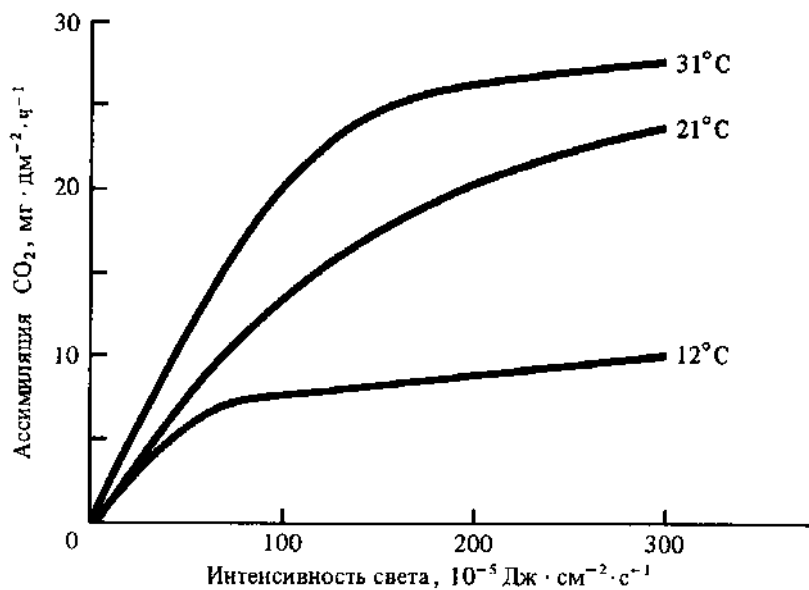


Рис. 7.15. Взаимовлияние интенсивности света и температуры на скорость фотосинтеза

1. *Наименее требовательные к теплу растения* способны прорастать (возобновлять вегетацию) при температуре среды 1...2 °С. К таким растениям относятся многие зерновые культуры (пшеница, ячмень, овес и др.), зернобобовые раннего высева (вика, горох, рапс, нут), масличные раннего высева (горчица, сафлор, люпин, рапс, нут);

2. *Нетребовательные к теплу растения*, прорастающие при температуре 3...5 °С (лен, подсолнечник и др.);

3. *Культуры с повышенным требованием к теплу*, прорастающие при температуре 5...6 °С (гречиха, люпин, бобы, перилла и др.).

4. *Теплолюбивые культуры*, прорастающие при 9...10 °С (соя, кукуруза, просо, кориандр, клевер и др.);

5. *Наиболее теплолюбивые культуры*, прорастание которых происходит при температуре выше 10 °С (сорго, фасоль, кунжут, хлопчатник и др.).

Влияние на интенсивность фотосинтеза света, концентрации CO_2 и температуры осуществляется в сложном взаимодействии этих факторов.

7.2.4. Влияние водного режима

Для процесса фотосинтеза вода является основой для окисления и источником кислорода. Кроме этого, уровень оводненности листьев определяет степень открывания устьиц, через которые в лист поступает CO_2 . При полном насыщении листа водой устьица закрываются, что снижает интенсивность фотосинтеза. В условиях недостатка влаги и при засухе чрезмерная потеря воды листьями также приводит к закрыванию устьиц.

Согласно исследованиям физиологов растений (Генкель П.А., 1982; Полевой В.В., 1989 и др.) под воздействием засухи в растительном организме происходит целый ряд функциональных и структурных изменений. Обезвоживание тканей в условиях высоких температур воздуха и почвы воздействует на микроструктуру клеток, и прежде всего на их мембраны, в которых содержится более 20 % воды их сухой массы. При сильном обезвоживании разрушаются органоиды клеточной структуры (митохондрии, пластиды и т.п.), нарушаются тонкие структуры хлоропластов, снижается содержание хлорофилла и желтого пигмента, увеличивается содержание каротина и т.д. Под влиянием обезвоживания происходят изменения в вязкости протоплазмы; такие изменения способствуют повышению жароустойчивости растений.

Следствием воздействия почвенной и атмосферной засухи является снижение интенсивности фотосинтеза растений. Дневной ход интенсивности фотосинтеза находится также в большей зависимости от степени увлажнения почвы (см. рис. 7.5). По мере усыхания корнеобитаемого горизонта почвы интенсивность фотосинтеза после полудня резко падает и во второй половине дня всегда меньше, чем в первой, при той же интенсивности солнечной радиации. Это связано с тем, что при недостатке

почвенной влаги и повышении температуры воздуха и, соответственно, более интенсивному нагреванию поверхности листьев происходит нарушение их водного режима, увеличивается устьичное сопротивление и снижается интенсивность транспирации растений.

Напомним, что *водным режимом растений* называется процесс водообмена в растениях, заключающийся в согласованном поступлении, передвижении, расходовании и отдаче воды путем транспирации. Передвижение воды в растении имеет сложный характер. Так суммарный поток (или интенсивность потока) воды в растении Q_{wp} ($г \cdot см^{-1} \cdot раст.^{-1}$) от корней до транспирирующих поверхностей в межклетниках листа определяется формулой (Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К., 1980):

$$Q_{wp} = \rho w S_p V_p = 1 / g(\Psi_R - \Psi_L) / r_p, \quad (7.13)$$

где ρw – плотность воды ($г \cdot см^{-3}$); S_p – эффективное сечение растения ($см^2/раст.$); V_p – скорость тока воды в растении ($см \cdot с^{-1}$); r_p – сопротивление тканей растения току воды ($с \cdot см^2$); Ψ_R, Ψ_L – водный потенциал корня, листа; g – ускорение свободного падения.

При сильном и продолжительном иссушении почвы депрессия фотосинтеза наблюдается на протяжении большей части светового дня. Снижение интенсивности фотосинтеза листьев приводит к увеличению вклада составляющей дыхания, зависящего от температуры среды. В условиях длительной и интенсивной почвенной и атмосферной засухи депрессия фотосинтеза уже не в состоянии компенсировать затраты на дыхание, устьица почти полностью закрываются, суточная «продуктивность» растения в течение всего периода засухи не увеличивается.

При засухе происходят и физиологические изменения в процессе фотосинтеза: значительно сокращается поступление углерода ^{14}C в фосфорные эфиры, происходит образование вещества аланина (неуглеводного продукта amino- и органических кислот), т.е. наступают биохимические изменения в метаболизме углерода. Засуха нарушает и постфотосинтетические превращения углерода, приводящие к усилению образования клетчатки, снижает интенсивность оттока ассимилятов из листьев, тормозит дыхательный метаболизм углерода и снижает темновую фиксацию CO_2 . Кроме этого, происходит изменение естественных свойств белков протоплазмы и органоидов клетки (т.н. *денатурация белков*, наступающая при изменении температуры и др. условий среды). Это существенно снижает синтез белка – на 50...75 %.

В период засухи резко снижается рост растений, но особенно отрицательно она влияет на генеративные органы растений. При этом значительные нарушения происходят на ранних стадиях развития половых клеток, в сложных процессах образования хромосом из ядерного вещества с последующим распределением его между дочерними клетками, так

называемый *кариокинез* – не прямое деление клеток. В случаях, когда засуха совпадает по времени с критическим периодом в водном режиме растений – периодом особой чувствительности растений к недостатку воды (фазы колошения и цветения), – происходит стерилизация пыльцы, следствием которой становится череззерница и «пустоколосье». С этим, в частности, связано значительное снижение урожая, а в экстремальных условиях – и его полная гибель.

Максимальный фотосинтез наблюдается при незначительном водном дефиците, около 5...20 % от полного насыщения при открытых устьицах.

7.2.5. Влияние минерального питания

Нормальная жизнедеятельность растительного организма возможна при полной обеспеченности комплексом макро- и микроэлементов корневого питания. Элементы минерального питания необходимы для формирования фотосинтетического аппарата: пигментов, систем хлоропластов, структурных и транспортных белков и т.п. Например, магний входит в состав хлорофиллов, железо в восстановленной форме необходимо для биосинтеза хлорофилла и железосодержащих соединений хлоропластов. В реакциях фотоокисления воды участвуют марганец и хлор, дефицит меди вызывает снижение интенсивности фотосинтеза. Недостаток и избыток фосфора влияют на снижение интенсивности фотосинтеза, в результате происходит замедление ростовых процессов и снижение продуктивности растений. Уменьшение содержания калия в тканях растений влечет за собой понижение интенсивности фотосинтеза и нарушение других процессов в растении: например, в хлоропластах нарушается структура, в результате чего слабо открываются устьица на свету и не полностью закрываются в темноте т.д. Таким образом, у автотрофных организмов, к которым принадлежит зеленое растение, фотосинтез является основным процессом образования органического вещества. Однако *материальную базу для формирования урожая растений создает сочетание ассимиляции минеральных элементов из почвы (корневое питание) с процессом фотосинтеза*. Помимо названных факторов влияния на интенсивность фотосинтеза большое значение имеет и изменение физиологического возраста растений, условно измеряемого суммой положительных или активных температур (ΣT °C). Онтогенетические кривые фотосинтеза и дыхания были представлены на рис. 7.6.

ГЛАВА 8

ДЫХАНИЕ РАСТЕНИЙ

8.1. Общие сведения о дыхании растений

Дыхание – одно из важнейших, неотъемлемых свойств организма; оно происходит в органах, тканях, клетках до тех пор, пока организм живет. Прекращение дыхания приводит к гибели организма – и животного и растения.

Роль кислорода в процессе дыхания и горения была открыта трудами французского ученого А.Л. Лавуазье в 1773–1783 гг. Независимо от А.Л. Лавуазье кислород открыли шведские ученые Дж. Пристли и К. Шееле (1772 г.). При горении и при дыхании поглощается кислород (O_2), образуется углекислый газ (CO_2) и при этом выделяется теплота. По А.Л. Лавуазье «дыхание есть медленно текущее горение питательных веществ в организме». В 1775 г. А.Л. Лавуазье дал название этому элементу *кислород* (от греч. *oxís* – кислый, *γενναο*; *oxugenium* – рождаю), т.е. кисло – род дословно с греческого – «образующий кислоты». Почти все реакции кислорода с другими веществами являются реакциями окисления, сопровождающиеся выделением энергии: $2H_2 + O_2 = 2H_2O$. Кислород легко окисляет почти все металлы, кроме золота, платины и тяжелых инертных газов. Исключительно велика роль свободного кислорода в биохимических и физиологических процессах, особенно в дыхании. За исключением некоторых микроорганизмов-анаэробов, все животные и растения получают необходимую для жизнедеятельности энергию за счет биологического окисления различных веществ с помощью кислорода. Кислород мало растворим в воде: при 20 °C и 1 атмосфере в 1 м³ воды растворяется 0,031 м³, а при 0 °C – 0,049 м³.

Основателем учения о дыхании растений называют Н.Т. Соссюра. С помощью количественного анализа он установил, что в темноте растения поглощают столько же кислорода, сколько выделяется CO_2 , т.е. соотношение CO_2/O_2 , как правило, равно 1, но при этом одновременно образуется и вода.

Вся масса свободного кислорода Земли возникла и сохраняется благодаря жизнедеятельности зеленых растений суши и Мирового океана, выделяющих кислород в процессе фотосинтеза. Подсчитано, что при сжигании топлива в мире ежегодно потребляется более $9 \cdot 10^9$ т кислорода.

Значительный вклад в физиологические, химические исследования природы процесса дыхания внесли отечественные физиологи: И.П. Бородин, А.Н. Бах, В.И. Палладин, С.П. Костычев, Б.А. Рубин и многие другие.

Дыхание растений – это процесс распада органических соединений, который осуществляется в живой ткани растения при участии свободного кислорода (окисление) и сопровождается выделением углекислого газа и воды, а также высвобождением энергии, необходимой для жизнедеятельности растений. Существо дыхательного процесса составляет связанное с окислительным распадом органических веществ «добывание» свободной энергии. Дыхание – одна из важнейших функций, свойственная всем живым организмам.

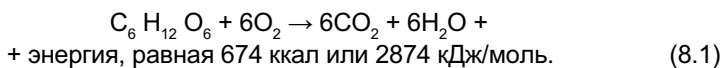
Образующиеся в процессе фотосинтеза углеводы (глюкоза, сахара, крахмал и др. соединения) используются клетками растения в качестве питательных веществ. Важнейшим этапом питания органическими веществами на клеточном уровне является процесс дыхания.

Клеточное дыхание – это окислительный, с участием кислорода распад органических, питательных веществ, сопровождающийся образованием химически активных метаболитов и освобождением энергии, которые используются клетками для процессов жизнедеятельности (Полевой В.В., 1989). В растительном организме дыхательный процесс значительно проще, чем в животном. Благодаря большому развитию поверхности, тесно связанному с воздушным питанием растений, кислород воздуха находит себе непосредственный доступ к каждой клетке тела растения, в которой и происходят окислительные процессы. В животный организм свободный кислород воздуха почти не поступает через кожу, хотя здоровый и чистый кожный покров играет определенную роль в дыхательном процессе. Основной путь снабжения кислородом животного происходит путем обогащения им капиллярной крови в легких, откуда с потоками крови кислород поступает в клетки и ткани организма.

Известно, что создаваемые зеленым растением ассимиляты являются в основном запасными веществами, использование которых другими формами организмов и синтез на этой основе необходимых для них соединений возможны лишь после сложной и длинной цепи химических и энергетических преобразований. То же относится и к содержащейся в продуктах фотосинтеза энергии. Суть таких преобразований заключается в следующем. Для того чтобы потенциальная энергия органического вещества превратилась в движущую силу процессов жизнедеятельности, ей должна быть придана более активная, мобильная форма. В биологических системах это осуществляется путем биохимического получения «нагруженного энергией» электрона и последующего аккумуляирования энергии в форме специфических соединений (*АТФ* и др.). Напомним, что *АТФ* – это *аденозинтрифосфат* – органическое, высокоэнергетическое вещество, содержащее аденин, рибозу и три фосфатные группы; играет важнейшую роль в переносе энергии в биологических системах. Вся сложная цепь взаимосвязанных процессов мобилизации продуктов фотосинтеза

посредством их активирования в химическом и энергетическом отношении осуществляются организмами в процессе дыхания. Эти процессы происходят при участии очень сложной цепи катализаторов, которые мы не рассматриваем. При дыхании происходит поглощение молекулярного кислорода, выделение углекислого газа и высвобождение энергии.

Во второй половине XIX в. было установлено общее уравнение процесса дыхания:



В этом процессе (обратном фотосинтезу) расходуется также энергия, созданная в процессе фотосинтеза. Следовательно, при полном окислении одной гамма-молекулы глюкозы освобождается это количество энергии, используемое в дальнейших процессах жизнедеятельности растения. С точки зрения энергетики живого организма, дыхание – это освобождение высококачественной энергии уже имеющихся органических структур для создания новых структурных единиц организма. Сущность дыхательного процесса составляет «добывание» свободной энергии путем окислительного распада органического вещества.

Для всех жизненных процессов растений (и животных, и человека) необходимо безостановочное получение свободной энергии, которая получается при дыхании путем окисления углеводов (в первую очередь сахаров), а также других органических веществ. Суммарный энергетический эффект от физиологического окисления углеводов и других органических соединений в процессе дыхания будет равен тому тепловому эффекту, который получается от сжигания веществ в калориметрической «бомбе». В среднем считается, что при сжигании 1 г углеводов выделяется около 4 ккал, 1 г белка – 5,7 ккал, 1 г жира – 9,2 ккал. Большая калорийность белков, и в особенности жиров по сравнению с углеводами обусловлена тем, что в их состав входит относительно больше водорода и меньше кислорода.

Дыхание растений происходит во всех органах (клетках, тканях) как на свету, так и в темноте. При этом окислительные процессы включают не только *аэробные* (протекающие при наличии кислорода), но и *анаэробные процессы* (протекающие в условиях отсутствия кислорода), например брожение. Физиологами отмечено, что повышение концентрации CO_2 как конечного продукта дыхания приводит к снижению интенсивности дыхания.

Если растение поместить в закрытый сосуд, то при дыхании объем воздуха не изменится, но качественно состав воздуха будет иной: кислород заменится углекислым газом. Однако не всегда объем поглощенного при дыхании кислорода будет равен объему выделенного CO_2 . Для характеристики соотношения между выделенным CO_2 и поглощенным кислородом используют показатель, называемый *дыхательным*

коэффициентом (ДК). Он представляет собой отношение объема выделяемого углекислого газа (V_1) к объему поглощаемого кислорода (V_2):

$$ДК = V_1 CO_2 / V_2 O_2 \quad (8.2)$$

Обычно опыты по исследованию дыхания проводят на плесневелых грибах: при питании их углеводами ДК равен 1; при питательном субстрате для грибов в виде жиров (например, стеариновая кислота) или белков ДК оказывается меньше единицы – 0,7...0,8. Если же дыхательным субстратом служат сложные органические кислоты, то дыхательный коэффициент оказывается равным 4 (Лебедев С.И., 1982).

Как видно, интенсивность дыхания, подобно другим ферментативным процессам, зависит в определенных пределах от температуры среды. Согласно правилу Вант-Гоффа, при повышении температуры на 10 °С скорость химических реакций удваивается. В интервале температур от 0 до 20 °С *температурный коэффициент дыхания, обозначаемый Q_{10}* , равен 2...3. При температурах выше 20 °С этот коэффициент понижается. Установлено, что величина температурного коэффициента зависит также от вида растения, фазы его развития и т.д.

8.2. Зависимость дыхания растений от факторов окружающей среды

Интенсивность дыхания зависит от *температуры среды* обитания растений. Для каждого вида растений и его органов существуют определенные минимальные, оптимальные и максимальные температуры. Например, в отличие от фотосинтеза дыхание у зимующих растений отмечено при очень низких температурах: при -25 °С у многих хвойных пород. Оптимальной температурой для большинства видов умеренных широт Северного полушария является 35...40 °С, т.е. на 5...10 °С выше, чем для фотосинтеза.

Оводненность тканей растения обеспечивается корневой системой, всасывающей доступную влагу из почвенных горизонтов. Согласно З.Н. Бихеле, Х.А. Молдау, Ю.К. Россу (1980), водный потенциал растения (листа) зависит от многих метеорологических и агрометеорологических факторов. Но из всех факторов влажность почвы в основном определяет величину водного потенциала растения. При хорошем увлажнении почвы, независимо от развитости корневой системы, оводненность растения изменяется незначительно. При слаборазвитой корневой системе в высыхающей почве растение быстрее испытывает недостаток влаги, вследствие чего происходит закрытие устьиц листа, снижающего интенсивность дыхания и транспирации. При постепенном снижении оводненности тканей растения происходит снижение интенсивности дыхания, но более медленное, чем падение интенсивности фотосинтеза.

Потребность во влаге при дыхании растений отчетливо прослеживается на примере дыхания семян. У семян, находящихся в воздушно-сухом

состоянии (10...11 % влаги), дыхание ничтожно мало. При повышении влажности до 14...15 % дыхание возрастает в 4...5 раз, при оводненности семян до 30...35 % дыхание возрастает в тысячи раз. Большое значение имеет и температура среды, при которой хранятся семена: при 0...10 °С влияние влажности на интенсивность дыхания значительно меньше, чем при 18...25 °С. Резкий подъем дыхания набухших семян сопровождается значительным выделением тепла, что может привести к перегреву и самовозгоранию при хранении в условиях недостаточной вентиляции. Именно поэтому закладка значительных количеств зерна (семян) на длительное хранение в элеваторах производится при строгом соблюдении технологических норм: поддержание заданных температуры и влажности воздуха, а также обеспечение постоянной, принудительной, активной вентиляции (аэрации) зернохранилищ.

Известно, что при поступлении в семена достаточного количества влаги, семена набухают и заметно увеличиваются в объеме. В замкнутом пространстве разбухшие семена приобретают исключительно высокое осмотическое давление (до 375 *атм*). В своей повести «Черное море» К.Г. Паустовский в очерке «Горох в трюме» описал случай, когда севший на рифы около берегов Турции океанский пароход «Днепр» был разорван пополам. Оказалось, что в трюмы, наполненные горохом, попала вода и набухший горох «с невероятной силой разорвал борта парохода, погнул переборки и вырвал шпангоуты» – ребра судна.

Известно, что у растений нет специального органа дыхания, подобно-го таковому у представителей животного мира. Высвобождение энергии при дыхании у животных (и человека) используется в первую очередь для поддержания температуры тела в определенных значениях, свойственных теплокровным организмам. Критерием интенсивности дыхания у животных является *частота дыхания*, т.е. количество дыханий в единицу времени (обычно в 1 мин). Этот объективный показатель зависит от многих факторов: размеров тела и объема легких, интенсивности обмена веществ, состояния организма, заболеваний, теплового состояния окружающей среды и т.п. Эти особенности изучаются физиологами животных, а нами рассматриваются в курсе зоометеорологии.

Одним из объективных показателей дыхания растений является *интенсивность дыхания*. Интенсивность дыхания растений обычно измеряют при стандартной температуре воздуха 20 или 25 °С (в темноте) и выражают количеством выделенной углекислоты (CO_2) на 1 г сухой массы в единицу времени, т.е. $\text{мг CO}_2/(\text{г сух. м.}/\text{ч})$. Поэтому интенсивность дыхания растений нельзя путать с термином «частота дыхания у животных».

Интенсивность дыхательного процесса у различных растений и даже у различных частей одного и того же растения оказывается неодинаковой.

Дыхание связано с процессами роста: чем быстрее рост растения, тем интенсивнее дыхание. В быстрорастущих частях растения, где клетки имеют развитую протоплазму, дыхание проходит наиболее интенсивно. Однако по мере старения органов растения интенсивность дыхательного процесса заметно снижается (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Количество углекислоты (мг/г сух. м./ч), выделенное листьями подсолнечника различного возраста (Максимов Н.А., 1948)

Возраст листьев (сут)	22	36	64	99	136
Количество CO ₂ (мг)	3	0,81	0,34	0,25	0,08

Таким образом, к концу вегетации интенсивность дыхания сократилась почти в 40 раз.

В опытах показано, что при температуре среды 37 °С прорастающие семена зерновых культур выделяют углекислоты в количестве около 1,2 % от своей массы, а плесневые грибы выделяют от 6 до 10 % CO₂ на единицу своей массы в сутки (табл. 8.2).

Растение в различные фазы своего развития дышит с различной интенсивностью. Молодые органы и ткани растений, находящиеся в состоянии активного роста, обладают наиболее высокой интенсивностью дыхания. Установлено также, что энергично дышат цветы, особенно нераспустившиеся. Их интенсивность дыхания количественно почти идентична интенсивности дыхания прорастающих семян.

Таблица 8.2

Количество углекислоты, выделяемой при дыхании различными объектами в течение 24 ч при комнатной температуре (в расчете на 1 г сухой массы) (Максимов Н.А., 1948)

Растительный объект	Количество CO ₂ , см ³
Листья взрослых растений	12...24
Корешки растущих растений	40...80
Почки различных пород деревьев	35...70
Прорастающие семена; цветы	60...120
Растущий мицелий грибов	180...270

На рис. 8.1 показана динамика интенсивности дыхания листьев земляники в зависимости от их возраста в сутках. Интенсивность дыхания резко снижается, когда заканчивается рост листа, т.е. когда общее число и размер клеток в тканях листа больше не увеличивается (Полевой В.В., 1989). Экспериментальным путем физиологами растений установлено, что интенсивность дыхания – величина непостоянная, она связана не только с видовой спецификой растения, но и варьирует в пределах одного и того же растения, в зависимости от особенностей его органов и тканей. Наиболее активно дышат молодые, активно растущие ткани и органы растений.

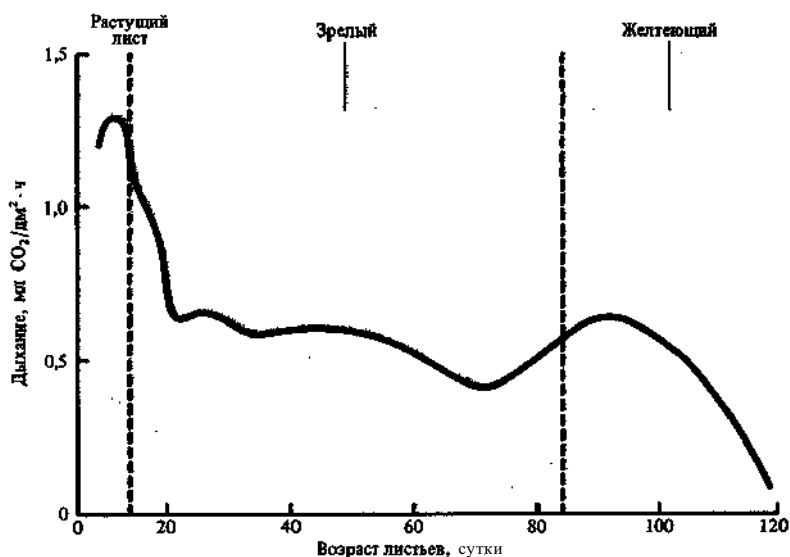


Рис. 8.1. Дыхание неотделенных листьев земляники в течение вегетационного периода (Эрни С., 1947)

Например, листья капусты белокочанной в возрасте 3 сут выделяют 314 мг CO_2 на 100 г сырой массы, в возрасте 31 – 67 мг, в возрасте 70 сут – 12 мг; листья картофеля в возрасте 30 сут выделяют 735 мг, а в возрасте 77 сут – 673 мг. Интенсивность дыхания молодых листьев некоторых культур, таких как земляника, тыква, кукуруза, щавель, в 2...10 раз превышает интенсивность дыхания старых листьев. Еще пример: если интенсивность дыхания семян пшеницы в фазу молочной спелости принять за 100 %, то в фазу восковой спелости она составляет 61 %, а в период перед уборкой (полная спелость) – всего 0,3 %.

Если собрать значительное количество интенсивно дышащих частей растений (прорастающие семена, цветы и листья) в замкнутый сосуд со специальным стаканчиком с раствором едкого калия для поглощения CO_2 , то не трудно заметить, что в результате дыхания частей растений и выделения энергии внутри сосуда происходит повышение температуры до 30...50 °С. От высокой температуры части растений погибают. Часть освобождаемой энергии при дыхании грибов и бактерий может выделяться в виде свечения. Свечение наблюдается только у низших растений, грибов и бактерий. Именно их деятельностью объясняется свечение гнилушек в темное время суток.

Дыхание определяется по количеству выделенного растениями CO_2 либо по количеству поглощенного кислорода (O_2).

Физиологи выделяют два вида дыхания: «темновое», происходящее в темноте во всех органах растений, и «световое», происходящее только в фотосинтезирующих органах. При этом «темновое» дыхание подавляется светом, а «световое» – возбуждается.

Установлено, что функция дыхания подразделяется на две составляющие: 1) дыхание, связанное с затратами энергии на поддержание структурной организации тканей растения (c_1); 2) дыхание, связанное с затратами энергии на передвижение веществ по растению, фотосинтезом и созданием новых структурных единиц растения (клеток, побегов, листьев и т.п.), называемое также дыханием роста (c_2).

Тогда суммарное дыхание j -го органа растения (R_{c_j}) может быть представлено в виде:

$$R_{c_j} = R_{n_j} + R_{p_j}, \quad (8.3)$$

где R_{n_j} – дыхание поддержания структур j -го органа; R_{p_j} – дыхание роста j -го органа.

Установлено также, что дыхание листьев тем больше, чем выше фотосинтетическая активность растений, которая характеризуется максимальным фотосинтезом при световом насыщении. Поэтому функцию дыхания листьев (R_L) можно приближенно представить в виде:

$$R_L = c \Phi_m, \quad (8.4)$$

где Φ_m – интенсивность фотосинтеза при световом насыщении и нормальной концентрации CO_2 ; величина c названа автором коэффициентом затрат, который при температуре 20°C варьирует в зависимости от вида растений в пределах $0,1 \dots 0,3$ (Тооминг Х.Г., 1984).

Углеводы, созданные в процессе фотосинтеза, накапливаются в фонде, откуда распределяются и используются для различных целей. Так часть углеводов запасается в листьях, стеблях и корнях, часть расходуется для роста органов растений, некоторая доля углеводов затрачивается на поддержание структур, созданных органов и тканей растения.

На экспериментальных материалах японским ученым К.Д. Маккри (McCree K.J., 1970) было показано, что суммарное дыхание (R_c) всего растения за сутки пропорционально массе растения M (г/см^2) и суточной сумме фотосинтеза растения за сутки Φ_c :

$$R_c = c_1 M + c_2 \Phi_c, \quad (8.5)$$

где M – сухая фитомасса всего растения (г/см^2); Φ_c – суточная сумма фотосинтеза растения; c_1 и c_2 – коэффициенты затрат на дыхание поддержания и роста растения соответственно.

В математических моделях обычно используются осредненные значения названных коэффициентов, определенных эмпирическим путем для различных видов трав и многих сельскохозяйственных культур: $c_1 = 0,21 \text{ CH}_2\text{O / (г·сут)}$; $c_2 = 0,25 \text{ CH}_2\text{O / (г·сут)}$.

Эти значения коэффициентов несколько варьируют в зависимости от температуры и возраста растения, т.е. фазы развития в онтогенезе (индивидуальное развитие особи, выраженное в совокупности последовательных морфологических, физиологических и биохимических преобразований от момента зарождения до естественной смерти организма). Поэтому в формулу (8.6) введен коэффициент (k_R), характеризующий влияние возраста растения на уровень дыхания:

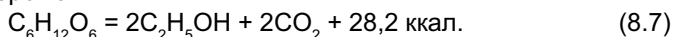
$$R_c = k_R (c_i M + c_2 \Phi_c). \quad (8.6)$$

Интенсивность дыхания зависит от *концентрации газов* – кислорода и углекислоты, от температуры среды, освещенности и водного режима тканей растений.

С прекращением активного роста органа, когда общее число клеток в тканях перестает увеличиваться, наблюдается постепенное снижение интенсивности дыхания, связанное с процессом старения протоплазмы. Интенсивность дыхания также меняется в различные фазы развития растений. Например, значительная активизация дыхания отмечается при цветении и в период плодоношения растений. Это связано с образованием новых тканей и органов, обладающих высоким уровнем обмена веществ (Полевой В.В., 1989).

Дыхание растений усиливается, как и другие физиологические процессы, с повышением температуры среды, но в пределах, которые являются нормальными для жизнедеятельности данного вида растения. Максимальные температуры, при которых возможно дыхание различных групп растений, лежат в интервале 45...55 °С. Этот максимум определяется разрушающим действием высоких температур на белковую основу живой клетки, ее протоплазму, со свойствами которой дыхание тесно связано. Названные температурные пределы относятся к уровню нагрева тканей растений, а не к температуре окружающей среды. В южных регионах летом в дневные часы температура воздуха и почвы может оказаться и выше. Известно, что листья пшеницы дышат в 3...5 раз интенсивнее листьев некоторых бобовых культур (вика, горох). Теневыносливые растения дышат менее активно, чем светолюбивые растения. Низкая активность дыхания характерна для суккулентных растений, мясистые ткани которых покрыты толстой газонепроницаемой кутикулой. Основным средством снижения температуры растительных тканей является усиление транспирации.

Из уравнения дыхания следует, что в нормальных условиях этот процесс связан с непрерывным потреблением тканями растения кислорода. Однако было доказано, что в среде, лишенной кислорода, высшие растения продолжают ограниченное время дыхание с выделением CO_2 . Такое дыхание было названо анаэробным. Обычно оно протекает по уравнению спиртового брожения:



Этот процесс может продолжаться только ограниченное время (не более 10 часов), после чего растение погибает в результате коренного нарушения структуры протоплазмы и ее последующего распада. Подобные ситуации возникают в условиях длительных, затяжных дождей или наводнений, когда посевы оказываются погребенными слоем воды. Из уравнения брожения видно, что оно имеет более низкий энергетический эффект по сравнению с выходом энергии при кислородном дыхании. По-видимому, это связано с тем, что образующийся в анаэробных условиях спирт обладает высоким запасом химической энергии, которая не используется при анаэробном цикле.

К числу факторов, от которых зависит дыхание, относится также содержание в атмосфере углекислого газа. Экспериментально показано, что при повышенном содержании CO_2 в атмосфере процесс дыхания угнетается (дыхательный коэффициент понижается).

Таким образом, растительный организм в каждый момент своего развития находится под влиянием не отдельных факторов среды, а их совокупного действия. При этом необходимо учитывать, что рассмотренные факторы оказывают определенное взаимное влияние друг на друга, при этом большое значение имеет и состояние растения, определяемое физиологическими процессами, происходящими в его тканях и органах.

ГЛАВА 9

ЗНАЧЕНИЕ ВОДЫ В ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАСТЕНИЙ

Вода является самым важным минералом на Земле.

Академик А.Е. Ферсман

*Воде дана великая власть –
стать соком жизни на земле.*

Леонардо да Винчи

В жизни растений, как всех других живых организмов на Земле, вода выполняет первостепенную роль. Все проявления жизни неразрывно связаны с водой. Биологическая роль воды во многом обусловлена ее физико-химическими свойствами. В тканях растений вода составляет 70...95 % сырой массы (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Примерное содержание воды в тканях некоторых растений (%)
(Рубин Б.А., 1971)

Растения и их органы	Вода, %
Водоросли	96...98
Листья салата, лука, плоды томата, огурцы	94...95
Листья капусты белокочанной, корнеплоды редиса, мякоть арбуза	92...93
Корни моркови, луковички лука	87...91
Листья травянистых растений, ткани яблок, груш	83...86
Листья древесных и кустарниковых пород	79...82
Клубни картофеля	74...80
Стволы деревьев	40...55
Зерно хлебных злаков (в воздушно-сухом состоянии)	12...14
Ткани мха (в воздушно-сухом состоянии)	5...7

При снижении содержания воды в клетках и тканях до критического уровня (например, у семян и спор при полном их созревании) живые структуры переходят в состояние *анабиоза* (от греч. *anabiosis* – оживление) – временное состояние растения или животного, при котором почти полностью прекращается обмен веществ и отсутствуют все видимые проявления жизни. Состояние анабиоза является одной из форм приспособления живых организмов к неблагоприятным условиям существования (низкие или высокие температуры, отсутствие влаги и др.).

Большую роль в исследованиях физиологии обмена выполнили работы К.А. Тимирязева (1892). Он первый из физиологов отказался от широко распространенного в те годы взгляда на испарение воды как на процесс, связанный исключительно с минеральным питанием растений. Он показал, что основная роль транспирации состоит в обеспечении нормальной работы листового аппарата как органа фотосинтеза. Именно с этим связано формирование многочисленных и разнообразных приспособлений, которые в процессе эволюции были выработаны различными группами растений для «добывания» и экономного расходования влаги (развитие глубокой и широко разветвленной корневой системы, сокращение листовой поверхности, опущение, сокращение сезона вегетации, суккулентность и т.п.).

9.1. Основные функции, выполняемые водой в биологических объектах

– Водная среда пронизывает и объединяет все части организма, начиная от молекул в клетках и кончая тканями организма, в единое целое. Около трети всего количества воды, содержащейся в клетке, находится в вакуоли, а две трети – в протоплазме и клеточной оборочке. В растении вода представляет собой непрерывную среду на всем протяжении от влаги, извлекаемой корнями из почвенных слоев, до поверхности раздела «жидкость – газ» в листьях, где она испаряется.

Вода обладает исключительно высоким *поверхностным натяжением* (уступает только ртути), которое способствует передвижению соков по тканям растения и процессу *адсорбции* (от лат. *sorbere* – поглощать, всасывать) – поглощение вещества из раствора или газа с образованием тонкого поверхностного слоя жидкости (для сравнения: *сорбция* – поглощение твердыми телами или жидкостями каких-либо веществ из окружающей среды).

– Вода – важнейший растворитель и среда для биохимических реакций.

– Вода входит в состав молекул белков; удаление воды из белков (с помощью «высаливания» или спирта) приводит белки к свертыванию (*коагуляции*) и выпадению их в осадок.

– Вода – *метаболит*, т.е. вещество, образующееся в растении в результате обмена веществ. Так при фотосинтезе вода является донором электронов, а при дыхании участвует в окислительных процессах; вода необходима для *гидролиза* (реакции ионного обмена между различными веществами и водой, играющие огромную роль в жизнедеятельности живых организмов) и многих синтетических процессов.

– Существенно участие воды в мембранных процессах обмена веществ.

– Вода – главный компонент в транспортной системе высших растений – в сосудах ксилемы и в ситовидных трубках флоэмы, при перемещении веществ по телу растения.

– Вода – терморегулирующий фактор. Она защищает ткани от резких колебаний температуры благодаря высокой теплоемкости. Напомним, что *теплоемкость* – это свойство вещества поглощать тепло, выражается в количестве тепла, поглощаемого веществом, при его нагреве на 1°C ; теплоемкость воды составляет около 1 кал/г или 4,2 Дж/г. Кроме этого, вода обладает и большой *удельной теплотой парообразования* (количество тепла, необходимое жидкости для перехода в пар при неизменной температуре на единицу массы; для воды при 0°C удельная теплота парообразования составляет 597 кал/г). Большая теплоемкость воды защищает растительные ткани от быстрого и сильного повышения температуры, тогда как высокая теплота парообразования обеспечивает надежную стабилизацию температуры тела растения. Вода обладает также высокой *теплопроводностью*, т.е. способностью вещества проводить тепло. Мерой теплопроводности является *коэффициент теплопроводности*, численно равный количеству тепла в калориях, которое протекает в 1 с через 1 см^2 поверхности при градиенте температуры $1^{\circ}\text{C}/\text{см}$. Для жидкостей характерна *молекулярная теплопроводность*, когда тепло распространяется вследствие передачи молекулярного движения. Для газов более характерна *турбулентная теплопроводность*, обусловленная переносом тепла вместе с крупными объемами вещества при турбулентном движении.

– Вода – хороший амортизатор при механических воздействиях на организм растения (ветер и др.).

– Благодаря явлениям *осмоса* (давления) и *тургора* (напряжения) вода обеспечивает упругое состояние клеток и тканей растений.

Все семенные растения суши в процессе эволюции выработали многообразные «механизмы», обеспечивающие растению экономное расходование воды, поступающей в организм. Водные растения, естественно, не испытывают ее недостатка.

9.2. Транспирация растений

Наземные растения приспособились создавать внутри себя непрерывно восходящий ток воды. Этот ток начинается в почве, на поверхности корневых волосков, пронизывает все растение и заканчивается на испаряющей поверхности наземных органов, в основном листьев. Движущей силой восходящего тока воды по ксилеме является градиент водного потенциала через растение от почвы до атмосферы. Передвижение воды вверх по растению создается и поддерживается сосущей силой транспирирующих клеток листовой паренхимы. Скорость передвижения воды по ксилеме не значительна. У лиственных пород она составляет в среднем $20\text{ см}^3\cdot\text{ч}^{-1}$ на 1 см^2 поперечного сечения древесины. Для хвойных пород средняя скорость передвижения воды по ксилеме составляет $5\text{ см}^3\cdot\text{ч}^{-1}$ (Полевой В.В., 1989).

Увеличение площади поверхности листьев не только облегчает поглощение CO_2 , поступление солнечной радиации, но и создает необходимую площадь для испарения через устьица. При этом для нормального роста и развития растения количество испарившейся воды должно быть компенсировано аналогичным количеством влаги, поступающей из корневой системы. Незначительное количество влаги может также поступать в растение из влажного воздуха через устьичные отверстия листьев. Таким образом, через устьичный аппарат происходит газообмен в листе, включая водяной пар (рис. 9.1). Как правило, устьица растений открываются на свету и закрываются с наступлением темноты. Открывание и закрывание устьиц регулируется изменением тургорного давления внутри замыкающих клеток (рис. 9.2).

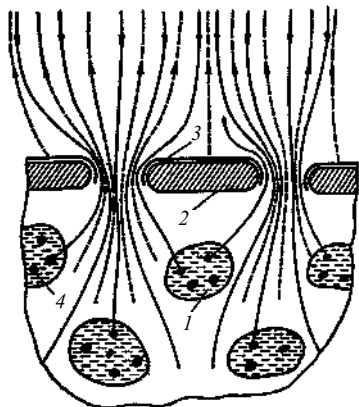


Рис. 9.1. Схема процессов газообмена в листе:

сплошные линии потоки CO_2 , штриховые – потоки водяного пара;

1 – клетки паренхимы, 2 – эпидермис, 3 – кутикула, 4 – хлоропласты.

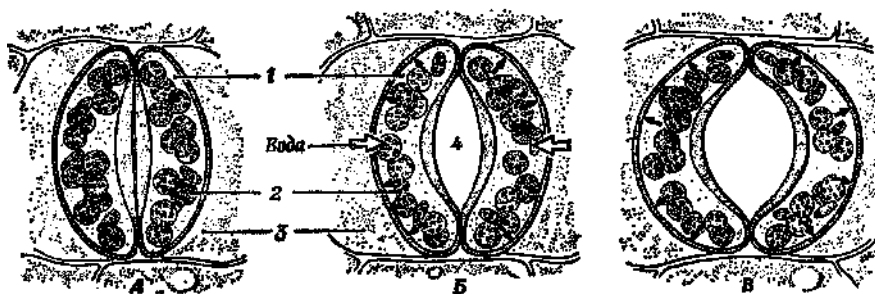


Рис. 9.2. Регулирование размеров устьичной щели замыкающими клетками: А. Щель частично закрыта; Б. При накоплении осмотически активных веществ, например глюкозы, вода проникает в замыкающие клетки, тургорное давление возрастает и замыкающие клетки изгибаются таким образом, что размер устьичной щели увеличивается. В. Устьице открыто; 1 – замыкающие клетки; 2 – хлоропласт; 3 – клетки эпидермиса; 4 – устьичная щель

Интенсивность транспирации выражают в граммах испарившейся воды за 1 час с единицы площади или на 1 г сухой массы. *Продуктивность транспирации* выражают количеством граммов сухого вещества, образуемого при расходе каждых 1000 г воды. Величиной, обратной продуктивности транспирации, является *транспирационный коэффициент*, т.е. число граммов воды, израсходованной при накоплении 1 г сухого вещества.

У большинства растений интенсивность транспирации составляет 15...250 г·м²·ч⁻¹ днем и 1...20 г·м²·ч⁻¹ ночью. Продуктивность транспирации у растений в условиях умеренного климата составляет 1...8 г (в среднем 3 г) на 1000 г израсходованной воды, а транспирационный коэффициент – от 125 до 1000 г; в среднем около 300 г воды расходуется на накопление 1 г сухого вещества. На синтез вещества растение использует лишь 0,2 % пропускаемой воды, остальные 99,8 % расходуются на испарение (Полевой В.В., 1989).

По мере роста интенсивности транспирации, т.е. потери клетками растений влаги, в листьях снижается водный потенциал, при этом возрастает сосущая сила – усиление поглощения воды из ксилемы жилок и передвижение воды по ксилеме из корней в листья. Сосущую силу транспирирующих клеток листовой паренхимы физиологи называют *верхним концевым двигателем*, обеспечивающим передвижение воды вверх по растению.

Устьичная транспирация играет важнейшую роль в газообмене между листом и атмосферой. Это основной проводящий путь для водяного пара, СО₂ и О₂. В среднем количество устьиц у хорошо освещаемых листьев различных типов растений (см. 9.3) варьирует от 50 до 500 на 1 мм². Различают также испарение влаги через кутикулу (она происходит и при открытых устьицах). Однако потери водяного пара через кутикулу незначительны по сравнению с величиной общей транспирации. Поскольку пути движения водяного пара – через кутикулу и через устьица – параллельны, то суммарное сопротивление водяному пару r_w выражается через кутикулярное сопротивление (r_{cut}) и устьичное сопротивление r_s :

$$1/r_w = 1/r_{cut} + 1/r_s. \quad (9.1)$$

В процессе транспирации на перенос водяного пара у поверхности листа влияет сопротивление пограничного слоя воздуха (r_a) и суммарное сопротивление (r_w). Интенсивность транспирации листа рассчитывается по формуле (Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К., 1980):

$$Q_{LW} = E_L = \rho_A (q_L - q_A) / (r_a + r_w). \quad (9.2)$$

где Q_{LW} – удельное поглощение воды листом, г·см⁻³·с⁻¹; E_L – интенсивность транспирации единицы площади листа в г Н₂О·см⁻²·с⁻¹; ρ_A – плотность воздуха, г·см⁻³; q_L – удельная влажность воздуха в межклеточном пространстве мезофилла листа, г Н₂О/г; q_A – удельная влажность

воздуха между листьями, г H_2O /г. Эта формула используется при расчетах энерго- и массообмена между растением (листом) и воздухом.

Согласно А.Н. Полевому (1992), интенсивность транспирации прямо пропорциональна разности между концентрацией водяного пара (ΔC) у испаряющих поверхностей растений и содержанием водяного пара в атмосфере (г/см³), площади испаряющей поверхности (A) и обратно пропорциональна сумме диффузионных сопротивлений ($\sum r$) у листьев:

$$E_L = \Delta CA / \sum r . \quad (9.3)$$

Величины интенсивности транспирации определяются не только физическими факторами (температура и влажность воздуха, интенсивность солнечной радиации и др.), но и физиологическими особенностями растений.

Периодичность суточного хода транспирации наблюдается у всех растений, но характер кривых транспирации различен у разных видов, он определяется также фактическими условиями погоды. Интенсивность транспирации регулируется степенью открытости устьиц в течение суток.

Таким образом, постоянный ток воды (с питательными веществами) от корневых волосков к надземным органам растения является важнейшим средством транспортировки и накопления минеральных веществ и химических соединений в растении; нормальный восходящий ток обеспечивает водоснабжение всех органов и поддержание *тургора* (от лат. *turgere* – быть набухшим, наполненным) в клетках; транспирация в определенной мере является средством защиты растения от перегрева, поскольку при испарении влаги затрачивается тепло и происходит охлаждение испаряющей поверхности; транспирация и усвоение CO_2 происходят при открытых устьицах. В условиях дефицита влаги устьица закрываются, что снижает приток в растение углекислоты.

9.3. Влага и экологические типы растений

По отношению к воде все высшие растения условно делят на три основные экологические группы (или типа): гигрофиты, мезофиты и ксерофиты. Условность такой классификации предполагает знание закона равнозначности (или незаменяемости) основных факторов среды: жизнедеятельность растений обеспечивается комплексным воздействием экологических факторов – солнечной радиацией, теплом, влагой, воздухом и минеральным питанием. Следствием исключительного разнообразия экологических условий (факторов) и их сочетания в природе является многообразие форм адаптации растений к условиям существования. Поэтому многие растения занимают промежуточное положение между названными тремя типами, характеризующими их отношение к влаге.

Гигрофиты (от греч. *hygros* – влажный; *phyton* – растение) – это наземные растения, живущие в условиях избыточного увлажнения почвы

и воздуха. Типичными местообитаниями гигрофитов являются влажные и теплые тропические леса, тенистые и влажные участки широколиственных лесов, а также искусственные сооружения – теплицы, оранжереи, парники, создающие для этого типа растений благоприятные микроклиматические условия. У *тенелюбивых гигрофитов* отсутствует устойчивая регуляция транспирации, устьица всегда открыты, а интенсивность транспирации практически равна физическому испарению.

К типу гигрофитов относятся *гидрофиты* (от греч. – *hydor* – вода, влага), водные растения, погруженные в воду только нижними своими частями; верхние части стеблей, листья и репродуктивные органы таких растений находятся в воздушной, более сухой и освещенной среде. Это *светолюбивые гидрофиты*, обитающие на почвах, пересыщенных влагой или покрытых водой. Хотя в жарком климате надводный слой воздуха насыщен парами испаряющейся влаги, анатомическое строение листьев гидрофитов имеет черты строения «световых» листьев. В таких условиях выращиваются, например, рис, папирус и некоторые другие культуры. К этому типу относятся и различные дикорастущие виды, например многие осоки, лотос, кисличка, калужница и др.

В дневные часы, когда воздух особенно влажен и транспирация не происходит, листья гидрофитов выделяют капельно-жидкую влагу через специальные поры – *гидатоды*, (см. 6.1.2.). Благодаря такому «механизму» и значительному гидростатическому корневому давлению, составляющему по данным физиологов 1,013 МПа (10 *атм*), обеспечивается поступление в растение новых порций воды и минеральных солей (Полевой В.В., 1989).

Подавляющее большинство культурных, в том числе и сельскохозяйственные растения, относятся к типу *мезофитов* (от греч. *mesos* – средний, промежуточный), т.е. к растениям, обитающим в достаточных, но не избыточных условиях увлажнения в зоне умеренного и влажного климатов. Мезофиты, занимающие по отношению к влаге промежуточное положение между гигрофитами и ксерофитами, обладают высокой пластичностью и приспособляемостью к условиям существования. В той или иной мере они выносят кратковременные периоды водного дефицита и перегрева, характеризуются сбалансированным водным режимом и мезоморфной (т.е. средней) анатомической структурой. Тип мезофитов расчленяется на различные градации (подтипы) по отношению к водному режиму. Например, *типичными мезофитами* являются огурцы, томаты, табак, хлопчатник, многие луговые травы, листопадные деревья и многие другие. *Засухоустойчивые мезофиты* – кукуруза, сорго, просо, морковь, люцерна и др. *Эфемероподобные мезофиты* представлены яровыми злаковыми культурами, это – пшеница, ячмень, овес и другие со сравнительно коротким вегетационным периодом, характеризующимся достаточной для посевов тепло- и влагообеспеченностью.

Практически все культурные растения относятся к *гелиофитному типу*, поскольку они приспособлены адаптироваться в широких пределах к перегреву под влиянием прямой солнечной радиации и временному недостатку почвенной влаги. Растения, культивируемые человеком, попадают в лучшие условия существования за счет агротехники, в том числе орошения, что содействует их мезофикации и повышению продуктивности, однако делает их более чувствительными к ухудшению водного режима почвы.

Ксерофиты (от греч. *xeros* – сухой) – это засухоустойчивые растения, обитающие в условиях постоянного или сезонного дефицита влаги, способные переносить перегрев и длительное обезвоживание. В процессе эволюции (филогенез), естественного отбора и в борьбе за существование эти растения «выработали» различные анатомо-морфологические и физиолого-биохимические признаки и свойства, позволяющие им в процессе онтогенеза приспосабливаться к недостатку влаги, перегреву надземных и подземных органов, обезвоживанию тканей или «уходить» от засухи благодаря смещению сроков вегетации на влажный сезон.

В обширной группе ксерофитов различают слабо и интенсивно транспирирующие формы, имеющие различный уровень «охлаждающего» эффекта поверхности растений. Фотосинтез у ксерофитов отличается от такового у мезофитов. Первичными продуктами усвоения углерода являются яблочная и аспарагиновая кислоты, и только через некоторое время усвоенный углерод из C_4 -кислот переходит в фосфорилиновые сахара. Такой характер углеродного метаболизма коррелирует с их анатомической структурой и водным режимом и является способностью ксерофитов приспосабливаться к засушливым местообитаниям и к высоким температурам (Генкель П.А., 1982).

Как известно, почва представляет собой многофазное тело, состоящее из четырех основных компонентов: твердых минеральных частиц, органического вещества (гумуса), почвенного раствора и почвенного воздуха. *Водно-физические свойства почвы* – это способность почвы удерживать влагу – подробно рассматриваются в разделе сельскохозяйственной метеорологии – *агрогидрологии*. Здесь же отметим, что под *доступной для растений почвенной влагой* понимается то количество воды, которое накапливается в почве от уровня *влажности устойчивого завядания* (коэффициент завядания) до уровня *полевой влагоемкости*. В среднем легкодоступная для растений влага удерживается в почве силой до 0,5 мПа, среднедоступная – до 1,0...1,2 мПа, труднодоступная – до 2,5...3,0 мПа.

Определение величины доступной почвенной влаги, режима ее сезонного формирования и динамики имеет большое практическое значение для полевого растениеводства и оценки сельскохозяйственной

пригодности почвенных угодий в различных почвенно-климатических зонах страны. Например, в южных регионах зоны умеренного климата в России за вегетационный период растения испаряют больше воды, чем ее выпадает за этот период в виде атмосферных осадков. При этом растения используют накопленную с весны почвенную влагу. В почве вода передвигается благодаря разности почвенных потенциалов между различными частями «системы»: от более высокого к более низкому потенциалу.

Водный потенциал почвы – это алгебраическая сумма сил, которыми почвенная влага удерживается и перемещается на поверхности частиц почвы (грунта). Это силы адсорбционные, осмотические, капиллярные и гравитационные. Численно водный потенциал почвы равен работе, которую нужно совершить, чтобы перевести единицу объема связанной влаги в свободное состояние. Иначе говоря, это количество работы на единицу массы чистой воды (например, в Дж/кг), которую необходимо совершить для переноса единичного количества воды от его положения в почве к некоторому свободному, стандартному состоянию. В ненасыщенных влагой почвах величина водного потенциала отрицательная, в насыщенных – положительная. По мере иссушения почвы скорость движения воды в ней значительно замедляется. Снабжение растущих органов растений водой определяется больше всего скоростью поступления воды из почвы в корни, которая, в свою очередь, обусловливается в значительной мере скоростью передвижения воды в почве.

9.4. Засухоустойчивость, жароустойчивость и солеустойчивость растений

В процессе онтогенеза в растении происходит непрерывное взаимодействие двух тесно связанных функций: поглощения и расходования воды. Постоянная компенсация испарения влаги возможна лишь для растений влажных мест обитания. В умеренных и засушливых зонах, особенно в летний период вегетации, многие растения и сельскохозяйственные культуры испытывают дефицит влаги, связанный в отдельные периоды с засушливыми явлениями и засухой. Максимум водного дефицита наблюдается у растений в часы наибольшей интенсивности транспирации. Как общая закономерность отмечается, что снижение содержания воды в клетке приводит к падению интенсивности фотосинтеза, нарушению процессов обмена веществ и других ассимиляционных процессов, к усилению процессов распада, в первую очередь дыхания. Уровень этих изменений зависит от степени и характера процесса обезвоживания клетки. На первых этапах завядания листьев происходит снижение интенсивности фотосинтеза при одновременном усилении дыхания растительной ткани. Например, уровень дыхания листьев сахарной свеклы изменялся при завядании следующим образом (табл. 9.2). Хорошо известно, что различные

сельскохозяйственные культуры, их сорта и гибриды обладают неодинаковыми свойствами (качествами) засухоустойчивости и жаростойкости.

Таблица 9.2

**Изменения интенсивности дыхания листьев сахарной свеклы
от содержания в них воды**

Содержание воды в листьях, %	Интенсивность дыхания листьев, %
100,0	100,0
87,6	123,3
78,4	188,7
72,4	204,2

Засухоустойчивость – это способность растений переносить временное или длительное обезвоживание и перегрев тканей, вызываемые почвенной и/или атмосферной засухой и высокими температурами воздуха и почвы без значительного снижения урожая и необратимых процессов жизнедеятельности. Установлено, что в листьях растений, подвергшихся воздействию засухи, содержание воды в тканях с возрастом падает значительно быстрее, чем у растений, не испытывавших влияния засухи.

У картофеля чрезмерно высокие температуры воздуха и почвы при недостатке запасов почвенной влаги приводят к ускоренному прохождению стадийных изменений, следствием которых становится вырождение клубней. При температуре почвы 26...29 °С картофель практически не образует клубней. Оптимальной среднесуточной температурой для клубнеобразования является 17 °С, а с повышением температуры уровни урожая картофеля прогрессивно снижаются. Именно поэтому в южных регионах с жарким и засушливым летом давно практикуются ранневесеннее и летние сроки посадки картофеля, рассчитанные таким образом, чтобы период образования клубней совпадал с периодом, когда средняя суточная температура не превышает 15...17 °С.

Биологическим основам засухоустойчивости растений посвящена весьма обширная научная литература эколого-физиологического направления. Остановимся только на основных, узловых вопросах.

Как было отмечено выше, большинство сельскохозяйственных растений относится к типу мезофитов, обитающих в условиях достаточного (но не избыточного) увлажнения умеренного и влажного климатов. Водный баланс растений зависит от комплекса факторов: природы самого растения, его строения (морфоструктуры), фазы развития, густоты стояния растений на единице площади (площадь питания), агрометеорологических условий, таких как температура и влажность воздуха, освещенность, ветер, запасы почвенной влаги и др.

Недостаток воды в тканях растений создается в условиях, когда расход воды на транспирацию превышает ее поступление из корневой системы. Водный дефицит возникает обычно в жаркую солнечную погоду к

середине дня, при этом увеличивается сосущая сила листьев, что активизирует поступление воды из почвы. Растения регулируют уровень водного дефицита путем изменения уровня открытости устьиц. Обычно при временном завядании листьев в дневные часы дефицит влаги восстанавливается в ночные часы при условии наличия влаги в почве.

Длительное нарушение водного баланса растения влечет за собой ряд изменений в ходе физиологических процессов в организме растения. Так завядание листьев (и побегов) вызывает нарушение нормального обмена веществ и осмотических свойств клеток, значительно увеличивает проницаемость их плазмы, благодаря которой уменьшается их сосущая сила. Это явление резко отражается на ростовых процессах, вследствие чего происходит задержка в увеличении листовой поверхности, на снижении накопления растениями органического вещества и уровня урожая.

Засуха нарушает также ферментативную деятельность в тканях растений. Подсушивание листьев влечет за собой исчезновение из них крахмала и распад белковых веществ. Различные части растения имеют различную устойчивость к засухе. Верхние листья, в меньшей степени страдающие от засухи и оттягивающие влагу из нижних листьев, дольше сохраняют способность к синтезу. Они становятся центром притяжения питательных веществ, которые также забираются у нижних листьев, где преобладают процессы *гидролиза* – реакция ионного обмена между различными веществами и водой, – играющие важнейшую роль в жизнедеятельности организмов, а также происходит накопление растворимых и подвижных соединений.

У теневыносливых растений даже незначительный дефицит почвенной влаги приводит к увяданию листьев благодаря потере внутриклеточного тургора. Экспериментально показано, что у «теневых» растений-мезофитов визуально заметное увядание листьев наступает несколько раньше, чем содержание воды в клетках успеет понизиться на 1...3 % от общей сырой массы растения, не испытывающего недостатка влаги. Это происходит за счет того, что оболочки клеток у таких растений слабо растянуты внутриклеточным давлением.

У светолюбивых мезофитов оболочки растянуты значительно сильнее, кроме того, они обладают значительной пластичностью. Например, сокращение объема клеток у подсолнечника или картофеля (при *плазмолизе* – отслаивание содержимого растительной клетки от клеточной оболочки в экстремальных условиях) происходит при потере 25...30 % влаги от их сырой массы.

Завядание растений отражает в первую очередь превышение расхода воды над ее приходом. Так у томатов кратковременное завядание начинается при дефиците воды около 17 %, длительное завядание наступает при потере 40...42 % влаги; у кукурузы соответственно при потерях 16 и 40 %, у фасоли – 18 и 30 %. Как видно, длительное завядание

характеризуется примерно вдвое большим дефицитом, чем при кратковременном завядании.

При длительном завядании растений происходит значительная потеря сухого вещества, например, у теневых растений (недотрога – *Impatiens parviflora*) до 40 %. Это связано с резким повышением интенсивности дыхания и увеличением скорости «осахаривания» крахмала под влиянием обезвоживания тканей. По мере уменьшения количества воды в листе ассимиляционная способность его быстро снижается (табл. 9.3).

Таблица 9.3

Влияние потери воды (%) на количество усвояемого CO₂ (мг)

Потеря воды, %	65...53	51...41	39...31	25...15	15...5
Количество усвоенного CO ₂ (мг)	1,4	1,5	37,0	142,0	127,4

Полное отмирание листьев отмечается при потере воды: у бузины 82 % (от нормального состояния оводненности), у тыквы 81 %, у подсолнечника 80 %, у березы 75 %, ольхи 74 %, платана 48 %, у гречихи 46 %. В условиях дефицита влаги быстро тормозится клеточное деление, и особенно растяжение, что приводит к формированию мелких клеток. Вследствие этого задерживается рост самого растения, особенно листьев и стеблей. С этим связана, например, низкорослость хлебных злаков в засушливые годы. Рост корней в начале засухи даже ускоряется (в поисках влажных слоев почвы), и снижается лишь при длительной почвенной засухе.

Повреждающее действие, оказываемое на растение недостатком влаги, в значительной степени усугубляется, если эти условия сочетаются с влиянием высоких температур. Устойчивость растений к воздействию температур выше оптимальных является весьма ценным приспособлением растений в процессе эволюции к выживанию в экстремальных условиях.

Жароустойчивость (или жаростойкость) – это способность растений сохранять жизнедеятельность своих тканей в условиях значительного временного повышения температуры воздуха и почвы. Жаростойкость обычно связана с засухоустойчивостью растений. Особенно жароустойчивы семена и споры растений. Наибольшая жаростойкость свойственна растениям-ксерофитам – до 55...60 °С. Верхним пределом жаростойкости сельскохозяйственных культур является температура воздуха 45...48 °С. Высокой засухоустойчивостью и жаростойкостью обладают просо, сорго, кукуруза, хлопчатник, кенаф и др. культуры, выращиваемые в южных регионах. Однако хлопчатник, кенаф и в значительной степени кукуруза дают высокие урожаи только в условиях орошения.

В различные фазы развития растений (в онтогенезе) засухоустойчивость и жаростойкость сельскохозяйственных культур меняются; отмечено, что эти свойства снижаются в период закладки и образования генеративных органов. Так, например, высокая температура почвы, при низких

запасах продуктивной влаги в фазу кущения приводит к повреждению конуса нарастания у пшеницы, в котором в это время происходит дифференциация колосков. В результате, отмечается снижение числа колосков в колосе и числа цветков в колоске, в силу чего урожай зерна оказывается значительно сниженным. Такое явление весьма часто наблюдается в Поволжье (Юго-восток РФ) в ранние и сухие весны с большим количеством солнечных дней. Для многих растений и сельскохозяйственных культур сочетание высоких температур воздуха и почвы с недостатком почвенной влаги в критические периоды развития растений (кущение, колошение, цветение) вызывает снижение количества закладываемых репродуктивных органов, стерильность пыльцы и опадение завязей, а, следовательно, и значительное снижение урожая. Напомним, что *критическим периодом в жизни растений* называется временной промежуток вегетационного периода, в течение которого растению присуща максимальная чувствительность к фактору, находящемуся в минимуме (например, воздушная и почвенная засуха, низкие температуры почвы на глубине узла кущения при отсутствии снежного покрова и др.)

В пределах группы жаростойких растений механизмы приспособления к выживанию в условиях высоких температур различны. Защитой от повреждающего воздействия жары является способность некоторых растений усиливать процесс транспирации благодаря физико-химическим свойствам протоплазмы клеток и развитию мощной корневой системы (тыква, арбуз). У кукурузы температура листьев в дневные часы на 1...3 °C выше температуры окружающего воздуха, а подсолнечника и пшеницы – на 1...2 °C ниже. Другая группа жаростойких растений – это суккуленты. К ним относятся кактусы, многие представители сем. *Солляноквых* и др., обладающие чрезвычайно низкой транспирацией, несмотря на то, что они, как правило, являются обитателями знойных и засушливых пустынь. Клеточная протоплазма всех тканей этих растений обладает высокой вязкостью с повышенным содержанием прочно связанной воды. На долю последней у кактусов, например, приходится 2/3 от общего содержания воды, тогда как у группы мезофитов – всего 30...40 %. К этой же группе жаростойких растений относятся жестколистн-ные субтропические и тропические растения: благородный лавр, лавровишня, олеандр, фикус и др.

Растение получает или теряет тепло под влиянием радиационного потока, направленного к нему или от него. Днем, подвергаясь воздействию прямой и рассеянной радиации, растение приобретает тепло, ночью излучает его. Степень «нагреваемости» отдельных органов и частей растений зависит от многих причин: от времени года и суток, от расположения тех или иных частей по отношению к лучам Солнца, от рельефа, режима облачности, температур верхних слоев почвы и т.п.

По данным В. Лархера (1978) при сильной *инсоляции* (от лат. *insolatio* – выставлять на солнце) тепло накапливается в листьях и других органах растений. Температура растения в целом и его отдельных частей обычно не совпадает с температурой окружающего воздуха.

Приведем несколько примеров из различных природных зон Северного полушария. На рис. 9.3 представлены натурные измерения температуры различных частей растения из арктической тундры в солнечное июньское утро при температуре воздуха 11,7 °С. В правой части рисунка – схема с различными зонами в системе «атмосфера – растение – почва»: 1 – самый холодный слой приземного воздуха; 2 – верхняя граница роста растений; 3, 4, 5 – зоны наиболее интенсивных «жизненных процессов» и максимального накопления органического вещества в растении; 6 – уровень вечной мерзлоты в тундре; 7 – зона наиболее низких температур почвы (Тихомиров Б.А., 1963).

На рис. 9.4 (Лархер В., 1978) показаны уровни жаростойкости летом и морозостойкости зимой различных органов сеянца пихты (°С). Все данные относятся к 50 % повреждению частей растения. В соответствующие сезоны корень является наиболее чувствительным органом, а К – камбий и Д – древесина (ствол) – самые устойчивые части молодого дерева. Хвоя в летний период повреждается жарой в меньшей степени, чем почки, а зимой почки заметно чувствительнее к морозу, чем хвоя. Столь же показательны различия в температуре органов растений, обитающих в засушливой пустыне (штат Аризона, США) и в высокогорной части Альп (рис. 9.5).

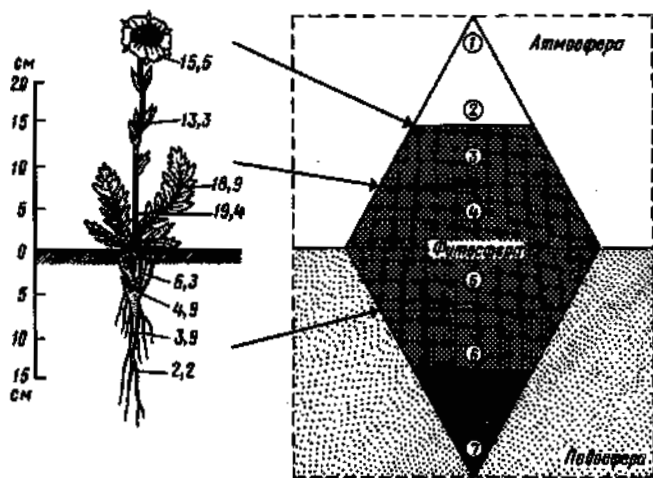


Рис. 9.3. Распределение температур (°С) в розеточном растении арктической тундры (*Novosieversia glacialis*) в солнечное июньское утро при температуре воздуха 11,7 °С.

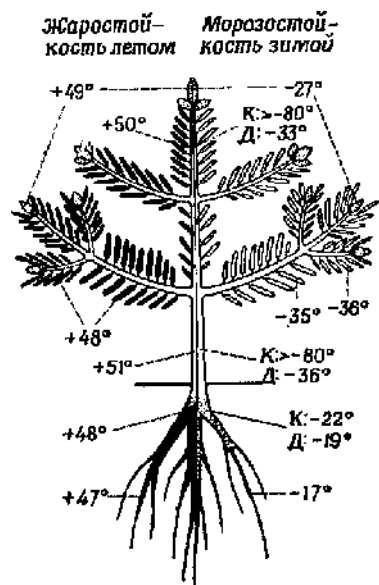


Рис. 9.4. Жаростойкость (летом) и морозостойкость (зимой) различных органов, сеянца пихты (°C) (Лархер В., 1978)

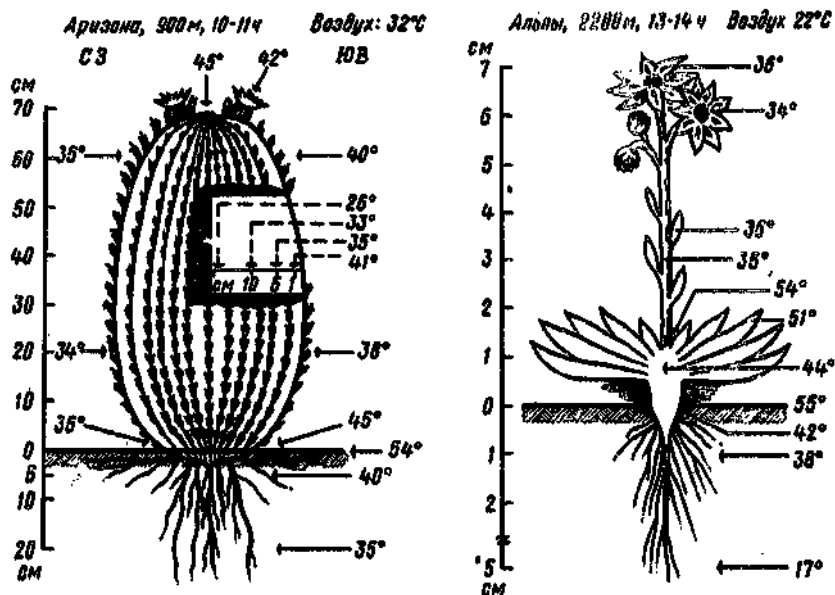


Рис. 9.5. Температура различных участков поверхности и тканей кактуса (*Ferocactus wislizenii*) в пустыне Аризона и суккулентного розеточного растения (*Sempervivum montanum*) в Альпах при сильной инсоляции и отсутствии ветра (Лархер В., 1978)

Особенно велик градиент температуры у высокогорных растений: так, температура листьев многих растений альпийской зоны днем, при ясной летней погоде достигает $>40^{\circ}\text{C}$, а ночью листья охлаждаются до минус 10°C ! Столь высокая разница объясняется радиационными потоками тепла. До некоторой степени оказывает влияние на температуры тканей растения и тепло, выделяемое им в процессе дыхания, в то время как транспирация, наоборот, снижает температуру, поскольку часть тепла затрачивается на испарение воды.

Известно, что распад белковых структур живых организмов начинается при температурах, близких к 50°C . В результате длительного перегрева тканей растения происходит распад белков и аминокислот, сопровождающийся выделением аммиака, отравляющим и парализующим жизнедеятельность клеток. У жаростойких растений наблюдается увеличение содержания органических кислот, связывающих избыточный аммиак.

Около 25 % различных типов почв нашей планеты засолены. Треть земель, подвергшихся орошению, изменена человеком в сторону избытка минеральных солей вследствие плохого дренажа. По степени засоления различают почвы: незасоленные, слабозасоленные, средnezасоленные и солончаки. Тип засоления определяется по содержанию *анионов* (отрицательно заряженных ионов) в почве: хлоридное, сульфатное, карбонатное, а также различные их сочетания. Преобладающим *катионом* (положительно заряженный ион) в таких почвах является натрий, но встречаются также карбонатно-магниевое, хлоридно-магниевое и другие виды засоления.

Солеустойчивые растения, приспособленные к существованию в условиях избыточного засоления благодаря морфофизиологическим особенностям, выработанным в процессе эволюции, называются *галофитами* (от греч. *halos* – соль, *phyton* – растение); для сравнения: растения незасоленных почв и водоемов относятся к группе *гликофитов* (от греч. *glykys* – сладкий). Они широко распространены в зоне умеренного климата средних широт. Среди них многие роды и виды сельскохозяйственных культур выработали определенную способность к перенесению незначительного избытка солей в почве. Относительно солеустойчивыми считаются следующие культуры: ячмень, сахарная свекла, относящаяся к семейству *Соляноквых*; менее солеустойчивым является хлопчатник из сем. *Мальвовых*. Мягкая пшеница устойчивее к солям, чем твердая. При длительном выращивании в условиях засоления почвы ячменя, томатов, проса отмечена их большая солеустойчивость без потери урожайности.

Галофиты выработали в процессе эволюции ряд «мер защиты» от избыточной концентрации солей:

– поглощение большого количества солей и концентрирование их в соке вакуолей, что приводит к созданию высокого осмотического давления; такие растения (солянки) на вкус имеют различные горько-соленые оттенки;

– выведение поглощаемых солей из клеток вместе с водой с помощью специализированных солевых железок и удаление избытка солей с опадающими листьями, например засоление песчаной почвы вокруг крупных экземпляров саксаула, в результате которого происходит смена растительного микросообщества;

– локализация поглощаемых солей в вакуолях клеток специализированных волосков на поверхности листьев, при обламывании хрупких волосков происходит вынос кристалликов соли, например, у «соленых веточек» тамарикса и др.

У гликофитов засоление сильнее всего подавляет рост клеток растяжением и в меньшей степени влияет на их деление. Избыточное засоление нарушает азотный обмен в растении, что способствует накоплению промежуточных продуктов азотного обмена и оказывает на него сильное токсическое действие. Интенсивное поглощение натрия уменьшает поступление калия и магния в клетки.

Основным методом борьбы с засолением почв в южных регионах является промывка почв до посева сельскохозяйственных культур, а также и после уборки урожая, при условии создания надежного дренажа. На солонцах (почвы, содержащие большое количество натрия) осуществляют гипсование почвы, которое приводит к вытеснению натрия из почвы и замещению его кальцием. Солеустойчивость растений (при хлоридном засолении) увеличивается после применения предпосевного закаливания семян путем обработки семян хлопчатника, сахарной свеклы, пшеницы 3 % раствором NaCl с последующей 1,5-часовой промывкой водой. При сульфатном засолении семена вымачивают в 0,25 % растворе сульфата магния.

9.5. Засухи и продуктивность сельскохозяйственных культур

Напомним, что засуха – это естественное явление природы, обусловленное циркуляционными процессами в атмосфере, следствием которых становится длительное отсутствие осадков (или значительное их сокращение по сравнению со средними многолетними величинами) в сочетании с повышенными температурами воздуха, почвы и ветрами (суховеи), что приводит к резкому снижению относительной влажности воздуха, истощению запасов влаги в почве. Визуальным признаком воздействия засухи (и суховеев) на растения является их стрессовое состояние: нарушение водного баланса растений, потеря тургора тканей, пониклость верхних частей стеблей, засыхание нижних и скручивание верхних листьев, пожелтение растений за счет распада хлорофилла в хлоропластах. По существу, *стресс* – это ответный комплекс защитно-приспособительных реакций растений (физиологических, анатомо-морфологических) на любые неблагоприятные условия их жизнедеятельности. При засухе – это реакция на обезвоживание и перегрев тканей растения.

В агрометеорологической литературе накоплен большой массив данных о природе засух: ареалах их распространения, повторяемости, продолжительности и мерах борьбы с целью смягчения последствий засух на урожайность посевов. Не вдаваясь в детальное рассмотрение количественных зависимостей продуктивности сельскохозяйственных культур от засух, отметим, что недостаток атмосферных осадков в зоне неполивного земледелия является основной причиной недобора зерна в отдельные годы в России.

Как было отмечено в главе 2, в России основные зернопроизводящие регионы расположены в зоне, где среднегодовое количество осадков около и менее 500 мм, а изогипта ≤ 500 мм является условной границей рискованного земледелия в нашей стране (рис. 2.3). Наиболее неурожайные годы – 1972, 1975, 1979, 1981, 1984, 1995, 1998, 1999, что отчетливо видно на приведенном графике. В России в такие годы общими признаками погоды является формирование мощного, обычно блокирующего антициклона на Европейской части страны с длительным бездождным периодом, высокой температурой и сухостью воздуха. В периоды сильных засух температура воздуха оказывается выше средней многолетней величины на 3...6 °С, осадков выпадает на 30...50 % меньше нормы, бездождные периоды составляют 20...40 (и более) суток. Нередко в таких случаях наблюдаются суховейные явления, а при наступлении почвенной засухи развиваются пыльные бури.

Согласно А.Н. Полевому (1992), под воздействием неблагоприятных (засушливых) условий в период вегетативного роста изменения характера роста надземной части растения происходят при

$$\Delta M^{j+1} / \Delta t < \Delta M^j / \Delta t, \quad (9.4)$$

если $\Delta M^{j=1} / \Delta t \neq 0$.

Распределение продуктов фотосинтеза между надземными органами растения происходит благодаря ростовым функциям надземной части растения:

$$\beta_{i(zac)}^j = \beta_i^j / \sum_i^{l,s,p} \beta_i^j, \quad (9.5)$$

где $\beta_{i(zac)}^j$ – ростовая функция периода вегетативного роста надземного органа в условиях засухи, безразмерная.

Уравнение динамики биомассы i -го надземного органа имеет следующий вид:

$$\Delta m_{i(zac)}^{j+1} / \Delta t = \beta_{i(zac)}^{j=1} (\Delta m_{надзем.}^{j+1} / \Delta t), \quad (9.6)$$

где $\Delta m_{i(zac)}^{j+1}$ – прирост сухой биомассы i -го надземного органа в условиях засухи, г/м².

Засушливые условия оказывают неблагоприятное воздействие на формирование высоты стеблестоя и продуктивную кустистость зерновых культур. Установлено влияние числа суток с суховеями за межфазный период «3-й лист – цветение» на высоту яровой пшеницы (У) (Пасечнюк Л.Е., Сенников В.А., 1983):

для степных районов Поволжья:

$$Y = 499,9 / x + 26,6, \quad (9.7)$$

$$S_y = \pm 13 \text{ см},$$

для Кулунды:

$$Y = 343,3 / x + 23,5; \quad (9.8)$$

$$S_y = \pm 7 \text{ см},$$

где x – число суток с засухами за этот период; Y – высота растений в фазу цветения, см.

Наибольшее снижение числа колосков в колосе происходит при числе суток с засухами за названный период ≥ 16 , при количестве осадков 40 мм и запасах влаги в пахотном горизонте < 20 мм. Число зерен в колосе в большой степени определяется условиями среды в ранние стадии морфогенеза – закладки, дифференциации колоса и цветка, а также от количества полностью сформировавшихся и оплодотворенных цветков.

Феномен явления засухи достаточно хорошо изучен метеорологами, климатологами, агрономами и агрометеорологами; однако наиболее важный для производителей сельскохозяйственной продукции – надежный прогноз сроков наступления, интенсивности и продолжительности засухи до сих пор остается не решенным, несмотря на многочисленные попытки со стороны многих коллективов ученых различных специальностей.

Довольно скромно выглядят исследования влияния засушливых явлений на урожайность, в первую очередь зерновых культур, что связано с рядом объективных причин. Реальные потери зерна, выраженные в т/га и в процентах, отмеченные в засушливые весенне-летние месяцы в ряде регионов страны, приведены за отдельные годы в табл. 9.4 (Страшная А.И., Зойдзе Е.К., Деревянко А.Н., 2005).

Таблица 9.4

Регион	1981		1984		1995		1998	
	т/га	%	т/га	%	т/га	%	т/га	%
Центрально-Черноземный	0,91	48	0,81	43	0,68	41	–	–
Поволжский	0,59	45	0,58	44	0,52	41	0,74	56
Уральский	–	–	–	–	–	–	0,63	55

Средние потери урожайности яровых культур от засух, наступивших в различные фазы развития, приведены в табл. 9.5.

Как видно из этой таблицы, яровые культуры могут подвергаться воздействию засух в любые периоды своего развития (фазы), при этом чем продолжительнее засуха, тем значительнее потери урожая. В годы, когда засуха наступает в конце вегетационного периода этих культур (от колошения до восковой спелости), влага уже не имеет решающего значения для яровых культур. Анализ динамики урожайности за последние десятилетия

Таблица 9.5

Средние потери от максимальной урожайности яровых культур в условиях засухи, наступившей в различные фазы развития (Жуков В.А., Святкина О.А., 2000)

Характеристика состояния	Засушливые условия в период					
	посев – кущение	куще- ние – ко- лошение	колошение – восковая спелость	посев – колоше- ние	кущение – восковая спелость	посев – восковая спелость
Поволжье						
Средние потери, %	30	40	25	70	60	85
Центрально-Черноземный район						
Средние потери, %	35	35	20	60	50	50
Северный Кавказ						
Средние потери, %	20	35	30	40	50	60

и валовых сборов зерна показывает, что практически ежегодно в течение вегетационного периода яровых зерновых культур на этих территориях, являющихся основными производителями зерна, наблюдаются засушливые явления, охватывающие различные по площади регионы.

Для каждого региона агрометеорологами подсчитана вероятность наступления засухи. Напомним, что *вероятность явления* есть числовая характеристика степени возможности появления определенного события (А) в определенных условиях, которые могут повторяться неограниченное число раз. Вероятность есть величина положительная, заключающаяся между нулем и единицей; она выражается в процентах или дробью.

В физиологическом смысле засуха вызывает несоответствие между потребностями растений во влаге и ее поступлением из почвы, результатом чего является снижение или полная гибель урожая. В южных, засушливых регионах местные жители справедливо считают, что «родит не земля, а вода».

Водный баланс растений зависит от комплекса факторов: природы самого растения, его строения, фазы развития, густоты стояния растений на единице площади; от агрометеорологических условий (температура и влажность воздуха, интенсивность освещенности, ветер, запасы почвенной влаги в корнеобитаемых горизонтах) и др. Засуха изменяет основу жизнедеятельности растений – обмен энергией и веществом между растением и средой их обитания, не только абсолютные величины составляющих этого обмена, но и соотношения между ними, что приводит к снижению конечной их продуктивности (Полевой А.Н., 1992).

Под воздействием засухи в растительном организме происходит целый ряд функциональных и структурных изменений. Обезвоживание, а также повышение температуры окружающей среды воздействуют на микроструктуру клеток, и прежде всего на их мембраны, в которых содержится более 20 % воды их сухой массы. При сильном обезвоживании

разрушаются органоиды клеточной структуры (митохондрии, пластиды и др.), нарушаются тонкие структуры хлоропластов, снижается содержание хлорофилла и желтого пигмента, увеличивается количество каротина. Наступают биохимические изменения в метаболизме углерода. Это приводит к усилению образования клетчатки, снижению оттока ассимилятов из листьев, к снижению темновой фиксации CO_2 , к изменению протоплазмы белков, в результате которого синтез белков снижается на 50...75 % (Генкель П.А., 1982). Под влиянием обезвоживания происходят изменения в вязкости протоплазмы, что повышает жароустойчивость растений.

Следствием воздействия почвенной и атмосферной засухи является снижение интенсивности фотосинтеза растений. Дневной ход интенсивности фотосинтеза находится в большей зависимости от степени увлажнения почвы, развитости корневой системы и скорости ветра, чем от температуры воздуха в период ее максимума. По мере усыхания корнеобитаемого горизонта почвы интенсивность фотосинтеза после полудня резко падает и во вторую половину дня всегда меньше, чем в первой, при той же интенсивности солнечной радиации. Это явление объясняется тем, что при недостатке влаги повышение температуры воздуха и соответственно поверхности листьев приводит к нарушению их водного потенциала, увеличению устойчивого сопротивления и снижению интенсивности транспирации.

Дефицит влаги в растении воздействует на скорость поглощения воды, изменение корневого давления и устьичных движений, на интенсивность транспирации, фотосинтеза, ферментативную активность, соотношение минеральных веществ. Причем на рост и развитие растений влияние оказывает даже слабый водный дефицит в почве задолго до того, как содержание влаги в почве достигнет уровня влажности устойчивого завядания.

При сильном и продолжительном иссушении почвы депрессия фотосинтеза наблюдается на протяжении большей части светового дня. Снижение интенсивности фотосинтеза листьев приводит к увеличению роли составляющей дыхания, зависящей от температуры среды. В условиях длительной и интенсивной атмосферной и почвенной засухи депрессия фотосинтеза уже не в состоянии компенсировать затраты на дыхание, устьица практически полностью закрываются, суточная «продуктивность» растения в течение всего периода не увеличивается.

Засуха особенно отрицательно влияет на формирование и развитие генеративных органов. При этом значительные нарушения происходят на ранних стадиях развития половых клеток, в сложных процессах образования хромосом из ядерного вещества с последующим распределением его между дочерними клетками. В случаях, когда засуха совпадает по времени с критическим периодом в водном режиме растений, т.е. с периодом наиболее высокой чувствительности растений к недостатку воды (фазы колошения и цветения), происходит стерилизация пыльцы,

следствием которой является «череззерница» и «пустоколосье». Отсюда – значительное снижение урожайности, а в экстремальных условиях – полная гибель урожая.

В энергетическом плане фотосинтез тесно связан с транспирацией, на долю которой в естественных условиях и при оптимальном водоснабжении расходуется около 80...90 % поглощенной энергии. Реакция растения на недостаток влаги в корнеобитаемом горизонте почвы всегда едина, прежде всего это регуляторная и затем энергетическая, определяющие одновременно уровень интенсивности фотосинтеза и транспирации. Так во избежание перегрева листа, его тканей и органелл растение различными способами стремится к минимизации количества поглощаемой ФАР. Это достигается путем изменения ориентации листа по отношению к падающей радиации, формы и площади листовой пластинки, вплоть до сброса самого листа. Например, у злаков при снижении их влагообеспеченности в первую очередь засыхают нижние листья, что сокращает общую транспирирующую площадь, а следовательно, и потерю влаги. На анатомическом уровне происходят изменения ориентации молекул хлорофилла в хлоропластах, изменения объема хлоропластов (разворот «ребром» к излучению), перемещения хлоропластов в более глубокие, с меньшей облученностью части клеток и т.п.

Снижение интенсивности фотосинтеза растения происходит при сокращении прихода ФАР в результате длительной (до нескольких дней) низкой и плотной облачности, смога или дыма при лесных пожарах, а также при загущенных посевах или в густых фитоценозах. Когда снижение величины прихода ФАР к растению происходит в наиболее ранний период развития (например, прорастание семени, рост первого-второго листьев у зерновых культур), это отрицательно сказывается на формировании конечного урожая. Уменьшение прихода ФАР в этот период воспринимается проростками как «сигнал» о том, что рост в дальнейшем будет протекать в неблагоприятных условиях с ослабленным фотосинтезом. Экспериментально доказано, что в таких случаях на основе полученного «сигнала» у растения формируется более тонкий стебель, с меньшим количеством проводящих пучков и ослабленной механической тканью. В последующие фазы развития даже при наступлении более благоприятных условий высота растения остается меньшей, а колос содержит меньшее количество зерновок. На большом фактическом материале показано, что между объемом механических («арматурных») тканей стеблей у злаков ($V_{арм}$) и массой зерновок колоса (M_3) существует константное соотношение независимо от этих величин (Шульгин И.А. и др., 1986, 1988, 1990):

$$V_{арм} / M_3 = 1,38 \text{ мм}^3 / \text{мг}. \quad (9.9)$$

Таким образом, было подтверждена регуляторная (информационная) роль ФАР. То есть изменение массы стебля, по существу, является

уменьшением дышащего органа, которое влечет за собой снижение массы и площади фотосинтезирующих тканей. Это обеспечивает организму как саморегулирующейся и самооптимизирующейся системе сохранение соотношения дыхания и фотосинтеза за сутки и постоянство КПД поглощенной за сутки ФАР по газообмену и приросту сухой биомассы.

Аналогичные процессы протекают в растениях и в другой критический период их развития – период формирования зачаточных цветков (V этап органогенеза). В условиях дефицита влажности почвы происходит «сброс» менее жизненных цветков. Сигналом к этому является полуденная депрессия газообмена как результат понижения интенсивности ФАР, «регулируемого» растением перестройкой анатомо-морфологических систем.

9.6. Влияние переувлажнения почвы

Наряду с периодически проявляющимися засушливыми явлениями климата в умеренных широтах страны, в отдельные годы наблюдаются периоды выпадения интенсивных и длительных осадков, вызывающих переувлажнение корнеобитаемых горизонтов почвы. При постоянном или периодически длительном, но избыточном увлажнении в пониженных участках рельефа скапливающаяся вода приводит к заболачиванию полей (местности).

В южных регионах, где возделывание многих сельскохозяйственных культур возможно только при искусственном орошении, избыточные поливы также вызывают переувлажнение почвы под посевами. Влажность почвы, превышающая *полевую влагоемкость*, т.е. наибольшее количество влаги, которое может удерживаться в однородной почвенно-грунтовой толще, после ее стекания под действием силы тяжести оказывается избыточной и, несмотря на ее доступность, бесполезной для растений из-за недостатка кислорода в порах почвы. Доступной для растений является влага, находящаяся в интервале от полевой влагоемкости до влажности устойчивого завядания.

Переувлажнение или избыточное увлажнение почвы характеризуется средним содержанием влаги за вегетационный период в пределах 70...80 % полной влагоемкости (Роде А.А., 1955). В различных типах почвы процессы заболачивания происходят по-разному, но общим для них является застой влаги, развитие анаэробной микрофлоры, трансформация механического состава и водно-физических свойств почвы.

Для нормального развития корневых систем растений необходимо наличие воздуха в почвенных порах. Установлено, что минимальный объем воздуха в почве для различных видов сельскохозяйственных культур изменяется от 10 до 50 % пористости, следовательно, оптимальная для роста растений влажность почвы будет изменяться от 90 до 50 % пористости.

При избытке влаги в почве интенсивность средней суточной скорости роста зерновых культур уменьшается на 8...47 %. Избыточное увлажнение

нарушает водообмен клетки и всего растения, это приводит к угнетению ростовых процессов, закладке и образованию репродуктивных органов, что обуславливает слабую «завязываемость» зерна из-за низкой способности пыльцы. В конечном итоге формируется низкий урожай зерна.

Согласно исследованиям О.Д. Сиротенко (1981), для учета влияния переувлажнения на снижение продуктивности фотосинтеза можно использовать *коэффициент переувлажнения* $\overline{SW}$:

$$SW_i = (W_i - W_{onm}) / (W_i^{ng} - W_{onm}), \quad (9.10)$$

если $W_i > W_{onm}$, иначе $SW_i = 1$,

$$\overline{SW} = \sum_{i=1}^n SW_{i\mu_i} / \sum_{i=1}^n \mu_i, \quad (9.11)$$

где W_i – влажность i -го слоя почвы, мм; W_i^{ng} – полная влагоемкость; W_{onm} – оптимальная для данной культуры влажность почвы, например, для яровой пшеницы $W_{onm} = 0,7 W_i^{ng}$; μ_i – доля корней в i -м слое почвы; n – число почвенных слоев.

При избыточном увлажнении почвы нарушается режим почвенного питания растений, возникает анаэробный тип дыхания, неэкономично расходуются питательные вещества, в результате происходит истощение растений и снижение их урожайности. Так при воздействии избытка влаги в результате переувлажнения почвы в зависимости от фазы развития культур и длительности затопления происходит потеря урожая: у картофеля на 56...84 %, у зерновых культур на 32...48 %, у многолетних сеяных трав на 24...36 %.

Внесение минеральных удобрений позволяет в определенной мере снизить отрицательное воздействие переувлажнения, поскольку повышенные дозы питательных веществ оказываются более эффективными при 70...80 % полевой влагоемкости (рис. 9.6).

В период созревания зерновых культур особенно опасны продолжительные дожди, вызывающие переувлажнение почвы, полегание хлебов и «стекание» зерна. В этих условиях происходит вымывание из верхних горизонтов почвы подвижных форм азота, недостаток которого в растении приводит к формированию щуплого зерна. При полегании стеблей с тяжелыми колосьями увеличивается влажность в среде растений, ухудшаются условия обмена веществ в самих растениях.

В период формирования и налива зерна осадки в количестве до 70 мм улучшают условия для физиологических процессов налива и созревания зерна. При этом масса 1000 зерен повышается (рис. 9.7).

Однако осадки, попадающие в большом количестве на созревающие колосья (в фазы молочно-восковой и полной спелости зерна) при теплой погоде, а также обильные росы или продолжительные туманы способствуют сохранению высокой влажности воздуха и почвы. Такие условия повышают активность гидролитических ферментов в зерне,

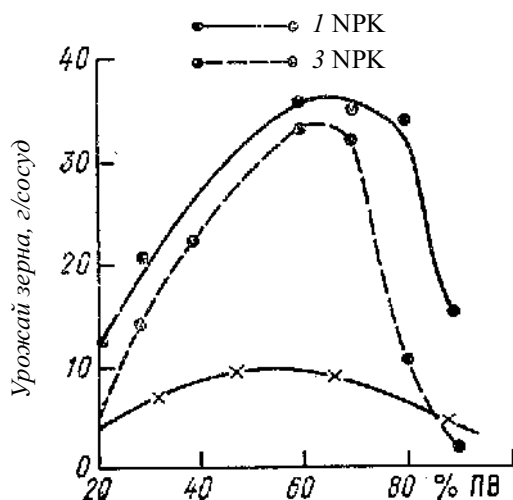


Рис. 9.6. Влияние доз минерального питания и влажности почвы на урожай ячменя (Шевелуха В.С., Берестов И.И., Дорохов В.О., 1980).

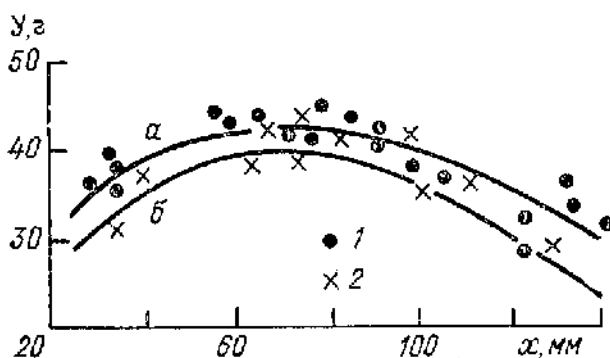


Рис. 9.7. Зависимость между массой 1000 зерен (y) и количеством осадков (x), выпавших за период формирования и налива зерна озимой пшеницы (Свислюк И.В., 1980): а – озимая пшеница, посеянная в оптимальные сроки по неудобренным непаровым предшественникам; б – то же при посеве в поздние сроки; 1 – оптимальные сроки сева, 2 – поздние сроки сева

которые увеличивают поступление воды с влажной поверхности в эндосперм зерновки. При этом усиливается гидролитический распад запасных питательных веществ (крахмала, сахаров), на колосьях появляется «сладкая роса» – признак вымывания подвижных углеводов. Вытекание углеводов из зерна и энергетический расход их в качестве дыхательного материала получило название «стекание» зерна.

В зависимости от состояния растений, степени созревания зерна и количества осадков в этот период потеря его массы может достигать 16,5...48 %. Осадки более 70...80 мм в этот же период оказывают отрицательное влияние на зерно, урожайность которого снижается. В табл. 9.6 приведены осредненные данные о снижении урожайности под влиянием различных сумм осадков.

Таблица 9.6

Влияние осадков, выпадающих в период налива и созревания зерна пшеницы, на урожайность озимой пшеницы на Северном Кавказе (Свисюк И.В., 1980)

Сумма осадков, мм	Снижение урожайности, %	Сумма осадков, мм	Снижение урожайности, %
80	0	120	16
90	4	130	20
100	6	140	27
110	11	150	35

Обильные дожди, выпадающие в период уборки хлебов, когда скошенные массы находятся в валках, также опасны для развития процесса стекания зерна, если его влажность превышает 25 %. В случаях продолжительного влажного периода скошенные хлеба, находящиеся на корню и в валках, начинают прорастать, что приводит к значительным потерям урожая зерна. Установлено, что зерно начинает прорастать по истечении периода покоя семян при их влажности 30...32 % и средней суточной температуре воздуха в пределах 5...14 °С.

При прорастании в течение 3–4 суток всхожесть зерна снижается до 65...75 %, масса сухого вещества уменьшается на 7...10 %. При прорастании в течение 7–8 суток зерно полностью теряет семенные качества, а потери сухой массы достигают 25...28 %. Скошенные и уложенные в валки зерновые начинают прорастать при осадках от 20 до 40 мм в зависимости от технологии укладки валков: тонкослойные валки быстрее прорастают по сравнению со стандартными (Борисоглебский Г.И., 1963).

Влажная и теплая погода способствует также развитию многих грибковых заболеваний, в частности, ржавчины, поражающей листья злаков, в результате происходит сокращение фотосинтетической деятельности, отмирание листьев и формирование щуплого зерна.

9.7. Холодостойкость, морозоустойчивость и зимостойкость растений

В течение вегетационного периода однолетние и двулетние растения периодически подвергаются воздействию низких температур. Многолетние растения исторически более приспособлены к переживанию холодных сезонов, в течение которых их физиологические процессы практически заторможены и протекают крайне медленно. Хорошо известно, что разные растения (роды, виды, сорта) обладают неодинаковой устойчивостью к воздействиям холодной погоды. Даже у одного и того же индивидуума уровень морозостойкости меняется в зависимости от фазы его развития, условий, предшествующих наступлению похолодания или заморозков. *Морозостойкость (морозоустойчивость)* – это свойство растений выдерживать воздействие отрицательных температур с сохранением способности к вегетации и репродукции при наступлении благоприятных условий погоды.

Холодостойкость (холодоустойчивость) – это способность вегетирующих растений переносить воздействие низких положительных температур воздуха (от 1...5 до 10 °С) с последующим возобновлением роста, развития и формирования продуктивности при наступлении благоприятных погодных условий. Холодостойкость меняется у растений в зависимости от стадии развития, условий произрастания и прочих особенностей места и времени наступления похолодания.

Большой вклад в изучение проблемы морозоустойчивости внесли работы крупнейших физиологов страны Н.А. Максимова, И.И. Туманова и многих др. На обширных экспериментальных исследованиях было показано, что быстрое понижение температуры сопровождается образованием кристаллов льда внутри клеток. Постепенное снижение температуры среды (от 0,5 до -1 °С), наблюдаемое в естественном ходе смены осеннего сезона на зимний, приводит к образованию льда в межклетниках. При оттаивании они снова заполняются водой, которая затем поглощается клетками, если они не погибли. Таким образом, при низких отрицательных температурах гибель клеток происходит в результате обезвоживания клеток, механического сжатия льдом, повреждающего клеточные структуры. Обезвоживание происходит в результате оттягивания воды из клеток образующимися кристаллами льда. Это иссушающее действие льда, особенно при низких температурах, длительно воздействующих на растение, сходно с обезвоживанием, происходящим при засухе за счет испарения. Внешним признаком повреждения растения от замерзания является потеря клетками и тканями тургора, благодаря инфильтрации межклетников водой и вымыванию сахаров и ионов их клеток.

Закаливание растений (закалка) – это процесс повышения морозоустойчивости (холодоустойчивости) растений. Закаливание растений осуществляется в условиях постепенного снижения температуры окружающей

среды, сокращения фотопериода (сокращения продолжительности светового дня). Процесс закалки растений является обратимым и проходит поэтапно: остановка ростовых процессов и переход в состояние покоя. Первая фаза: озимые культуры проходят ее на свету при температуре 0,5...2 °C за 6...9 суток; древесные культуры – за 30 суток. Эти условия (низкие плюсовые температуры и еще достаточное освещение) способствуют накоплению сахаров. Закалка происходит в результате сложных физиологических процессов усиления гидролиза и накопления сахаров, синтеза водно-растворимых белков в цитоплазме. В процессе закаливания сахара локализируются в разных частях клетки – в клеточном соке, в цитоплазме, особенно в хлоропластах. Сахара повышают осмотическое давление в клетках. Чем выше концентрация сахаров в клеточном соке и межклетниках, тем ниже точка замерзания, поэтому сахара предохраняют от замерзания большое количество воды и, следовательно, значительно уменьшают количество образующегося льда. Кроме того, сахара стабилизируют клеточные структуры, в частности хлоропласты, благодаря чему они продолжают функционировать. Велико защитное влияние сахаров на белки клеток и мембран. Защитное действие сахаров проявляется только в тех случаях, когда оно происходит при одновременном понижении температуры среды и умеренной влажности почвы. Излишняя влажность почвы (дождливая осень) препятствует нормальному процессу закаливания.

В мембранах происходит образование жирных кислот, снижающих точку замерзания цитоплазмы, сокращение внутриклеточной воды, что, в целом, тормозит образование внутриклеточного льда.

Вторая фаза закалки проходит при дальнейшем снижении температуры (от -2...-5 °C до -10...-20 °C), когда в межклетниках образуется лед, и начинают действовать механизмы защиты от обезвоживания, подготовленные в течение первой фазы. Для прохождения второй фазы не требуется света. Поэтому у многих зимующих травянистых растений эта фаза может проходить и под снегом. В течение этой фазы происходит перестройка белков цитоплазмы, новообразование специфических (водно-растворимых) белков, отличающихся более крупными молекулами и большей устойчивостью к обезвоживанию. Перестройка цитоплазмы способствует увеличению ее проницаемости для воды. Благодаря быстрому оттоку воды уменьшается опасность внутриклеточного образования льда. Крахмал в клетках растений частично превращается в сахара, запасы которых увеличиваются, следовательно, в этот период происходит повышение зимостойкости и холодостойкости растений.

Критической температурой вымерзания называется пороговое значение температуры окружающей среды, ниже которой наступает гибель растения, равное: -13...-16 °C для озимого ячменя и двуукосного клевера, -17...-19 °C для люцерны; -18...-20 °C для озимой пшеницы; -22...-24 °C

для озимой ржи. Кроны многих плодовых культур могут переносить морозы до $-25...-30^{\circ}\text{C}$, а лесные породы деревьев – до $-45...-50^{\circ}\text{C}$.

Известно, что в зимний период интенсивность дыхания озимых культур незначительна. В табл. 9.7 показана динамика расхода сахаров в зависимости от температуры на глубине залегания узла кущения злаков (3 см).

Таблица 9.7

Динамика расхода сахаров (мг) закаленными растениями озимых культур на дыхание под снежным покровом за 1 сутки в зависимости от температуры (Петунин И.М., 1957)

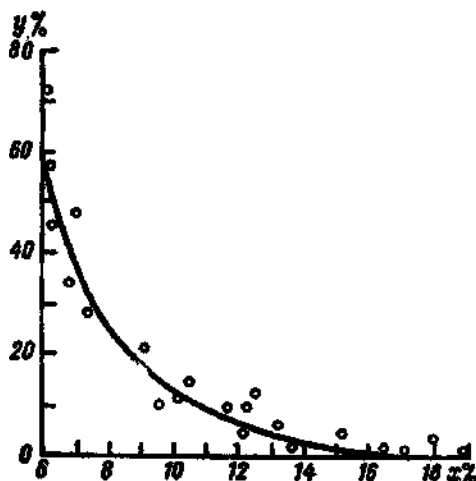
Температура, $^{\circ}\text{C}$	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
Расход сахаров	9,9	9,1	8,3	7,6	6,9	6,3	5,7	5,2	4,7	4,3	3,8	3,4	3,1	2,7	2,3	2,0	1,7	1,3

Хотя суточные расходы сахаров не велики, но за длительный зимний период суммарная величина расходов оказывается весьма значительной. Расход сахаров у озимых культур резко возрастает в период интенсивного снеготаяния.

Агрометеорологами разработан и широко используется биохимический метод определения количества сахаров в зимующих тканях озимых культур. По количеству сахаров в узлах кущения, которые залегают, как правило, на глубине 3 см от поверхности почвы, судят об условиях хода перезимовки озимых посевов. Степень гибели (изреженности, в процентах на единицу площади) посевов озимой ржи хорошо коррелируется со степенью концентрации клеточного сока (процент сухих веществ по сахарозе) в узлах кущения зимующих растений (рис. 9.8).

Оптимальным количеством сахаров к началу зимнего периода для озимых зерновых культур считается величина 24...26 % от массы сухого вещества. Максимальное количество сахаров в этот период у озимой

Рис. 9.8. Зависимость степени гибели (y) озимой ржи от минимальной за зиму концентрации клеточного сока в узле кущения растений (x) (Константинов Л.К., 1989)



пшеницы достигает 38...44 % (Гойса Н.И., Гаценко Р.В. и др., 1977). Минимальное количество сахаров в узле кущения, составляющее 10 %, – это сигнал к тому, что озимые посевы в данном обследованном пункте подлежат замене на весенние посевы яровыми, поскольку подавляющая масса озимых растений весной не даст возобновления вегетации.

В Нечерноземной зоне состояние озимых получает хорошую оценку при сохранении сахаров в растениях к концу зимнего периода в количестве 13 % и более. Однако, как показали исследования, результаты перезимовки и морозостойкость растений определяются не только количеством накопленных к зиме сахаров, но и динамикой их расходования в период зимнего покоя. Более морозостойкие сорта расходуют запас своих сахаров значительно экономнее, чем сорта с более низким уровнем морозостойкости.

У растений умеренных и северных широт, переживающих в период своей жизни значительные понижения температуры, процесс закаливания проходит в определенные этапы их развития. Для приобретения способности к закаливанию древесные формы растений должны закончить процессы роста, в это же время происходит отток различных веществ (ассимиляты) из надземных органов в корневые системы, где скапливаются продукты обмена, гормоны, способствующие ростовым процессам с наступлением теплой весенней погоды. Если эти процессы не завершены, наступившее резкое похолодание может привести к гибели древесно-кустарниковых пород. Например: резкое похолодание осенью 1956 г. в республиках Средней Азии привело к массовой гибели фруктовых садов и виноградников на больших площадях. У многих древесных растений, обладающих достаточным количеством сахаров, в процессе закаливания первая и вторая фазы могут протекать, практически, одновременно.

В результате процесса закаливания морозоустойчивость растений резко возрастает. Для предохранения растений от повреждений морозами целесообразно усиление фосфорного питания (подкормки), которое повышает устойчивость растений к холодам. Положительное влияние на морозоустойчивость (и холодоустойчивость) оказывают микроэлементы. Так цинк повышает содержание связанной воды и усиливает накопление сахаров, молибден способствует увеличению содержания общего и белкового азота. Однако азотные удобрения способствуют процессам роста и делают растения более чувствительными к холоду.

Таким образом, основное повреждающее влияние на растительный организм оказывает образование льда в межклетниках и клетках. Образование льда происходит при резком снижении температуры воздуха. При замерзании воды происходит ее расширение, благодаря которому кристаллы льда разрывают оболочки клеток и тканей растений. Кроме того, происходит обезвоживание клеток и тканей, при котором изменяется концентрация

и происходят изменения pH клеточного сока. Все это определяет гибель поврежденных клеток, тканей и растения в целом или его частей.

Способностью к закаливанию обладают не все растения. Так растения южного происхождения вообще не способны к закаливанию. Способность к закаливанию обычно утрачивается весной в связи с началом ростовых процессов у растений. В случаях наступления поздних весенних заморозков, когда у перезимовавших растений закалка уже утеряна, возможна гибель растений даже от незначительных по интенсивности и продолжительности заморозков.

Существует еще одно понятие, отражающее отношение растений к пониженным температурам, – *зимостойкость растений*; это – биологическое свойство зимующих растений переносить воздействие комплекса неблагоприятных условий зимнего периода без существенных повреждений. Зимостойкость зависит от направленности физиологических и биологических процессов, протекающих в тканях растений в зимний период, определяемых видом растения, его наследственными свойствами (селекция), агротехникой возделывания, климатическими условиями географической среды и погодными условиями конкретного года. Зимостойкость растений определяется не только термическим режимом, но и такими показателями, как высота снежного покрова, толщина и продолжительность залегания ледяной корки, глубина промерзания почвы, режима снеготаяния весной и др.

Особенно многочисленные формы неблагоприятного воздействия зимой испытывают зимующие сельскохозяйственные культуры, однолетние и многолетние растения. Так при глубоком залегании снежного покрова и небольших морозах происходит *выпревание* озимых культур. Это связано с тем, что под толстым слоем снега температура среды повышается (около 0 °С) и дыхание растений становится интенсивным, происходит большая трата сахаров при отсутствии или очень слабом фотосинтезе, результатом чего становится их частичная или полная гибель от истощения.

Другой причиной гибели растений зимой является повреждение, связанное с *выпиранием*. При образовании в почве ледяной корки или кристаллов воды корни растений, не успевшие хорошо раскуститься и укорениться, разрываются, что при первом же потеплении приводит растения к гибели.

С наступлением весны в пониженных участках полей, как правило, скапливаются талые воды, быстрое впитывание которых сдерживается промерзшими, более глубокими слоями почвы. Накопившаяся вода, покрывает молодые растения, которые могут погибнуть от *вымокания*. Причиной их гибели становится резкий недостаток кислорода, при этом в клетках растений начинается процесс брожения, следствием которого является отравление всего организма (см. гл. 8).

Теплолюбивые растения сильно страдают даже при пониженных положительных температурах. Это связано с нарушением обменных процессов, из-за чего в растениях накапливаются промежуточные продукты метаболизма, поскольку каждая биохимическая реакция протекает в определенных температурных условиях. При нарушении температурных условий происходит замедление реакций, что влечет за собой изменение вязкости протоплазмы, а следовательно, и замедление процессов окисления и фосфорилирования (процесс, обратный окислению, – *раскисление*).

Агрометеорологические условия перезимовки основных сельскохозяйственных и плодовых культур рассматриваются в части IV настоящего учебного пособия.

В процессе исторического развития большинство растений выработали «меры защиты» от болезней и вредителей путем создания целого «арсенала» биохимических и физиологических реакций на различные *патогены* (от греч. *pathos* – страдание, *genes* – рожденный). Это, в первую очередь, микроорганизмы, которые окружают растения в течение его онтогенеза. К ним также относятся многочисленные *экзогенные* (от греч. *exo* – внешний и *genos* – род, происхождение) и *эндогенные* (от греч. *endon* – внутренний) паразиты, сосущие и листогрызущие насекомые и разнообразные болезни. Эти аспекты жизнедеятельности растений рассмотрены в главе 17.

ГЛАВА 10

МИНЕРАЛЬНОЕ (ИЛИ КОРНЕВОЕ) ПИТАНИЕ РАСТЕНИЙ

10.1. Типы питания растений

В растительном мире различают несколько типов питания растений. Основная масса зеленых растений, включая многие водоросли, питаются самостоятельно благодаря процессу фотосинтеза, путем использования углекислого газа, воды и солнечной энергии для образования органических веществ, при этом выделяется кислород. Этот тип питания получил название *аутоτροφный* (от греч. *autos* – сам и *trophe* – пища), а сами растения – *аутотрофы*, т.е. питающиеся самостоятельно.

Другой тип питания связан с употреблением в пищу уже готовых органических веществ и получивший название *гетеротрофный* (от греч. *heteros* – другой и *trophe* – пища), такие растения называются *гетеротрофами*, питающиеся органическими веществами. К ним относятся многие роды грибов и микроорганизмов. В типе гетеротрофов различают *сапротрофный* (от греч. *sapro* – гнилой) подтип питания; такие растения называются *сапрофитами* или *сапротрофами*, питающиеся разлагающимися остатками растений и животных и превращающие органические вещества в неорганические. Сапрофиты выполняют важнейшие функции в круговороте веществ в природе. К ним относятся многие грибы, бактерии, некоторые виды диатомовых водорослей; среди высших растений известны только единичные виды. К другому подтипу гетеротрофного питания относится небольшая группа растений, питающихся *паразитическими* (от греч. *parasitus* – нахлебник), т.е. органическими веществами живых организмов. В эту группу растений входят несколько родов головневых и ржавчинных грибов, а также отдельные роды высших насекомоядных растений, например повилика (*кускута*), паразитирующая на стеблях и стволах растений-хозяев с помощью специальных присосок, врастающих в центральный цилиндр тела и получающих оттуда воду, органические и минеральные элементы. Другим примером является заразиха (*Orobanchе*), не имеющая хлорофилла и не способная к фотосинтезу. Она паразитирует на корнях отдельных видов растений, в частности томатов; в растениях томатов, пораженных заразихой, содержание белкового азота снижается в 3 раза, а сахаров – в 16 раз.

В настоящее время известно более 400 видов покрытосеменных растений, которые ловят насекомых с помощью трансформированных листьев, переваривают их и используют продукты их разложения как

дополнительный источник питания. Это росянка (парализует захваченное насекомое муравьиной кислотой и специальным алкалоидом, содержащимся в обволакивающей слизи), жирянка, росолист и другие.

Важность изучения гетеротрофного типа питания определяется тем, что все не зеленые органы растений (корни, цветки и плоды) в темноте питаются гетеротрофно.

10.2. Общие сведения о минеральном (или корневом) питании растений

Представления о почвенном питании растений складывались по мере развития растениеводства. Еще Аристотелем (384–322 гг. до н. э.) было высказано мнение о том, что растения поглощают пищу из почвы в виде сложных веществ. В XVIII столетии основоположник русской агрономии А.Т. Болотов в своей книге «Об удобрении земель» (1770 г.) изложил свои представления об агрохимии: «пища растений в почве состоит в воде и некоторых особлевых земляных или паче минеральных частичках». Он определил удобрения, пригодные для применения в растениеводстве и разработал приемы внесения минеральных удобрений в почву. В 1840 г. немецкий химик Ю. Либих в своей книге «Химия в приложении к земледелию и физиологии» обосновал теорию минерального питания растений. История развития идей о минеральном питании растений имела несколько теорий: водная теория (XVII в.), гумусовая теория (XVIII в.), теория минерального питания (XIX в.). Основоположники научного почвоведения русские ученые П.А. Костычев, В.В. Докучаев и советский агрохимик К.К. Гедройц обосновали «теорию о почвенном поглощающем комплексе». В настоящее время имеется ясное представление о том, что плодородие почвы связано как со специфическими особенностями материнской горной породы (минеральный состав и структурное состояние почвы), так и с деятельностью почвенных микроорганизмов, которые минерализуют органические остатки.

Современное толкование понятия «почва» следующее: *почва* – природное (естественно-историческое) образование, состоящее из генетически связанных почвенных горизонтов, формирующихся в результате преобразования поверхностных слоев горных пород и рельефа под воздействием воды, воздуха и живых организмов.

Почва обладает *плодородием*, т.е. способностью удовлетворять потребности растений в питательных веществах, воде, обеспечивать их корневые системы необходимым количеством воздуха, теплом и благоприятной биотической и физико-химической средой и на этой основе обеспечивать формирование продуктивности посевов и естественной растительности. Специалисты выделяют *естественное, искусственное и эффективное плодородие*.

Естественное (или потенциальное) плодородие определяется природными, исторически сложившимися процессами почвообразования, с определенными запасами минеральных и органических веществ и сложившимся гидротермическим режимом. *Искусственное* плодородие почвы определяется внесением удобрений и проведением комплекса агротехнических мероприятий, включая севообороты, мелиорацию и т.п. *Эффективное (или экономическое)* плодородие представляет собой совокупность естественного и искусственного плодородия почвы, реализуемое в ходе его использования в форме полученного урожая, включая потенциальную его часть, оставшуюся для получения будущих урожаев.

Почва состоит из твердой, жидкой, газообразной и живой частей. Соотношение их неодинаково в различных почвах и почвенных горизонтах одной и той же почвы.

Согласно В.В. Полевому (1989), растения способны поглощать из окружающей среды практически все элементы Периодической системы Д.И. Менделеева. Но для нормального жизненного цикла растения необходима более узкая группа основных элементов, составляющих питательную основу растений. Это следующие элементы: углерод (С), водород (Н), кислород (О), азот (N), фосфор (P), сера (S), калий (K), кальций (Ca), магний (Mg), железо (Fe), марганец (Mn), медь (Cu), цинк (Zn), молибден (Mo), бор (B), хлор (Cl), натрий (Na), кремний (Si), кобальт (Co).

Из названных элементов 16 являются собственно минеральными, т.к. С, Н и О поступают в растение преимущественно в виде CO_2 , O_2 и H_2O . Углерод в среднем составляет в растении 45 % сухой массы тканей, кислород – 42 %, водород – 6,5 % и азот – 1,5 %, а все вместе – 95 %. Остальные 5 % приходятся на, так называемые, зольные вещества: P, S, K, Ca, Mg, Fe, Al, Si, Na и др. О минеральном составе растений судят по анализу золы, оставшейся после сжигания органического вещества растений. Перечисленные вещества золы называют *макроэлементами*, содержание которых в растении составляет от десятков до сотых долей процента ($10^1 \dots 10^{-2}$). Некоторые элементы присутствуют в растениях в очень малых количествах $\leq 0,001$ %, их называют *микроэлементами*: Mn, Cu, Zn, Co, Mo, B, Cl и другие. Все названные элементы играют важную роль в обмене веществ, поскольку, согласно закону Ю. Либиха, все необходимые элементы питания растений равнозначны, полное исключение любого из них приводит растение к гибели; ни один из перечисленных элементов не может быть заменен другим, даже близким по химическим свойствам, т.е. каждый элемент имеет свое специфическое физиологическое значение.

Количественное содержание различных элементов в тканях растений меняется под влиянием условий внешней среды, но встречаются виды, в тканях которых содержание тех или иных элементов весьма значительно. Так, например, натрий содержится в большом количестве у

представителей сем. *Солянковых* (солянки, свекла и др.), называемых *натриефиллами*. У *кальцефиллов* – фасоль, бобы, клевер и др. из сем. *Бобовых* – значительно содержание кальция и т.п. По-видимому, это связано с местами происхождения и генетическим закреплением распространения подобных растений.

В тканях различных органов содержание золы также различно: наиболее богаты зольными элементами листья и корнеплоды растений: например, в листьях картофеля 5...13 % золы, свеклы – 11...15 %, репы – 8...15 %, меньше всего содержится золы в мертвых клетках древесины деревьев (0,4...1 %). Клубни картофеля, корнеплоды (свекла и др.) богаты калием, на долю которого приходится около половины всей золы. Почти 25 % золы хрена приходится на долю SO_3 , что считается особенностью многих представителей сем. *Крестоцветных*. Установлено, что чем богаче почва и чем суше климат, тем выше содержание золы в растении.

На разных этапах развития растительного организма питательные вещества потребляются им с различной интенсивностью. Например, азот, фосфор и калий поступают в свеклу на протяжении 150...170 сут, у озимой пшеницы и ржи содержание азота и калия достигает максимума после окончания цветения – в начале созревания, а поступление фосфорной кислоты продолжается до фазы полной спелости. Существенные потери калия происходят вследствие отмирания листьев. У яровых хлебов активное поглощение питательных веществ происходит в относительно короткий промежуток времени, например у овса оно продолжается 40...55 сут; поступление фосфора в растения гороха, фасоли и др. растянуто на 100...110 сут в связи с длительным периодом цветения у представителей сем. *Бобовых*.

На разных этапах своего развития растения неодинаково реагируют на внесение больших доз минеральных удобрений. Так, отрицательное действие высоких концентраций минеральных удобрений проявляется уже на ранних стадиях жизни растений, что снижает всхожесть семян, подавляет их энергию прорастания и развитие корневой системы. Кроме того, снижается эффективность использования растениями питательных веществ, внесенных с удобрениями. Правильная система внесения минеральных подкормок в различные периоды жизни растений – залог получения высоких и устойчивых урожаев.

10.3. Роль азота, фосфора, серы, калия, кальция, магния в питании растений

Азот. Этот элемент входит в состав белков, нуклеиновых кислот и многих, жизненно важных органических веществ. Для растений азот – дефицитный элемент. Несмотря на обилие в атмосфере молекулярного азота (N_2), – 75,6 % воздуха по массе, – в такой форме он не доступен для

усвоения высшими растениями и может переходить в доступную для них форму только благодаря деятельности микроорганизмов-азотфиксаторов. Растения могут использовать только азот минеральный. В литосфере связанного азота достаточно много. Но в почве сосредоточена лишь малая его доля – 0,5...2 % от общей массы. Например, в черноземных почвах в среднем его содержится около 200 кг/га, в подзолистых (нечерноземных) почвах – в 3...4 раза меньше. Такой азот представлен ионами (–) NO_3 и катионами (+) NH_4 . Ионы NO_3 подвижны, плохо фиксируются в почве, легко вымываются водами в более глубокие горизонты почвы и водоемы. Катионы NH_4 менее подвижны, хорошо адсорбируются отрицательно заряженными частицами, меньше вымываются осадками.

Сельскохозяйственные растения в процессе своего развития нуждаются в значительных количествах связанного азота. Так растения кукурузы при среднем урожае 35 ц/га и зеленой массы 50 ц выносят с 1 га 85 кг связанного азота.

Почвенные бактерии-азотфиксаторы минерализуют недоступный растениям органический азот (растительные остатки, гумус, органические соединения), переводят его в форму катионов (+) NH_4 . Процесс разложения микроорганизмами органических веществ, содержащих азот, с выделением аммиака (NH_3) называется *аммонификацией*. Выделяющийся аммиак частично используется микроорганизмами для синтеза белков своих клеток. Большая часть аммиака превращается в почве в аммонийные соли, усваиваемые растениями. Этот процесс играет значительную роль в обеспечении растений источниками азотного питания.

Микробиологическая минерализация органического почвенного азота зависит от условий, благоприятствующих деятельности микроорганизмов (оптимальная температура, влажность почвы, pH, аэрированность корнеобитаемых горизонтов и др.). Часть аммонийных солей окисляется до *нитратов*, благодаря процессу *нитрификации* с помощью других групп специализированных бактерий-нитрификаторов, действующих только в хорошо аэрируемых, слабокислых и нейтральных (pH 5...9), достаточно увлажненных почвах. Нитрификация завершает минерализацию органических соединений, начатую в процессе аммонификации. Нитрификация протекает в две стадии: ион аммония окисляется в нитрит-ион, затем нитрит-ион – в нитрат-ион. Образующиеся нитраты хорошо усваиваются растениями. В анаэробных условиях, например, на затопляемых слое воды рисовых чеках происходят значительные потери доступного растениям азота благодаря деятельности анаэробных микроорганизмов, осуществляющих восстановление иона (–) NO_3 до газообразного азота (N_2) и кислорода (O_2). Этот процесс называется *денитрификацией*.

В природе существуют *химический и биологический пути* превращения N_2 в доступную растениям форму. *Химическое связывание азота* в

форме ионов ($-$) NO_3 и катионов ($+$) NH_4 в небольших объемах осуществляется в результате фотохимических реакций и электрических разрядов в атмосфере. Количество связанного азота, попадающего в почву с атмосферными осадками, невелико и варьирует в различных регионах мира от 1 до 30 кг/га. В промышленных условиях химическое связывание молекулярного азота воздуха в виде аммонийных солей (HNO_3) и аммиака (NH_3) осуществляется с помощью специальных катализаторов при температуре свыше 500 °С и давлении около 35 мПа. Однако азот минеральных удобрений восполняет лишь часть того азота, который выносится с урожаем (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Вынос азота из почв, занятых различными культурами, кг/га

Типы почв	Пашня		Луга
	зерновые	пропашные	
Песчаные	30	45	7
Суглинистые и лессовые	21	32	5
Глинистые	15	24	3
В среднем	22	34	5

Основная масса азота, содержащаяся в живых организмах, населяющих Землю, связана с деятельностью уникальной группы микроорганизмов, способных ассимилировать молекулярный азот атмосферы, восстанавливая в аммиак (NH_3), и делать его доступным для высших растений и в последующем для животных организмов. Процесс связывания молекулярного азота атмосферы, осуществляемый этими организмами, называется *биологической азотфиксацией*, составляющей в мире около $17.2 \cdot 10^7$ т в год, что в 4 раза превышает химическое связывание молекулярного азота в форме аммиака на всех предприятиях химической индустрии.

Азотфиксирующие микроорганизмы. Микроорганизмы, осуществляющие биологическую азотфиксацию, были открыты русскими учеными в 1893 и 1901 гг. Это свободно живущие в почве – *Azotobacter*, *Clostridium* и др. Эти бактерии, нуждающиеся в углеводном источнике питания, связаны с микроорганизмами, способными к разложению целлюлозы и других полисахаридов. Обычно они поселяются на корнях высших растений, питаясь продуктами, выделяемыми корнями в почву. Однако сельскохозяйственное значение их невелико. В условиях умеренного климата ежегодная фиксация ими азота составляет несколько килограммов азота на 1 га, и лишь при наличии в почве большого количества органических остатков она достигает 20...40 кг/га азота.

Наиболее значимы *симбиотические азотфиксаторы*, например *Rhizobium*, образующие на корнях бобовых растений клубеньки, обеспечивающие симбиоз с бобовыми культурами. Эти бактерии фиксируют в год в среднем от 100 до 400 кг/га азота.

Люцерна может накопить до 500...600 кг/га, клевер – 250...300 кг/га, люпин – 150 кг/га, кормовые бобы, горох, фасоль – 50...60 кг/га азота.

Таким образом, азот является очень подвижным элементом, циркулирующим между атмосферой, почвой и живыми организмами, осуществляющим постоянный круговорот в биосфере.

Азотные минеральные удобрения выпускают и применяют в твердом и жидком видах. Твердые азотные удобрения подразделяют на: аммонийные (NH_4): сульфат аммония, хлорид аммония; на аммонийно-нитратные ($NH_4 NO_3$): аммиачная селитра, сульфат-нитрат аммония; на нитратные (NO_3): нитрат натрия (натриевая селитра), нитрат кальция (кальциевая селитра); на амидные (NH_2): карбамид (мочевина), цианамид кальция.

Из жидких азотных удобрений достаточно широко применяют аммиачные (NH_3), в которых весь азот находится в виде аммиака (водного или безводного). Под воздействием уже названных нитрифицирующих микроорганизмов аммонийный и амидный азот в почве постепенно переходит в нитратный азот. Под воздействием благоприятных условий в течение нескольких дней нитритный азот может превратиться в нитратный, доступный и хорошо усваиваемый растениями. Нитратный азот очень подвижен и при обильных осадках или поливах легко вымывается из почвы, за пределы корнеобитаемых горизонтов (рис. 10.1).

Процесс вымывания нитратов ускоряют распашка лугов, увеличение доли зерновых и пропашных культур в севообороте и др. условия. Многолетние исследования А.П. Федосеева (Агротехника и погода, 1979; Погода и эффективность удобрений, 1985) доказали, что эффективность минеральных удобрений существенно варьирует в зависимости от типа и плотности почв, а главное – от степени их увлажнения (рис. 10.2). При внесении различных доз азотных удобрений степень увлажнения сказывается не только на абсолютных прибавках урожайности зерна, но и на содержании в нем белка. Из рис. 10.3 следует, что в засушливые годы происходит лишь некоторое увеличение урожайности при малых дозах азотных удобрений (22 кг/га), в умеренно влажные годы – значительное увеличение при средних дозах (45 кг/га) и во влажные годы также значительное, но при высоких дозах (90 кг/га). Содержание белка в зерне при увеличении доз азотных удобрений во всех случаях возрастало и было наивысшим в сухие годы.

В засушливых условиях нитратный азот может накапливаться в растениях (особенно в овощной и бахчевой продукции) в больших количествах. Такое накопление нитратов в растениях происходит в результате того, что поглощенный азот не полностью расходуется в процессе синтеза аминокислот и белков (т.е. не все поглощенные нитраты восстанавливаются до аммиака). Установлено, что причиной нарушения процессов ассимиляции нитратов в растении является около 20 факторов: сроки посадки и густота стояния растений на единице площади, погодные условия,

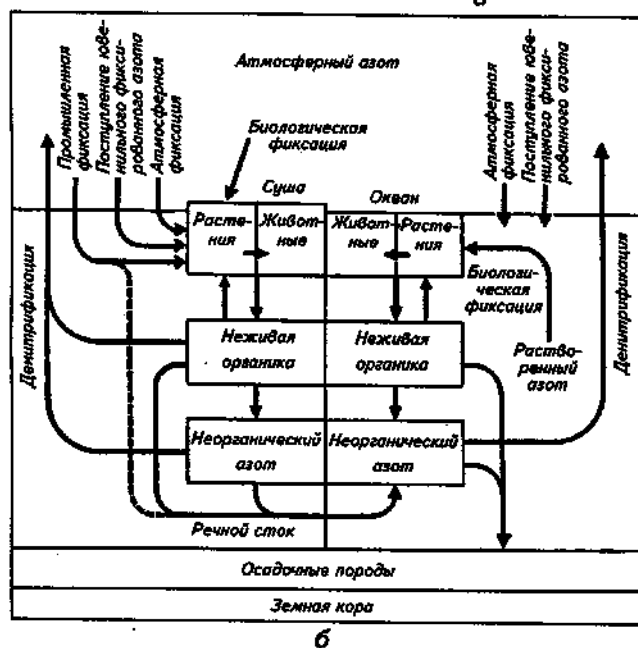
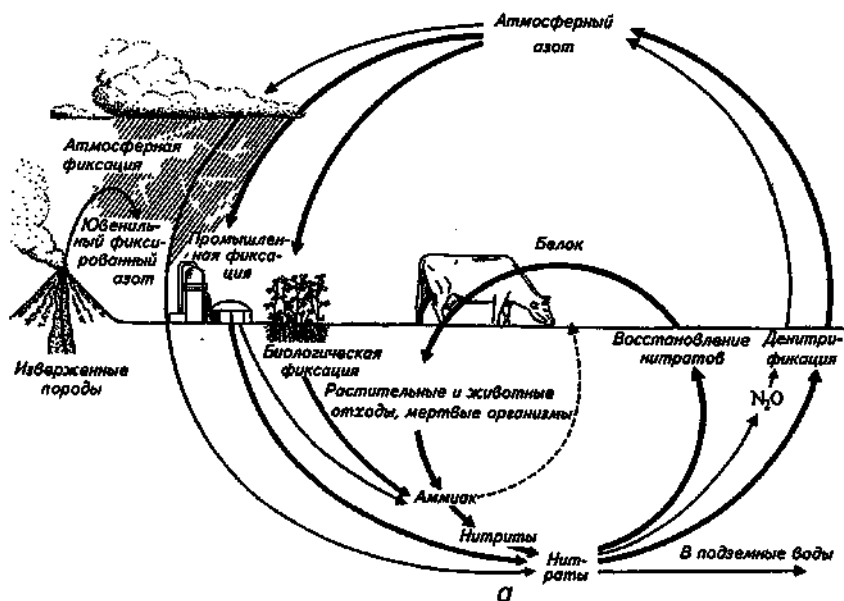


Рис. 10.1. Круговорот азота в биосфере: а – общая схема круговорота; б – схема круговорота на суше и в Мировом океане (Делвич, 1972)

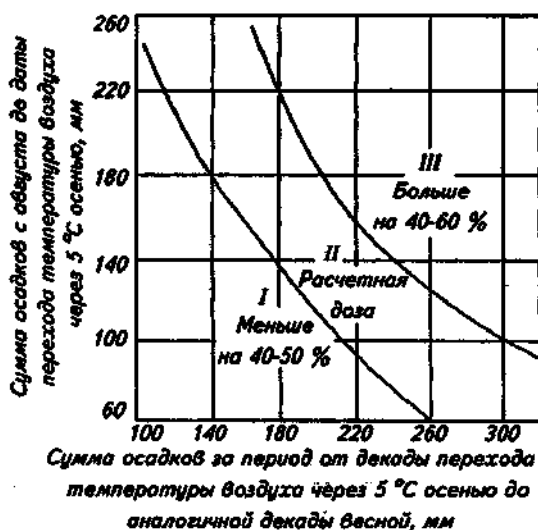


Рис. 10.2. Поправки для Нечерноземной зоны ЕЧС к установленным дозам азотных удобрений по фону $P_{40...80} K_{40...80}$ под ранние яровые колосовые культуры по занятым парам и непаровым предшественникам в зависимости от количества осадков за осенне-зимний период (Федосеев А.П., 1985)

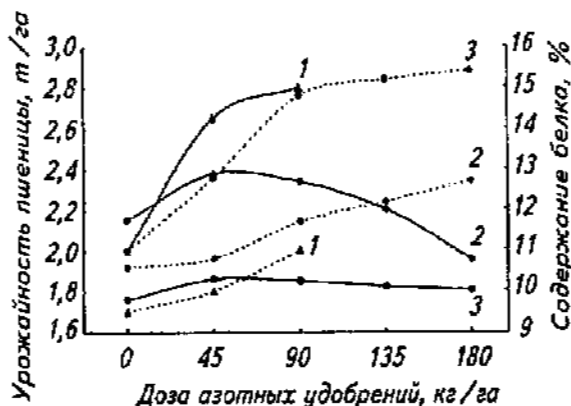


Рис. 10.3. Влияние азотных удобрений на урожайность и белковость пшеницы во влажный (1), умеренно-влажный (2) и засушливый (3) годы (Schlesinger, 1970); сплошные кривые – урожайность, штриховые – содержание в зерне белка

сроки и дозы внесения азотных удобрений, наличие и соотношение в почве различных питательных веществ, pH и многие другие. Избыточное накопление нитратов в растениях происходит также в случаях внесения больших доз удобрений (табл. 10.2).

Таблица 10.2

Влияние количества внесенных азотных удобрений на содержание нитратов в растениях

Доза азотных удобрений, кг/га	Содержание нитратов в растениях, мг/кг	
	Шпинат	Кресс-салат
0	952	993
80	1338	1322
160	2160	1642

В среднем с каждого килограмма азотных удобрений в шпинате накапливается 7,55 мг нитратов, а в кресс-салате – 4,06 мг. Увеличение доз азотных удобрений приводит не только к повышению содержания нитратов в произведенной продукции, но и к снижению в ней содержания витамина «С», сахаров и других веществ, а следовательно, и ее биологической ценности (рис. 10.4).

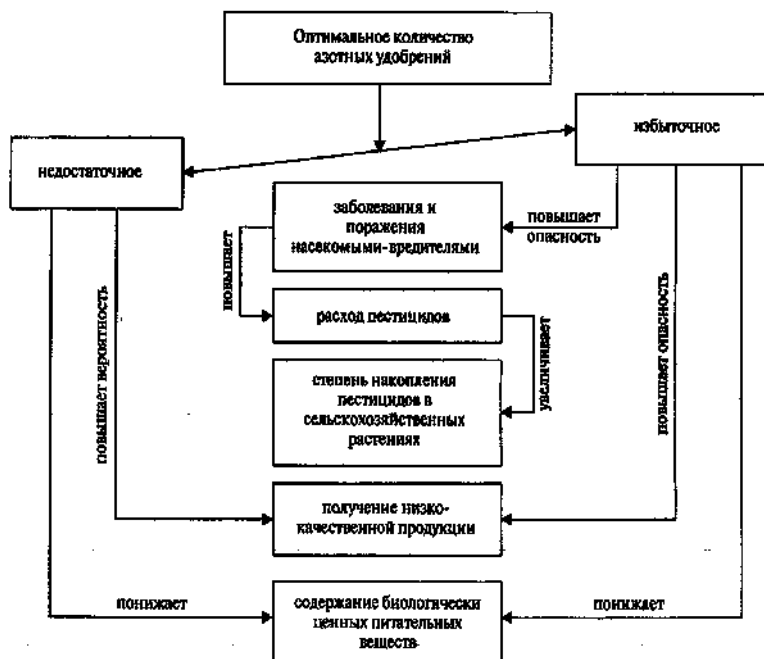


Рис. 10.4. Схема некоторых последствий недостаточного или избыточного внесения азотных удобрений

Фосфор. Фосфор содержится во многих природных минералах, наиболее значимые для сельского хозяйства – *фосфориты и апатиты*. В почвах содержится около 0,1...0,2 % или (5...25 т/га), около половины – в органической форме; наиболее богаты природными соединениями фосфора черноземы и пойменные почвы.

В использовании растениями органических соединений фосфора участвуют специфические ферменты, которые выделяются корневыми системами в почву. Фосфор – биогенный элемент, необходимый для жизнедеятельности всех организмов. В тканях растений содержится 0,5...1,6 % P_2O_5 , особенно много его в семенах масличных культур. Фосфор извлекается растением из почвы в виде растворимых фосфатов. После отмирания растительных организмов фосфор вновь поступает в почву, участвуя, таким образом, в круговороте веществ в природе (рис. 10.5).

В растительной клетке фосфор присутствует в органической форме, в виде ортофосфорной кислоты и ее солей. Он входит в состав белков, нуклеиновых кислот, фосфорных эфиров, сахаров. При этом фосфор играет особо важную роль в энергетике клетки, контролирует многие процессы метаболизма, деления и дифференцировки клеток и т.п. Фосфор, как и азот, легко перераспределяется между органами растения.

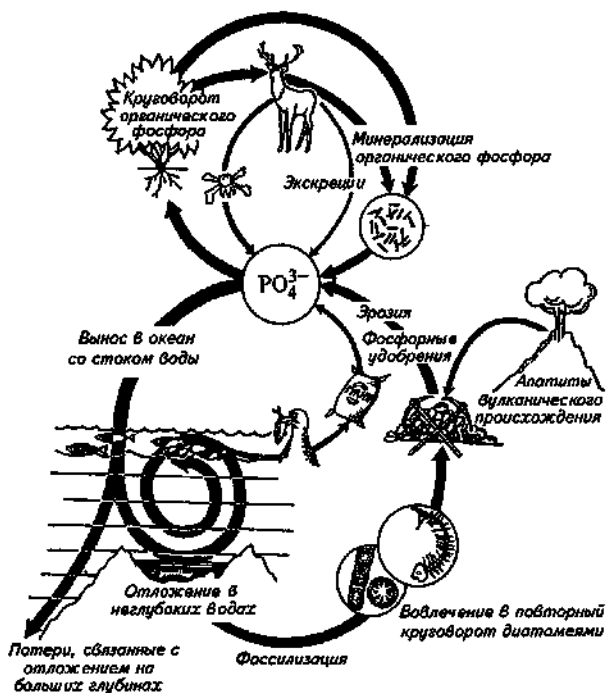


Рис. 10.5. Круговорот фосфора в биосфере (Дювиньо, Танг, 1968)

В растительной клетке фосфор участвует в построении важнейших органических соединений, таких как: аденозиндифосфат (АДФ), аденозинтрифосфат (АТФ) и др., обладающие богатой энергией для большинства ферментативных реакций. Центральное место принадлежит фосфорной кислоте в процессах аэробного дыхания и фотосинтеза. В растении фосфорная кислота распределена неравномерно. Так процентное содержание фосфора в семенах в 5...10 раз выше, чем в вегетативных органах.

Внешним признаком фосфорного голодания является синевато-зеленая окраска листьев, нередко с пурпурным или бронзовым оттенком (свидетельство задержки синтеза белка и накопления сахаров). Листья становятся мелкими и более узкими, приостанавливается рост растений, задерживается созревание урожая. При дефиците фосфора снижается скорость поглощения кислорода, изменяется активность ферментов, участвующих в метаболизме дыхания. Наиболее чувствительны к фосфорному голоданию растения на ранних этапах своего развития и роста. На более поздних этапах развития нормальное фосфорное питание растений ускоряет их развитие (в противоположность азотному). Это позволяет в южных регионах уменьшить вероятность попадания растений в засушливый период, а в северных районах – под ранние заморозки.

В растениеводстве недостаток фосфора в почвах восполняют фосфорными удобрениями, внесением навоза, компоста. Фосфорные удобрения – *суперфосфат* $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$, фосфоритная мука $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – приготавливают в промышленных масштабах из природных апатитов и фосфоритов. Приготавливают также и жидкие фосфорные удобрения на основе полифосфорных кислот. Фосфорные удобрения вносят во всех земледельческих районах страны, особенно они эффективны на фоне обеспеченности растений азотом и калием. В качестве основного удобрения вносят 60...120 кг/га P_2O_5 .

Значительная часть фосфорных удобрений попадает в водные объекты в результате транспортных потерь поверхностного стока, отсутствия утилизации органических веществ в животноводстве и др. причин. Установлено, что на 1 кг поступившего в водоемы фосфора образуется 100 кг фитопланктона. Когда концентрация фосфора в воде превысит 0,01 мг/л, начинается «цветение» воды, обусловленное массовым развитием водорослей, которое достигает оптимума при содержании фосфора 0,9...3,5 мг/л. Вода становится непригодной для питья из-за повышенного содержания в ней органических веществ в растворенной форме и увеличением pH при массовом развитии водорослей.

Сера. В почве сера находится в неорганической и органической формах (рис. 10.6). В большинстве почв преобладает органическая сера растительных и животных остатков. Основная неорганическая форма серы в почве – *сульфат*, который может находиться в виде солей CaSO_4 ,

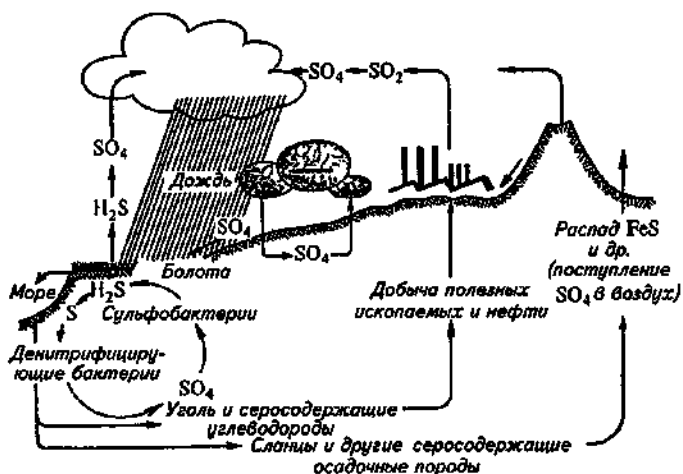


Рис. 10.6. Круговорот серы в биосфере (Рамад Ф., 1981)

MgSO₄, NaSO₄ в почвенном растворе в ионной форме или в почвенных коллоидах. Суммарное содержание серы в почвах умеренных климатических зон составляет в среднем 0,005...0,040 %.

Сера входит в число основных питательных элементов, необходимых для физиологических процессов, протекающих в растении. Она поступает в них в виде сульфатов. Ее содержание в растительных тканях относительно невелико – 0,2...1,0 % в расчете на сухую массу. В растениях она входит в состав белков, витаминов, жиров и ферментов. Потребность в сере высока у растений, богатых белками (люцерна, клевер), но особенно она необходима представителям сем. *Крестоцветных*, которые в большом количестве синтезируют серосодержащие горчичные масла; много серы содержится и в тканях подсолнечника.

Автотрофные растения поглощают серу в виде окисла SO₄²⁻, восстанавливая его до уровня SH-групп органического вещества. Органическая сера в форме растительных и животных остатков попадает в почву и водоемы, где минерализуется сапрофитными микроорганизмами до сероводорода (H₂S) и нерастворимые соединения железистой серы (FeS). Попадая в растения в форме сульфата, сера задерживается в корнях, а затем перемещается из корней в сосуды ксилемы и транспирационным током переносится к молодым растущим органам, где она активно включается в обменные процессы. Доля сульфата в общем балансе серы в тканях растений может варьировать от 10 до 50 %. Она минимальна в молодых листьях и возрастает в стареющих листьях, в которых происходит деградация серосодержащих белков. В растениеводстве на бедных серой подзолистых почвах применяют серные удобрения.

Калий. В свободном состоянии в природе калий не встречается. Он входит в состав полевого шпата, слюды и др. минералов (карналит, сильвинит и т.п.), которые образуют месторождения калийных солей. Калий содержится в природе в различных формах: в составе кристаллической решетки, в коллоидных частицах, в составе пожнивных растительных остатков и в микроорганизмах.

Калий — один из самых необходимых элементов минерального питания растений. В пахотных горизонтах различных типов почв среднее содержание калия составляет: в дерново-подзолистых — 1,93 %, в черноземах — 1,63...1,98 %, в каштановых — 2,12 %, в сероземах — 1,88 %, в кризоземах — 0,72 %.

Запасы калия в почве больше содержания фосфора в 8...40 раз, азота — в 5...50 раз. Попеременное подсушивание и увлажнение почвы, а также деятельность корневых систем растений и микроорганизмов способствует переходу калия в доступные формы для растений. Однако основным источником получения калия являлась зола, отсюда его название (*potassium*, *potashes* — тигельная зола).

В растениях калий содержится в наибольшем количестве в молодых, растущих тканях с высоким уровнем обмена веществ: меристемах, камбии в молодых листьях, побегах и почках. В тканях растений калия содержится 0,5...1,2 %, его содержание в клетке в 100...1000 раз превышает таковое во внешней среде. В растительных клетках около 80 % калия содержится в вакуолях, он составляет основную часть клеточного сока, поэтому легко вымывается из старых листьев с дождями и попадает в почву. Калий в значительной степени определяет коллоидно-химические свойства цитоплазмы, регулирует водоудерживающую способность цитоплазмы, что повышает устойчивость растений к засухе. Калий влияет, практически, на все процессы в клетке.

Под влиянием калия увеличивается накопление крахмала в клубнях картофеля, сахарозы в сахарной свекле, моносахаридов в плодах и овощах, целлюлозы и пектиновых веществ в клеточной стенке растений. В результате последнего влияния повышается устойчивость соломины злаков к полеганию, у льна и конопли повышается качество волокна. Более 60 ферментных систем растений могут успешно функционировать только при оптимальном уровне содержания калия в почве. Калий в растениях повышает их устойчивость к засухе, низким температурам в вегетационный период, а также к грибным и бактериальным заболеваниям.

Критический период в снабжении калием приходится на ранние стадии развития растений (первые 2 недели после всходов). Наибольшее его количество поглощается в периоды интенсивного нарастания вегетативной массы. У зерновых культур поступление калия заканчивается

к началу молочной спелости, у льна – в фазу цветения, у картофеля, сахарной свеклы, капусты максимум поглощения приходится на период формирования клубней, корнеплодов и кочанов. Однако потребление калия подсолнечником превосходит все остальные культуры. Например, при уборке вместе с урожаем из почвы выносятся калия (K_2O): картофелем и злаками – 180 кг/га, капустой – 280 кг/га, семенами подсолнечника – 990 кг/га.

При недостатке калия снижается функционирование камбия, сокращается толщина клеточных стенок, эпидермиса и кутикулы, тормозятся процессы деления и растяжения клеток. Снижается продуктивность фотосинтеза прежде всего за счет снижения скорости оттока ассимилятов из листьев. Происходит пожелтение листьев снизу вверх – от старых к молодым, листья при этом желтеют с краев и покрываются «ржавыми» пятнами; верхушечные почки перестают развиваться и отмирают, активизируется рост боковых побегов, и растение приобретает форму куста. Ни фосфорные, ни азотные удобрения не могут заменить действия на растительный организм калийных удобрений.

Недостаток калия в почве восполняется *калийными удобрениями* (хлористый калий или хлорид калия, сульфат калия и др.), зола и др. Обычно их применяют на фоне внесения азотных и фосфорных удобрений. Наиболее эффективно внесение калийных удобрений в почвы, обедненные калием (торфянистые, пойменные, дерново-подзолистые, оподзоленные и выщелоченные черноземы). Вымывание калия из почвы зависит от типа водного режима почвы, ее гранулометрического (механического) состава, содержания гумуса, норм полива, кислотности почвы и рельефа местности. Так, например, на дерново-подзолистых почвах Беларуси, занятых паром, потери калия составляют 4...6 % от внесенного с удобрениями вещества, на супесчаных почвах – 6...8 %. На красноземах в Грузии при орошении потери достигали 13...17 %, а в дождливые годы – до 25 %. На дерново-подзолистых почвах Подмоскovie в местах с глубоким промерзанием почвы и небольшим уклоном местности талые воды смывали до 40...70 % внесенного калия.

В калийных удобрениях обычно встречаются балластные элементы – хлор и натрий, которые накапливаются в почве при систематическом применении повышенных доз этих удобрений, что снижает плодородие почв.

Выше отмечалось, что с урожаем из почвы выносятся значительное количество минеральных, питательных веществ. Для восстановления их количества в почве при интенсивном ведении землепользования необходимо систематическое поддержание реального баланса питательных веществ. Фактическая динамика баланса питательных веществ в Российской Федерации за 12 лет представлена в табл.10.3.

Таблица 10.3

**Реальный баланс питательных веществ (кг/га НРК) в земледелии
Российской Федерации в 1986–1997 гг. (Агроэкология, 2000)**

Внесение, расход удобрений/годы	1986– 1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Всего внесено НРК, кг/га	147	110	70	53	25	24	23	22
В том числе								
с минеральными удобрениями	100	78	43	29	11	12	13	14
с органическими удобрениями	47	32	27	24	14	12	10	8
Всего вынесено питательных веществ	138	123	135	139	130	116	118	126
В том числе:								
с урожаем	113	90	110	106	90	74	72	78
с сорняками	25	33	25	33	40	42	44	46
Баланс ±	+ 9	- 13	- 65	- 86	- 105	- 92	-95	- 104

Кальций. Общее содержание кальция в растениях составляет от 5 до 30 мг на 1 г сухой массы. Много кальция содержится в растениях из семейства *Бобовых*, особенно в бобовых травах – клевере, люцерне, эспарцете, в гречихе, подсолнечнике, картофеле, капусте, конопле. В почве, содержащей катионы кальция (Ca^{2+}), рост корней протекает более интенсивно, чем в почвах, лишенных этого катиона.

Значительно меньше содержание кальция в зерновых культурах, сахарной свекле и у льна. У большинства культурных растений кальций накапливается в вегетативных органах преимущественно в старых органах и тканях. При старении клеток или снижении их физиологической активности кальций из цитоплазмы перемещается в вакуоль и откладывается в виде нерастворимых солей щавелевой, лимонной и других кислот.

Кальций выполняет многообразные функции в обмене веществ на клеточном уровне и в растении в целом. Он стимулирует образование пектиновых веществ, входящих в состав клеточных стенок, активизирует процессы размножения клеток, стимулирует развитие корневых систем растений, нейтрализует токсическое действие водородных ионов в почве, благодаря чему становится возможной активная нитрифицирующая и азотфиксирующая деятельность полезных микроорганизмов в почве.

Наиболее важной физиологической стороной значения кальция в жизни растений является влияние катионов кальция на физико-химическое состояние протоплазмы, на ее вязкость, проницаемость и другие свойства. При недостатке кальция в почве нарушается процесс деления клеток у растений, прекращается образование боковых корней и корневых волосков, замедляется рост корней. По этой причине происходит набухание пектиновых веществ в клетках, что вызывает «ослизнение» клеточных стенок и разрушение клеток; корни, а затем и листья отмирают. При

недостатке кальция в почве увеличивается подвижность и физиологическая активность содержащихся в почве алюминия и магния, оказывающих токсическое воздействие на растение. Эта токсичность легко устраняется внесением в почву извести.

Большинство типов почв богато кальцием, и резко выраженное кальциевое голодание встречается редко: преимущественно на торфяниках, при сильной кислотности или засоленности почв. В растениеводстве используются кальциевые удобрения: *кальциевая селитра* (азотнокислый кальций, *нитрат кальция*) – $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Это гранулированное, физиологически щелочное, очень гигроскопическое удобрение, хорошо растворимое в воде, содержит 17,5 % N. Такое удобрение применяют на всех типах почв, особенно с повышенной кислотностью, под различные сельскохозяйственные культуры.

Магний. По содержанию в растении магний занимает 4-е место после калия, азота и кальция. У высших растений его содержание в расчете на сухую массу 0,02...3,1 %. Особенно его много в растениях короткой продолжительности дня: кукурузе, просе, сорго, конопле, а также в картофеле, свекле, табаке и в бобовых культурах. В 1 кг зеленых листьев содержится 300...800 мг магния из них 10 % (30...80 мг) входит в состав хлорофилла, содержание магния, в котором составляет 10...12 %. Ни один другой элемент не может заменить магний в хлорофилле. Особенно много магния в молодых клетках и растущих тканях, а также в генеративных органах и запасающих тканях.

Магний – весьма подвижный катион (Mg^{2+}), что обуславливает его вторичное использование (реутилизацию) из стареющих тканей и органов. Действие магния весьма существенно в регулировании работы различных ферментов. Магний усиливает синтез эфирных масел, каучука, витаминов «А» и «С».

При недостатке магния (менее 2 мг на 100 г почвы) в растениях накапливаются моносахариды, что тормозит их превращение в полисахариды (крахмал). Недостаток магния испытывают растения на песчаных почвах. Бедны магнием и кальцием подзолистые почвы; наиболее богатыми по содержанию магния являются сероземы (1...3 %). Черноземы занимают промежуточное место по количеству магния между сероземами и подзолистыми почвами.

При магниевом голодании на листовых пластинках появляются пятна и полосы светло-зеленого, а затем желтого цвета. Края листовых пластинок окрашиваются в желтый, оранжевый и красноватые тона, а сами листья скручиваются и опадают. «Мраморная» окраска листьев – признак нехватки магния, называемая *хлорозом*. Поскольку магний относится к легкоподвижным элементам в растениях, возможна внекорневая подкормка растений путем опрыскивания растений.

Минеральные удобрения, содержащие магний, называются *калийно-магниевыми*. В них содержится до 18 % Mg SO_4 . Такие удобрения особенно эффективны на легких почвах Нечерноземья. Сельскохозяйственные культуры выносят с урожаем из почвы от 10 до 70 кг/га магния. Значительное количество этого элемента потребляют картофель, свекла, бобовые травы. На кислых песчаных и супесчаных почвах норма магниевого удобрения составляет 20...40 кг/га MgO . При известковании почв *известковыми удобрениями (известняк, доломит, мел, известь и др.)*, содержащими магний, вносят от 2 до 6 т/га в зависимости от степени кислотности почв. Этим удобрением растения полностью обеспечиваются магнием. Напомним, что *кислотность почв* выражается условной величиной pH (отрицательный логарифм концентрации H-ионов); при pH 7 реакция почвенного раствора нейтральная, ниже 7 – кислая, выше 7 – щелочная.

10.4. Роль макро- и микроэлементов в питании растений

В растительном, как и в любом живом организме, все физиологические процессы тесно взаимосвязаны. Исключение из питательной среды какого-либо необходимого элемента быстро вызывает изменения во многих, если не во всех, процессах метаболизма.

Железо. В среднем содержание этого элемента в растениях в форме катиона Fe^{2+} составляет 0,02...0,08 % (20...80 мг на 1 кг сухой массы). Вместе с молибденом железо участвует в восстановлении нитратов и в фиксации молекулярного азота в клубеньковых бактериях. При недостаточном поступлении железа в растения в условиях переувлажнения почвы в карбонатных почвах происходит снижение интенсивности дыхания и фотосинтеза. Это приводит к пожелтению листьев (*хлороз*) и быстрому их опадению. Железо – необходимый компонент при образовании хлорофилла. Этот компонент выступает катализатором образования предшественников хлорофилла – ряда аминокислот. Кроме того, железо входит в состав некоторых типов белка (*ферритин*), накапливающийся в отдельных пластидах клетки.

Кремний. Этот элемент обнаружен во всех растениях, особенно много содержится его в растениях, имеющих прочные стебли. Недостаток кремния в организме задерживает рост злаковых культур (кукуруза, овес, ячмень) и двудольных (огурцы, томаты, табак, бобы). В период репродуктивной стадии недостаток кремния вызывает уменьшение количества семян и т.п.

Алюминий. Этот элемент также относится к макроэлементам, в которых нуждаются некоторые растения: катион алюминия концентрируется в папоротниках и чайном листе. При недостатке алюминия у чайного листа проявляется *хлороз*, однако при избыточном накоплении этот элемент токсичен. При высоких дозах алюминий связывается в клетках с фосфором, что в итоге приводит к фосфорному голоданию растений.

Микроэлементы. Нормальная жизнедеятельность растительного организма возможна лишь при условии полной обеспеченности его *микроэлементами*. Эта группа представляет собой незаменимые минеральные элементы, несмотря на то, что их содержание в растениях составляет тысячные и сотые доли процента. Микроэлементы принимают участие в окислительно-восстановительных процессах, в фотосинтезе, в азотном и углеводном обменах, они входят в состав ферментов и витаминов, повышают устойчивость растений к болезням и неблагоприятным условиям внешней среды. Недостаток микроэлементов вызывает ряд заболеваний и может привести к гибели растений.

Бор, марганец, цинк, молибден и медь оказывают существенное влияние на фотосинтетическую активность растений. Кроме того, бор, медь и цинк стимулируют передвижение ассимилятов из листьев в генеративные органы и корни. Это действие проявляется в особенности отчетливо при повышенной температуре почвы, которая обычно тормозит миграцию ассимилятов.

Бор, алюминий, кобальт, марганец, цинк и медь повышают степень засухоустойчивости растений путем развития способности тканей растений интенсивно взаимодействовать с водой (*гидрофильность*) и усиления водоудерживающей способности *коллоидов*. Коллоиды – это дисперсные системы, промежуточные между истинными растворами и грубодисперсными – суспензиями и эмульсиями. Жидкие коллоидные системы – *золи*, студнеобразные – *гели*. *Дисперсные системы* – значит *рассеянные* (от лат. *dispersus* – рассеянный, рассыпанный).

Микроэлементы оказывают существенное влияние на скорость прохождения стадий развития растений. Например, медь, цинк, молибден и бор ускоряют прохождение семенами стадии яровизации, тогда как растворы железа и марганца задерживают развитие. Медь и молибден стимулируют рост стебля и корней, марганец и никель – только стебля, бор – только корней. Прохождение световой стадии у растений «длинного дня» (озимая пшеница, овес) ускорялось под влиянием бора, кобальта, молибдена, марганца, цинка, меди и алюминия. Столь разнообразная биологическая активность микроэлементов обусловлена в первую очередь их непосредственным влиянием на *ферментные системы* клетки. Ферментные системы (от лат. *fermentum* – закваска) – это биологические катализаторы белковых веществ, регулирующие и многократно ускоряющие биохимические процессы, особенно в обмене веществ.

Многие микроэлементы – железо, медь, молибден, марганец, цинк, кобальт и магний – входят в состав многочисленной группы ферментов энергетического обмена клетки, ферментов, осуществляющих перенос отдельных частей сложных молекул, ферментов, расщепляющих углеводные цепи, эфиры, нуклеиновые кислоты и др.

В качестве иллюстрации влияния на растения отдельных микроэлементов приведем рис. 10.7 и 10.8.

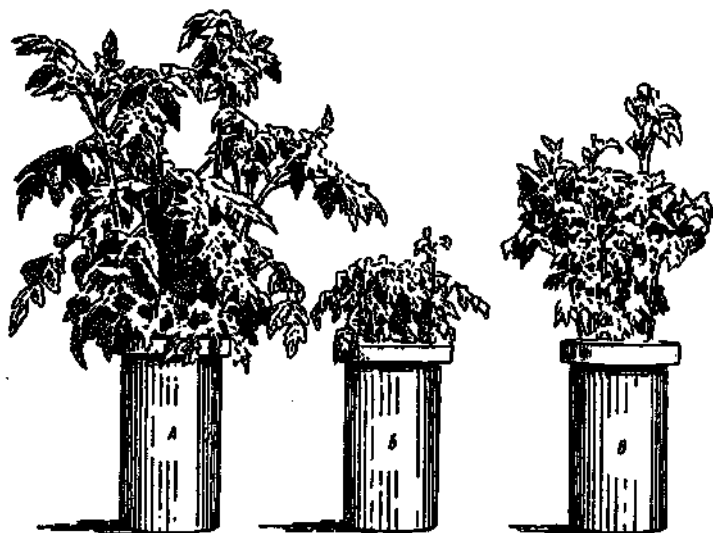


Рис. 10.7. Влияние цинка на развитие растений томата: А – растения снабжались цинком в течение всей вегетации; Б – контроль без цинка; В – цинк дан перед началом цветения

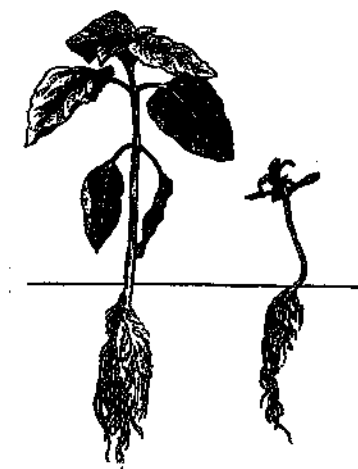


Рис. 10.8. Влияние марганца на развитие подсолнечника. Растения выращены на питательной смеси Прянишникова: справа – контроль без марганца, слева – в сосуд внесен марганец

10.5. Зависимость минерального питания растений от внешних и внутренних факторов

Количественно содержание минеральных элементов в растениях варьирует в широких пределах в зависимости от: доступности и концентрации минеральных соединений в среде (почва, питательные растворы), уровня кислотности почвы, условий влажности, температуры, аэрации, возраста растений.

Установлено, что в семенах растений, выращенных при оптимальных условиях, содержится много калия и фосфора, в листьях и стеблях злаков 40...67 % кремния, в листьях и стеблях льна и гречихи 34...47 % калия, клубни картофеля, корнеплоды сахарной свеклы богаты калием – 45...60 % (Полевой В.В., 1989).

Доступность минеральных элементов почвы в значительной степени определяется кислотностью почвенного раствора. С помощью корневых выделений растения активно воздействуют на тот субстрат, на котором растут. Они могут изменять ионный состав и кислотность почвы. Корни растений выделяют большое количество органических соединений (сахара, органические и аминокислоты, витамины и др.). Эти выделения формируют специфическую для данного растения микрофлору в ризосфере (от греч. *rhiza* – корень), т.е. в той части почвы, которая непосредственно соприкасается с корнями растений. Микроорганизмы участвуют в превращениях минеральных элементов в почве, активно воздействуя на ее минеральный состав и кислотность. С корневыми выделениями связано, в частности, явление «почвоутомления», проявляемое при монокультуре сельскохозяйственных растений, высеваемых на одних и тех же полях. Такие выделения, накапливающиеся в больших количествах, повреждают молодые корневые волоски, при этом вокруг развиваются болезнетворные организмы.

Содержание воды в почве – важнейший фактор, влияющий на рост корней и доступность минеральных элементов. Дефицит влаги и минерального питания в почве стимулирует интенсивный поиск корнями влажных горизонтов и хорошего почвенного питания.

Поглощение минеральных веществ растениями в онтогенезе зависит от биологических особенностей самих растений. Например, азот, фосфор и калий наиболее активно поглощаются яровыми злаками в начальные фазы развития (первые полтора месяца). После колошения, в период развития и созревания колоса, содержание азота, фосфора и калия, в расчете на все растение почти не меняется.

Однако в органах происходит значительное перераспределение элементов, когда большое количество этих трех элементов переносится из листьев и стеблей в зерновки. За время первых полутора месяцев овес накапливает более 79 % калия, 58 % кальция, а магний поглощается с

одинаковой скоростью в течение всего онтогенеза. У гороха, обладающего длительным периодом цветения и созревания плодов, все элементы поглощаются равномерно в течение вегетационного периода. За время цветения льна (10...12 сут) количество золы в надземной части удваивается, а содержание азота, фосфора и калия возрастает в 3...4 раза.

Относительное количество кальция, марганца, железа и бора выше в более зрелых частях и в более старых растениях, т.к. их соединения прочно связаны с цитоплазмой и мало используются повторно. При недостатке этих элементов в первую очередь страдают молодые листья и конусы нарастания растений.

Поглощенные растениями из почвы элементы питания частично выносятся с выращенным урожаем. Объемы выноса элементов из почвы зависят от вида сельскохозяйственных культур, уровня урожая и почвенно-климатических условий. Например, овощные культуры, картофель, многолетние сеяные травы выносят больше элементов питания, чем зерновые культуры. Так вынос кальция с 1 т продукции составляет у зерновых культур 10 кг, у картофеля, кормовой и сахарной свеклы – 30...40 кг, у капусты – 60 кг.

Частично элементы питания возвращаются в почву с опавшими листьями, с побегами (ботвой), когда их наибольшее количество попадает в верхние горизонты почвы в период уборки урожая. В фитоценозах естественное пополнение почвы питательными веществами происходит в результате опада увядающей растительности в осенние месяцы.

10.6. Физиологические основы применения удобрений в растениеводстве

Возможность получения высоких и устойчивых урожаев без снижения плодородия почвы связана с применением научно обоснованной системы удобрений в рамках комплексной программы химизации сельскохозяйственного производства. *Система удобрений* – это программа применения удобрений с учетом растений-предшественников, биологических особенностей культур, их сортов, плодородия почвы, состава и свойств удобрений, учета климатических и складывающихся погодных (агрометеорологических) условий. В агрономическом смысле это – составная часть системы земледелия, конкретно – многолетний план распределения удобрений между культурами севооборота, определяющего сроки и нормы внесения удобрений, способы их внесения в соответствии с системой обработки почвы и т.п. Цель такой системы – получение запланированной урожайности с наименьшими затратами труда и средств при условии повышения плодородия почвы.

Система удобрений разрабатывается агрономами и агрохимиками. Одним из важных этапов в ее разработке является химический анализ состава растений, почвы и удобрений, проводимый в специализированных

агрохимических лабораториях. Так в растениях определяют содержание макро- и микроэлементов, количество органических соединений (белки, жиры, углеводы и др.), необходимые для оценки качества растительных продуктов и кормов.

Определение минерального состава почвы и растений выполняют с помощью химических, вегетационных и полевых методов в экспериментальных условиях. Наиболее распространенным способом определения минерального состава почвы и растений является физиологический *вегетационный метод*. Его сущность заключается в проведении экспериментов по выращиванию исследуемых культур в вегетационных сосудах, когда растения попадают в запрограммированные агрохимические условия, с учетом воздействия на них контролируемых (или регулируемых) параметров освещенности, температурного и влажностного режимов воздуха и почвы.

В частности, этот метод широко использовался в период развития экспериментальной агрометеорологии в 60...80 годы XX столетия в ряде институтов системы Гидрометеорологической службы СССР. При проведении агрометеорологических опытов в лабораторно-полевых условиях главной задачей было исследование влияния динамично меняющихся погодных условий (в первую очередь – условий увлажнения) на эффективность вносимых минеральных удобрений при формировании продуктивности основных зерновых культур. Такие работы в течение почти трех десятилетий проводились в России (Калужская область) под руководством известных ученых-агрометеорологов М.С. Кулика, А.П. Федосеева (см. гл. 10).

В удобрениях определяются количество и форма питательных веществ, кислотность и щелочность; в известковых удобрениях – содержание кальция и магния, в навозе – количество азота, фосфора, калия, микроэлементов, влаги. В торфе определяется зольность, кислотность, влажность и степень разложения органических веществ.

Физиологами растений и агрохимиками при изучении механизмов поглощения, превращения и транспорта в растении минеральных элементов в условиях вегетационных опытов широко применяется *метод радиоактивных изотопов* фосфора (^{32}P), калия, серы (^{35}S), тяжелого азота (^{15}N), ($^{14}\text{CO}_2$) и др.

Применяются также метод *листовой диагностики* – определение потребности растений в элементах питания по результатам экспресс-анализов клеточного сока листьев – и методы агрохимического анализа элементов в почве (Полевой В.В., 1989). Результаты подобных лабораторных исследований проверяются впоследствии в полевых условиях.

Одним из важных приемов разработки системы удобрения является использование результатов географической сети опытов с удобрениями, которые проводятся в различных почвенно-климатических зонах применительно к различным сельскохозяйственным культурам.

При составлении баланса питательных веществ рассчитывают поступление (приход) их в почву, суммарный расход на формирование урожая и непродуктивные потери из почвы. В России впервые баланс элементов питания был составлен акад. Д.Н. Прянишниковым (1937).

10.7. Классификация удобрений

Коротко охарактеризуем систему удобрений. Удобрения подразделяют: на *минеральные* и *органические*; на *промышленные* (азотные, калийные, фосфорные, микроудобрения) и *местные* (навоз, торф, зола); на *простые* (содержат один элемент питания – азотные, калийные, борные, молибденовые, марганцевые) и *комплексные* (содержат два и более питательных элементов).

Среди комплексных удобрений выделяют *сложные* и *комбинированные*. Сложные удобрения в составе одного химического соединения содержат два или три питательных элемента, например калийная селитра – KNO_3 , аммофос – $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ и др. К сложным удобрениям относятся аммофос – $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, в котором соотношение азота и P_2O_5 равно 1: 4, для увеличения доли азота к нему обычно добавляют мочевины $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$.

В комбинированных удобрениях одна гранула включает два или три основных элемента в виде различных химических удобрений (например, *нитрофос, нитроаммофоска и др.*).

Азотные удобрения. Как уже отмечалось ранее, единственным естественным источником накопления запасов азота в почве являются азотфиксирующие микроорганизмы. Азот, вынесенный с урожаем, частично возвращается с внесенным в почву навозом. Велико значение вносимых в почву азотных удобрений, которые обеспечивают наибольшую прибавку урожая. Существуют 4 группы азотных удобрений.

Нитратные удобрения (селитры) содержат азот в нитратной форме – NaNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Физиологически щелочные удобрения эффективнее вносить в кислые почвы.

Аммонийные и аммиачные удобрения – сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, жидкий безводный аммиак (содержит 82,2 % азота), аммиачная вода (NH_4OH – водный 25 %-ный раствор аммиака). Эти удобрения эффективны на нейтральных и слабощелочных почвах из-за физиологической кислотности. На кислых почвах одновременно требуется известкование.

Аммонийно-нитратные удобрения. Основное азотное удобрение – аммиачная селитра NH_4NO_3 – содержит 34 % азота, удобрение физиологически кислое, но подкисляет почву слабее, чем сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. На кислых почвах предпочтительнее внесение известковой аммиачной селитры ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaCO}_3$).

Мочевина (карбамид) содержит $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – около 46 % азота, слегка подщелачивает почву.

Фосфорные удобрения. В среднем за вегетационный период растения поглощают из почвы около 60 кг P_2O_5 с 1 га. Запасы доступного фосфора восстанавливаются только с внесением удобрений. Потребность в фосфорных удобрениях возрастает при хорошем обеспечении растений азотом.

Фосфорные удобрения делят на три группы в зависимости от растворимости в воде. *Водорастворимые* – это простой суперфосфат $Ca(H_2PO_4)_2$ и двойной суперфосфат $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ с небольшим количеством свободной фосфорной кислоты. Фосфор суперфосфатов малоподвижен в почве и концентрируется в месте внесения. Эффект удобрения проявляется в течение 2...3 лет.

Удобрения, фосфор которых не растворим в воде, но слабо растворим в кислотах, называются *преципитат* и др., в которых фосфор находится в доступной для растений форме. К удобрениям, *не растворимым* в воде и *плохо растворимым* в слабых кислотах, относятся фосфорная мука и костяная мука.

Калийные удобрения. Как уже отмечалось, растения поглощают калия больше других зольных элементов. Основным калийным удобрением является хлористый калий (KCl). Он применяется во всех типах почв и вносится под все сельскохозяйственные культуры. Много калия содержится в навозе. *Сульфат калия* (K_2SO_4) особенно важен для культур, чувствительных к хлору (картофель, лен, цитрусовые). *Калимагнезия* ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$) применяется на бедных калием и магнием песчаных и супесчаных почвах.

Калийные удобрения физиологически кислые, но кислотность проявляется при длительном их применении без известкования почвы. На черноземах и сероземах влияние калийных удобрений на pH почвы не наблюдается. Калийные удобрения дают значительные прибавки к урожаю при хорошем снабжении растений и азотом.

Органические удобрения – навоз, торф, птичий помет, зеленые удобрения – эффективны при совместном внесении с минеральными удобрениями как важные дополнительные источники основных минеральных элементов, органических веществ, улучшающих структуру почвы и ее биологическую эффективность.

Микроудобрения. Внесение микроудобрений обеспечивает значительное повышение эффективности удобрений, содержащих основные элементы питания растений. Так марганец способствует большей подвижности фосфора в почве, а кобальт усиливает поступление в растения азота. Повышение уровня азотного питания увеличивает поступление не только фосфора, калия и магния, но и меди, железа, цинка и марганца.

Бактериальные удобрения. Эти удобрения, вносимые в почву в форме различных препаратов, поддерживают биологическую активность почв. Препарат *фосфобактерин* разлагает органические соединения фосфора в почве и делает их более доступными для растений.

Препараты азотобактера *азотоген* и *азотобактерин* обогащают почву свободноживущими азотфиксаторами. Препарат *нитрагин* содержит клубеньковые бактерии, способствующие образованию клубеньков на корнях бобовых культур, и усиливает фиксацию неорганического азота. Препараты силикатных бактерий разрушают почвенные калийные силикаты и улучшают калийное питание растений.

10.8. Способы внесения удобрений

Смысл внесения в корнеобитаемые горизонты почвы различных типов удобрений заключается в обеспечении возделываемых культур на весь вегетационный период необходимыми питательными элементами. При этом преследуется цель не только сохранения, но повышения плодородия почвы, ее биологической активности, агрофизических и агрохимических свойств.

По времени внесения различают удобрение *основное (допосевное), припосевное и послепосевное*. До посева вносят $2/3 \dots 3/4$ общей нормы удобрений – это основная зарядка почв питательными веществами на весь вегетационный период, способ внесения – вразброс осенью или весной. Под вспашку вносят органические удобрения, известь, азотные, фосфорные и калийные удобрения. Конкретные сроки и нормы внесения удобрений определяются складывающимися агрометеорологическими условиями, уровнем увлажнения почвы с учетом особенностей расположения полей на используемой территории (рельеф и т.п.).

Припосевное удобрение вносят одновременно с посевом или посадкой растений в рядки или заделывают ленточным способом на некотором удалении от рядков с растениями. Этот прием позволяет усилить минеральное питание молодых растений. Обычно используют хорошо растворимые и легко усваиваемые удобрения в небольших дозах. Уже отмечалось, что в первые две недели после прорастания семян у растений отмечается критический период к недостатку фосфора. Поэтому при посеве вносят $5 \dots 20$ кг/га аммофоса или суперфосфата.

Послепосевное удобрение (подкормка) проводится для усиления питания растений в наиболее важные периоды их развития. Обычно проводят ранневесеннюю подкормку озимых культур, ослабленных условиями перезимовки, после того, как произойдет возобновление их вегетации. С помощью внекорневых подкормок озимых культур азотом (мочевина) в фазу молочной спелости увеличивают содержание белка в зерне на $0,5 \dots 1$ %. Фосфорно-калийная внекорневая подкормка сахарной свеклы за месяц до уборки способствует оттоку продуктов фотосинтеза в корни, что увеличивает сахаристость на $1 \dots 2$ % и повышает урожай. Выбор способов внесения удобрений связан с особенностями почвенно-климатических условий, где возделываются сельскохозяйственные культуры, уровнем плодородия почв и агротехникой возделывания.

Обычно вносят минеральные и органические удобрения вместе с известкованием почвы (если почвы кислые с $\text{pH} < 5$) или гипсованием почвы (на солонцах и сильно солонцеватых почвах с $\text{pH} 8 \dots 10$). При внесении научно обоснованных норм удобрений с учетом потребностей растений, уровня плодородия почвы и сложившихся погодных условий, урожайность возделываемых культур повышается в пределах биологических возможностей сортов и гибридов.

При внесении удобрений в количествах, превышающих потребности растений, урожайность не увеличивается, а качество растениеводческой продукции оказывается ниже, вплоть до опасных пределов для питания человека и животных. Предельно допустимая концентрация нитратов не должна превышать следующих норм: в картофеле – 86 мг/кг, капусте, огурцах, томатах – 150 мг/кг сырой массы (не более 405 мг в суточном рационе человека) и т.п. Высокая концентрация удобрений в начале прорастания семян задерживает этот процесс и рост корневой системы. Например, избыточное азотное питание капусты приводит к недостатку в ней сахаров, капуста плохо хранится и сбрасывается.

Нормы удобрений определяют с помощью полевых и лабораторных опытов с введением поправок на обеспеченность почв подвижными соединениями питательных веществ и балансовых расчетов на основе знаний о количестве выносимых питательных веществ с урожаем, коэффициентов использования питательных веществ растениями из почвы.

ГЛАВА 11

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТЕНИЙ

11.1. Понятия онтогенеза и филогенеза. Рост и развитие растений. Этапы онтогенеза высших растений

Вся жизнь растений протекает в постоянной, закономерной перестройке, в тесной зависимости от их вечно меняющейся среды. Живые ткани и целые органы растительного тела носят текучий, кратковременный характер, отмирают, заменяясь новыми.

Акад. Б.А. Келлер (1951)

Индивидуальное развитие особи, выраженное совокупностью последовательных морфологических, физиологических и биохимических преобразований от момента зарождения до естественной смерти организма, называется *онтогенезом* (от греч. *ontos* – существо и лат. *genesis* – развитие, происхождение). В ходе исторического развития вида из поколения в поколение в процессе естественной изменчивости под влиянием условий окружающей среды, борьбы за существование и естественного отбора происходит наследственное закрепление приобретенных признаков и свойств вида.

Процесс исторического развития растительных и животных организмов называется *филогенезом* (от греч. *phyle* – племя, род, вид), представляющим собой преемственный ряд онтогенезов последовательных поколений.

Жизненный цикл индивидуального развития каждого растения «от семени до семени» характеризуется наступлением очередных этапов роста и развития.

Рост растений – это необратимое количественное увеличение размеров и массы клеток, тканей, органов и всего организма в целом, связанное с новообразованием элементов и структур. Понятие «рост» отражает количественные изменения, сопровождающие развитие организма или его частей. Однако под ростом можно понимать изменение геометрических размеров исследуемого биологического объекта, или изменения (нарастание) его сухой массы.

«Наиболее выдающаяся черта в жизни растений заключается в том, что оно растет: на это указывает самое название его» (Тимирязев К.А., 1936). Рост — это важнейший жизненный процесс, лежащий, наряду с развитием, в основе формирования растительного организма в его онтогенезе. Рост растения локализуется в так называемых зонах (или точках роста) в меристемах и складывается из процессов активного деления клеток, с последующим их увеличением и дифференциацией, обеспечивающей специализацию тканей и органов. Регуляторные функции роста как физиологического процесса проявляются в распределении образующихся при фотосинтезе и метаболизме органических веществ, поглощенной воды, а также минеральных солей, идущих на образование органов и тканей, их регенерацию и на запасные отложения.

Первое представление о росте растений получают при измерении его высоты. Однако высота растений не всегда пропорциональна его объему и массе. Например, при сильно загущенных посевах (или плотном естественном покрове фитоценоза) растения сильно вытянуты, с тонким стеблем и слабым ветвлением. Соотношение высоты и массы «среднего» однолетнего растения также изменяются в процессе его роста и развития. Так в первые периоды развития растения его рост и сухая масса изменяются медленно, затем изменения роста (прирост в единицу времени) и нарастание фитомассы ускоряются и достигают максимума, обусловленного биологическими особенностями растения и условиями тепло- и влагообеспеченности конкретного вегетационного периода. Затем наступает постепенное уменьшение прироста и его полное прекращение. Понятно, что высота растения в течение вегетационного периода изменяется только в сторону увеличения. В динамике же фитомассы растения после формирования ее максимума отмечается постепенное сокращение, связанное с частичным отмиранием (засыханием, опадом) отдельных его органов. Кроме того, в отдельные периоды онтогенеза изменения внешних (погодных) условий приводит к значительному снижению интенсивности фотосинтеза растений. В таких случаях ассимиляция органического вещества оказывается ниже его расходов, связанных с процессом дыхания. Например, в период летних высоких температур и засухи интенсивность фотосинтеза резко снижается, а интенсивность дыхания значительно возрастает. Аналогичное явление снижения величины сухой массы наблюдается в первые фазы развития растений, когда у молодых проростков (всходов) в силу «перевеса» процесса дыхания над фотосинтезом используется резервный запас питательных веществ, накопленный в эндосперме семян.

В различных агрометеорологических условиях скорость роста растений оказывается неодинаковой. Зависимость скорости роста от температуры среды (почвы и воздуха) очевидна. Так при одинаковых условиях

освещения, влагообеспеченности и питательной среды, но при низких температурах скорость роста растений незначительна. Ускорение роста, как и другие биологические процессы: фотосинтез, дыхание, *метаболизм* (от греч. *metabole* – обмен веществ), – происходит при повышении температуры. Таким образом, для каждого вида растений (возделываемых культур) характерны определенные пороговые значения их роста и развития: температурные минимум, оптимум, максимум. Причиной прекращения роста при низких и высоких температурах в первую очередь являются нарушения в процессах фотосинтеза, дыхания и метаболизма.

Известно, что лучистая энергия Солнца, являясь основной энергией для создания органических веществ растения, способствует их росту. В то же время высокая интенсивность солнечной радиации (например, в высокогорьях) сдерживает (угнетает) ростовые процессы. В условиях сильного затенения рост растений непропорционально увеличивается, механические ткани, поддерживающие растения, оказываются недоразвитыми, тонкими и слабыми.

На процессы роста большое влияние оказывают условия увлажнения и доступности влаги корневым системам растений. Это связано с особенностями биохимических и физиологических процессов в растительных клетках и тканях, которые могут проходить только в водных растворах. Недостаток влаги или слабая доступность ее в растения (например, в условиях высокого засоления почвы) приводит к образованию низкорослых растений с измененной анатомо-морфологической структурой. В качестве примера приведем рис. 11.1, отражающий зависимость интенсивности роста различных по степени «теплолюбивости» растений от температуры среды и рис. 11.2, показывающий влияние света на рост побегов картофеля.

На примере многих видов растений установлено, что рост является периодическим колебательным процессом с фазными, околосуточными

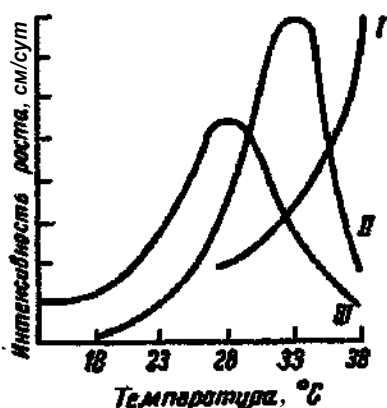


Рис. 11.1. Зависимость роста различных растений от температуры: I – огурцы; II – кукуруза; III – люпин

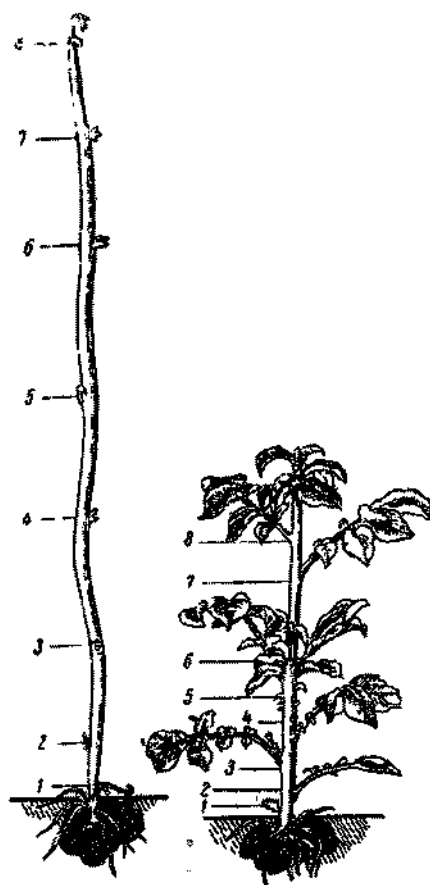


Рис. 11.2. Побеги картофеля, выращенные в темноте (слева) и на свету (справа). Цифрами обозначены узлы.

и пульсирующими ритмами. Строгой и постоянной временной корреляции в суточном ходе процессов роста, фотосинтеза и дыхания у растений не обнаружено. В наибольшей степени связь между линейным ростом и дыханием проявляется у злаковых и в наименьшей – у корнеплодных растений и картофеля. Частое нарушение временной связи суточных ритмов роста, фотосинтеза и дыхания является следствием различной чувствительности и разного уровня потребностей этих процессов к уровню интенсивности факторов окружающей среды. Суммарные приросты за несколько суток коррелируют с показателями интенсивности основных энергетических процессов (Шевелуха В.С., 1977).

Особенностью роста является полярность, т.е. ориентация в пространстве клеточных структур и происходящих в них процессах. Например, на черенке, посаженном во влажный питательный грунт, образуются корни на нижнем его конце, тогда как на верхнем конце развиваются листовые почки. Рост непрерывно связан с развитием и органогенезом (морфогенезом).

Важным свойством роста растений является суточная и сезонная ритмичность, зависящая от комплекса внешних условий – продолжительности светлой части суток, температуры воздуха и почвы, влажности корнеобитаемых горизонтов почвы и других, а также от генетических особенностей растения.

При анализе обширных полевых материалов наблюдений, собранных в пустынях и горах Средней Азии было установлено, что наиболее информативными параметрами, определяющими общий *габитус* растения (от лат. *habitus* – внешность, общий облик) и его массу являются: высота растений или длина его молодых побегов ($H_{см}$), средний диаметр ($D_{см}$) или сумма двух взаимно перпендикулярных диаметров куста или розетки листьев. В тех случаях, когда $H/D < 3$, масса растения (Y_2) достаточно надежно определяется параметром его высоты (H), например, эта закономерность относится ко всем представителям семейства злаковых и другим длинностебельным растениям (Ан П.А., Грингоф И.Г., 1971; 1972 и др.):

для мятлики луковичного

$$Y = 0,006H^{1,6}, r = 0,92 \pm 0,005; \quad (11.1)$$

для люцерны дикорастущей

$$Y = 0,0013H^{1,6}, r = 0,88 \pm 0,003. \quad (11.2)$$

Была показана также возможность определения урожайности растительной массы сомкнутого эфемерового покрова ($г/м^2$) при проективном покрытии почвы растениями ≥ 90 % по средней высоте растительного покрова $H_{ср}$:

$$Y = 4,6 H_{ср} + 1,6, \quad (11.3) \\ r = 0,83 \pm 0,03.$$

Для полупустынного растительного сообщества, состоящего из эфемеров и отдельных кустов полыни, связь величины сухой массы с учетной площадки ($1м^2$) имеет вид:

$$Y = 0,36 H^{1,85} + 1,6, \quad (11.4) \\ r = 0,87 \pm 0,02.$$

При $H/D < 3$ для определения массы растений по биометрическим параметрам целесообразнее использовать трехмерные параметры – высоты ($H_{см}$) и суммы двух диаметров розетки листьев ($D1+D2$) (см), общего габитуса куста:

для ферулы (крупного зонтичного растения)

$$\lg Y = 2,78 \lg (H + \sum 2D) - 4,44, \quad (11.5)$$

$$R = 0,978 \pm 0,006;$$

для полыни (весеннего сезона)

$$\lg Y = 0,51 \lg H + 1,8 \lg \sum 2D - 2,56, \quad (11.6)$$

$$R = 0,965 \pm 0,008.$$

Рост растений является одной из составных частей *продукционного процесса растений* (см. 11.9), который сопровождается увеличением массы и размеров органов, органелл и живого организма в целом. Элементарным показателем роста фитомассы является прирост фитомассы $\Delta M = M_2 - M_1$, т.е. разница между сухой фитомассой за определенный промежуток времени (Полевой А.Н., 1992):

$$\Delta M / \Delta t = (M_2 - M_1) / (t_2 - t_1). \quad (11.7)$$

Это выражение означает абсолютную скорость роста. Относительная величина прироста фитомассы имеет вид:

$$R_r = (M_2 - M_1) / [M_{cp} (t_2 - t_1)], \quad (11.8)$$

где M_{cp} – средняя сухая масса растения за период $t_2 - t_1$.

При анализе прироста фитомассы используется показатель, характеризующий фотосинтетическую активность листовой поверхности, предложенный А.А. Ничипоровичем (1956) – *чистая продуктивность фотосинтеза посева* ($E_{н.ф.}$):

$$E_{н.ф.} = 1 / L_{cp.} \cdot \Delta M / \Delta t, \quad (11.9)$$

где $L_{cp.}$ – средняя суммарная площадь листьев растения за период Δt .

Совместное влияние внешних (экологических) и внутренних (генетических) факторов на рост растений проявляется в величине их показателей: размере, форме, морфологической структуре. Сложность и разнообразие роста определяются физиолого-биохимическими и биофизическими процессами, протекающими в растениях под влиянием внешних факторов: освещенности, теплового и влажностного режимов почвы и приземного слоя воздуха.

Рост является функцией времени, равно как и другие процессы, протекающие в растениях, что выражается в периодических и ритмических колебаниях его интенсивности, локализации и направленности (Шевелуха В.С., 1977). Необходимым условием роста растений являются тепло, влага, свет и элементы корневого минерального питания.

Между различными органами растения существует взаимовлияние (коррелятивные связи), обеспечивающие гармоничный рост и развитие всего растения. Например, такая связь легко прослеживается у картофеля между клубнеобразованием и интенсивностью разрастания надземных

побегов (ботвы). С помощью различных агротехнических приемов (технологий) агрономы регулируют соотношение процессов роста и развития возделываемых культур. Так при выращивании растений для плодов и семян агротехника направляется на ограничение избыточного роста вегетативной массы и на усиление формирования органов плодоношения. Для этого применяются ретарданты (от лат. *retardation* – замедление) – химические вещества, тормозящие рост (удлинение) стебля или побега. Используются и регуляторы роста растений (от лат. *regulo* – направляю, упорядочиваю). Это – органические соединения, вызывающие стимуляцию или подавление роста и морфогенеза. К ним относятся ауксины, гиббереллины, этилен и др. Применение регуляторов роста приводит к сдвигам в обмене веществ, к ускорению или торможению роста, образования генеративных органов и т.д. При выращивании растений для получения вегетативной массы или корнеплодов (свекла, репа, морковь и др.) используют технологические приемы, подавляющие их генеративное развитие.

Известно, что общим выражением зависимости хода ростовых процессов во времени стал закон большого периода роста, отражающий S-образный ход кривой интегрального нарастания размеров (или массы растений) и параболический ход дифференциальной кривой приростов (и привесов) за определенные промежутки времени. Этот закон был сформулирован немецким биологом Ю. Саксом в 1856 г. (рис. 11.3 и 11.4).

В начале роста происходит медленное нарастание высоты (длины) побега, междоузлия или площади листовой поверхности, затем происходит интенсивное ускорение роста, после этого по мере приближения к окончанию процесса роста происходит замедление (затухание) его интенсивности, связанное с возрастом и изменением окружающих условий (интенсивности освещения, температурных и влажностных условий). Начало и конец кривой роста удовлетворительно описываются линейной функцией, типа:

$$Y = aX + b, \quad (11.10)$$

участок кривой интенсивного роста, называемый экспоненциальной функцией, более точно описывается по типу геометрической прогрессии:

$$Y = a^x \text{ или } Y = \exp X. \quad (11.11)$$

Общая характеристика динамики роста растений наиболее точно описывается кривой логарифмической функции (Плохинский, 1970; и др.):

$$Y = \log a^x. \quad (11.12)$$

Учитывая закономерности роста, наличие функциональной зависимости между ростом, временем его проявления и массой (или размерами) растения, известны попытки многих исследователей применять математические методы выражения его временного хода с целью прогнозирования темпов роста и формирования будущего урожая. Например, И.Л. Давидсон и И.Р. Филипп (Davidson J.L., Philip J.R., 1958), рассматривая рост

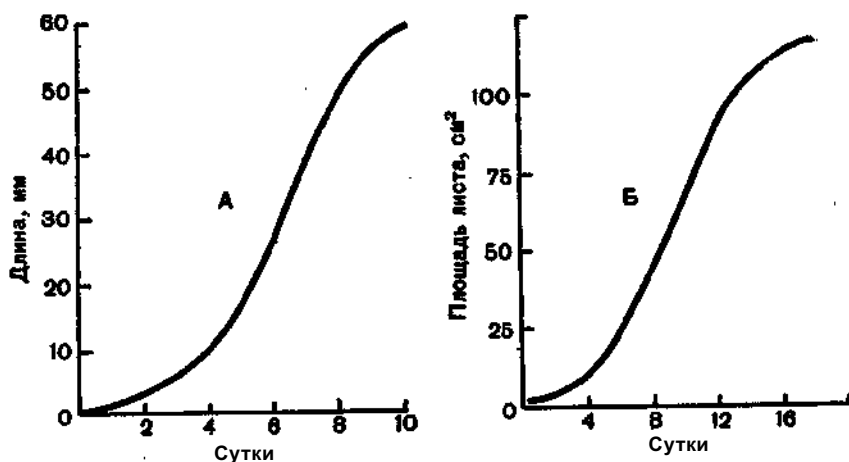


Рис. 11.3. Большая кривая роста:

А – увеличение длины междоузлия у фасоли; Б – рост листа огурца

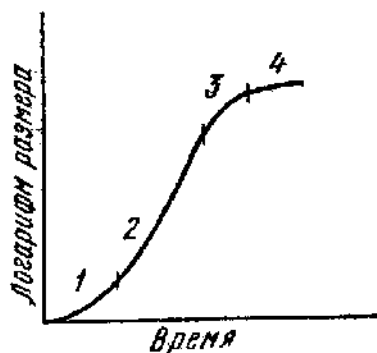


Рис. 11.4. Общая схема большой кривой роста: 1 – начальный индукционный период; 2 – логарифмическая фаза (интенсивный рост); 3 – фаза замедленного роста; 4 – фаза стационарного состояния

растения как итоговый процесс, отражающий баланс фотосинтеза и дыхания, предложили физиологически обоснованное уравнение:

$$dM / dt = K(F - R), \quad (11.13)$$

где dM / dt – изменение сухой массы во времени; F – суммарный фотосинтез растения; R – суммарное дыхание растения; K – эмпирический коэффициент пропорциональности между количеством усвояемой CO_2 и созданной при фотосинтезе биомассой ($K=0,67$ г сухой массы / г CO_2). На основании этой формулы Ю.К. Росс (1966) предложил систему уравнений для определения величины биомассы каждого органа растения в целом как функции времени. В упрощенном случае рассматриваются функции вегетативного роста A_j , когда основными фотосинтезирующими органами являются листья; а для периода репродуктивного роста – функции

«притока-оттока» B_j . Уравнение роста j -го органа записывается в виде:

$$\Delta m_{ij} / \Delta t = A_j (\Delta M / \Delta t) + MB_j, \quad (11.14)$$

где $\Delta m_{ij} / \Delta t$ – изменение сухой массы j -го органа во времени; A_j – доля созданных за сутки в i -м органе «свежих» ассимилятов, перетекающих в течение суток в j -орган; B_j – обмен «старых» ассимилятов (г) за сутки из других органов в j -орган, отнесенный к 1 г сухой фитомассы целого растения; $M = \sum_{j=1}^n m_j$ – суммарная сухая масса всех органов (n) растения.

В период вегетативного роста $B_j \approx 0$, тогда:

$$\Delta m_j / \Delta t = A_j (\Delta M / \Delta t) \quad \text{или} \quad \Delta m_j / \Delta M = A_j. \quad (11.15)$$

В период только репродуктивного роста $\Delta m_j / \Delta t \approx 0$, тогда:

$$\Delta m_j / \Delta t = MB_j, \quad (11.16)$$

следовательно, функция B_j определяет, какая доля всей фитомассы перемещается в форме «старых» запасенных ассимилятов из других органов в j -орган. Если $B_j > 0$, то происходит приток ассимилятов в j -орган, если же $B_j < 0$, то, наоборот, происходит отток ассимилятов из j -органа в другие. Таким образом, функции A_j и B_j отдельных органов растения характеризуют внутренние закономерности роста, раскрывают характер общего прироста по отдельным органам.

Прирост всего растения определяется уравнением роста в виде (Тооминг Х.Г., 1977):

$$\Delta M / \Delta t = (k_\phi \Phi - k_r R) - V, \quad (11.17)$$

где Φ – суммарный фотосинтез растения; R – суммарное дыхание растения; k_ϕ и k_r – коэффициенты для перехода с единиц фотосинтеза и дыхания к единицам прироста; V – опад листьев, бутонов, лепестков, цветков и других органов. В последующие годы были предложены более детальные математические описания роста отдельных органов растения (Полевой А.Н., 1979 и др.), используемые при моделировании продукционного процесса растений. В настоящем учебном пособии они не рассматриваются.

Длительное отсутствие видимого роста называется *покоем растений*. Различают: *вынужденный покой*, возникающий под влиянием внешних условий, например длительной засухи весной, задерживающей всходы семян; *физиологический покой*, связанный с особенностями зародыша семян или окружающих их тканей, задерживающих прорастание; *покой почек и побегов*, возникающий как механизм приспособления к сезонным сменам климатических условий, например низким температурам зимнего периода; *фотопериодический покой*: «длинный» световой день ускоряет вегетативный рост, а «короткий» день приводит к прекращению роста и формированию покоящихся почек.

Для сезонной ритмики роста (и развития) многих растений засушливых местообитаний характерно два периода покоя: зимний и летний. Зимний покой растений обусловлен недостатком тепла (термического фактора), а летний – наступлением засушливого периода при высоких температурах воздуха и почвы и, как следствие, развитием почвенной засухи в корнеобитаемых горизонтах почвы. Рост растений тесно связан с развитием растений.

Развитие растений. Это последовательные качественные изменения в точках роста, в которых происходит деление клеток меристемы с последующим их увеличением и дифференцированием, обеспечивающие специализацию тканей и органов. При этом происходят изменения в структуре и функциональной активности растения и его частей – клеток, тканей и органов, – возникающие в процессе роста растений в онтогенезе, ведущие в конечном итоге к органообразовательным процессам (фазам) и к воспроизведению себя в потомстве.

Возникновение качественных различий между клетками, тканями и органами получило название *дифференцировка* (от фр. *differentiation* – разделение, расчленение целого на различные части). В понятие развитие входят также и возрастные изменения, наблюдаемые в онтогенезе.

В цикле развития высших растений выделяют четыре возрастных этапа: эмбриональный (юность), ювенильный (молодость), репродуктивный (зрелость) и старение (старость) (рис.11.5).

Эмбриональный этап охватывает период от формирования и развития зародыша (*зигота*, которая образуется в результате слияния мужского *гаметофита* с яйцеклеткой зародышевого мешка – женского *гаметофита*) до созревания семени. На последнем этапе созревания семена теряют значительное количество воды и у большинства видов умеренного климата переходят в состояние покоя.

Ювенильный этап начинается с прорастания семян или вегетативных зачатков (например, клубней) и характеризуется быстрым накоплением вегетативной массы. Прорастание семян делится на фазы: набухание семян; проклевывание семян; *гетеротрофный рост проростка* (за счет запасных питательных веществ в эндосперме); переход к *автотрофному способу питания*. Период покоя у семян заканчивается при поглощении воды благодаря повышенной проницаемости семенных покровов (у большинства видов). Происходит физиологическое давление при набухании эндосперма, в результате чего покровы семени разрываются. Набухание практически не зависит от температуры, освещенности и на первых этапах этого процесса от содержания кислорода.

Проклевывание начинается, когда семена достигают критической влажности (40...65 % в пересчете на сырую массу). Происходит рост растяжением самого зародышевого корня или *гипокотилия*, в результате чего кончик корешка выталкивается из семени (например, горох). Выход корешка

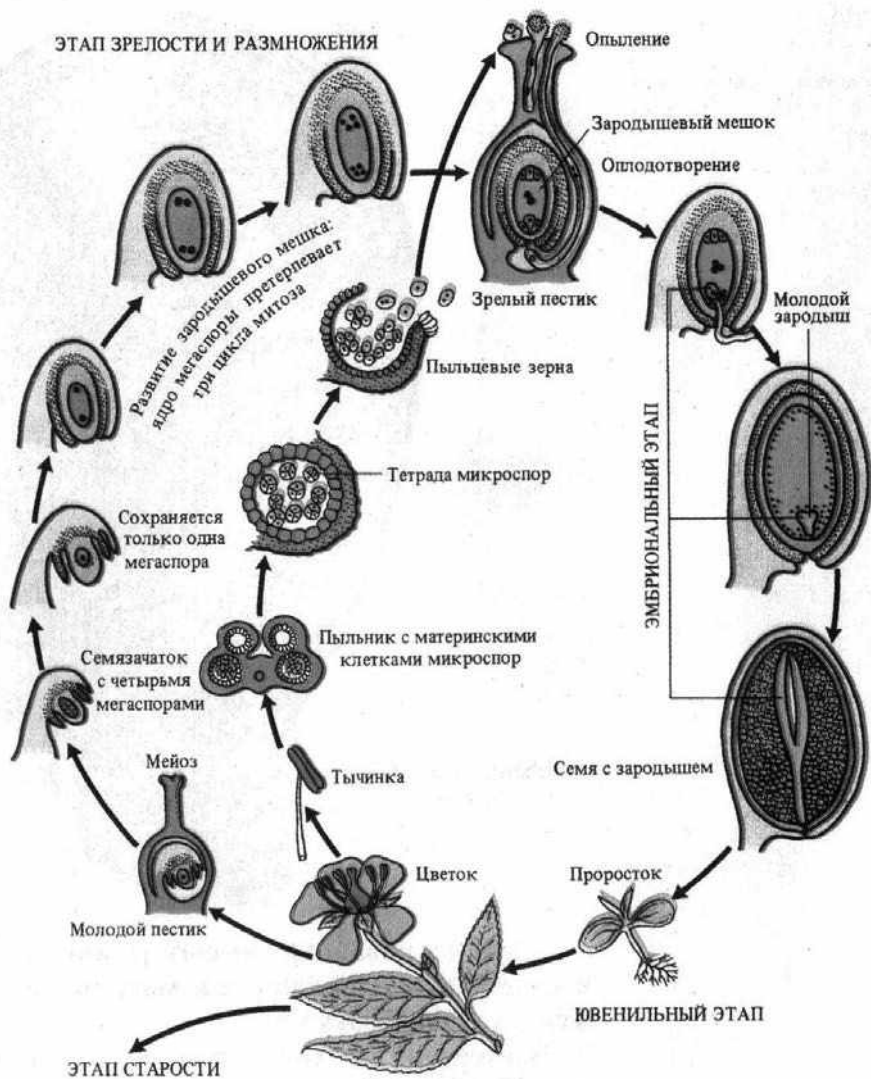


Рис. 11.5. Этапы онтогенеза и фазы развития покрытосеменных растений

обеспечивает закрепление прорастающего семени в почве и улучшает поглощение воды. Затем начинается рост побега. Прорастание происходит в темноте (в почве), и корень, и побег ориентируются по *гравитационному вектору*, при этом корень растет по направлению к центру Земли, т.е. углубляется в почву, а побег – от центра, т.е. направляется к свету. Такой специализированный рост поддерживается различными фитогормонами.

Рост зародышевого корня в зоне деления происходит за счет растяжения и дифференциации клеток. Побег удлиняется благодаря растяжению гипокотилия (у бобов, тыквы и др.) или *мезокотилия* (у злаков). Благодаря дальнейшему росту главного, боковых и придаточных корней и формированию побега, роста листовых пластинок, утолщения стебля растение к концу ювенильного периода накапливает значительную вегетативную массу. Зачастую у растений проростки по многим внешним признакам не похожи на взрослые особи, например форма листьев у огурца, хлопчатника, ипомеи и др. Для этого периода развития характерна значительно большая способность к образованию корней, что обычно используется в практике садоводства.

Продолжительность ювенильного периода у разных типов растений различна: от нескольких недель (однолетние травы) до нескольких лет – древесные породы.

Этап молодости характеризуется полным отсутствием цветения, благодаря тому, что растение не производит на этом этапе закладку органов полового и вегетативного размножения. Переход от ювенильного типа роста к зрелому наиболее отчетливо прослеживается у древесных растений.

Репродуктивный этап (зрелости и размножения) охватывает период от закладки и роста генеративных органов до формирования семян и плодов. В этот период растение достигает состояния наибольшей жизнеспособности, поскольку имеет сформировавшуюся вегетативную массу, обеспечивающую рост и развитие цветков, семян и плодов. Физиологические особенности размножения растений будут рассмотрены в главе 12.

Этап старения охватывает период от полного прекращения плодоношения до естественного отмирания особи. На этом этапе наблюдается прогрессирующее ослабление всех функций жизнедеятельности растений (рис. 11.6). Старение и смерть растения – завершающие этапы онтогенеза, однако в процессе эволюции выработаны различные типы старения. Однолетние растения отмирают целиком. У многолетних трав ежегодно полностью отмирают надземные органы (стебли, листья, генеративные органы), а корневая система и другие подземные органы остаются жизнеспособными. У многих растений в процессе роста стареют и отмирают нижние, ранее образовавшиеся листья и побеги (ветви). У листопадных деревьев осенью одновременно стареют и опадают все листья.

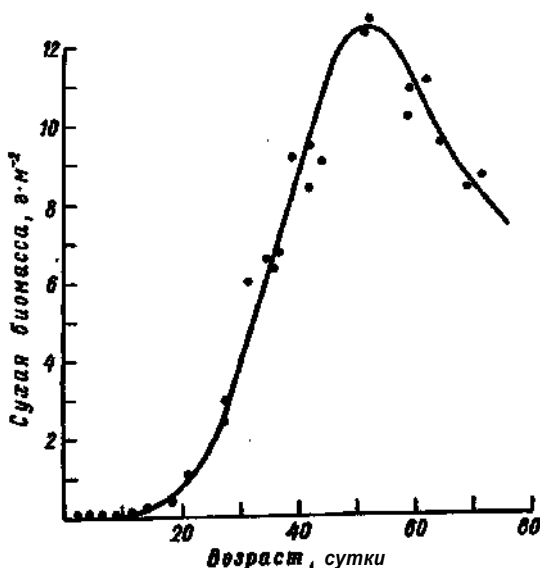


Рис. 11.6. Изменение сухой биомассы листьев и стеблей пшеницы сорта *World's Seeds 1877* в зависимости от возраста растения

Таким образом, процесс старения органа завершается его опадением. Перед опадением листа или плода в основании черешка или плодоножки образуется *отделительный слой*, представляющий собой зону, состоящую из клеток, ориентированных под прямым углом к оси черешка. Кроме того, в зоне отрыва образуются «пробкоподобные» клетки, легко отделяющиеся даже при слабом механическом воздействии (ветер и др.). Старение имеет большое биологическое значение. Оно является одним из способов адаптации растений к условиям внешней среды. Старение, по-видимому, способствует более быстрой эволюции, поскольку ускоряет смену поколений, т.е. «оборачиваемость» генетического материала (Полевой В.В., 1989).

У однолетних и двулетних растений, плодоносящих один раз в течение своей жизни, называемых *монокарпиками* (от греч. *топо* — один, единый; *karpos* — плод), происходит отток большей части питательных веществ (ассимилятов) к репродуктивным органам, и наступающее истощение, а также ряд физиологических изменений приводят к отмиранию растения.

У поликарпических растений, многократно цветущих и плодоносящих в период своей жизни, с течением времени происходит угнетение роста корней, физиологические изменения, нарушение связи между поступлением от корней в надземные органы питательных веществ, что в конечном счете способствует постепенному отмиранию всего растения.

Очередность и последовательность этапов развития и роста генетически закреплена биологическими особенностями вида и влиянием на растения комплекса экологических факторов, характеризующихся временной суточной и сезонной динамикой.

Многочисленными исследованиями установлено, что влияние экологических факторов окружающей среды оказывается неодинаковым в разные периоды жизненного цикла растений. В ранние периоды онтогенеза от эмбрионального развития до начала образования генеративных органов растение более пластично и отзывчиво на меняющиеся условия, чем во взрослом состоянии (от плодоношения до старения). Это свойство широко используется в процессе селекционной работы по выведению новых сортов и гибридов культурных растений и при их акклиматизации с целью расширения ареалов их возделывания.

По признаку общей продолжительности жизненного цикла все высшие растения делят на однолетние, двулетние и многолетние формы. К *однолетним растениям* относится несколько групп: *эфмеры* (от греч. *ephmeros* – однодневный, недолговечный) – растения засушливых регионов, заканчивающие полный цикл развития «от семени до семени» за короткий период (обычно несколько месяцев), в течение которого сохраняются необходимые условия увлажнения и температуры. Яровые однолетние формы имеют надземные и подземные органы, жизненный цикл которых ограничен весенне-летними месяцами вегетации. Растения отмирают (засыхают) после созревания семян. Среди сельскохозяйственных культур эта группа представлена многими зерновыми и зернобобовыми, большинством овощных, масличных, прядильных и бахчевых культур.

Вегетационный период озимых однолетних форм не превышает в общей сложности один год, но он начинается с осени и завершается летом следующего года созреванием семян, после чего растение отмирает; в зимние месяцы озимые растения находятся в состоянии покоя. К этой группе относятся озимые пшеница, рожь, ячмень и др.

У группы *двулетних растений* в первый год жизни обычно формируются только вегетативные органы (корни, побеги, листья), а на второй год – генеративные органы – бутоны, цветы, плоды, после созревания которых растение отмирает. К этой группе растений относятся многие корнеплоды, имеющие специальный запасующий орган, обычно это утолщенный корень, например свекла, морковь, репа, дайкон, или стебель – капуста и др.

Многолетние растения характеризуются самой различной продолжительностью жизненного цикла: от нескольких лет (многие плодово-ягодные культуры, виноград, сеяные травы, например клевер, люцерна, костер, ежа сборная и др.) до сотен и даже тысяч лет. Продолжительность жизни хвойных и листопадных деревьев составляет у секвойи 5000 лет, у дуба 1500 лет, у ели 1200 лет, у липы до 1000 лет, у сосны до 500 лет и т.п.

Естественно, что в процессе развития растений-долгожителей происходит постоянная смена их тканей и органов. У секвойи листья-иглы живут всего 2...4 года, затем они засыхают и опадают, внешние слои коры отслаиваются и осыпаются, древесина отмирает изнутри, а на смену ей камбий образует новые слои коры и древесины. Именно поэтому для старых экземпляров секвойи, платанов и др. характерно естественное образование крупных пустых полостей в центре стволов (гигантские дупла).

Если посмотреть внимательно на состав подстилки в хвойном лесу, то нетрудно убедиться, что основу ее составляют опавшие иголки, мелкие веточки, сухие остатки травяного покрова, обычно изреженного под темным пологом густых деревьев.

Плодоношение многолетних растений начинается в различном возрасте, что связано с биологическими особенностями вида, породы, гибрида. У многолетних растений плодоношение происходит практически ежегодно (или через год, как у многих плодовых культур), это, так называемые, *поликарпики* (от греч. *poly* – много). Однако среди многолетних растений нередко встречаются *монокарпические* формы, у которых в течение ряда лет происходит только вегетативный рост, накопление питательных веществ в запасующих органах. В годы, когда запас питательных веществ (ассимиляты) достигает объемов, достаточных для формирования генеративных органов, происходит их расходование на образование цветков и плодов, после их созревания жизненный цикл таких форм растений заканчивается. Примером таких растений являются некоторые тропические и пустынные роды – агава, бамбук, ферула, дорема и др.

Еще в 30...60 годы прошлого столетия в СССР получили широкое развитие исследования *скорости развития* растений, позволившие агрометеорологам количественно определять суммы температур, необходимые для прохождения основных фаз развития возделываемых культур и их сортов. Теоретическим обоснованием вопроса о связи скорости развития растений с температурой воздуха за различные межфазные периоды и весь жизненный цикл растений «от семени до семени» стали исследования А.В. Федорова (1935), А.А. Скворцова и Л.Н. Бабушкина (1938–1953; 2004) и др. В основу предложенного ими метода было положено предположение о наличии количественной связи между средней температурой воздуха (почвы) и скоростью развития растений, близкой к прямолинейной. Известно, что физический смысл *скорости* есть отношение пройденного расстояния (пути) к единице времени. Скорость развития растения – это «путь», пройденный растением в своем развитии за единицу времени. Если межфазный период (или весь период онтогенеза) продолжается n суток, то путь, пройденный растением в одни сутки (скорость развития), будет равен $1/n$. Например, продолжительность межфазного периода от даты посева до даты всходов составила 8 сут, тогда среднесуточная скорость развития растения за одни

сутки будет равна $1/8 = 0,125$. Общий вид связи скорости развития со средней суточной температурой воздуха за искомый межфазный период представлен формулой

$$1/n = (T_{\text{сред}} - B) / A, \quad (11.18),$$

откуда:

$$A = (T_{\text{сред}} - B) / 1/n, \quad (11.19)$$

где B – нижний предел эффективных температур растения для данного межфазного периода, °С; A – сумма эффективных температур за этот же межфазный период, °С; n – число суток.

Этот метод в агрометеорологической науке и практике называется «методом Скворцова – Бабушкина». Он был широко апробирован при оперативном агрометеорологическом обеспечении возделывания основных сельскохозяйственных культур, в том числе плодовых, цитрусовых, винограда и пастбищной растительности.

Например, связь скорости развития пустынного эфемера – *костра кровельного* за период всходы – созревание со средней температурой воздуха графически представлена на рис. 11.7. Как видно на этом рисунке, в температурных пределах от 15 до 28 °С точки сильно разбросаны, т.е. при одних и тех же температурах скорость развития резко отличается: например, для точки I при температуре 23,8 °С $1/n = 0,140$, а для точки II скорость развития равна 0,250. Анализ показал, что для случаев, когда запасы влаги в слое почвы 0...20 см были ≥ 8 мм, просматривается четкая связь скорости развития растений со средней температурой воздуха за этот период:

$$1/n = 0,010T_{\text{сред}} + 0,003; \quad r = 0,93; \quad S = 0,018. \quad (11.20)$$

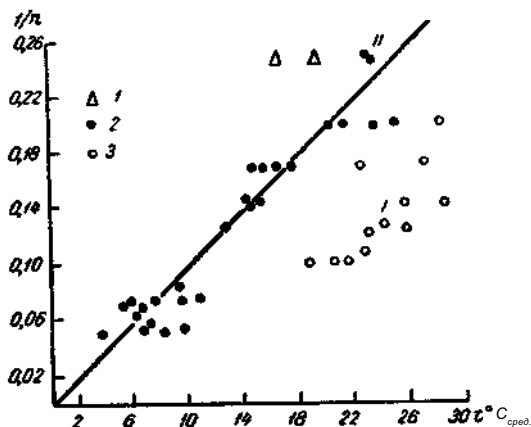


Рис. 11.7. Связь скорости развития костра кровельного с температурой воздуха в период посев – всходы. 1957–1960 гг.: 1 – посевы на сильно увлажненной почве, 2 – посевы на увлажненной почве, 3 – посевы на подсушенной почве

При расчете по (11.19) сумма эффективных температур (A), необходимая кострю кровельному для появления всходов составила 100°C , при $B = 0^{\circ}\text{C}$. Для точек, расположенных ниже прямой (3), соответствовали случаи, когда запасы влаги в этом же слое были < 8 мм, т.е почва была подсушена, скорость развития замедлена, и для появления всходов потребовалось больше тепла: сумма температур составила 180°C (при $B = 0^{\circ}\text{C}$).

Для полного завершения цикла развития костра кровельного от посева до созревания семян сумма температур составила 1205°C при $B = 3^{\circ}\text{C}$ (Грингоф И.Г., 1962). Пользуясь полученными температурными показателями, были составлены карты *изохрон* массового весеннего появления (всходов) костра кровельного в Кызылкуме, знаменующие начало зеленения пастбищ (рис. 11.8). Карта сроков массового созревания семян, что соответствуют началу выгорания эфемеровой растительности в этой пустыне представлена на рис. 11.9.

Метод используется в оперативном режиме при составлении информации о ходе развития посевов и ожидаемых сроков наступления основных фаз развития растений, например всходов, цветения, созревания и т.п., что имеет большое значение для работников сельскохозяйственного производства.

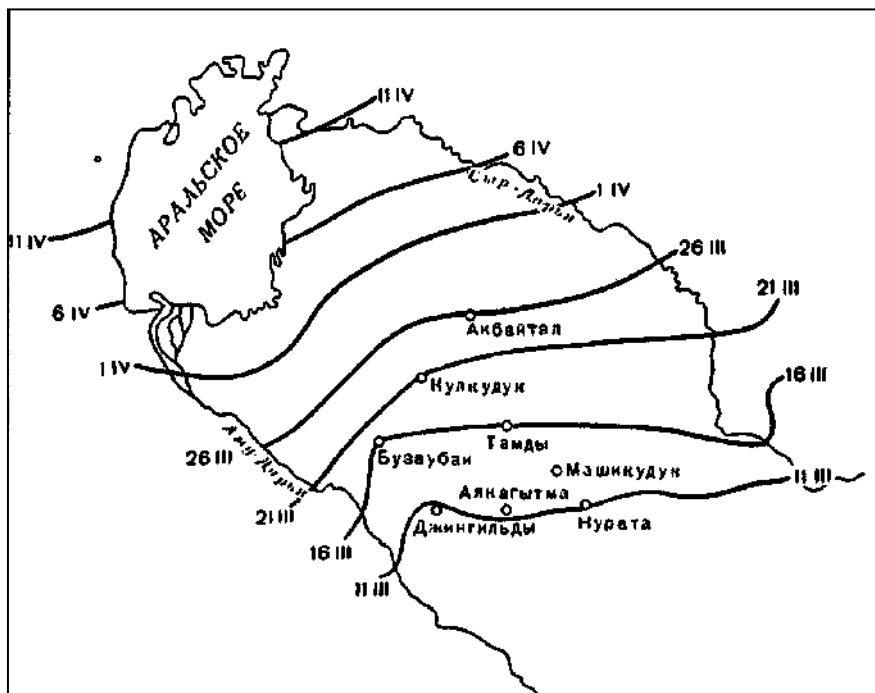


Рис. 11.8. Карта изохрон появления всходов костра кровельного

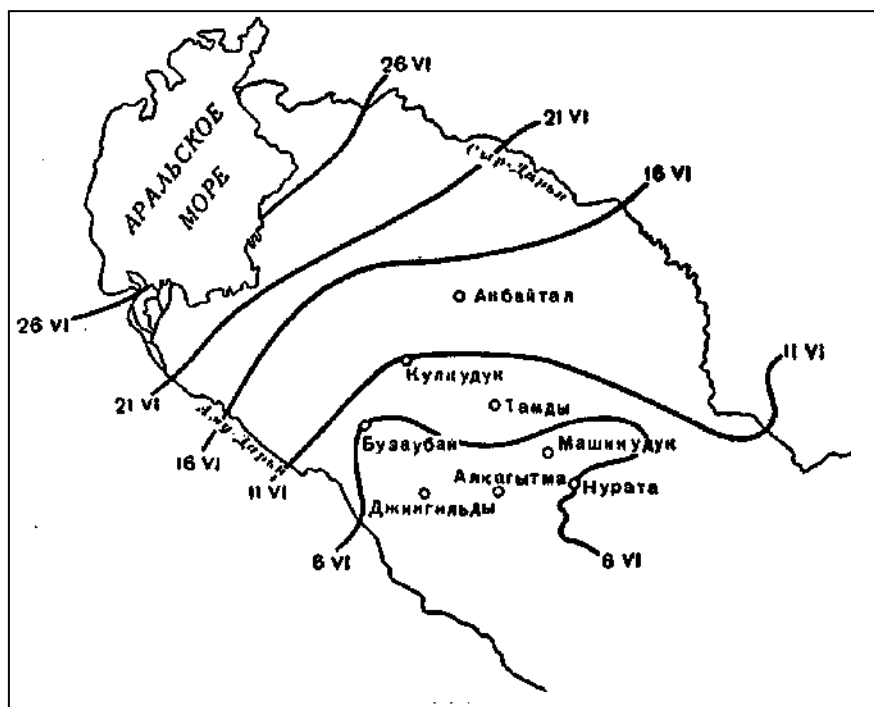


Рис. 11.9. Карта изохрон созревания семян ковра кровельного

11.2. Понятие «жизненная форма» растений

В процессе типизации огромного разнообразия представителей растительного мира возникло понятие о сходстве групп растений не только в их внешнем облике, но и в сходстве путей их приспособления к различным экологическим условиям произрастания. Не останавливаясь на истории формирования научного понятия «жизненная форма», отметим, что в современном представлении специалистов экологов и ботаников *жизненная форма* – это совокупность родов и видов растений со сходными внешним строением и ритмами развития, отражающими их историческую приспособленность к разнообразным условиям окружающей среды. Таким образом, жизненная форма – это результат длительного приспособления растений к местным условиям существования, выраженный в его внешнем облике, а также в комплексе адаптационных качеств и признаков. К ним относятся: формы роста, ритмы сезонного развития, степень защищенности от неблагоприятных условий наиболее уязвимых органов растений, способность к вегетативному размножению, наконец, «вечнозеленость» у некоторых травянистых и кустарниковых видов еловых

лесов и т.п. Поэтому жизненные формы не совпадают с таксономическими единицам (видами, родами, классами, семействами). Подобно тому, как в систематике принадлежность растений к одной и той же таксономической единице означает *общий путь происхождения*, в экологии отнесение различных родов и видов растений к одной жизненной форме означает их *одинаковый путь приспособления к окружающей среде* (Горышина Т.К., 1979).

Учеными разработаны различные системы классификации жизненных форм растений, например, в экологии растений популярна классификация датского ботаника Кристена Раункиера, предложенная им в 1903 г. Хотя и эта система не универсальна для исключительного разнообразия растительного мира и окружающих растения условий существования. В качестве признака, выражающего приспособленность растений к перенесению неблагоприятных условий сезона (или отдельных периодов жизнедеятельности растений), К. Раункиер избрал способ их перезимовки, т. е. признак расположения почек возобновления в пространстве или способ защиты от неблагоприятных условий (рис. 11.10). Этот признак имеет глубокий биологический и экологический смысл, заключающийся в том, что клетки *меристемы* (ткани, предназначенной для продолжения роста и развития) обеспечивают непрерывное существование особей из поколения в поколение в условиях динамичного комплекса факторов, составляющих среду обитания растений.

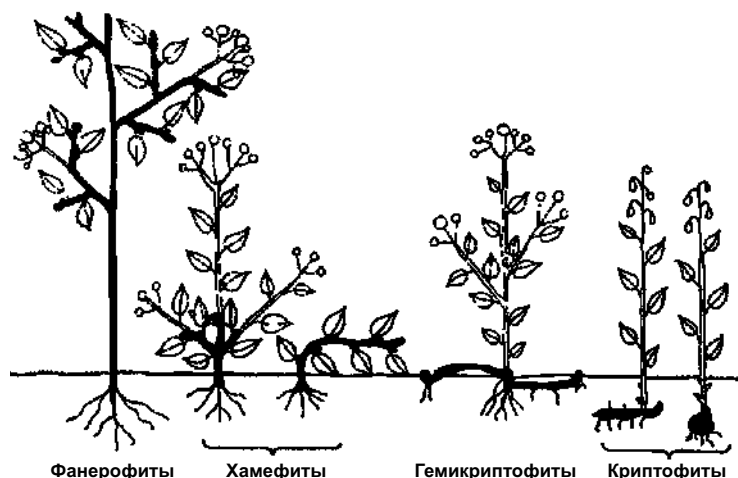


Рис. 11.10. Схематическое изображение жизненных форм по К. Раункиеру. Незачерненные (на рисунке) части растений на время неблагоприятного сезона отмирают, а зачерненные сохраняются и возобновляют рост на следующий год. Наименее защищены почки у растения, изображенного слева, а далее степень защищенности все больше возрастает.

Коротко охарактеризуем 5 основных групп растений, выделенных по признаку расположения зимующих почек, не останавливаясь при этом на более мелких таксономических единицах классификации жизненных форм К. Раункиера. В первой группе, названной автором *фанерофиты* (от греч. *phaneros* – видимый), объединены в основном деревья и кустарники, почки возобновления и концевые побеги которых находятся высоко над поверхностью земли. Растения этой жизненной формы доминируют над другими растительными формами в теплых и влажных условиях тропического и субтропического поясов.

Вторая группа *хамефиты* (от греч. *hame*– приземистый, карликовый) объединяет мелкие кустарники и кустарнички, слабо возвышающиеся над поверхностью земли, иногда стелющиеся формы. Близость к почве защищает почки и молодые побеги от неблагоприятных зимних условий, когда снежный покров предохраняет растения от резких колебаний температуры воздуха и от вымерзания. Растения этой группы преобладают в областях с умеренным и арктическим климатом.

Третья группа получила название *гемикриптофиты* (от греч. *hemi* – половина, наполовину; и *criptos* – тайный) – растения, надземные побеги которых с наступлением неблагоприятных условий зимних месяцев отмирают; при этом почки, из которых образуются побеги следующего года, оказываются защищенными почвой и опавшими листьями прошлых лет, например, многие сорные растения: лютики, пырей, одуванчики; многолетние цветы – ирисы, лилии, акониты и др. Эта жизненная форма преобладает в засушливых пустынях.

Следующая группа растений – *криптофиты* или (*геофиты* – от греч. *gē* – земля), их почки возобновления полностью погружены в почву, что обеспечивает их жизнеспособность в условиях почвенной засухи и защищает от зимних холодов. Примерами таких растений служат многолетние травянистые растения: многие луковичные растения, в том числе тюльпаны, нарциссы, топиамбур, картофель и др.

Пятая группа растений – *терофиты* (от греч. *teros* – лето) представляют однолетние растения, отмирающие при наступлении неблагоприятных условий вегетационного периода (например, засуха, ранние, губительные заморозки) или после завершения жизненного цикла «от семени до семени». У таких растений нет зимующих почек или побегов. Возобновление вегетации происходит исключительно семенами, которые физиологически приспособлены к перенесению длительных засух и низких температур. К терофитам относятся практически все однолетние сельскохозяйственные культуры, собранные семена которых используются при посевах под урожай будущего года. Из дикорастущих форм к терофитам относится большая группа однолетников, обитающих в засушливых и полувасушливых регионах, в том числе *эфемеры* – растения осенне-зимне-весеннего

цикла развития и многие виды растений с весенне-летним циклом развития. Соотношение разных жизненных форм по К. Раункиеру в различных климатических зонах мира представлено на рис. 11.11.

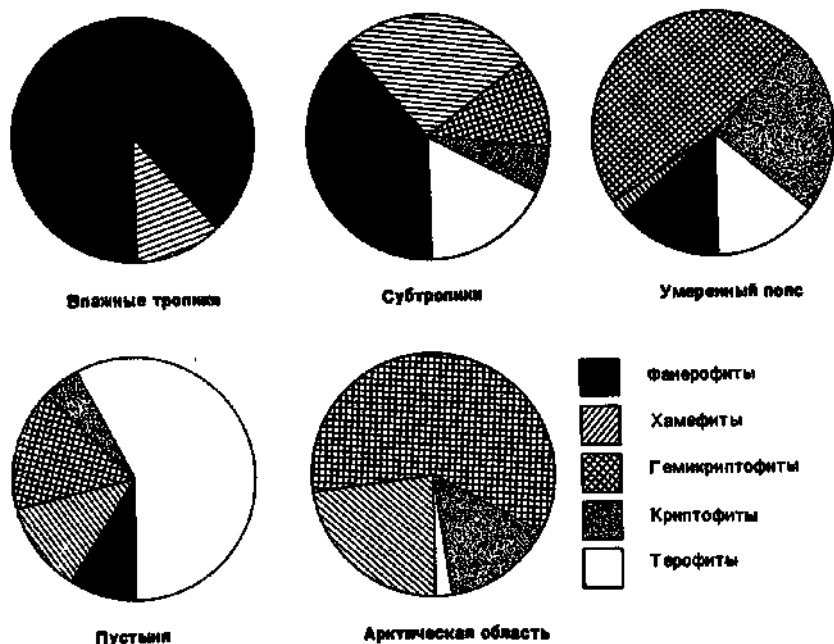


Рис. 11.11. Соотношение разных жизненных форм растений по системе К. Раункиера в местностях, расположенных в разных областях земного шара

11.3. Основные фазы развития растений и этапы органогенеза

Наблюдения за формированием органов у растений в процессе прохождения жизненного цикла дали основание выделить различные фазы развития и роста, так называемые *фенологические фазы развития*. Это – последовательные этапы индивидуального развития растения, характеризующиеся внешне различными морфологическими признаками появления новых органов. Названия фаз соответствуют морфологическим признакам, например кущение, колошение, цветение и т.п., или признакам, характеризующим состояние растения: засыхание, пожелтение, опад листьев и др.

Наблюдения за фазами развития растений называются *фенологическими наблюдениями*, которые регулярно проводятся на сети станций и постов в национальных гидрометеорологических службах стран СНГ в

рамках добровольной фенологической сети Фенологического сектора Географического общества России и ряда других стран мира. Например, на территории стран СНГ такие систематические наблюдения проводятся примерно в 600 пунктах. Целью проведения регулярных фенологических наблюдений является регистрация даты наступления признаков той или иной фазы развития растений. Точность наблюдений определяется строгой периодичностью осмотра растений (ежедневно или через день), знанием наблюдателем признаков наступления фаз и соблюдением методики наблюдений, детально описанных в ряде действующих Наставлений (1985; 2007); Инструкций (1978, 2000) и Руководства (2001).

Погодичная фенологическая изменчивость наступления сезонных явлений варьирует обычно в пределах нескольких дней. Так в условиях Восточно-Европейской (Русской) равнины среднее квадратическое отклонение σ (в днях) даты окончания периода снеготаяния составляет $\pm 10 \dots 11$ дней, даты начала цветения фруктовых садов $\sigma = \pm 7 \dots 8$ дней, сроки наступления осенних фенофаз у листопадных деревьев и кустарников характеризуются $\sigma = \pm 3 \dots 4$ дням. В условиях Юго-Восточных Каракумов средняя многолетняя дата начала вегетации пустынной растительности варьирует в зависимости от вида растения от третьей декады февраля до середины марта, $\sigma = \pm 7 \dots 15$ дней.

У сельскохозяйственных культур на протяжении всего периода их развития отмечаются следующие фазы: *всходы, появление очередных листьев, появление боковых побегов (кущение), рост стебля (стеблевание), появление бутонов и соцветий (бутонизация), раскрытие цветков, формирование семян и плодов, созревание семян и плодов, засыхание (прекращение вегетации).*

Российскими учеными-фенологами (В.А. Батмановым, Н.Т. Нечаевой, А.И. Руденко, А.А. ШигOLEвым, Л.Н. Бабушкиным и др.) была разработана и внедрена в систему ботанических и агрометеорологических наблюдений методика определения фенологических фаз развития для большинства сельскохозяйственных культур и многих видов дикорастущих растений. С признаками наступления фаз развития дикорастущих растений, произрастающих в различных почвенно-климатических зонах бывшего СССР, и основных сельскохозяйственных культур можно ознакомиться в специальной литературе и научно-методических документах.

В зависимости от видовых особенностей растений (в том числе и сельскохозяйственных культур) программами наблюдений предусмотрен определенный набор фаз, характерных для тех или иных объектов наблюдений (табл. 11.1).

Многолетние материалы фенологических наблюдений после определенной статистической обработки используются при составлении фенологических карт, календарей сезонного развития природы, при разработке

Таблица 11.1

**Фенологические фазы основных сельскохозяйственных культур
(Куперман Ф.М., Чирков Ю.И., 1970 и др.)**

Фенологические фазы	Пшеница	Ячмень	Просо	Рис	Кукуруза	Фасоль	Хлопчатник	Подсолнечник	Огурец	Картофель	Томаты
Прорастание семян	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	+
Всходы	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1-й настоящий лист									+	-	+
3-й настоящий лист	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+
5-й настоящий лист							+	-	-	-	-
Кушение	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Выход в трубку	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	
Образование соцветий (колошение, выметывание)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Бутонизация	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+
Цветение	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
Цветение початка	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Конец цветения	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Раскрытие 1-й коробочки	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Молочная спелость	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-
Восковая спелость	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Полная спелость (созревание)	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+
Увядание ботвы	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Прекращение вегетации	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-

фенологических индикаторов, показывающих синхронную связь между отдельными сезонными явлениями и «сигнализирующих» о необходимости проведения тех или иных хозяйственных мероприятий в лесоводстве, виноградарстве и других отраслях растениеводства.

Такие материалы используются также при картографировании природных явлений, в том числе с помощью дистанционных методов, при оценке крупных антропогенных нарушений ландшафтов, связанных с освоением новых территорий и изменяющих естественные циклы развития природы.

Фенологические данные необходимы при разработке фенологических прогнозов в растениеводстве и лесоводстве, при разработке современных методов математической фенологии и в других научно-практических областях знания (Харин Н.Г., Кирильцева А.А., Грингоф И.Г., 1993). Достаточно полная схема объектов изучения фенологии, представляющая собой классификацию фенологии, была предложена А.И. Руденко (1960). Эта схема представлена на рис. 11.12.

Многoletние наблюдения ученых за анатомо-морфологическими изменениями, происходящими в индивидуальной жизни растения, показали, что из участков недифференцированных тканей (*меристемы*), независимо от возраста растений возникают, формируются и развиваются их органы: корни, стебли, листья, цветки и семена (плоды). Этот процесс органобразования называется *органогенезом* (от греч. *genesis* – происхождение, возникновение). Глубокие анатомо-морфологические

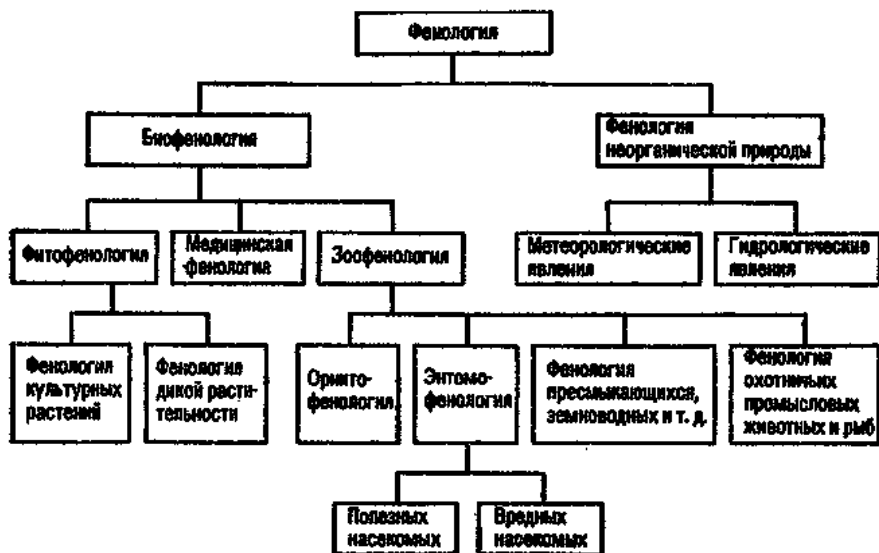


Рис. 11.12. Схема деления фенологии по объектам наблюдений

исследования были выполнены в Лаборатории развития растений в МГУ им. М.В. Ломоносова профессором Ф.М. Куперман и ее учениками в 1936–1980 гг. В специальной литературе ею были детально описаны особенности 12 выделенных этапов органогенеза. Чтобы наглядно проследить всю сложность формирования тканей и органов растения, не различимую при проведении визуальных фенологических наблюдений, приведем упрощенную схему (табл. 11.2).

Таблица 11.2

**Схема формирования элементов продуктивности озимой пшеницы на разных фазах и этапах органогенеза (Куперман Ф.М., 1963;
Куперман Ф.М., Чирков Ю.И., 1970 и др.)**

Фенофазы	Этапы органогенеза	Элементы продуктивности
Прорастание – всходы	I этап Клеточно-тканевая дифференциация меристемы	Прорастание семян, всхожесть, густота стояния растений на 1 м ²
3-й лист - кущение	II этап Дифференциация основания стебля на зачаточные узлы, междоузлия и стеблевые листья	Габитус растения, коэффициент кущения, зимостойкость
	III этап Дифференциация главной оси зачаточного соцветия, члеников колоса, корзинки, початка	Число члеников колосового стержня
Начало выхода в трубку	IV этап Образование конусов нарастания второго порядка (колосовых бугорков)	Число колосков в колосе и продуктивная кустистость
Выход в трубку – начало стеблевания. Колошение. Начало бутонизации.	V этап Закладка покровных органов цветка, тычинок, пестика (дифференциация цветка)	Число цветков в колосках
	VI этап Формирование пыльников и завязи	Готовность цветка к опылению (фертильность)
	VII этап Рост в длину вегетативных органов соцветия	
	VIII этап Завершение процессов формирования всех органов соцветия и цветка	
Цветение, начало налива зерна	IX этап Цветение и оплодотворение	Озерненность колоса, начало формирования плодов
	X этап Рост и формирование зерновки и плодов	Величина зерновки, плодов
Налив, молочная спелость	XI этап Рост и формирование зерновки и плодов	
Восковая и полная спелость	XII этап Превращение питательных веществ в запасные вещества в зерновке и плодах	Масса зерновки и плодов

Эти исследования показали, что все виды однолетних яровых, озимых, а также двулетних и многолетних травянистых и древесно-кустарниковых растений, несмотря на специфические видовые особенности, проходят в своем развитии 12 этапов формирования тканей и органов. Ф.М. Куперман принадлежит заслуга открытия «Закона единства этапов органогенеза высших растений».

Основные положения этого закона заключаются в следующем:

- всем цветковым растениям присуще единство процессов формирования побегов, выражаемое в последовательности прохождения 12 этапов органогенеза;

- различия в продолжительности этапов органогенеза побегов характеризуют основное разнообразие жизненных форм цветковых растений и их долголетие;

- для всех жизненных форм цветковых растений характерно формирование побегов с различными циклами этапов органогенеза;

- закон единства органогенеза проявляется в онтогенетической изменчивости строения органов растений и в морфологической, ярусной изменчивости строения побегов; он отражает количественные и качественные различия биохимических и физиологических процессов, присущих каждому этапу.

Благодаря этому закону выявилась возможность унификации наблюдений за всеми сельскохозяйственными культурами. Единство этапов органогенеза различных видов растений позволило разработать дополнительно к фенологическим наблюдениям новый метод диагностики состояния растений – «экспресс-метод» биологического контроля. Наблюдения за формированием зачаточных органов позволяют на ранних этапах развития достаточно быстро диагностировать заболевания растений, определять степень повреждения их вредителями, выявлять повреждения в период перезимовки, повреждения от засух и суховеев, ранних осенних и поздних весенних заморозков, пыльных бурь и других неблагоприятных для возделываемых культур условий погоды. Практическое использование этого «экспресс-метода» значительно повышает оперативность получения информации о состоянии посевов, особенно в районах, оказавшихся под воздействием опасных для посевов погодных явлений.

На рис. 11.13, 11.14 изображены фенологические фазы и соответствующие этапы органогенеза развития некоторых сельскохозяйственных культур (Куперман Ф.М., 1970 и др. работы).

Хорошо известно, что кардинальным, переломным моментом в жизни каждого растительного организма является переход от вегетативного к генеративному развитию и плодоношению. Согласно представлению известного физиолога растений Д.А. Сабина (1963), продуктивность растения определяется не только интенсивностью ростовых процессов, но и главным

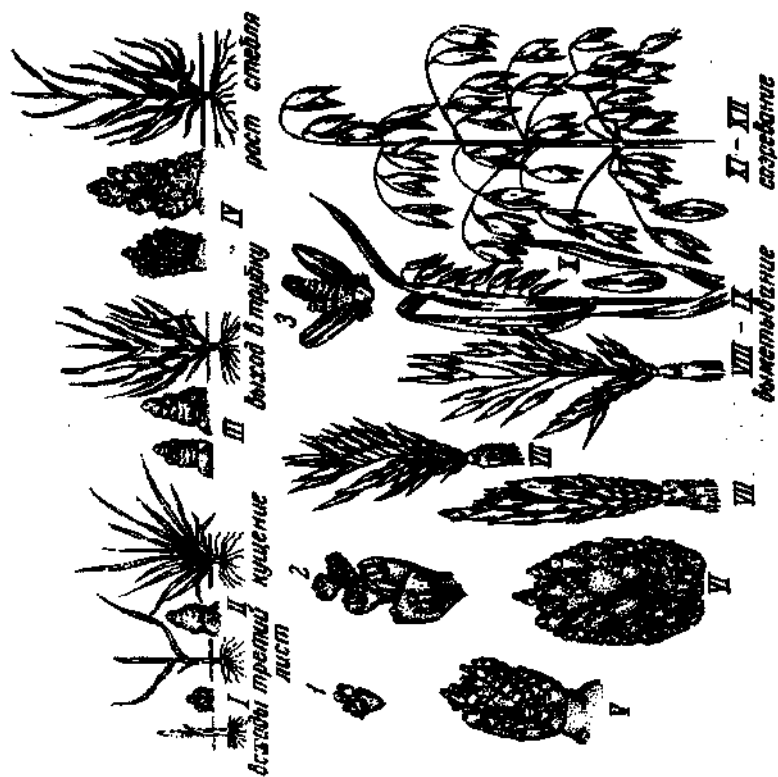


Рис. 11.13. Фенологические фазы и этапы органогенеза овса:

I–XII – последовательные этапы органогенеза овса, 1 – колосок на V этапе, 2 – колосок на VI этапе, 3 – пестик с двумя рыльцами и тычинки в цветке перед цветением (VIII этап органогенеза)

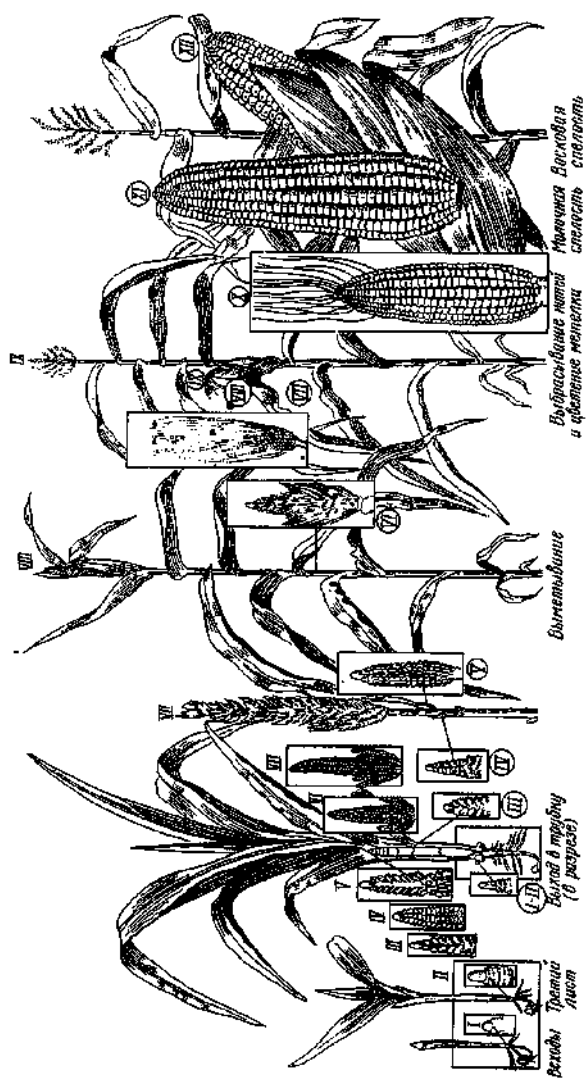


Рис. 11.14. Фазы развития и этапы органогенеза кукурузы (Ф.М. Кулерман):

Этапы органогенеза метелки: I – конус нарастания стебля с зародышевыми листьями, II – вытягивание конуса и формирование узлов и междоузлий зачаточного стебля, III – сегментация конуса нарастания (зачаточной оси соцветия), IV – формирование колосковых листьев, V – формирование цветков, VI – формирование пыльника и образование микрогастер, VII – усиленный рост соцветия, VIII – выметывание, IX – цветение. Этапы органогенеза початка (цифры в кружочках): I – недифференцированный конус нарастания бокового побега, II – вытягивание конуса и дифференциация узлов и междоузлий укороченного побега, III – сегментация конуса нарастания (оси зачаточного початка), IV – формирование колосковых листьев, V – дифференциация цветков, VI – формирование пестика и зародышевого мешка, VII – усиленный рост нитей и початка, VIII – выбрасывание нитей (пестичных столбиков с рыльцами); IX – цветение и оплодотворение, X – формирование зерновки, XI – молочная спелость, XII – восковая спелость

образом развитием. Это определение было убедительно подтверждено исследованиями проф. Ф.М. Куперман на анатомо-морфологическом уровне в процессе исследования этапов органогенеза высших растений.

11.4. Стадии развития растений

В 20–40 годах XX столетия в СССР в циклах развития многих сельскохозяйственных культур были выявлены, так называемые, *стадии развития*. Согласно теории стадийного развития, растения в течение своего онтогенеза проходят определенные, следующие друг за другом стадии: яровизации, световую, плодоношения, для которых характерен специфический обмен веществ. Внутри каждой стадии выделяются фазы, отмечаемые по морфологическим признакам. Видимым внешним морфологическим изменениям в ходе развития растения предшествуют скрытые внутренние качественные сдвиги, осуществляющиеся при определенном сочетании внешних и внутренних условий (в современном понимании – этапы органогенеза). Стадийные изменения, осуществляющиеся в точках роста, определяются внутренними физиологическими изменениями и передаются всем тканям, образующимся из этих почек. На основе этих стадий осуществляется развитие отдельных органов и признаков растения.

Первой стадией развития растительного организма считается *стадия яровизации* – процесс, протекающий в озимых формах однолетних и двулетних растений под воздействием низких положительных температур определенной длительности, способствующий последующему ускорению развития этих растений (Полевой В.В., 1989). Растения, нуждающиеся в яровизации, называются *озимыми*, а развивающиеся без этой стадии – *яровыми*. В условиях умеренного климата Северного полушария главным фактором, определяющим прохождение растением стадии яровизации, является температурный режим. Например, у озимых сортов пшеницы эта стадия проходит при пониженных температурах воздуха и почвы, в пределах от 0 до + 4 °С. Для теплолюбивых растений оптимальны более высокие температуры, около 10...13 °С. Длительность воздействия пониженными температурами, необходимая для прохождения озимыми стадии яровизации, у разных видов и сортов одного и того же вида составляет обычно от 36 до 60 (90) суток. Необходимым условием для прохождения стадии яровизации является сочетание пониженных температур, влажности почвы (воздуха) с периодической сменой светлой и темной частей суток. Яровизация вегетирующей озимой пшеницы проходит нормально при пониженных температурах в условиях «длинного» дня, а при повышенных температурах – при «коротком» световом дне. Используемые во многих научных работах термины «короткий день» и «длинный день» не корректны: поскольку «длина дня» измеряется не в единицах длины, а в часах, то правильнее говорить о *продолжительности дня* или о *продолжительности светлой или темной части суток*.

После завершения стадии яровизации растение должно пройти вторую стадию, главная роль при прохождении которой принадлежит фактору освещенности – *световая стадия*. Последние, т.е. фотопериодические воздействия на растения, возможны только при наличии на них листьев. Роль света на этой стадии ученые-физиологи усматривают при накоплении богатых энергией ассимилятов и воздействии на скорость их передвижения из листьев в точки роста стебля. Кроме этого, фактор света является регулятором процессов дифференциации точек роста и органогенеза в целом.

У растений средних и высоких широт световая стадия (необходимые изменения в точках роста, являющиеся основой дальнейшего развития организма) наступает в условиях либо круглосуточного освещения, либо «длинного» дня, прерываемого относительно небольшими периодами ночной темноты. Растения южных широт успешно проходят световую стадию при небольшой продолжительности дня (Рубин Б.А., 1971).

Рядом ученых предложены и другие стадии развития, например первая стадия эмбриональная, далее, после описанных выше стадий, наступает стадия генеративная, когда происходит закладка генеративных органов растения. Однако сведения о природе таких стадий пока весьма ограничены.

Таким образом, *стадийное развитие* – это прохождение растительным организмом определенных, следующих друг за другом стадий (яровизации, световой, плодоношения и др.), характеризующихся специфическим обменом веществ. В пределах каждой стадии выделяются фазы развития, отмечаемые по внешним морфологическим признакам.

Какова связь этапов органогенеза со стадийным развитием растения? Развитие и рост отдельных органов растения подчинены развитию и росту всего организма. У растения, стадийно подготовленного к образованию какого-либо органа, это образование может не происходить, если отсутствуют необходимые для роста данного органа условия. С другой стороны, даже самые благоприятные для роста органа условия не обеспечивают его образования организмом. Так у растений, не завершивших стадию яровизации, не наблюдается сегментации конуса нарастания, т. е. закладки генеративных органов не произойдет. В период прохождения световой стадии у злаков осуществляется интенсивная сегментация вытягивания конуса нарастания и дифференциация лопастей соцветия, но к закладке самих органов плодоношения (V этап органогенеза) растение приступит только после световой стадии.

В экспериментальных исследованиях показано, что возможно управление процессом органогенеза. Например, воздействуя на определенном этапе органогенеза температурой, светом определенной интенсивности и составом, можно изменить число междоузлий, тип ветвления, строение

цветка, число семян в завязи и т.п. у злаковых растений. Для растений южных широт (в условиях «короткого» дня) процессам органогенеза больше благоприятствуют коротковолновые лучи. Для растений «длинного» дня более благоприятными оказываются длинные лучи (красные) светового спектра. По мере перехода от одного этапа органогенеза к другому в растении изменяются состав пигментов, интенсивность фотосинтеза, скорость роста и другие физиологические процессы (Рубин Б.А., 1971). Все эти важные биологические «детали» развития и роста растительного организма чрезвычайно важны при проведении селекционных работ, в частности создания новых сортов, гибридов и генотипов сельскохозяйственных культур. Вполне понятно, что при изучении агрометеорологических вопросов влияния погодных условий на рост, развитие и формирование продуктивности сельскохозяйственных культур, пастбищной растительности и сеяных трав биологические особенности различных растений имеют первостепенное значение.

11.5. Фотопериодизм растений

Итак, на растения влияют: 1) продолжительность солнечного освещения; 2) интенсивность солнечной радиации; 3) спектральный состав света. Реакция растений на суточный ритм лучистой энергии Солнца (соотношение продолжительности светлого и темного периодов суток) называется *фотопериодизмом* (от греч. *photos* – свет). Это реакция растений на различия в продолжительности дня и ночи, выражающаяся в изменении процессов их роста и развития, проявляется в колебании интенсивности физиологических процессов. Впервые эта закономерность была обнаружена У. Гарниром и Г. Аллардом в 1920 г., получившая название фотопериодизм. Было установлено, что продолжительность светового дня оказывает сильное влияние на процессы органогенеза, на скорость наступления фаз цветения и формирования плодов (семян). По этому признаку растения условно делят на три основные группы, заметим при этом, что имеются многочисленные промежуточные или узкоспециализированные растения по отношению к световому фактору (Шульгин И.А., 1973):

1. *Растения «длинного» или долгого дня*, у которых наступление репродуктивных фаз развития – цветения и плодоношения – ускоряется при продолжительности светлой части суток более 10...12 часов (пшеница, рожь, ячмень, овес, лен, клевер и др.).

2. *Растения «короткого» дня*, развитие которых задерживается при продолжительности светлого времени суток более 10...12 часов (просо, соя, фасоль, кукуруза, рис, хлопчатник, редис, клевер и др.).

3. *Нейтральные растения* – изменение продолжительности освещения не влияет на их развитие и формирование урожая (гречиха, многие бобовые и др.).

Как отмечал известный физиолог растений Н.А. Максимов (1931), «... у растений «долгого» дня при сокращении освещенности до 12 часов преобладает вегетативный рост, и растение развивает значительную листовую поверхность и, вообще, оказывается более мощным; но зато у него подавлена функция воспроизведения. На растения «короткого» дня совершенно такое же действие оказывает удлинение дня до 16...18 часов». Различные сорта одной и той же культуры по-разному реагируют на продолжительность светлого и темного периода суток. В целом можно считать, что растения «длинного» дня приспособлены к условиям северных широт, а «короткого» дня – южных широт.

Весьма информативным климатическим показателем степени освещенности территории является *продолжительность солнечного сияния* (ПСС), представляющая собой суммарное число часов, когда светило Солнце. Иногда этот показатель называют *числом часов солнечного сияния*. Продолжительность солнечного сияния зависит от географической широты, продолжительности светлой части суток (изменяющейся по сезонам и месяцам года) и от режима облачности в пункте наблюдения (рис. 11.15). Суточные количества общей солнечной радиации, поступающей на посевы сельскохозяйственных культур в течение вегетационного периода на разных географических широтах, иллюстрирует рис. 11.16.

На территории бывшего СССР минимальная продолжительность солнечного сияния приходится на декабрь, максимальная – на июль. Иногда этот максимум смещается на июнь, в зависимости от режима облачности. В отличие от большей части названной территории в Дальневосточном

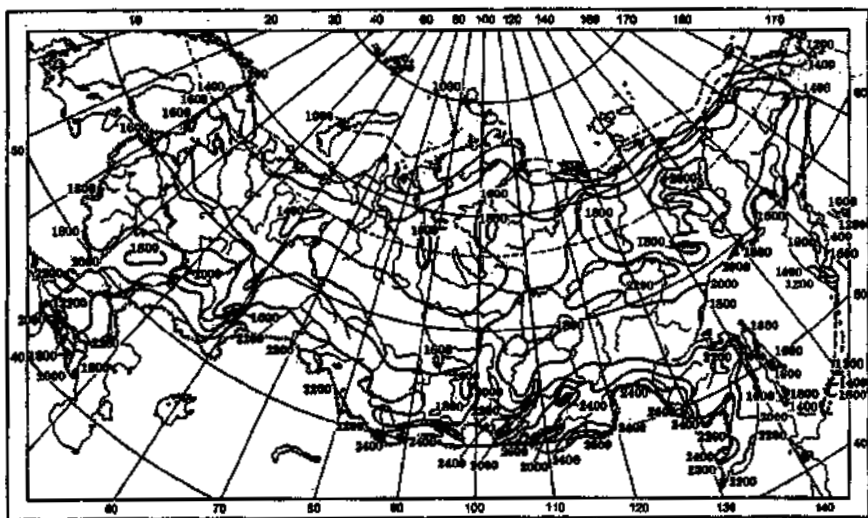


Рис. 11.15. Продолжительность солнечного сияния, ч/год

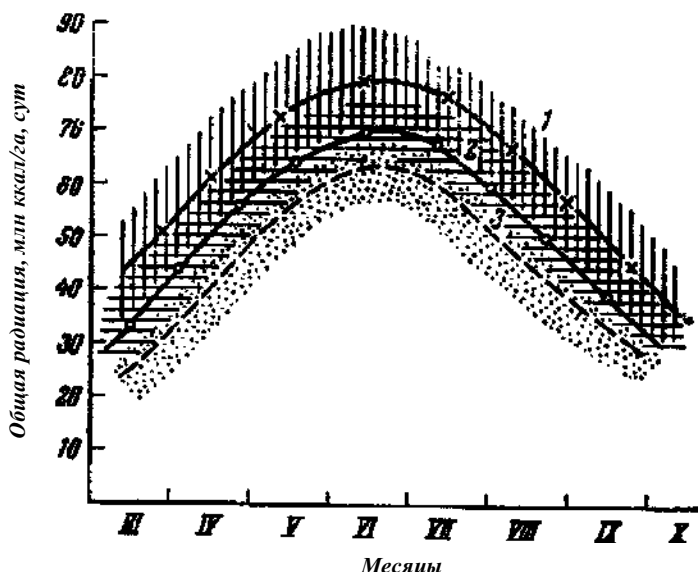


Рис. 11.16. Суточные количества общей солнечной радиации, падающей на посевы в течение вегетационного периода в разных географических зонах (средние многолетние данные): 1 – Ташкент; 2 – Саратов; 3 – Москва

регионе максимум продолжительности солнечного сияния наблюдается в марте, поскольку в летние месяцы там преобладают пасмурные дни, обусловленные господством летнего муссона (Климат России, 2001). В условиях горного рельефа продолжительность солнечного сияния заметно уменьшается, особенно в долинах и котловинах за счет особенностей горно-долинной циркуляции воздушных потоков и режима облачности.

На территории Российской Федерации средняя многолетняя продолжительность солнечного сияния варьирует от 1200 на севере (Кольский полуостров, Таймыр) до 2200 ч на юге (Северо-Кавказский регион) и до 2400...2600 ч на юге Сибири, Забайкалья и в Приморском крае.

Разнообразие освещенности местообитаний растений на Земле чрезвычайно велико. Оно определяется географической широтой местности, высотой над уровнем моря, а также местными особенностями рельефа, характером растительного покрова и т.п. Все многообразие условий обитания исторически способствовало формированию различных групп растений, адаптировавшихся к различным условиям освещенности: интенсивности солнечной радиации, продолжительности освещения растений, особенностям спектрального состава, пространственному и временному распределению света различной интенсивности. По

отношению к свету экологи различают три основные группы растений: *светолюбивые, тенелюбивые и теневыносливые*.

Жизнедеятельность *светолюбивых растений* проходит в условиях оптимального солнечного освещения, сильное затенение действует на них угнетающе. К этой группе относятся растения открытых местообитаний или хорошо освещаемых экологических ниш, например степные и луговые травы (верхние ярусы травостоев), растения высокогорных альпийских лугов, ранневесенние травянистые растения листопадных лесов, большинство сельскохозяйственных культур открытого грунта и сорные растения.

Экологический оптимум *тенелюбивых растений* находится в области слабой освещенности солнечным светом, характерной для затененных местообитаний (пещеры, глубокие расщелины скал, многие комнатные и оранжерейные растения и др.). Однако большинство тенелюбивых растений занимают нижние ярусы сложных фитоценозов, например, в тропических и еловых лесах, в лесостепных дубравах.

В растениеводстве применяется посев однолетних и многолетних бобовых и злаковых трав под покров каких-либо других сельскохозяйственных культур. Это, так называемые, *подпокровные культуры*, раннее развитие которых происходит в условиях затенения более высокорослыми растениями, а после их уборки подпокровные растения получают полное освещение. В качестве подпокровных культур высеваются клевер, люцерна, эспарцет, тимopheевка, овсяница, житняк и др.

Теневыносливые растения характеризуются наиболее широкой амплитудой приспособления к освещенности, занимая промежуточное положение между светолюбивыми и тенелюбивыми растениями. Такие растения хорошо развиваются в условиях полной освещенности и легко адаптируются к ее недостатку. На рис. 11.17 представлена схема экологического оптимума описанных трех групп растений.

Растения каждой из названных групп выработали в процессе эволюции специфические анатомо-морфологические и физиологические «механизмы», позволяющие им полноценно развиваться в различных условиях энергетической освещенности. Анатомическое строение листьев светолюбивых растений отличается хорошо развитой палисадной тканью, состоящей из плотного слоя цилиндрических клеток (иногда в два-три ряда) в мезофилле, около эпидермиса верхней стороны листа. В условиях сильного освещения такие клетки дольше продолжают расти в длину по сравнению с аналогичными клетками «теневых» растений. Поэтому за счет мощной палисадной ткани увеличивается общая толщина листьев светолюбивых растений. На единицу площади такого листа обычно приходится большая масса, чем у «теневых» листьев (табл. 11.3).

Рис. 11.17. Схема экологического оптимума по отношению к свету у тенелюбивого (1), светолюбивого (2) и теневыносливого (3) видов

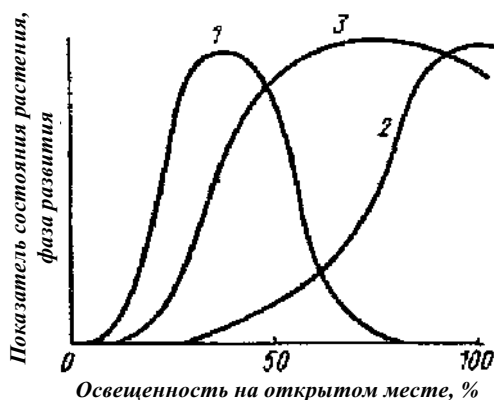


Таблица 11.3

Соотношение массы и площади листа у растений разных экологических групп в средней полосе России (Шульгин И.А., 1973, осредненные данные)

Группы растений	Поверхностная масса листа, г/дм ²		Удельная поверхность листа, дм ² /г	
	сырая	сухая	сырого	сухого
Растения хорошо освещенных местообитаний	2,3	0,5	0,4	2,0
Растения затененных мест	1,5	0,3	0,7	3,1
Древесные породы	1,6	0,5	0,6	2,0
Полевые культуры	2,1	0,4	0,5	2,2

Число хлоропластов на единицу площади листовой пластинки в условиях сильной освещенности в несколько раз превышают таковые у «теневых» растений. При избыточном освещении хлоропласты светолюбивых растений обладают защитной способностью, выражающейся в изменении ориентировки и к перемещению внутри клетки. В таких случаях хлоропласты располагаются по периметру стенок клеток и становятся «ребром» к направлению солнечных лучей. При слабом освещении хлоропласты размещаются в клетке диффузно или скапливаются в ее нижней части.

У «теневых» растений палисадная ткань почти не развита, сложение мезофилла очень рыхлое, хорошо развита система межклетников. Пластинка листа тонкая, с большей удельной поверхностью, что способствует лучшему проникновению солнечного света в глубь листа и даже в глубину растительного покрова.

Подробно эти особенности рассматриваются в специальной ботанико-экологической литературе (Шульгин И.А., 1973; Горышина Т.К., 1979 и др.). Знания об отношении растений к энергетической освещенности широко используются в растениеводстве, садоводстве и агролесоводстве при

подборе культур и древесно-кустарниковых пород для формирования оптимальной структуры агроценозов и создания искусственных лесопарковых территорий.

Животные (от насекомых до млекопитающих) также реагируют на изменения энергетической освещенности, создаваемой солнечным излучением, на изменения спектрального состава и продолжительность светового дня. С этими факторами связаны процессы развития и распространения вредителей и болезней сельскохозяйственных культур, сезонная цикличность их активности, периодов относительного покоя и т.п.

Рост растений не является непрерывным процессом. У большинства растений время от времени наступают периоды замедления и даже полной приостановки ростовых процессов. В состоянии покоя растительный организм может вступать как целиком, так и отдельно частями (семена, корни, клубни). В некоторых случаях растительный организм может находиться в состоянии активного роста, и одновременно отдельные его органы – в состоянии покоя, например «спящие почки».

На любых этапах онтогенеза для растений характерен *период покоя*, например покой на этапе эмбрионального развития (покой зиготы и семян) или покой побегов растений, находящихся на разных фазах вегетативного развития. Семена могут оставаться в состоянии покоя в течение длительного времени, сохраняя при этом свою жизнеспособность.

Переход растения в покоящееся состояние может сопровождаться утратой (опадением) отдельных органов, например листьев осенью или отдельных побегов, когда происходит отмирание надземной части у многолетних трав осенью и т.п. По существу, наступление периода покоя – это не только защитная реакция растений от наступивших неблагоприятных условий среды обитания, но и своеобразный «отдых», замедление обменных процессов в растении, наблюдаемое даже в условиях благоприятных для жизнедеятельности организма. Так для тропических растений характерна временная приостановка ростовых процессов, несмотря на круглогодично благоприятные условия для их роста и развития. Следовательно, период покоя растений – это необходимое звено в онтогенезе растений. Однако следует иметь в виду, что в период покоя многих растений, когда отсутствуют внешние признаки их жизнедеятельности, в органах растений происходят глубокие биохимические, физиологические и анатомо-морфологические изменения. Например, в луковицах тюльпанов (и др. родственных родов) в период летнего покоя происходит «закладка» бутонов, активный рост и цветение которых начнется только будущей весной. Известно также, что искусственная поддержка вегетации некоторых комнатных растений (амариллисы и др.) путем обильного полива в осенне-зимние месяцы (обычно в этот период растения должны находиться в состоянии покоя) приводит к угнетению или полному отсутствию их цветения.

Физиологи различают вынужденный покой и физиологический (или глубокий). *Вынужденный покой* связан с факторами внешней среды: низкие температуры, отсутствие доступной влаги (засуха), препятствующие прорастанию семян, или росту побегов. Как только необходимые для роста и развития условия (температура, влажность) восстанавливаются, растения возобновляют свою жизнедеятельность. Сухие семена не прорастают до тех пор, пока под воздействием влаги они не набухают при положительной температуре среды. При набухании семян возобновляется их активное дыхание, поэтому для нормального процесса прорастания семян необходим доступ кислорода. Семена, находящиеся в толстом слое воды, набухают, но задыхаются и быстро загнивают из-за отсутствия кислорода. Для прорастания семян некоторых растений, наоборот, необходимо подсушивание (томаты). Всхожесть семян кукурузы возрастает по мере того, как содержание влаги в них сокращается.

Покоящиеся почки (глазки) находятся не только на побегах, но и на клубнях, корневищах (например, у георгинов, у огородного хрена, у многих корневищных злаков и осок и др.). Обычно покоящееся состояние почек приходится на холодные месяцы года. Именно в эти месяцы происходят невидимые глазу анатомо-морфологические изменения, подготавливающие дальнейший рост и активную вегетацию при наступлении необходимых условий тепла и влаги. Физиологи считают также, что сигналом для вступления растений в состояние покоя являются сезонные изменения продолжительности светлой части дня и ночи. Растения вступают в покой под влиянием сокращающейся длительности светлой части суток (фотопериодизм) вследствие изменения интенсивности и спектра поступающей к Земле солнечной радиации.

Зимующие почки не распускаются, пока температура окружающей среды не поднимется до определенного уровня и не усилится приток солнечной радиации. В средней полосе России для большинства дикорастущих растений и многих возделываемых в этой зоне сельскохозяйственных культур таким порогом является средняя суточная температура воздуха $\geq 5^{\circ}\text{C}$, а точнее, ее устойчивый переход в сторону повышения.

Физиологический покой связан с состоянием зародыша и его тканей (физиологическая недоразвитость). Для того, чтобы вывести из состояния покоя такие семена, проводится искусственное воздействие для их послеуборочного дозревания. Одним из наиболее эффективных приемов ускорения дозревания зародышей семян является достаточно длительное выдерживание их во влажной среде при температуре около 0°C . Этот прием получил название *стратификации (или яровизации)*. Длительность стратификации у различных растений неодинакова.

У многих растений семена сразу после их созревания не способны к прорастанию, т.к. находятся в состоянии глубокого покоя. У некоторых

растений ко времени высвобождения семян из плодов зародыш еще недоразвит. Развитие зародыша продолжается в семени. Только по истечении некоторого времени, иногда до нескольких месяцев, и при наступлении необходимых условий окружающей среды семена могут прорасти.

Некоторые семена имеют настолько толстую и водонепроницаемую оболочку, что не могут прорасти при обычных условиях окружающей среды. Например, семена многих представителей бобовых: конские бобы, акация, гледичия, клевер, а также растения из семейства *Солянок* (или *Маревых*), *Пасленовых* и др. Известен эксперимент, когда семена акации, находившиеся в благоприятных условиях температуры и влажности воздуха, прорастали вследствие низкой водопроницаемости оболочки на протяжении 30 лет.

Состояние покоя регулируется балансом фитогормонов, стимулирующих и ингибирующих (сдерживающих или замедляющих химические реакции) рост. Покой почек и побегов определяется в основном климатическими условиями, являясь исторически выработанным приспособлением растений к перенесению неблагоприятных внешних условий. Например, у древесных пород верхушечные точки роста (*апекс* – конус нарастания побега или корня) к зиме теряют основную массу воды в протоплазме клеток, прекращают активный рост и покрываются почечной чешуей, превращаясь в зимующие почки. Такая защита значительно повышает морозоустойчивость этих частей растения. У многих других растений на период зимних холодов жизнедеятельность сохраняется в покоящихся органах – луковицах, клубнях, корневищах и т.п. Кстати, эти органы могут быть адаптированы также к периодам длительной, летней почвенной засухи и высоким температурам почвы, например, у многих пустынных растений-многолетников (тюльпаны, ферулы, песчаная осока и др.).

У большинства растений умеренного климата состояние покоя контролируется *фотопериодической реакцией*: «длинный» день ускоряет вегетативный рост, а «короткий» приводит к прекращению роста и формированию покоящихся почек. У многих растений выход почек из состояния покоя возможен только после длительного воздействия низкими температурами. В ряде случаев прорастание семян ускоряется в условиях резкой смены температуры среды, характерной для суточного хода температуры.

Существует большое разнообразие методов искусственного выведения растений из состояния глубокого физиологического покоя. Например, погружение покоящихся веток с цветочными почками плодовых и декоративных культур в теплую воду (или в пары серного эфира) стимулирует их раннее распускание и цветение в зимнее время. Обработка семян и клубней растений веществом *гиббереллином* или облучение красным светом способствует их выходу из состояния покоя и активному росту. Гиббереллин – это химическое кристаллическое вещество, полученное

японским исследователем Е. Куросавой (в 1926 г.) из фитопатогенного гриба (*Gibberella*), обладающее высокой физиологической активностью и являющееся естественным фитогормоном. При опрыскивании листьев растений происходит активное деление и растяжение клеток меристемы, особенно верхушечных участков побегов (апексов), что способствует значительному росту, особенно карликовых растений. Например, высота стеблей конопли под влиянием опрыскивания раствором гиббереллина увеличивается на 30...50 %. Имеются положительные опыты получения крупноплодного винограда после опрыскивания его кистей 0,01-процентным раствором гиббереллина.

Таким образом, значение покоя растений заключается в обеспечении выживаемости организма в неблагоприятных условиях существования. В сельскохозяйственной практике знание биологических (физиологических) особенностей возделывания культур позволяет вести грамотное управление процессами их выращивания и получения устойчивых урожаев.

11.6. Ростовые движения растений

Одной из отличительных черт природы растений от животных является их неспособность к территориальному перемещению. Однако, несмотря на отсутствие возможности у растений менять место произрастания в пространстве в течение индивидуальной жизни, они обладают способностью к движениям. Находясь в благоприятных условиях, высшие растения и их органы осуществляют разнообразные движения. Движения начинаются с прорастания семян и прекращаются при полном отмирании организма. Все движения растений связаны с процессами роста и питания. Способность к движениям реализуется у растений, прежде всего, в непрерывном росте надземных и подземных органов (листья, стебли, побеги, корни), роль которых заключается в «добывании» элементов питания и влаги. Огромные размеры поверхности листьев и корней, которые высшие растения создают в процессе своего онтогенеза, обеспечивают им возможность использовать для этих целей большие массы воздуха и почвы, что является необходимым для их выживания и воспроизводства себе подобных.

Изменения ориентировки органов растений в пространстве называется *тропизмами* (от греч. *tropos* – поворот, направление) – направленные ростовые движения (изгибы) органов растений, вызванные односторонним действием какого-либо раздражителя. Это важнейшее свойство, позволяющее растению наиболее эффективно использовать источники питания, воду, свет и одновременно защищать себя от неблагоприятного фактора.

Геотропизм – способность органов растений принимать под влиянием земного притяжения (гравитации) определенное положение по отношению к центру Земли. Корни растений растут вниз – положительный геотропизм, главные стебли растут вверх – отрицательный геотропизм.

Боковые побеги и корни, растущие «в стороны» имеют менее выраженную геотропическую реакцию, что позволяет растению более активно включать в сферу своей жизнедеятельности большие объемы воздуха и почвы (свет, влага, питательные вещества), а следовательно, развивать большую массу и оставлять более многочисленное потомство.

Фототропизм – ростовые движения растений, вызванные односторонним действием на них света. Например, искривленные верхушки надземных частей растений. Для стеблей растений это – положительный фототропизм. Листья многих растений, живущих в районах с избыточным количеством солнечной радиации, располагаются перпендикулярно к падающим на них лучам Солнца. Движения плоскостей листьев обусловлены главным образом движением их черешков. В основе фототропических изгибов лежит различная скорость роста отдельных участков ткани одного и того же органа в связи с различной (неравномерной) их освещенностью. Свет, как известно, подавляет вторую фазу роста – растяжение клеток. В силу этого обращенная к источнику света сторона органа растет медленнее, чем противоположная ей. Более быстрый рост органа с недостаточно освещенной стороны обуславливает изгиб его по направлению к источнику света.

У некоторых растений существует способность, получившая название *гелиотропизма* – поворачиваться вслед за движением Солнца для получения максимального притока солнечных лучей (подсолнечник, гелиотроп, череда и др.). У большинства видов корни обладают отрицательным фототропизмом, но есть и исключения, например корни лука, обладающие положительным фототропизмом.

Гидротропизм – это способность растущих органов растений изгибаться под влиянием неравномерного распределения влажности в окружающей его среде. Например, в сторону большей влажности у корней растений – *положительный гидротропизм* (рис. 11.18, 11.19), в сторону меньшей влажности – *отрицательный геотропизм*, наблюдаемый у роста некоторых плодовых тел грибов.

Наконец, еще одна форма – *травмотропизм*, выявленный в опытах Ч. Дарвина при воздействии на корни растения ядовитым веществом. Корни изгибаются в противоположную сторону от места, где растением была получена травма. Механические повреждения также относятся к этой категории тропизмов. Удаление части листьев, побегов вызывает ответную реакцию растений, выражающуюся в перестройке всей структуры растительного организма, изменении его габитуса – внешней формы и размеров.

Наряду с тропизмами растениям свойственны и другие формы движения, обусловленные не односторонними, а равномерно действующими раздражителями. К таковым относятся температура, влажность среды, уровень освещенности, которые распределены в окружающем растение

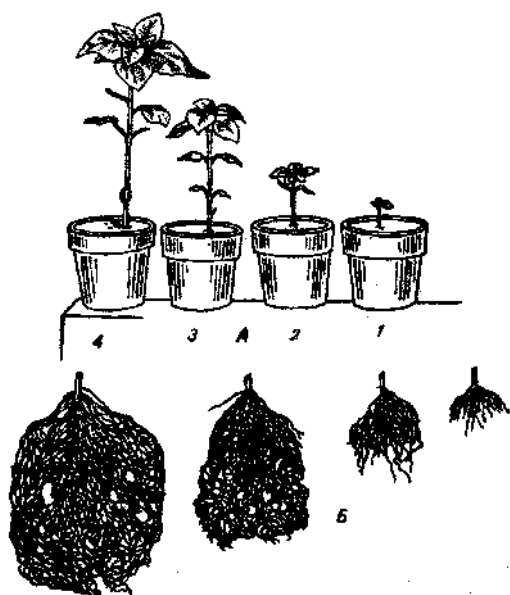


Рис. 11.18. Развитие корневой системы в зависимости от снабжения водой. А – одновозрастные растения подсолнечника, выросшие на одинаковой почве при различном количестве влаги; справа налево: 1 – получало ежедневно минимальное количество воды, 2 – вдвое большее, 3 – вчетверо большее, 4 – в 8 раз больше. Б – соответственные различия в массе корней

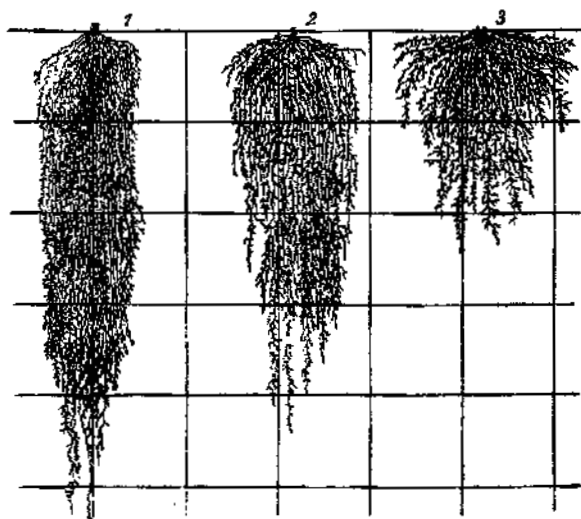


Рис. 11.19. Корни озимой пшеницы при большом количестве осадков (1), при среднем (2) и при малом (3)

пространстве более или менее равномерно. Такие движения называются *настическими* (от греч. *nastos* – уплотненный), т.е. реакциями органов растений (движениями листьев, бутонов, лепестков и др.), не имеющих определенного направления. Эти движения происходят, как правило, из-за неодинакового изменения тургора в клетках органа, реже – под влиянием неравномерного роста клеток, а также под воздействием специфических гормонов. Например, перемещенные из холодных (прохладных) условий в теплые условия (комнатные) цветки крокусов, тюльпанов и др. очень быстро раскрываются (*термонастии*) и, наоборот, закрываются бутоны, цветки у растений, перемещенных (или попавших) в более холодные условия. Та же реакция наблюдается при перемещении цветков из темноты на солнечный свет (*фотонастии*), известны также *гидронастии*, *хемонастии* и т.п.

11.7. Регенерация у растений (физиологическая и травматическая)

Регенерация – (от лат. *regeneratio* – возрождение, вторичное раз-
витие) это восстановление организмом поврежденной или утраченной
части тела. Такая способность широко распространена в мире растений,
причем разнообразие форм регенерации очень велико. Во-первых, это
один из основных неспецифических способов защиты растений, веду-
щих, практически неподвижный, закрепленный образ жизни, защищен-
ный от всякого рода повреждений и травм. Простейшим примером явля-
ется *отава* (повторное отрастание) сенокосных и пастбищных растений,
наступающая после стравливания растительной массы животными или
хозяйственного укуса. Во-вторых, многие формы регенерации исполь-
зуются растениями как способ вегетативного размножения (см. 12.2). В
практической деятельности регенерация растений используется с глу-
бокой древности. Прежде всего, это размножение растений черенками,
которые у многих растений легко укореняются.

Различают *физиологическую регенерацию*, когда восстанавливаются
части растения при их естественном изнашивании, например постоянное
восполнение стирающихся клеток на корневом чехлике, замена старых
элементов ксилемы новыми клетками (у древесных пород), замена коры
у стволов деревьев и т.п.

Заживление травм (ран) у растений происходит благодаря усиленно-
му делению клеток, превращающихся в пробку, а также путем образова-
ния, так называемого, *каллуса* (от лат. *callus* – толстая кожа, мозоль) – не-
организованного деления клеток, из которых формируется новая ткань в
форме нароста.

Восстановление надземных органов у высших растений происходит,
как правило, за счет отрастания покоящихся почек побега в результате
смены этапа органогенеза. Восстановление и активное разрастание части

главного корешка наблюдается при известном агротехническом приеме, называемом *пикировкой рассады*: когда у молодых растений, находящихся в ювенильном возрасте, отщуждается нижняя часть главного корешка.

В результате органогенеза из новообразованных зачатков стеблевые черенки многих древесных и травянистых растений образуют корешки благодаря активации клеток камбия и перицикла. Это пример искусственного вегетативного размножения некоторых растений: при погружении в воду (лучше – в физиологический раствор) листьев с черешками таких комнатных растений, как зумбарские фиалки, герани и др., или черенков древесных пород происходит образование первичных корешков. Таким образом, растения могут восстанавливать как надземные, так и подземные органы и продолжать свой жизненный цикл.

ГЛАВА 12

ФИЗИОЛОГИЯ РАЗМНОЖЕНИЯ РАСТЕНИЙ

Размножение растений – это физиологический процесс воспроизведения себе подобных организмов, обеспечивающий непрерывность существования вида и расселения его представителей в окружающем пространстве (Полевой В.В., 1989). Для высших растений характерно два вида размножения: *половое* и *вегетативное*. В анатомо-морфологическом плане процессы размножения у большинства групп растений изучены довольно подробно. Ниже будут изложены только основные моменты циклов развития растений.

12.1. Половое размножение растений

Цветок покрытосеменных растений – это измененный побег, содержащий вместо обычных зеленых листьев концентрически расположенные листья, модифицированные для размножения. «Классический» тип цветка состоит из *цветоложа* – расширенного конца цветоносного стебля, *чашелистиков* – внешних элементов, обычно зеленого цвета, сходных с настоящими листьями, *лепестков* – часто ярко окрашенных (для привлечения насекомых и птиц, обеспечивающих опыление) и расположенных внутри кольца чашелистиков. Непосредственно внутри кольца лепестков расположены *тычинки* – *мужские части цветка*. Каждая тычинка состоит из тонкой *тычиночной нити* с расположенным на ее конце *пыльником*. Пыльник представляет собой группы *пыльцевых мешочков* (или *микроспорангиев*), содержащие клетки микроспор, так называемые *материнские клетки пыльцы*. Пестик состоит из утолщенной полой нижней части – *завязи*, длинного толстого столбика над ней, который заканчивается наверху утолщенным *рыльцем*. Рыльце обычно выделяет липкую жидкость для улавливания и удержания попавших на пестик пыльцевых зерен. Все части цветка чрезвычайно разнообразны по числу органов, их расположению, форме, окраске.

Цветок, содержащий тычинки и пестики, называется *обоеполым*. Однополые цветки, содержащие только тычинки, называются *тычиночными*, содержащие только пестики – *пестичными*. Ива, тополь, облепиха, финиковая пальма, фисташка, конопля и др. относятся к числу растений, у которых одни особи несут только тычиночные цветки, другие – только пестичные. Растения, у которых тычиночные и пестичные цветки развиваются на одной особи, называются *однодомными*, растения, на которых развиваются только пестичные или только тычиночные цветки, называются *двудомными*.

В завязи, расположенной у основания пестика, находятся одна или несколько *семяпочек*. Материнская клетка *макроспора* в результате нескольких этапов деления превращается в *макрогаметофит* (или зародышевый мешок), представляющий собой восьмиядерную клетку, одна из которых становится *ядром яйцеклетки*.

Внутри пыльцевого мешка происходит развитие микроспор: ядро микроспоры делится, образуя крупное ядро пыльцевой трубки и меньшее по размерам – генеративное ядро. В таком состоянии пыльца (в большинстве случаев) переносится ветром, насекомыми, птицами на рыльца других или того же цветка. При прорастании пыльцы на рыльце образуется пыльцевая трубка, растущая по столбику вниз к семяпочке. Кончик пыльцевой трубки выделяет ферменты, растворяющие клетки столбика. Генеративное ядро перемещается вниз по пыльцевой трубке и делится на два ядра – ядра спермиев. Проникнув в макрогаметофит, оба генеративных ядра сливаются с ним. Возникает, так называемая, *зигота*. После оплодотворения зигота многократно делится и формирует многоклеточный зародыш. Общая схема оплодотворения и образования семян представлены на рис. 6.10 (см. глава 6).

После оплодотворения все части цветка обычно завядают и опадают. Семяпочка вместе с содержащимся в ней зародышем превращается в семя, ее стенки утолщаются и превращаются в жесткие наружные покровы семени. Семя состоит из зародыша и *эндосперма* (от греч. *endo* – внутренний, *sperma* – семя) с запасом питательных веществ, заключенных в прочную оболочку, которая развивается из стенки семяпочки. Семена, таким образом, получают возможность переживать неблагоприятные условия (холод, засуха и т.п.), губительные для взрослых растений, а также расселяться по территории с помощью ветра (*анемохоры*), животных (*зоохоры*) и др.

Нижняя часть пестика, содержащая семяпочки (завязь), разрастаясь, превращается в *плод* – зрелую завязь, содержащую семена – по числу зрелых семяпочек. В обыденной жизни плодами мы называем ароматные, мясистые и разноцветные образования, такие как виноград, вишня, персики, абрикос и др. К плодам также относятся бобы фасоли и гороха, зерна кукурузы, помидоры, огурцы и дыни, а также орехи, крылатые плоды клена и др. *Настоящий плод* развивается только из завязи. Плод, развившийся из чашелистиков, лепестков или цветоложа называется *ложным плодом*. Плод яблони состоит преимущественно из разросшегося мясистого цветоложа, только сердцевина происходит из завязи.

Настоящие и ложные плоды могут быть трех типов: *простые плоды* (например, вишня, черешня, финики и др.), образующиеся из цветка с одним пестиком; *сложные плоды* (ягоды малины, ежевики и др.), развивающиеся из цветка с несколькими пестиками; *соплодия* (например,

ананасы), возникшие в результате срастания плодов одного соцветия (см. рис. 6.10 и 6.11). Различают также плоды сухие, у которых зрелый плод состоит из твердых и сухих тканей и *сочные* плоды, когда в зрелом состоянии они мягкие, мясистые и сочные. Лесной орех – это сухой плод, в котором стенка завязи превратилась в твердую оболочку, окружающую семя. Миндаль – это не «орех», а семя или «косточка» мясистого плода (в зеленом состоянии), близкого к персику. Примерами мясистых плодов, у которых вся внутренняя стенка завязи стала мясистой, могут служить виноград, помидоры, бананы, апельсины, дыни, такие плоды специалисты называют *ягодами*. Персики, сливы, вишни и абрикосы – это *костянка*, или *косточковые плоды*, у которых из наружной части стенки завязи формируется кожура, средняя часть становится мясистой и сочной, а внутренняя часть превращается в твердую косточку, окружающую семя.

У некоторых сельскохозяйственных культур естественным или искусственным путем образуются бессемянные плоды. Например, бананы, культивируемые в течение многих веков, содержат только рудиментарные семена (черные крупинки в плодах), поэтому бананы размножают вегетативным путем. Путем селекции выведены бессемянные (бескосточковые) сорта винограда, апельсинов, огурцов и др.

Признаком естественного созревания семян является их опадение. Однако далеко не у каждого вида опавшие семена получают возможность сразу же прорасти. Для семян большинства видов необходим период покоя, обычно это холодные месяцы года или засушливый период. После относительно длительного периода покоя с наступлением нового вегетационного периода семена оказываются способными к прорастанию. Наиболее длительный период покоя наблюдается у семян, имеющих толстую оболочку, нередко покрытую восковым налетом, которая защищает их от проникновения влаги. Некоторые семена сохраняют жизнеспособность в течение многих лет: до 70 и даже 200 лет (лотос). Установлено, что более высокая энергия прорастания семян сохраняется у семян с толстыми оболочками, с низким содержанием воды, а также в тех случаях, когда основным запасным веществом является крахмал, а не масла.

Семена, находящиеся в состоянии покоя живые, но интенсивность процессов обмена веществ в них чрезвычайно низка. Прорастание семян инициируется обычно влагой и теплом и доступностью кислорода для дыхания. Зародыш и эндосперм поглощают воду, набухают и разрывают семенные покровы. Зародыш освобождается и получает возможность развиваться. Семена многих растений могут прорасти и в условиях без почвы, поскольку для начала развития достаточно питательных веществ, накопленных в эндосперме.

12.2. Вегетативное размножение растений

Вегетативное размножение – воспроизведение себе подобных из частей растения – является типичным свойством растений, отличающее их от высокоорганизованных животных. Биологическое значение такого вида размножения огромно. Благодаря этому способу покрытосеменные (цветковые) растения получили значительное преимущество в конкуренции с голосеменными (например, хвойными) растениями, которым свойственно размножение только семенами. Во многих случаях вегетативное размножение становится единственно возможной формой репродукции, обеспечивающей расселение вида и сохранение генофонда. Существуют три основных способа вегетативного размножения (рис. 12.1):

- 1) размножение отводками и отпрысками – «усами» различной природы, отделяющимися от материнской особи после укоренения;
- 2) размножение клубнями и луковицами;
- 3) обособление частей материнской особи (черенкование, прививка и др.).

Размножение отводками и другими способами. У многих дикорастущих растений широко распространено размножение корневой порослью, т.е. отрастанием при повреждении растения спящих почек в нижней части ствола (пневые побеги), а также корневыми побегами, корневищами, отводками – ветвями, соприкасающимися с почвой (смородина, крыжовник и др.) и образующими на месте соприкосновения с почвой новые корни; плетями – у видов с ползучим стеблем, образующим придаточные корни в узлах (клюква, костяника, лютик ползучий, лапчатка и др.); усами, представляющими собой видоизмененные стебли, из каждой почки которых образуются новые растения (земляника и др.).

Размножение клубнями. Способность к клубнеобразованию формируется в процессе онтогенеза постепенно и проявляется после завершения ювенильного возраста. Вначале развиваются *столоны*, видоизмененные стебли, из которых в дальнейшем образуются клубни. На их образование оказывает влияние температура почвы и продолжительность светлой части суток, чувствительность к которой вырабатывается в листьях благодаря специфическим фитогормонам. Развитие и рост клубней поддерживается притоком к ним продуктов фотосинтеза, образуемых в листьях. При интенсивном процессе клубнеобразования замедляется рост надземных частей растения (картофель, топинамбур, батат, георгины и др.).

У сортов картофеля, выращиваемых в условиях «короткого» дня, вначале происходит рост надземных частей, а затем – интенсивное столоно-клубнеобразование. Для сортов, образующих клубни в условиях «длинного» дня, характерен более продолжительный период вегетации, когда развивается надземная масса, а формирование клубней начинается в условиях сокращения продолжительности дня, т.е. во второй половине лета.



Рис. 12.1. Вегетативное размножение: 1 – размножение земляники усами; 2 – размножение луковицами (слева направо: гиацинт, лилия, крокус); 3 – размножение кустарников отводками (слева направо: горизонтальными, вертикальными, дугообразными); 4 – размножение яблони корневыми черенками (сформировавшиеся на верхнем конце черенка придаточные почки образовали побеги, на нижнем конце развились корни); 5 – размножение бегонии листовыми черенками (новые растения образовались в местах надрезов жилок листа); 6 – укоренившиеся зелёные черенки вишни (вверху: обработанные водным раствором индолилмасляной кислоты концентрации 25 мг/л, экспозиция 24 ч; внизу – необработанные); 7 – размножение вишни зелёными черенками (слева – укоренившийся зелёный черенок, справа – корнесобственный саженец, выращенный из зелёного черенка, после 1 года культуры в питомнике)

Размножение луковичами. Для луковичных растений (лук, чеснок, лилии, тюльпаны, гиацинты и др.) характерным является формирование лукович в условиях «длинного» дня, что связано с эколого-географическим происхождением различных видов. Обычно в период зимнего покоя в луковиче образуются пазушные побеги – будущие дочерние луковички, «детки». У тюльпанов закладка «деток», а также цветков происходит в сухой жаркий летний период, когда надземные части растения засыхают и луковича находится в состоянии покоя.

Одним из видов вегетативного размножения является *прививка растений* – это пересадка отрезка побега (черенка) или почки (глазка) одного растения (привой) на другое (подвой). Прививка почкой называется *окулировкой*. Прививку применяют для закрепления сортовых особенностей многолетних растений, замены подвоя, не приспособленного к данным климатическим условиям; для замены привоя более хозяйственно-ценным, зимостойким, устойчивым к болезням и вредителям, для ускорения плодоношения, создания декоративных и стелющихся или карликовых форм, удобных для машинной и ручной уборки плодовых культур. Известно около 400 способов прививки растений, но наиболее широко применяются около 15 способов.

Еще одна форма прививки называется *аблактировкой* (от лат. *ab* – от + *lac* – молоко): она выполняется путем сближения ветвей или побегов без отделения прививаемой части – привоя от материнского растения. На прививаемых частях делают срезы коры и древесины, эти срезы соединяют, обвязывают и обмазывают садовым варом. После полного срастания привой отделяют от материнского растения и оставляют на корнях подвоя. Обычно этот способ применяют при сращивании далеких растительных форм, прививка которых другими способами не удастся.

Плодовые деревья и кустарники (ягодники) обычно размножают черенками. Этот способ дает хорошие результаты при размножении винограда, смородины, крыжовника, сливы, айвы, облепихи. Подобное размножение практикуется на некоторых лесных и декоративных породах: тополь, ива, жасмин, хризантемы, герани и многие другие. Листовыми черенками размножают бегонию, узумбарскую фиалку (сенполию) и другие. Корневыми черенками размножают малину, ежевику, яблоню, некоторые сорта вишни, сливы и др.

При размножении культур черенками необходимо помнить, что черенки, взятые из различных участков растения, обладают разными свойствами. Если использовать черенки из верхней (плодоносной) части растения, то укоренившиеся молодые растения переходят к фазам цветения и плодоношения значительно раньше, чем растения, выращенные из ювенильных черенков. Это связано с тем, что разные части растений проходят различные стадии развития не одновременно: верхние части

побегов оказываются более подготовленными, стадийно более зрелыми и способными к образованию генеративных органов по сравнению с частями побегов, расположенными ниже.

При помощи прививок развитие черенка значительно ускоряется благодаря развитой и функционирующей корневой системе подвоя. При этом привой сохраняет все свои свойства. Срастание привоя и подвоя происходит следующим образом. Живые клетки вблизи поверхности среза, особенно клетки камбия, коры, сосудистых пучков, начинают интенсивно делиться, заполняя щель между поверхностями подвоя и привоя промежуточными тканями. Через некоторое время клетки привоя и подвоя соединяются плазмодесмами, затем образуются дифференцированные клетки, соединяющие проводящие системы привоя и подвоя.

Таким образом, благодаря работе селекционеров по применению разнообразных методов вегетативного размножения растений число сортов плодовых и ягодных культур, овощных культур, цветочных культур, а также методов межвидового скрещивания ежегодно увеличивается, причем разнообразие их поражает воображение. Но перед селекционерами стоит и другая, наиболее сложная проблема – закрепление в новом сорте полезных, нужных человека качеств и свойств и подавление нежелательных качеств. Однако эти проблемы относятся к компетенции *генетики*, изучение которой не входит в задачи нашего курса.

ГЛАВА 13

ЗНАЧЕНИЕ РАСТЕНИЙ ДЛЯ БИОСФЕРЫ

(космическая роль растений)

*Пища служит источником силы
в нашем организме потому только,
что она – не что иное,
как консерв солнечных лучей.*

К.А. Тимирязев (1937)

Как было отмечено ранее, фотосинтез – единственный процесс на Земле, происходящий в грандиозных масштабах и связанный с превращением энергии солнечного света в энергию химических связей. Эта космическая энергия, запасенная зелеными растениями, составляет основу для жизнедеятельности всех других гетеротрофных организмов на Земле от бактерий до человека.

Органические вещества, первично создаваемые в процессе фотосинтеза, составляют 90–95 % сухой массы зеленых растений. Усвоение элементов минерального питания, сухая масса которых составляет 5–10 %, возможно только при фотосинтезе, поскольку для поступления минеральных веществ из почвы в растения, для передвижения их в растении нужна энергия, первоисточником которой является фотосинтез.

Привносимая в посевы дополнительная энергия в виде минеральных и органических удобрений не заменяет солнечную энергию, а выполняет функции своеобразного катализатора, стимулирующего более полноценное и активное использование этой энергии. Фотосинтез и минеральное питание «поддерживают» друг друга, составляя в целом единую систему питания растений (Ничипорович А.А. и др., 1961).

Около 95,5 % химического состава растений приходится на углерод, водород, кислород, азот, фосфор и серу, потребляемые из атмосферы, воды и почвы. По образному выражению акад. А.А. Жученко (2001), «зеленый лист является главным цехом по производству и накоплению органических соединений, превращая в процессе фотосинтеза каждые 3,75 ккал солнечной энергии в 1 г первичных ассимилятов» (продуктов ассимиляции биохимических соединений в процессе фотосинтеза). Именно поэтому на долю фотосинтезирующих растений наземных экосистем приходится более 90 % годичной продукции органического вещества, которое является источником энергии всего бионаселения Земли, обуславливая динамику его численности и видового состава. Именно эти свойства зеленых растений обеспечивают поддержание экологического равновесия биосферы. Ученые выделяют пять аспектов космической и планетарной роли растений.

13.1. Накопление органической массы

Общая масса растений на Земле в настоящее время составляет 2402,7 млрд т, причем 90 % этой сухой массы приходится на целлюлозу. Общая масса животных и микроорганизмов на Земле оценивается учеными в 23 млрд т., что составляет около 1 % от растительной биомассы, Из этого количества 20 млрд т. приходится на обитателей суши и около 3 млрд т. – на животных и микроорганизмов гидросферы.

Ежегодно в результате процесса фотосинтеза на Земле образуется около 160...180 млрд т органического вещества, что соответствует поглощению 250...300 млрд т CO_2 и выделению 180...200 млрд т O_2 .

Согласно А.А. Жученко (2001), из 180 млрд т. фотосинтезируемой ежегодно на нашей планете общей биомассы на долю пахотных земель приходится 9 млрд т., на долю лугов и пастбищ – 12 млрд т. Из 180 млрд человечество использует лишь около 7 млрд т (менее 4 %), т.е. ничтожную часть от первичной продукции фитоценозов. Растения морей и океанов фотосинтезируют 60...70 млрд т биомассы в год (в пересчете на сухое вещество). В главе 2 отмечалось, что согласно расчетам А.А. Покровского (1975), коэффициент пищевого использования (КПИ) этой биомассы составляет в среднем 0,55 % (0,6 %) Повышение КПИ в основном зависит от достижений генетики, селекции, уровня агротехники (т.е. от общего уровня культуры земледелия). С другой стороны, это подтверждает тезис о том, что энергетические ресурсы биосферы используются еще недостаточно.

За время существования Земли органические остатки растений и животных накапливались и модифицировались. Эти остатки представлены в виде подстилки, гумуса, торфа, из которых при определенных условиях в толще литосферы формировались органические массы в виде каменного угля, нефти и газа. Масса органических веществ подстилки, торфа, и гумуса оценивается соответственно в 194, 220 и 2500 млрд т. Содержание органических веществ (в основном животного происхождения) в осадочных породах океанов и морей оценивается в $20 \cdot 10^{15}$ т. (по углероду). Особенно интенсивное накопление мертвых органических остатков происходило в палеозойскую эру (около 300 млн. лет назад). Запасы древесины, а в последние 200 лет угля, нефти и газа используются человеком для получения энергии, необходимой в быту, промышленности и в сельском хозяйстве.

Еще в 1791 г. швейцарский естествоиспытатель Ж. Сенебье писал: «Я вижу, как моя кровь образуется в хлебном колосе..., а древесина... отдает зимю теплоту, огонь и свет, похищенные ею у Солнца» (цитата по Келлеру Б.А., 1951, с. 300).

13.2. Обеспечение постоянства содержания CO_2 в атмосфере

В процессе образования органических веществ гумуса, осадочных пород и горючих ископаемых выводилось значительное количество CO_2 из круговорота углерода. В атмосфере Земли сокращалось количество углекислого газа, в настоящее время этот газ составляет 0,03 % (по объему), или в (абсолютных значениях) 711 млрд т в пересчете на углерод. В кайнозойской эре 65 млн лет назад содержание двуокиси углерода в атмосфере стабилизировалось, отмечены только его суточные, сезонные и более длительные геохимические колебания. Эта стабилизация достигается сбалансированным связыванием и освобождением CO_2 в процессе фотосинтеза, осуществляемого в глобальном масштабе. Ежегодное поступление CO_2 в атмосферу в пересчете на углерод (млрд т) обусловлено: дыханием растений – 10, дыханием и брожением микроорганизмов – 25, дыханием человека и животных – 1,6, производственной деятельностью людей – 5, геохимическими процессами – 0,05. Все эти цифры даны приблизительно, т.к. различаются у разных авторов.

При отсутствии названного поступления углекислого газа в атмосферу весь CO_2 был бы связан процессом фотосинтеза в течение 6...7 лет. Значительным резервом поступления CO_2 в атмосферу является Мировой океан, в водах которого растворено в 60 раз больше углекислого газа, чем находится в атмосфере. Таким образом, фотосинтез, с одной стороны, – дыхание всех живых организмов и карбонатная система Мирового океана – с другой поддерживают относительно постоянный уровень CO_2 в атмосфере.

Изменение свойств подстилающей поверхности также влияет на изменения климата. Так с развитием сельскохозяйственного производства площади распахки земель и вырубки лесов увеличились, и к концу XX столетия сельскохозяйственные угодья и пашни стали занимать 35...39 % всей площади суши, а доля, занятая лесами, сократилась на 20...24 %. Радиационное воздействие, связанное с хозяйственным использованием земель, оценивается величиной, равной 0,15...0,20 Вт/м² (Оценочный доклад об изменениях климата..., Техническое резюме, 2008). Начиная с 70-х годов XX столетия благодаря интенсивному развитию промышленности, постоянно увеличивающемуся объему сжигания углеродного топлива, масштабной вырубки лесов и разложения гумуса происходит увеличение «выброса» CO_2 в атмосферу в среднем на 0,23 % в год.

13.3. Парниковый эффект

Средний климат Земли определяется поступающей солнечной энергией, свойствами атмосферы и подстилающей поверхности планеты, т.е. отражением, поглощением и излучением энергии в атмосфере и на поверхности Земли. В атмосфере и на земной поверхности происходит

изменения, влияющие на энергетический баланс планеты, вызывающие изменения климата. Одним из факторов этих изменений является повышение концентрации парниковых газов, действие которых проявляется в увеличении поглощения атмосферой исходящей радиации, и повышение содержания аэрозолей – микроскопических частиц капелек влаги. Они отражают и поглощают поступающее солнечное излучение и изменяют радиационные свойства облаков. Масштабы такого воздействия различны в пространстве и во времени. Доминирующим фактором в радиационном воздействии на климат в индустриальную эпоху стало повышение концентрации различных парниковых газов.

Согласно Оценочному докладу об изменениях климата... (т. 1, 2008) основной причиной изменения газового состава атмосферы в индустриальную эру (началом ее условно принято считать 1750 г.) стала возрастающая хозяйственная деятельность людей на Земле – рост потребления энергии в результате сжигания ископаемого топлива и выброса в атмосферу продуктов сгорания. За эти годы значительно сократились площади лесных массивов, произошло масштабное нарушение естественного состояния поверхности почвы и т.п.

Основными парниковыми газами являются: диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O), тропосферный озон (O_3) и водяной пар (H_2O). Количество этих газов (кроме водяного пара) в атмосфере чрезвычайно мало, например объемная концентрация CO_2 – 0,038 %, других газов – не более $2 \cdot 10^{-3}$ %. Однако влияние их на термический режим атмосферы велико.

Концентрация диоксида углерода (CO_2) в атмосфере – наиболее важного из перечисленных газов по влиянию на климат – за последние 250 лет увеличилась на 35%. Средняя годовая *эмиссия* (от лат. *emissio* – испускание, выброс) этого газа за 2000...2005 гг. от сжигания ископаемого топлива составила $7,2 \pm 0,3$ млрд т. На увеличение концентрации CO_2 в воздухе оказывают также влияние масштабные лесные пожары, военные конфликты, извержения вулканов и другие его источники.

Метан (CH_4) является вторым по значимости парниковым газом после CO_2 . Его концентрация увеличилась в 2,5 раза по сравнению с концентрацией в доиндустриальный период.

Содержание закиси азота (N_2O) увеличилось за этот период на 18%. Основными антропогенными источниками тропосферного озона (O_3) являются выбросы оксидов азота (NO и NO_2) индустриальной теплоэнергетикой и транспортом, летучие органические соединения и др.

Водяной пар (H_2O) является основным естественным парниковым газом, хотя хозяйственная деятельность людей не оказывает заметного прямого влияния из-за большого его количества в глобальной атмосфере. Распределение этого газа по земному шару зависит от

температуры воздуха; ее повышение вызывает рост влагосодержания атмосферы, которое, в свою очередь, вызывает усиление парникового эффекта и тем самым способствует дальнейшему повышению температуры воздуха (Оценочный доклад об изменениях климата..., Общее резюме, 2008).

Что такое *парниковый эффект*? Известно, что земная атмосфера сравнительно хорошо пропускает коротковолновую солнечную радиацию, которая почти полностью поглощается земной поверхностью, поскольку ее альбедо мало. Нагреваясь за счет поглощения солнечной радиации, земная поверхность становится источником земного, в основном длинноволнового излучения. Прозрачность атмосферы для этих длин волн мала, и они почти полностью поглощаются в атмосфере, преимущественно водяным паром. Только около 10...20 % земного излучения, проникая сквозь атмосферу, уходит в космическое пространство. Таким образом, «атмосфера поглощает тепловое (длинноволновое) излучение поверхности Земли и переизлучение части этого поглощения обратно к земной поверхности, препятствуя тем самым потере потока этого излучения в мировое пространство. С увеличением содержания парниковых газов в атмосфере количество поглощенной ими тепловой радиации и, следовательно, переизлучаемой в направлении земной поверхности увеличивается, что, в свою очередь, приводит к повышению температуры воздуха у поверхности Земли» (Оценочный доклад об изменениях климата..., том. I, 2008).

Парниковый, или тепличный, эффект атмосферы аналогичен действию стекол (или пленок) теплицы при их нагревании солнечными лучами. Накопление в атмосфере углекислого газа, метана, фторхлоруглеводов, окиси азота (за счет промышленных выбросов), тропосферного озона и аэрозолей, пропускающих коротковолновую радиацию, препятствует, подобно покрытиям теплицы, длинноволновому излучению поверхности Земли. В результате происходит накопление тепла в атмосфере, что и проявляется потеплением глобального климата.

Известно, что в течение длительного времени средняя годовая температура Земли составляла 14 °С с колебанием ± 5 °С. Если бы CO₂ и другие парниковые газы естественного происхождения полностью отсутствовали в атмосфере, то средняя годовая температура воздуха у поверхности Земли была бы равной -19 °С. Увеличение концентрации CO₂ вдвое по отношению к современному состоянию вызвало бы рост средней годовой температуры до + 18 °С.

Итак, парниковый эффект – это свойство атмосферы пропускать солнечную коротковолновую радиацию, но задерживать длинноволновое земное тепловое излучение и тем самым способствовать аккумуляции тепла Землей.

Согласно данным Оценочного доклада об изменении климата... (2008), за период с 1907 по 2006 г. произошло инструментально зафиксированное повышение средней глобальной температуры воздуха на 0,74 °C; а в целом по России – на 1,29 °C. За период 1976...2006 гг. среднее потепление по России достигло 1,33 °C (рис. 13.1).

С позиций физиологов растений отметим лишь главное обстоятельство: повышение содержания в атмосфере количества CO_2 будет способствовать усилению процесса фотосинтеза растений, а также фитопланктона в Мировом океане. Интересные данные о влиянии концентрации углекислого газа, находящегося в среде растений, на продуктивность фотосинтеза приводит акад. Б.А. Келлер (1951) в табл. 13.1.

Таким образом, есть основание полагать, что повышенное изъятие CO_2 из атмосферы будет способствовать интенсивному развитию автотрофных растений и снижению в процессе фотосинтеза избыточного накопления этого газа в атмосфере.

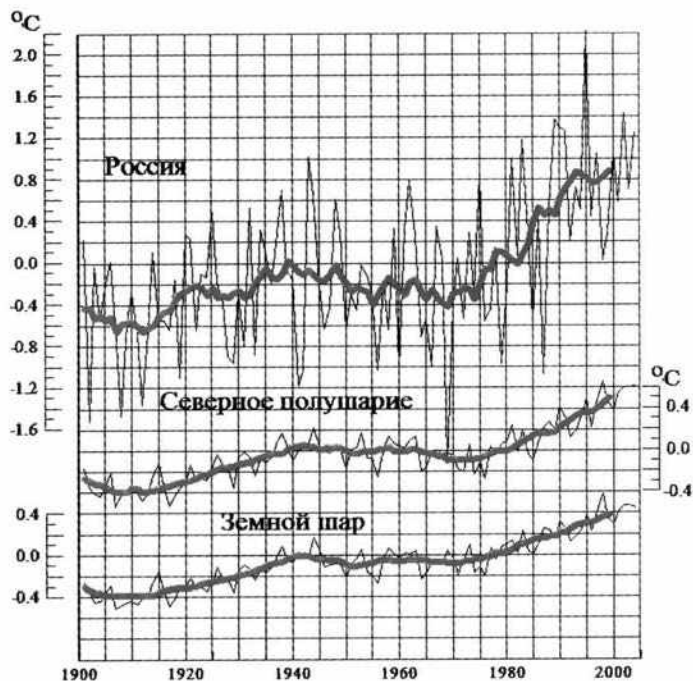


Рис. 13.1. Временные ряды пространственно осредненных аномалий среднегодовой температуры приземного воздуха для территории Российской Федерации, Северного полушария и земного шара, 1901–2004 гг. Жирные линии – значения сглаженных рядов (по результатам, полученным в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН)

Таблица 13.1

Влияние концентрации CO₂ на продуктивность фотосинтеза

Концентрация CO ₂ в воздухе, в среде растений (%)	Усвоение CO ₂ (мг) за 1 час на площади листовой поверхности 50 см ² на «полном свете»
Фасоль	
0,03	4,3
0,09	11,9
Увеличение в 3 раза	Увеличение в 2,7 раза
Картофель	
0,03	3,9
0,18	22,5
Увеличение в 6 раз	Увеличение почти в 6 раз
Овес	
0,03	5,4
0,236	39,4
Увеличение почти в 8 раз	Увеличение в 7,3 раза

13.4. Накопление кислорода в атмосфере

В настоящее время количество кислорода в атмосфере составляет 21 % по объему воздуха. Его появление и накопление в атмосфере связано с жизнедеятельностью зеленых растений. В результате фотосинтеза ежегодно в атмосферу поступает от 70 до 120 млрд т O₂. Этот кислород необходим для дыхания всех гетеротрофов – бактерий, грибов, животных и человека, а также для дыхания растений в темное время суток. Известно, что легкими планеты называют леса, особенно тропические. Лесной покров Планеты обеспечивает постоянное пополнение содержания кислорода в атмосфере. По подсчетам специалистов, весной в среднем 1 гектар леса выделяет за час столько кислорода, сколько необходимо для дыхания 200 человек.

13.5. Озоновый экран

Важнейшим следствием выделения зелеными растениями кислорода является образование озонового экрана в верхних слоях атмосферы, на высоте около 25 км. Озон (O₃) образуется в результате фотохимической *диссоциации* (от лат. *dissociatio* – разъединение, разделение) молекул O₂ под действием солнечной радиации. Озон задерживает большую часть ультрафиолетовых лучей (240...290 нм), губительно действующих на все живые организмы. Следствием загрязнения атмосферы промышленными и другими отходами становится разрушение озонового слоя (толщина которого составляет всего несколько миллиметров!) и образование, так называемых, «озоновых дыр», площадь которых может достигать тысяч квадратных километров. Это может оказаться опасным

для всего живого, и в том числе для человека, оказавшегося в зоне по-добных дыр.

Таким образом, возникнув на первых этапах эволюции жизни, фотосинтез выполняет космическую функцию, производя за счет солнечной энергии огромное количество зеленой биомассы и одновременно поставляя кислород в атмосферу, без которых существование жизни на Земле было бы невозможным.

С полным основанием можно утверждать, что биологическое существование человека и животных целиком зависит от растений: благодаря фотосинтезу зеленых растений атмосфера Земли насыщена кислородом, значительная часть фитомассы служит людям пищей, кроме этого, растения, поедаемые травоядными животными, в свою очередь, являются основой потребления человеком животного белка. Человек получает разнообразные продукты питания, напитки, соки и различные лекарства из всех частей растений: корней, стеблей, листьев, цветков, семян и плодов. Список несъедобных продуктов, получаемых, изготавливаемых из растений и используемых в повседневной жизни, практически, бесконечен: это лесоматериалы, красители, каучук, пробка, мыло, волокна, смолы и т.п.

ЧАСТЬ III

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ КУЛЬТУРЫ И ПАСТБИЩНАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ

ГЛАВА 14

ОСОБЕННОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА КАК ОТРАСЛИ ЭКОНОМИКИ

Одной из главных отраслей материального производства является сельское хозяйство – система возделывания сельскохозяйственных культур и разведения сельскохозяйственных животных – центральное звено агропромышленного комплекса страны. Сельскохозяйственная деятельность – древнейшая форма использования человеком природных ресурсов. Результатом этой деятельности является биологическая продукция и биологические материалы, без которых существование человека невозможно. Получение продуктов продовольствия и сельскохозяйственного сырья для перерабатывающей промышленности – это функция исторически сложившихся природных условий, освоенных технологий сельскохозяйственного производства и принятой в каждой конкретной стране социально-экономической и политической системы распределения материальных ресурсов, в том числе продуктов питания.

Сельское хозяйство, как отрасль материального производства, представляет собой сложную систему, связанную с биологическими особенностями сельскохозяйственных культур и животных, а также с комплексом природных условий, в которых происходит их возделывание и выращивание. Это динамическая система, которая непрерывно адаптируется к изменениям природной среды.

Как система сельское хозяйство характеризуется следующими специфическими свойствами:

- масштабностью использования территорий в различных почвенно-климатических зонах;
- рассредоточенностью объектов производства по территориям в зависимости от их природного комплекса;

- разнообразием видов, сортов и пород возделываемых растений и животных;
- размещением возделываемых культур и выращиваемых пород животных в зависимости от комплекса природных условий (районирование и специализация);
- длительностью процесса производства конечного продукта;
- сезонностью процессов формирования урожая и проведения всех видов сельскохозяйственных работ;
- разнообразием и масштабностью полученных конечных биологических продуктов и материалов, требующих их переработки для использования и длительного хранения;
- относительной (локальной) ограниченностью природных ресурсов, необходимых для производственного процесса (недостаточное увлажнение, дефицит тепла, низкое естественное плодородие почвы и т.п.);
- необходимостью систематической работы по созданию и внедрению новых технологий и агротехнических приемов для поддержки продуктивного функционирования агроэкосистем и их коренной реконструкции (мелиорация, химизация, селекция и т.п.);
- неопределенностью получения запланированного результата, т.е. зависимостью получения конечного продукта от складывающихся погодных (агрометеорологических) условий вегетационных периодов конкретных лет.

Некоторым исключением из названных особенностей являются современные, быстро развивающиеся индустриальные технологии тепличного хозяйства в растениеводстве, а также в отдельных отраслях животноводства – птицеводстве, кролиководстве, звероводстве и др.

В мировой флоре и фауне зарегистрированы сотни тысяч видов растений и животных, но лишь около сотни из них используются человеком для производства основных видов продуктов питания. К числу основных отраслей сельского хозяйства относится *растениеводство*, занимающееся возделыванием сельскохозяйственных культур для производства растениеводческой продукции. Растениеводство обеспечивает население продуктами питания, животноводство – кормами, а различные отрасли – сырьем для пищевой, комбикормовой, текстильной, фармацевтической и парфюмерной промышленности. Все многообразие полевых культур объединено в группы и подгруппы по различным признакам: биологическим, агротехническим, агроэкологическим, производственным и др. Однако любая классификация в значительной мере условна, поскольку некоторые культуры можно одновременно отнести к различным группам. Например, сою – к зернобобовым, масличным и кормовым культурам, лен и хлопчатник – к пряжильным и масличным культурам и т.п. Приведем одну из известных классификаций полевых культур (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Классификация полевых культур
(«Сельскохозяйственному энциклопедический словарь», 1989)

Группы культур	Подгруппы культур	Культуры
Зерновые	Хлебные и крупяные	Озимые (пшеница, рожь, ячмень); яровые раннего срока сева (пшеница, рожь, ячмень, овес); яровые позднего срока сева (кукуруза, рис, сорго, просо, гречиха)
	Зерновые бобовые	Горох, чечевица, бобы, чина, фасоль, нут, соя
Клубнеплоды и корнеплоды	Клубнеплоды	Картофель, топинамбур
	Корнеплоды	Сахарная свекла, столовая свекла, кормовая свекла, брюква, турнепс, морковь, цикорий
Масличные	Жирномасличные	Подсолнечник, клещевина, арахис, рапс, горчица, сафлор, кунжут, хлопчатник, лен, конопля
	Эфирномасличные	Кориандр, анис, тмин, фенхель, лаванда, роза, мята и др.
Прядильные		Хлопчатник, лен, конопля, канатник, кенаф, джут
Кормовые	Однолетние	Травы семейства мятликовые (суданская трава, могар, чумиза и др.); бобовые (вика, клевер, сераделла, люпин)
	Многолетние	Травы семейства мятликовых (тимopheевка, овсяница луговая, райграс, житняк, костер безостый и др.); бобовые (люцерна, эспарцет, клевер, донник, люцерна и др.).
Бахчевые		Арбуз, тыква, кабачок, дыня
Алкалоидные		Табак, махорка, мак и др.

Растениеводство включает следующие главные направления: полеводство (основная отрасль), овощеводство, плодоводство, виноградарство, луговое хозяйство, цветоводство, лесоводство (частично).

В различных регионах земного шара условия для жизни людей складываются неодинаково, поскольку исторически сформировавшиеся в биосфере почвенно-климатические зоны и высотные пояса в горных регионах обладают различными возможностями для продукционного процесса растений и производства биологической продукции.

Большое разнообразие почвенно-климатических условий на территории Российской Федерации и других стран Содружества Независимых Государств (СНГ) позволяет развивать многоотраслевое сельское хозяйство. При сравнении комплекса природных (агроклиматических) условий этой территории с развитыми странами применительно к сельскохозяйственному производству было установлено, что более 30 % территории бывшего СССР относится к малопродуктивному в сельскохозяйственном отношении холодному поясу, в то время как в США такие

условия наблюдаются лишь на Аляске (около 3 % территории всей страны). Более 30 % территории США находится в теплом поясе, где возделывают высокопродуктивные теплолюбивые культуры с продолжительным вегетационным периодом. На территории стран СНГ, включая Россию, такие условия теплообеспеченности культур отмечаются лишь на 5 % территории (Центрально-Азиатский регион), однако из-за низкой естественной влагообеспеченности вегетационного периода возделывание теплолюбивых культур возможно там только при условии искусственного орошения (Жуков В.А., Полевой А.Н. и др., 1989).

На огромной территории Российской Федерации лишь третья часть всех ее посевных площадей расположена в зоне гарантированных урожаев. Для остальных площадей (две трети посевного клина) развитие растениеводства сдерживается холодными, продолжительными зимами, коротким вегетационным периодом и низкой обеспеченностью теплом. Южные регионы страны, обеспеченные теплом и необходимым количеством солнечной радиации, испытывают недостаток естественного увлажнения вегетационного периода. Полевое, неорошаемое земледелие подвержено губительному влиянию частых засушливых явлений, неблагоприятным условиям перезимовки озимых (и плодовых) культур, следствием которых становится снижение урожайности и продуктивности посевов, садов и виноградников.

Агроклиматическими аналогами благоприятным российским земледельческим районам Южного Федерального округа являются в США штаты Индиана, Иллинойс, Айова и Небраска – основного зернового пояса страны, а также некоторые южные районы Канады. Большинство стран Центральной и Южной Европы также расположено в зоне умеренного климата с достаточным увлажнением вегетационного периода.

Средняя биологическая продуктивность одного гектара пашни в США за весь период вегетации превосходит среднюю продуктивность гектара в России в 2,2 раза. В то же время отдельные растениеводческие районы России и Северной Америки весьма близки по условиям тепло- и влагообеспеченности, а также по типам почв. При сравнительной оценке биологической продуктивности сельскохозяйственных культур (Шашко Д.И., 1985) установлено: максимально возможная продуктивность земледельческой зоны России, выраженная в радиационно-температурном потенциале, составляет в среднем 13,4 т/га сухой массы, для Республики Беларусь – 15 т/га, для территории Украины – 17 т/га, для стран Западной Европы – 18 т/га.

Зависимость удовлетворения потребностей человека в продовольствии от сравнительно узкого набора сельскохозяйственных растений и животных повышает уязвимость систем производства продуктов питания от случайных природных явлений.

Неустойчивость погодных условий, смена влажных лет засушливыми, суровых зим теплыми вызывает существенную изменчивость в величине валовых сборов урожаев сельскохозяйственных культур и продуктивности животноводческих отраслей. Кроме того, экстремальные условия погоды, такие, как интенсивные и длительные засухи и суховеи, поздние весенние и ранние осенние заморозки, длительное переувлажнение почвы и наводнения, эпизодическое обширное развитие вредителей и болезней сельскохозяйственных культур, широкое и стремительное распространение заболеваний среди сельскохозяйственных животных (*эпизоотии*), а также возрастающее загрязнение окружающей среды выше предельно допустимых концентраций (ПДК) наносят серьезный урон аграрному сектору экономики и производству продовольствия и биологического сырья для отраслей промышленности.

Основная масса сельскохозяйственной продукции производится в естественных природных условиях. В спектре экономики каждой страны сельское хозяйство – своеобразный «цех под открытым небом». Объемы его производства и качество продукции зависят от количества солнечного света, тепла, влаги, плодородия почвы, уровня культуры земледелия и животноводства. Выдающийся русский ученый-почвовед В.В. Докучаев отмечал, что «почва и климат – суть основные и важнейшие факторы земледелия – первые и неизбежные условия урожаев».

ГЛАВА 15

РОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАСТЕНИЙ

Растения и среда их обитания находятся в сложном и динамичном взаимодействии, интенсивность и характер которого постоянно меняются в зависимости от сезона года, складывающихся агрометеорологических условий, биологических особенностей и фазы развития растений. На это взаимодействие серьезное влияние оказывают агротехнические мероприятия, проводимые человеком в процессе возделывания культур: полив, прополка, рыхление почвы, внесение удобрений или ядохимикатов для подавления популяций сельскохозяйственных вредителей и т.п. При этом нельзя забывать, что экологические факторы действуют на растения не в отдельности, а комплексно. Например, интенсивность фотосинтеза растений зависит не только от биологических особенностей самих растений, но и в значительной мере от ряда условий. К таким условиям относятся: интенсивность ФАР, поступающая на растительный покров, степень затененности растений (густота стояния растений на единице площади), характер облачности (повторяемость, высота, плотность), скорость ветра, запасы влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы и др.

Растения реагируют на изменения внешних условий путем перестройки биологических процессов на биохимическом, физиологическом и клеточном уровнях. Например, на рост и развитие растений оказывает влияние даже слабый дефицит почвенной влаги. Обезвоживание тканей растения, а также повышенная температура среды (приземный слой воздуха и почвы) воздействуют на микроструктуру клеток, на их стенки (мембраны), в которых содержится более 20 % воды от их сухой массы. При более сильном обезвоживании нарушаются органоиды клеточной структуры, снижается содержание хлорофилла, увеличивается содержание каротина, повышается вязкость протоплазмы клеток и т.п.

При высоких температурах воздуха происходит перегрев поверхности листьев и корней, в результате которого закрываются устьица на вегетирующих частях растений с целью сохранения водного баланса растения. Это способствует снижению уровня транспирации растений, падению интенсивности фотосинтеза, которая находится в большой зависимости и от степени увлажнения почвы. В условиях продолжительной засухи развивается депрессия фотосинтеза и возрастает доля затрат энергии на дыхание. Компенсировать эти затраты депрессия фотосинтеза не в состоянии, в итоге происходит снижение продуктивности растения, а в экстремальных условиях и его полная гибель.

Однако при исследованиях влияние различных факторов на изучаемый объект проводится обычно дифференцированно.

15.1. Свет как фактор жизнедеятельности растений

*Солнце и жизнь – эти два представления
человек привык связывать, сопоставлять,
как только стал осмысленно озираться
на окружающий мир и на самого себя.*

К.А. Тимирязев

*Свет есть один из тех архитекторов, которые
участвовали и участвуют в воздвижении здания,
называемого растением... цвет, направление
частей (растений), внутреннее строение
находятся под управлением света.*

А.Н. Бекетов, 1951

В Части I отмечалось, что солнечная энергия – практически единственный источник энергии, тепла и света, определяющий все процессы, происходящие в атмосфере, в водах Мирового океана и на поверхности земли. Благодаря этой энергии стало возможным образование и существование биосферы со всем ее многообразием живого вещества: микроорганизмов, растений, животных и человека.

В 2.1 (Часть I) было рассказано о продолжительности светлой части суток в зависимости от астрономических и географических факторов. Наиболее полную картину динамики изменения продолжительности светлой части суток в течение астрономического года для различных широт Северного полушария применительно к процессу фотосинтеза растений можно составить при анализе табл. 15.1.

Таблица 15.1

Физиологическая продолжительность светового дня (ч, мин) для широт от 0 до 70° на 15-е число каждого месяца (Шульгин И.А., 1973)

Месяц	Широта, град.							
	0	10	20	30	40	50	60	70
I	12–54	12–22	11–54	11–19	10–41	9–49	8–32	5–44
II	12–51	12–35	12–18	12–01	11–39	11–16	10–42	9–40
III	12–51	12–48	12–46	12–48	12–49	12–57	13–08	13–36
IV	12–50	13–06	13–24	13–47	14–13	14–55	16–07	18–55
V	12–53	13–21	13–55	14–35	15–27	16–45	19–16	24–00
VI	12–53	13–31	14–12	15–02	16–08	17–50	22–19	24–00
VII	12–54	13–26	14–04	14–48	15–51	17–24	20–46	24–00
VII	12–51	13–13	13–37	14–06	14–47	15–46	17–37	23–16
IX	12–50	12–55	13–00	13–02	13–26	13–46	14–23	15–38
X	12–51	12–39	12–27	12–17	12–06	11–57	11–41	11–18
XI	12–51	12–25	12–00	11–31	11–00	10–19	9–26	7–12
XII	12–53	12–21	11–47	10–09	10–26	9–26	7–54	4–16

Наклон земной оси, условно соединяющей Северный и Южный полюса Земли, равен $23^\circ 27'$, в связи с чем в экваториальной зоне нашей планеты продолжительность светлого и темного времени суток практически одинакова и составляет около 12 часов. Разница между самым продолжительным и самым коротким световым днем на экваторе незначительна. Для этой зоны характерно наиболее высокое солнцестояние в течение всего года. Приход солнечной энергии к земной поверхности максимален, когда лучи падают на нее под углом 90° . С уменьшением угла падения количество радиации, приходящей на единицу поверхности, уменьшается. Количество прямой радиации, приходящееся на единицу горизонтальной поверхности, S' пропорционально синусу высоты Солнца:

$$S' = S_{90} \sin h_{\odot}, \quad (15.1)$$

где S_{90} – приход радиации на поверхность, расположенную перпендикулярно к лучам; $h_{\odot}$ – высота Солнца.

В субэкваториальной (субтропической) зоне Солнце стоит высоко над горизонтом; с этим связана незначительная разница между самыми продолжительными и самыми короткими днями в году, достигающая 3–4 часов.

В умеренном поясе, где вегетационный период охватывает только теплое полугодие, высота Солнца значительно ниже, по сравнению с южными широтами. Продолжительность светового дня в северных широтах намного превышает таковую в южных широтах Северного полушария. В зависимости от географической широты местности в одни и те же сутки максимальный подъем Солнца над горизонтом различен. Известно, что при определении астрономической продолжительности (длины) дня не учитываются временные периоды – от захода Солнца до наступления ночной темноты (вечерние сумерки) и утренние часы – от окончания ночной темноты до восхода Солнца (утренние сумерки или рассвет). Например, во время вечерних сумерек освещенность, измеряемая в люксах (лк), изменяется от 650...250 лк (в зависимости от облачности) до 1,0...0,1 лк.

В южных районах Северного полушария летом утренние (рассвет) и вечерние сумерки коротки, тогда как в северных широтах они длительны при низком стоянии Солнца. С продолжительностью светового дня связана продолжительность солнечного сияния, т.е. время, в течение которого земная поверхность освещается прямой солнечной радиацией. Продолжительность выражается в часах за сутки и в процентах от возможной величины, т.е. от продолжительности светлой части суток. Изменчивость продолжительности солнечного сияния зависит от сезона и месяца года, от географической широты и высоты местности, а также от климатического режима облачности конкретной территории.

Соотношение продолжительности светлой части суток в самый короткий зимний день и в самый длинный летний день на разных широтах от Экватора до Северного полюса наглядно иллюстрирует рис. 15.1.

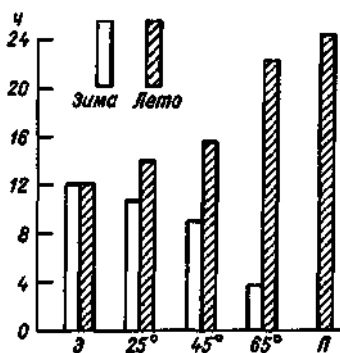


Рис. 15.1. Продолжительность дневной части суток в самый короткий зимний и в самый длинный летний день под разными широтами

Поэтому растения северных районов, длительное время находящиеся под воздействием утреннего и вечернего освещения при низком стоянии Солнца, физиологически (в процессе фотосинтеза) используют рассеянную радиацию утренних и вечерних сумерек. За счет этого удлиняется период вегетации растений. В результате этого малотребовательные к количеству тепла луговые травы и сеяные кормовые культуры успевают в течение короткого северного лета накопить значительную кормовую растительную массу. Длительность дневного освещения в летние месяцы в северных (высоких) широтах дает возможность выращивать ценные овощные культуры в теплицах и парниках.

В южных районах, где период перехода от дня к ночи непродолжителен, значительно возрастает временной вклад высокостоящего Солнца. От высоты Солнца прежде всего зависит мощность его светового потока, которая в северных широтах менее интенсивна, чем в южных широтах, но растянута по времени. Растения получают в основном прямую и рассеянную радиацию, в меньшей степени – отраженную.

Влияние облачности на приход прямой солнечной радиации к поверхности растительного покрова различно. Так, перистые облака незначительно ослабляют прямую радиацию, при высококучевых облаках только некоторая часть солнечных лучей доступна растениям; при слоистых облаках среднего и нижнего ярусов растения совсем не получают прямой радиации. Облачность вообще, а тем более сплошная, сокращает синефиолетовую часть рассеянной радиации, в связи с чем максимум энергии приходится на длинноволновые лучи (0,75...0,80 мкм).

С увеличением высоты Солнца над горизонтом возрастает интенсивность рассеянной радиации. С подъемом высоты Солнца до 50° интенсивность рассеянной радиации при безоблачном небе сравнительно быстро возрастает и составляет около 10 % от прямой радиации; в дальнейшем, эта доля увеличивается незначительно. С увеличением запыленности атмосферы доля рассеянной радиации возрастает.

Усвоение энергии солнечной радиации растениями происходит избирательно: наиболее интенсивно растения поглощают сине-фиолетовые ($\lambda = 0,40 \dots 0,48$ мкм) и оранжево-красные ($\lambda = 0,65 \dots 0,68$ мкм) лучи; менее интенсивно – желто-зеленые ($\lambda = 0,50 \dots 0,58$ мкм) и дальние красные ($\lambda > 0,69$ мкм).

Благодаря приспособленности многих видов и культур растений ориентировать расположение своих листьев и соцветий «вслед за Солнцем», для их роста и развития большое значение имеют прямые солнечные лучи. Растения, произрастающие в северных широтах, получают солнечный свет относительно меньшей интенсивности, чем в южных. В его спектре преобладают инфракрасные лучи. В южных районах в световом потоке преобладает коротковолновая радиация (ультрафиолетовые и синие лучи).

Интенсивность солнечной радиации определяет особенности ростовых процессов, форму и расположение листьев у растений, их строение и цвет. Недостаточная освещенность в посевах обуславливает, например, слабую дифференциацию тканей соломины у зерновых культур, что способствует полеганию растений. В загущенных посевах кукурузы из-за слабой освещенности солнечной радиацией ослабляется образование початков. При слабой освещенности надземных органов растений замедляется поглощение корнями питательных веществ, происходит торможение фотосинтетических процессов в растении.

В условиях холмистого и, особенно, горного рельефа угол падения солнечных лучей на земную поверхность в значительной степени зависит и от угла наклона поверхности и ее экспозиции, т.е. от ориентации по отношению к странам света. Например, при высоте Солнца 30° на горизонтальную поверхность поступает 420 Вт/м^2 , а склон крутизной 10° , обращенный к северу, в полдень получает 286 Вт/м^2 , склон такой же крутизны, обращенный к югу, – 538 Вт/м^2 .

Таким образом, при сравнении с количеством солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, на северный склон поступает всего 68 % этой величины, а на южный склон почти в два раза больше (128 %). Согласно натурным наблюдениям и расчетам, количество солнечной радиации, получаемой северными и южными склонами, по сравнению с горизонтальной поверхностью, и зависит от крутизны склонов и от месяца года. В качестве примера приводится табл. 15.2.

Известно, что максимальная полуденная высота Солнца в Северном полушарии отмечается в день летнего солнцестояния (22 июня), когда светлая часть суток оказывается наиболее продолжительной. Разница в величине солнечной радиации, поступающей на различно экспонированные склоны (северный и южный), становится наименьшей в дни, близкие к 22 июня.

Таблица 15.2

Отношение средних суточных сумм прямой солнечной радиации (Вт/м^2) на северном и южном склонах различной крутизны к суммам на горизонтальной поверхности в различные месяцы года: март–сентябрь (Чирков Ю.И., 1986)

Широта, град.	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Крутизна склона 10°							
Северный склон							
50	0,75	0,86	0,91	0,94	0,93	0,90	0,80
60	0,64	0,80	0,88	0,90	0,88	0,86	0,73
Южный склон							
50	1,22	1,11	1,04	1,01	1,02	1,07	1,14
60	1,34	1,14	1,06	1,07	1,04	1,12	1,21
Крутизна склона 20°							
Северный склон							
50	0,48	0,70	0,83	0,87	0,85	0,76	0,60
60	0,27	0,60	0,77	0,81	0,80	0,68	0,44
Южный склон							
50	1,38	1,18	1,07	1,02	1,04	1,12	1,28
60	1,65	1,29	1,12	1,04	1,07	1,20	1,42

Ранней весной на южных склонах даже с незначительной крутизной 3...5° снежный покров сходит на 7...10 суток раньше, чем на северных. Благодаря этому происходит более раннее прогревание и «созревание» почвы, позволяющее проводить более ранние выборочные посевы. Размещение более теплолюбивых культур на южных склонах обеспечивает вероятность их созревания, особенно в районах с недостаточными ресурсами тепла. Наименьшая высота Солнца отмечается в дни зимнего солнцестояния (22 декабря).

В условиях равнинного ландшафта, одного и того же географического района, на одной и той же широте весной и осенью солнечный свет «богаче» длинноволновыми и «беднее» коротковолновыми лучами, чем летом.

На той же широте, в высокогорье солнечный свет более интенсивен и содержит больше коротковолновой радиации, по сравнению с таковым в равнинной части ландшафта. Поэтому растения, произрастающие в высокогорных районах, отличаются по высоте роста, фазам развития от растений того же вида, растущих внизу, на равнине. Под влиянием изменения условий освещения происходят закономерные морфологические изменения в строении растений. Так, с увеличением абсолютной высоты над уровнем моря заметно уменьшается высота роста растений (сокращение длины междоузлий главного стебля до формы «розеток листьев»), уменьшается размер листьев. В результате воздействия более сильной ультрафиолетовой радиации в высоких горах окраска листьев и цветов становится более интенсивной. При избыточных дозах ультрафиолетовой радиации происходит снижение фотосинтетической активности, снижение высоты роста, уменьшение поверхности листьев и объема продуцируемой

растительной массы. Ярким примером такого влияния является низкорослость растительного покрова и невысокие запасы фитомассы, которыми характеризуются растительные сообщества высокогорий (альпийский пояс).

Отмечено влияние солнечной радиации на закладку узла кущения у озимых зерновых культур. Например, при пасмурной и дождливой погоде узел кущения у озимых формируется близко к поверхности почвы (1–2 см), в то время как при солнечной погоде в условиях достаточного увлажнения верхних горизонтов почвы узел кущения закладывается на глубине 4–5 см.

Биологическое воздействие инфракрасных лучей состоит в тепловом эффекте при их поглощении тканями растений и животных. Инфракрасные лучи, активно поглощающиеся водой листьев и стеблей растений, оказывают тепловое воздействие и заметное влияние на рост и развитие растений.

Солнечная радиация влияет на химический состав растений. Отмечено, что содержание белка в зерне пшеницы, сахаристость винограда и сахарной свеклы тесно связаны с количеством солнечных дней конкретного вегетационного периода, а сахаристость плодовых культур – с интенсивностью солнечной радиации. С увеличением доли прямой солнечной радиации возрастает количество масла в семенах подсолнечника, льна, клещевины, более полно усваиваются фосфаты и калий растениями томатов.

В физическом отношении солнечная радиация чрезвычайно разнообразна – она и волна, и фотон; ее кванты несут разное количество энергии; в ней меняются соотношения спектральных потоков в зависимости от состояния атмосферы и от высоты Солнца над горизонтом; ежедневно изменяется угол «наклона» солнечных лучей и их азимут, ее изменяющаяся интенсивность по-разному влияет на физиологические процессы, протекающие в растениях (Шульгин И.А., 2009).

Таким образом, на растения влияют: продолжительность солнечного освещения, интенсивность солнечной радиации, спектральный состав света.

Зеленые растения синтезируют органическое вещество, которое используется в качестве источника энергии основной массой живых организмов, обитающих на Земле, как непосредственно, так и посредством пищевых цепочек.

Около 95,5 % химического состава растений приходится на углерод, водород, кислород, азот, фосфор и серу, потребляемые из атмосферы, воды и почвы.

15.2. Тепло как фактор жизнедеятельности растений

Лучистая энергия Солнца, достигая поверхности Земли, преобразуется в тепловую. Согласно М.И. Будыко (1971), тепловой баланс земной поверхности складывается из алгебраической суммы радиационного потока тепла (R), приходящего к Земле, и уходящих от ее поверхности тепловых потоков (рис. 15.2):

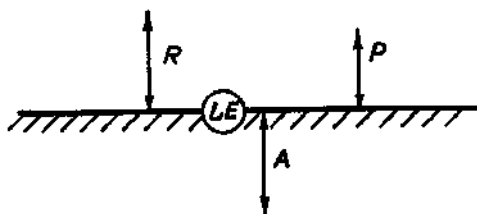


Рис. 15.2. Схема теплового баланса земной поверхности

$$R = LE + P + A, \quad (15.2)$$

где L – скрытая теплота парообразования, E – скорость испарения, P – турбулентный поток тепла от подстилающей поверхности к атмосфере, A – поток тепла от подстилающей поверхности к нижележащим слоям почвогрунтов.

Разнообразие термических условий на земном шаре в значительной мере обуславливает географическое распространение растений и их биологические особенности. Тепловые условия существования биологических объектов ограничены относительно узкими пределами, по сравнению с диапазоном температур, наблюдаемых на Земле. Основные физиологические процессы (фотосинтез, дыхание, транспирация, обмен веществ) и анатомо-морфологические изменения (рост, развитие), протекающие в растениях, определяются температурами не ниже 0°C и не выше 50°C . На рис.15.3 в качестве примера показано взаимное влияние интенсивности света и температуры на скорость фотосинтеза.

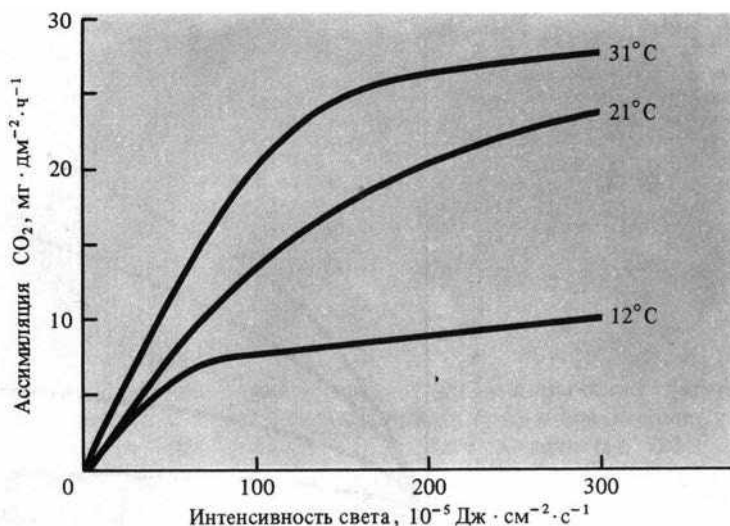


Рис. 15.3. Взаимовлияние интенсивности света и температуры на скорость фотосинтеза

В процессе онтогенетического развития (от семени до семени) потребности растений в тепле различны, что связано с их эволюционным развитием и закреплено на генетическом уровне. Для каждого этапа (фазы развития) жизненного цикла существуют определенные температурные границы – минимум, оптимум, максимум, в пределах которых интенсивность биохимических и физиологических процессов изменяется. Согласно закону Вант-Гоффа, с повышением температуры скорость реакции экспоненциально возрастает. Для количественной оценки такой зависимости используются температурные коэффициенты, показывающие, во сколько раз увеличивается скорость реакции при повышении температуры на 10°C . Ускорение реакции при повышении температуры на 10°C характеризуется коэффициентом (Q_{10}), который определяется из следующего выражения (Лархер В., 1978; Тооминг Х.Г., 1984):

$$\ln Q_{10} = 10 / (T_2 - T_1) \cdot \ln k_2 / k_1, \quad (15.3)$$

где $T_2 - T_1$ – диапазон изменения температуры; k_1 и k_2 – скорости реакции при температурах T_1 и T_2 соответственно.

В небольшом диапазоне температур коэффициент Q_{10} остается сравнительно постоянным и составляет для большинства растений 1,4...2,0, а для физических процессов – 1,03...1,3. При низких температурах Q_{10} больше, поскольку в этих условиях лимитирующими факторами являются ферментативные (внутриклеточные) реакции. При высоких температурах этот коэффициент уменьшается, так как лимитирующее действие оказывают физические процессы, протекающие в растении, например скорость диффузии влаги.

Интенсивность и скорость процессов жизнедеятельности растений целиком определяются температурным режимом среды обитания (при условии, что другие экологические факторы не лимитированы).

Температурный режим вегетационного периода растений достаточно полно характеризуется динамикой сезонного хода температуры воздуха (и почвы), уровнем температуры начала и конца вегетации, минимальной и максимальной температурами и диапазоном оптимальных температур, суммой температур (положительных, активных, эффективных), необходимых растениям для всего периода вегетации и отдельных этапов (фаз) их развития (Бабушкин Л.Н., 1953; Шульгин А.М., 1978 и др.).

Нижняя граница жизнедеятельности растений определяется в основном физическим процессом замерзания клеточного сока, в первую очередь ассимилирующих органов, который наступает при температуре $-1...-2^{\circ}\text{C}$. У некоторых арктических и высокогорных растений, а также у многих вечнозеленых растений нижний предел замерзания наблюдается при $-5...-7^{\circ}\text{C}$.

Верхняя граница жизнедеятельности растений обычно не превышает $50...55^{\circ}\text{C}$, однако имеются сведения о более высоких температурных пределах газообмена у некоторых тропических злаков, достигающих $58...60^{\circ}\text{C}$. Оптимальные температуры для основных функций

жизнедеятельности растений соответствуют климатическим нормам и обладают определенной динамичностью. Температурные пределы, необходимые для жизнедеятельности растений, не являются константами, они могут изменяться в некоторых генетически закрепленных нормах реакции, в результате адаптации растений к складывающимся условиям теплового режима среды их обитания.

Большинство наземных растений являются *эвритермными* (от греч. *eurus* – широкий, *thermos* – теплый), т.е. способными произрастать в достаточно широком температурном диапазоне и переносить значительные колебания внешней среды. Некоторые примеры минимальных и максимальных температур роста отдельных растений приведены в табл. 15.3.

С повышением температуры среды обитания растений интенсивность их роста возрастает до определенных пределов. Усиление роста продолжается до оптимального значения температуры, свойственной биологическим особенностям конкретного вида (сорта) растения. Дальнейшее повышение температуры вызывает угнетение физиологических процессов и, соответственно, снижение интенсивности роста. Наивысшая температура, при которой рост растения еще возможен, называется температурным максимумом этого конкретного вида (сорта) растения.

Таблица 15.3

Минимальные и максимальные температуры роста некоторых сельскохозяйственных культур и других растений, полученные экспериментально физиологами растений (Рубин Б.А., 1971)

Культура	Температуры, ° С	
	Минимальные	Максимальные
Горох посевной (корни)	- 2	44,5
Пшеница	0... - 2	42
Лен-долгунец	3...4	39...40
Кукуруза, просо, могар, соя	9,5	46
Тыква, хлопчатник, рис	12...14	46
Гриб (<i>Aspergillus fumigatus</i>)	15	60
Клен европейский	7	26

Усиление процессов роста при повышении температуры происходит на различных этапах органогенеза с неодинаковой скоростью. Например, скорость роста корней гороха при повышении температуры почвы от 0 до 10 °С возрастает в 9 раз, тогда как в интервале температуры от 10 до 20 °С – всего в 2,5 раза. В соответствии с генетической природой вида (сорта) активный рост корней наблюдается при температурах более низких, чем рост надземных органов того же растения (Рубин Б.А., 1971). Верхний температурный предел роста различных растений также варьирует в широких пределах.

Температурные пределы для процесса фотосинтеза у большинства растений в период активной вегетации примерно на 5 °С уже, чем интервал между повреждением тканей низкими температурами и их гибелью от

перегрева (рис. 15.4). Начало развития и роста побегов в умеренной зоне происходит при температуре на уровне нескольких градусов выше нуля, у тропических растений – при 12...15 °С. Уровень средних суточных температур воздуха начала вегетации и периода формирования генеративных органов неодинаков у различных сельскохозяйственных культур (табл. 15.4).

Таблица 15.4

Биологический минимум температуры в различные периоды вегетации некоторых сельскохозяйственных культур (Степанов В.Н.), °С

Сельскохозяйственная культура	Появление всходов и формирование вегетативных органов	Формирование генеративных органов
Рапс яровой	2...3	8...10
Горох посевной	4...5	8...10
Пшеница яровая, ячмень, овес	4...5	10...12
Чечевица	4...5	12...15
Подсолнечник	7...8	12...15
Просо	10...11	12...15
Фасоль	12...13	15...18
Хлопчатник	14...15	15...20
Рис	14...15	18...20

Так, у озимых и ранних яровых зерновых культур он равен 5 °С, у поздних яровых – около 10 °С, у теплолюбивых культур (рис, хлопчатник и др.) – около 15 °С, у тропических культур (сахарный тростник, финиковая пальма, авокадо или персея американская – ценное плодородное дерево и др.) – выше 20 °С.

Для наступления каждой последующей фазы развития растений необходим более высокий уровень средних суточных температур. Если прорастание семян началось при низкой температуре, то эта фаза будет продолжаться до тех пор, пока не наступят более благоприятные условия, необходимые для появления всходов. При раннем севе в холодную почву развитие проростка задерживается, тогда, как корневая система продолжает медленный рост. При позднем севе, в условиях быстрого нарастания температуры почвы и воздуха, интенсивно растет и формируется надземная часть растений, а корневая система отстает в росте. Поэтому сев зерновых культур в ранние сроки, в более холодную почву, обеспечивает хорошее развитие корневой системы и использование растением влаги из более глубоких слоев почвы. Оптимальный температурный диапазон для фотосинтеза и прироста сухого вещества у большинства видов равен 15...20 °С, активный рост побегов у растений умеренного климата отмечается в пределах 15...25 °С, а у растений субтропической и тропической зон – от 25 до 40 °С.

Температурные пределы для роста и развития растений существенно изменяются в зависимости от биологических возможностей вида к температурной адаптации сезона, фазы развития и времени суток. Например,

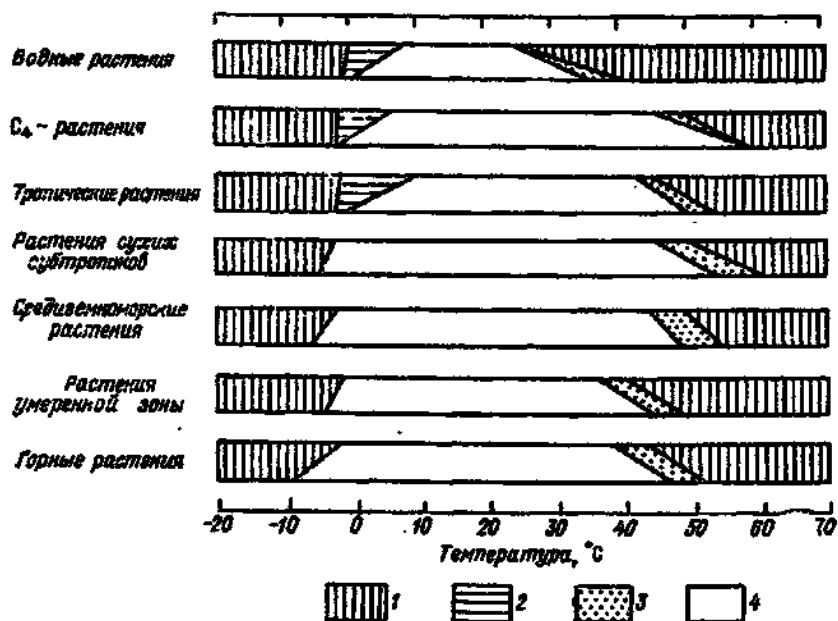


Рис. 15.4. Температурные границы жизни и нетто-фотосинтеза растений в состоянии активной вегетации (Wagner, 1975):

1 – повреждение морозом и высокой температурой; 2 – нарушение обмена веществ при низкой температуре, которое постепенно приводит к необратимым повреждениям; 3 – нарушение поглощения CO_2 при высокой температуре; 4 – область нормальных функций; на верхнем крае выделенных прямоугольников показаны температурные границы для жизни и продуктивности наиболее чувствительных к холоду и жаре растений, на нижнем крае – соответствующие величины для наиболее устойчивых видов

высокая температура почвы и воздуха (более 20 °C) в период формирования цветков в колосе зерновых яровых культур в условиях недостатка почвенной влаги снижает урожай на 20...40 %. Жаркая сухая погода в период налива зерна также значительно снижает урожай зерновых культур.

У теплолюбивых культур угнетение процесса фотосинтеза наступает при температурах 10...12 °C, даже кратковременное охлаждение фотосинтезирующих поверхностей вызывает его нарушение.

Информативной характеристикой тепловых ресурсов территории является показатель суммы среднесуточных температур воздуха за определенный промежуток времени. Во многих климатических и агроклиматических справочниках и атласах приводятся такие значения, определяемые датами устойчивого перехода среднесуточных температур через 0, 5, 10, 15 °C в сторону повышения весной и понижения – осенью.

Потребность растений в тепле выражают обычно суммами активных или эффективных температур. *Суммой активных температур* называется показатель, пропорциональный количеству тепла и выражающийся суммой средних суточных температур воздуха или почвы, превышающих биологический минимум температуры, установленный для определенного периода развития растений. *Суммой эффективных температур* называется показатель, пропорциональный количеству тепла, выраженный суммой средних суточных температур воздуха или почвы, уменьшенных на величину биологического минимума температуры (ГОСТ 17713–89).

Практически расчет сумм активных (или эффективных) температур за вегетационный период или его подпериоды проводят по данным средней декадной (или месячной) температуры, снятой с графика годового хода температуры воздуха пункта наблюдений (рис. 15.5). Например, с графика снимают даты начала (точка А) и конца (точка В) периода с температурой воздуха выше 10 °С. Затем подсчитывается сумма активных температур за каждый полный месяц. Для этого значение средней месячной температуры умножается на число дней в месяце. За неполные месяцы в начале (на отрезке АС) и в конце (на отрезке DB) периода, когда происходит переход температуры через 10 °С, сумма температур подсчитывается по формуле площади трапеции:

$$\sum T = T_{10} + (T_n / 2n), \quad (15.4)$$

где $\sum T$ – сумма температур за неполный месяц в начале вегетационного периода, °С; T_{10} – температура воздуха на дату перехода температуры

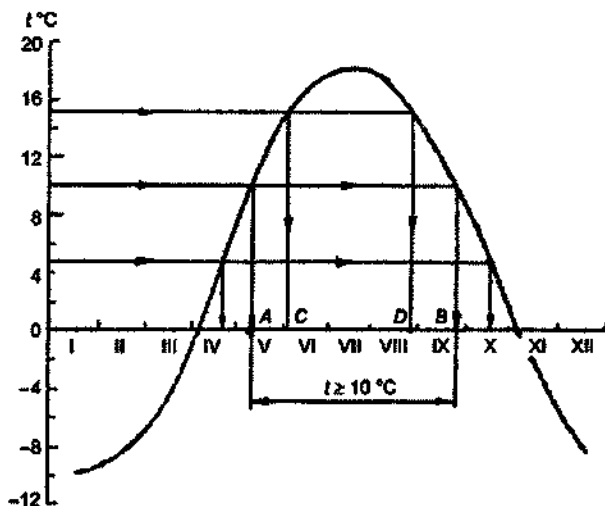


Рис. 15.5. Годовой ход температуры воздуха по данным метеорологической станции «Мичуринск» (Лосев А.П., 1988)

через $10\text{ }^{\circ}\text{C}$; T_n – температура на конец месяца; n – число дней неполного месяца.

В качестве примера приведен расчет суммы активных и эффективных температур воздуха с 10 по 18 мая в табл. 15.5 (Лосев А.П., 1988).

Таблица 15.5

Характеристика температуры воздуха	Числа месяца									Сумма
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Средняя суточная	12,0	10,5	8,6	4,9	7,6	12,0	15,1	18,2	16,0	106,9
Активная	12,0	10,5	0,0	0,0	0,0	12,0	15,1	18,2	16,0	83,8
Эффективная выше $5\text{ }^{\circ}\text{C}$	7,0	5,5	3,6	0,0	2,6	7,0	10,1	13,2	11,0	60,0
Эффективная выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	2,0	0,5	0,0	0,0	0,0	2,0	5,1	8,2	6,0	23,8

На рис. 15.6 приведено географическое распределение среднегодовых сумм активных среднесуточных температур воздуха выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В ранневесенний период нередко отмечаются случаи, когда дневные температуры воздуха способствуют началу вегетации растений, несмотря на то, что средние суточные температуры оказываются ниже биологического минимума (для конкретных растений) за счет ночного выхолаживания. В таких случаях, согласно методике А.А. Шиголева (1951), эффективная температура рассчитывается по данным срочных наблюдений и полученную сумму делят на количество сроков, в которые температура воздуха была выше биологического минимума.

Для уточнения термических условий, необходимых для роста и развития растений, возможно использование суммы дневных и суммы ночных

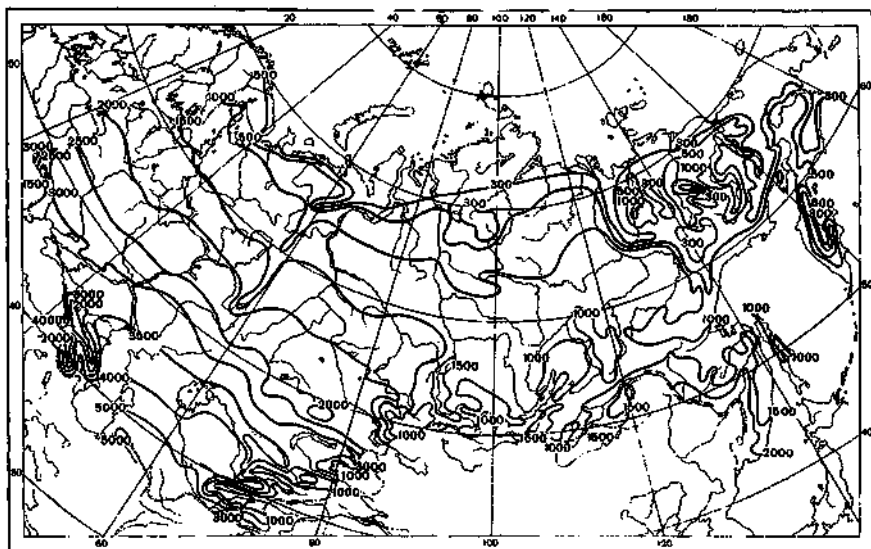


Рис. 15.6. Карта сумм активных температур выше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

температур, поскольку значение среднесуточной температуры и ее суммы нивелируют термические различия в суточном ходе температуры воздуха.

В исследованиях З.А. Мищенко (1984) было показано, что суммы активных температур воздуха не всегда отражают уровень теплообеспеченности растений. Так, было установлено, что при одной и той же сумме активных температур в различных географических зонах складываются неодинаковые условия благодаря различиям в суммах среднедневных и средненочных температур в период, когда температура дня и ночи выше 10 °С. Особенности термического режима дня и ночи имеют физиологическое значение, поскольку продуктивность растений (в том числе сельскохозяйственных культур) определяется количественным соотношением двух процессов – фотосинтеза и дыхания, протекающих в растениях в различные по условиям освещенности и продолжительности светлые и темные часы суток. При одной и той же средней суточной температуре воздуха могут наблюдаться различные сочетания средних дневных и средних ночных температур.

Для примера сравним пять пар метеорологических станций с близкими значениями сумм средних суточных температур воздуха, расположенных примерно на одинаковых широтах, но значительно различающихся по долготе своего местоположения, т. е. находящихся в неодинаковых условиях континентального климата. В таблице эти пары станций размещены в направлении с севера на юг (табл. 15.6). Как видно из этой таблицы, в восточных, более континентальных районах, суммы температур дня значительно превышают средние суточные суммы, а суммы температур ночи меньше средних суточных, по сравнению со станциями, расположенными на западе. Разности между суммами температур дня и ночи возрастают в направлении с северо-запада на юго-восток. Агрометеорологический анализ материалов наблюдений показал, что с увеличением сумм дневных температур наблюдается ускорение в развитии и созревании сельскохозяйственных культур в юго-восточных и восточных регионах, повышение процента содержания белка в зерне и сахаристости в плодах возделываемых культур.

В процессе многолетних исследований агрометеорологами изучены потребности в тепле практически всех сельскохозяйственных, плодово-ягодных, древесно-кустарниковых культур, естественной пастбищно-сенокосной растительности и сеяных кормовых трав. Некоторые примеры потребностей различных сельскохозяйственных культур в обеспеченности их развития приведены в табл. 15.6.

Если сумму температур рассматривать как приближенный интеграл всех воздействий термического фактора на растение за период вегетации, то он оказывается удобным и простым климатологическим показателем термических ресурсов вегетационного периода (Селянинов Г.Т., 1937). Однако для использования этого способа необходимо знать нижний предел эффективных температур применительно к каждой культуре, виду (сортu). Многочисленные исследования показали, что для

Таблица 15.6

Суммы средних суточных ($\sum T_{\text{сред}}$), дневных ($\sum T_{\text{д}}$) и ночных ($\sum T_{\text{н}}$) температур воздуха за период с температурой выше 10°C (Мищенко З.А., 1984), °C

Станции	Высота н.у.м., м	Долгота, град.	$\sum T_{\text{сред}}$	$\sum T_{\text{д}}$	$\sum T_{\text{н}}$	$\sum T_{\text{д}} - \sum T_{\text{н}}$
Сыктывкар	130	50	1460	1650	1000	650
Якутск	100	130	1550	1860	880	980
Новосибирск	140	83	1820	2070	1350	720
Красноярск	156	93	1810	2330	1290	1040
Львов	298	24	2540	2980	2050	930
Кокпекты	511	82	2540	3160	1310	1850
Одесса	43	30	3270	3500	2910	590
Бетпақдала	328	70	3370	4060	2510	1550
Ленкорань	37	49	4310	4980	3740	1240
Чардара	240	70	4300	5760	2620	3140

большинства растений, произрастающих в условиях умеренного климата, нижним пределом эффективных температур начала вегетации является средняя суточная температура 5 °C.

Не останавливаясь подробно на истории развития исследований в части применения метода сумм температур, отметим, что еще в 30...60-е гг. прошлого столетия в СССР получили широкое развитие исследования скорости развития растений, позволившие агрометеорологам количественно определять суммы температур, необходимые для прохождения основных фаз развития возделываемых культур и их сортов.

В ряде публикаций И.Г. Мирошниченко (1928), А.В. Федорова (1935), Л.Н. Бабушкина (1938, 1953, 1964, 2004), А.А. Шиголева (1957); А.А. Скворцова и Л.Н. Бабушкина (1964) и др. были изложены теоретические обоснования связи средней скорости развития растений (за весь вегетационный период или за различные межфазные периоды) с температурой среды их обитания (табл. 15.7).

В основу метода определения скорости развития растений положен постулат о том, что средняя суточная скорость развития в первом приближении находится в прямолинейной зависимости от эффективной температуры, если растение не испытывает недостатка во влаге.

Известно, что физический смысл скорости есть отношение пройденного расстояния (пути) к единице времени. Скорость развития растения – это путь, пройденный растением в своем развитии за единицу времени.

Авторы метода справедливо отмечают, что получаемые с его помощью показатели сумм температур, нижнего и верхнего пределов эффективных температур являются статистическими, а не биологическими

Таблица 15.7

**Суммы эффективных температур, необходимые для наступления фаз
развития некоторых сельскохозяйственных культур
(по данным различных авторов)**

Сорт, район произрастания			Сумма эффективных культур		
Культура		Межфазный период	>5 °С	>10 °С	>15 °С
Озимая рожь		посев – всходы	52		
Озимая пшеница		посев – всходы	67		
Яровая пшеница		посев – всходы	67		
Озимая пшеница Яровая пшеница		колошение – восковая спелость	490...540		
Гречиха		посев – всходы	75		
Просо		посев – всходы	150		
Рис	раннеспелый среднеспелый позднеспелый	посев – созревание		2580 2820 3320	
Кукуруза	среднеспелый среднепоздний позднеспелый	3-й лист – выметывание		420 480 540	
Горох		посев – всходы всходы – цветение цветение – созревание	110 250 290		
Люцерна		весеннее отрастание – бутонизация	560		
Томаты	Европейская часть страны Дальний Восток Узбекистан (сорта различной скороспелости)	образование соцветий – зеленые плоды; образование соцветий – бланжевая спелость; образование соцветий – полная спелость; посев – последний сбор			100...220 200... 380 300...470 1840...2200
Хлопчатник	сорта различной скороспелости	посев – всходы; посев – цветение; посев – раскрытие первых коробочек		970...1100 1720...2120	
Яблоня Яблоня	Россия летние сорта осенние сорта зимние сорта	возобновление вегетации – начало цветения; цветение – созревание		180...240	1400...1500 1550...1600 1700

показателями. Во-первых, стандартные значения средней температуры воздуха получают в психрометрической будке (на высоте 2 м), а не в среде растений, которая в процессе нарастания надземной фитомассы заметно изменяется (фитоклимат среды обитания растений). Во-вторых, все расчеты проводятся по данным среднесуточных температур воздуха, для которых характерна суточная динамика (дневной и ночной ход). В-третьих, скорость развития растения изменяется в зависимости от условий увлажнения почвы: при недостатке влаги скорость развития замедляется, при высоком уровне влагообеспеченности скорость развития возрастает.

«...Вопрос заключается не в том, чтобы заменить суммы температур другим понятием, а в том, чтобы корректировать их путем учета факторов, нарушающих простую пропорциональность напряжения температуры и темпа развития растений, и выявить пределы и степень этого нарушения, т.е. перейти от приближенного интеграла к истинному» (Г.Т. Селянинов). Аналогичные выводы сформулировал и проф. Л.Н. Бабушкин (1953):

«1. Температура является одним из наиболее сильных факторов, действующих на скорость развития растения, но строгой, функциональной зависимости скорости развития растения от температуры среды в естественной обстановке быть не может.

2. Отклоняющиеся случаи в основном объясняются тем, что действия температуры среды на скорость развития растения ослабляются или усиливаются другими факторами среды.

3. Анализ отклоняющихся случаев позволяет установить значение и вклад других факторов среды в процессах изменения скорости развития растения. Следовательно, необходимо установление количественных показателей связи скорости развития растения с компонентами общего комплекса факторов окружающей среды».

Метод используется в оперативном режиме при составлении информации о ходе развития посевов и ожидаемых сроках наступления основных фаз развития растений, например всходов, цветения, созревания и т.п., что имеет большое значение для работников сельскохозяйственного производства. Этот метод в агрометеорологической науке и практике называется «методом Скворцова – Бабушкина». Подробно метод описан в главе 11.

Из сказанного становится ясным, что температура воздуха и корнеобитаемых горизонтов почвы, как фактор жизнедеятельности растений, является объективным показателем этапов их развития, поскольку регулирует интенсивность биохимических и физиологических процессов, протекающих в организме, а, следовательно, и скорость развития растений.

Учет температурного режима, знание особенностей его формирования на сельскохозяйственных полях, в среде растений, а также в условиях

регулируемого климата (теплицы, парники, оранжереи) представляет собой важное условие для получения высоких и устойчивых урожаев в растениеводстве.

Более того, для размещения новых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур необходимы знания о потребности растений в тепле, выраженные, например, в суммах активных или эффективных температур в различные периоды их развития, в предельных условиях их минимальных и максимальных температур, обеспечивающих оптимальные условия для формирования определенного уровня урожая. Оперативные данные о складывающемся температурном режиме необходимы также для расчета сроков и норм посева, количественной оценки состояния посевов в различные периоды их жизнедеятельности, сроков уборки урожая, для прогнозов ожидаемой величины их урожайности и валового сбора.

В последние годы перманентно происходит смена сортов (и гибридов) в результате целенаправленной работы селекционеров страны. Для поддержания современного уровня оперативного агрометеорологического обеспечения сельскохозяйственного производства необходимы агрометеорологические исследования потребностей новых сортов (и гибридов) в условиях температурного и влажностного режимов в процессе их возделывания. *«Если солнце – отец урожая, то вода – мать урожая»* – гласит индийская пословица.

15.3. Влага как фактор жизнедеятельности растений

Академик Вернадский В.И. отмечал: *«Вся масса воды и в жидкой, и в газообразной, и в твердой форме находится в непрерывном движении, переполнена действенной энергией, сама вечно меняется и меняет все окружающее»*.

Вода, как экологический фактор, имеет первостепенное значение в жизни всех без исключения биологических объектов. В тканях растений она составляет 70...95 % сырой массы. Даже самые воздушно-сухие части растений – споры, семена – содержат в себе воду (см. Часть II табл. 9.1). При снижении количества воды в клетках и тканях до критического уровня (например у спор, у семян при их полном созревании) живые структуры переходят в состояние *анабиоза* т.е. состояние, при котором резко замедляется обмен веществ, а видимые проявления жизни не заметны. Такое состояние позволяет живым организмам пережить периоды с неблагоприятными условиями среды обитания, например жаркое, засушливое лето или холодную зиму.

Водная среда объединяет все части организма, начиная от молекул в клетках и кончая тканями и органами, в единое целое. Вода – главный компонент в транспортной системе высших растений. В теле растения водная фаза представляет собой непрерывную среду на всем

протяжении – от влаги, извлекаемой корнями из почвы, до поверхности раздела – «жидкость – газ» в листьях, где она испаряется.

Согласно исследованиям физиологов (Полевой В.В., 1989), в биологических объектах вода выполняет следующие функции:

- вода – важнейший растворитель и необходимая среда для биохимических реакций;

- вода входит в состав молекул белков и участвует в жизнедеятельности клеточных структур;

- вода – *метаболизм* (от греч. *metabole* – перемена), т.е. вещество, возникающее в организме в результате обмена веществ и непосредственный компонент биохимических процессов. Например, при фотосинтезе вода является донором электронов, а также в процессах *гидролиза* (от греч. *hydor* – вода, влага; *lysis* – разложение), т.е. реакция ионного обмена между различными веществами и водой, играющая значительную роль в жизнедеятельности организмов и др.;

- вода – терморегулирующий фактор, защищающий ткани растений от резких колебаний температуры благодаря высокой теплоемкости и большой удельной теплоте парообразования;

- вода – хороший амортизатор при механических воздействиях на растение. Благодаря явлениям *осмоса* (от греч. *osmos* – толчок, давление), т.е. явления медленного проникновения растворов различной концентрации через мембрану клетки и *тургора* (от лат. *turgere* – быть набухшим, наполненным), вода обеспечивает упругое состояние клеток и тканей растений вследствие давления внутриклеточного сока.

Жизнедеятельность наземных растений протекает в почвенной и воздушной среде. Вода поступает в растения через корневую систему в основном из почвы. Лишь для некоторых растений засушливых и тропических регионов свойственно поглощение атмосферной влаги через устьица вегетативных органов. Низшие растения – лишайники, мхи и др. – поглощают влагу всей своей поверхностью из атмосферного воздуха, насыщенного водяным паром, во время дождей, туманов, росы.

В условиях достаточного увлажнения почвы наземные растения создают непрерывный восходящий ток влаги, который начинается на поверхности корневых волосков, пронизывает все растение и заканчивается на испаряющих поверхностях надземных органов, в основном листьев. При этом количество испарившейся влаги (транспирация) должно быть компенсировано равным количеством за счет поглощения влаги корневой системой. Водный баланс растений определяется комплексом факторов: биологическими особенностями самого растения, фазой развития, агрометеорологическими условиями (температура и влажность воздуха, освещенность, ветер, запасы почвенной влаги), густотой стояния на единице площади и др.

При нарушении водного баланса и образовании дефицита влаги в растении происходит ряд физиологических и анатомических изменений, направленных на экономное расходование и сохранение влаги (см. Часть II).

Недостаток запасов почвенной влаги сдерживает развитие корневой системы, а, следовательно, и всего растения. Хорошо известно, что величина продуктивности сельскохозяйственных растений определяется уровнем их потребности во влаге и фактическими запасами почвенной влаги, доступной растениям в течение вегетационного периода. Недороды и неурожаи при интенсивных и длительных засухах, а в экстремальных условиях даже полная гибель урожая – яркие примеры недостатка почвенной влаги для нормального развития и формирования продуктивности сельскохозяйственных культур.

Зависимость продуктивности растений от фактора влаги (при прочих равных условиях) хорошо известна агрометеорологам по многочисленным корреляционным связям. Наименьшей устойчивостью обладают такие связи, установленные с количеством атмосферных осадков, выпавших за тот или иной экологически важный период в жизни растений. Это объясняется тем, что далеко не все выпавшие осадки усваиваются растениями: значительная часть влаги расходуется на поверхностный сток (при ливневом характере осадков), испарение с поверхности почвы и растений, на внутripочвенный сток в более глубокие горизонты почвы, недоступные корневой системе. Более тесные количественные зависимости продуктивности растений с фактором влаги установлены при использовании параметра запасов продуктивной влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы в экологически значимые периоды вегетации растений. Не следует, однако, забывать, что при этом определенная часть запасов влаги расходуется на испарение с поверхности почвы. Наиболее полезной для продукционного процесса растений является влага, прошедшая через растение: часть ее непосредственно участвует в процессе фотосинтеза, но основная доля поглощенной влаги транспортирует минеральные вещества и испаряется через устьица в приземный слой атмосферы. Передвижение воды в почве и в растении имеет сложный характер, определяемый физическими, химическими свойствами самой почвы, а также морфологическими и физиологическими особенностями растений.

ГЛАВА 16

ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ, ПРОГРАММИРОВАНИЕ УРОЖАЕВ, ПРОДУКЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС

16.1. Общие закономерности формирования продуктивности растений

Изучение физиологических основ жизнедеятельности растений, основополагающих процессов фотосинтеза, дыхания, роста и развития позволяют перейти к пониманию формирования продуктивности растений, в частности к их хозяйственно полезной части – урожаю. Экстенсивное ведение сельского хозяйства путем освоения новых земель – распахивания целины, сведения лесов под сельскохозяйственные посевы – привело к разрушению природных экосистем на значительных площадях, созданию агроэкосистем и поселений человека.

По мере развития человеческого сообщества на территориях природных экосистем сформировались разнообразные антропогенные (искусственные) сельскохозяйственные образования – экологические системы однократного и многолетнего использования – *агроэкосистемы*. Напомним, что, в отличие от природных экосистем, агроэкосистемы характеризуются неустойчивостью, но значительно более высокой продуктивностью, поскольку их состав, структура и режим жизнедеятельности возделываемых культур создаются, регулируются и поддерживаются трудом человека с целью получения максимального урожая высокого качества. На достижение этой цели направлена вся совокупность применяемых агротехнических (агротехнологических) воздействий на агроэкосистему.

Применяемые агротехнические мероприятия, осуществляемые на плантациях и угодьях, направлены на получение *первичной продуктивности* агроэкосистем. Процесс целенаправленного производства первичной растениеводческой продукции на промышленной основе тесно связан с природными закономерностями конкретных почвенно-климатических условий территории, сменой сезонов года. Учет почвенно-климатических (агроклиматических) особенностей каждой территории является первоочередным в сельскохозяйственном производстве любого государства, поскольку тепло- и влагообеспеченность возделываемых культур определяет не только спецификацию и набор культур, но, и величину и качество сельскохозяйственной продукции. Например, одним из непеременимых условий ведения неполивного растениеводства является степень естественного увлажнения зоны возделывания многих зерновых и других сельскохозяйственных культур. Изогията ≥ 500 мм/год, выделенная жирной линией, является границей рискованного земледелия (рис. 16.1).

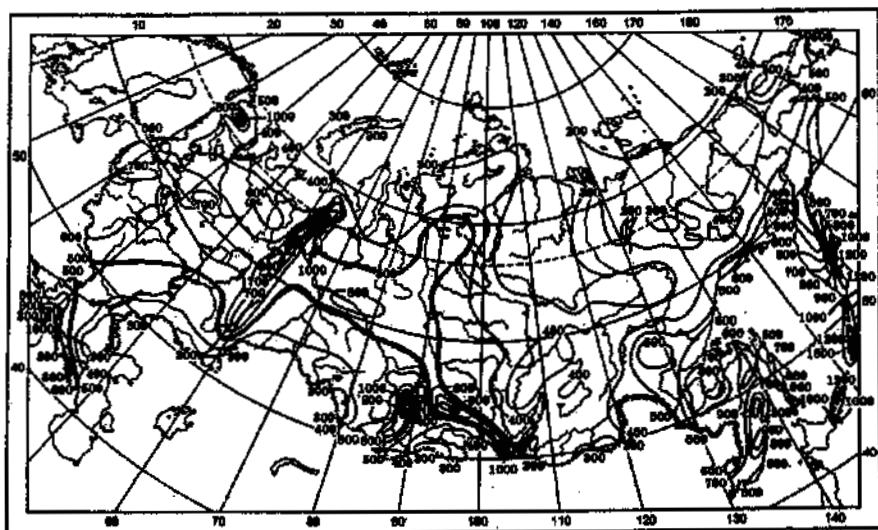


Рис. 16.1. Годовое количество осадков, мм

В 70...80 гг. прошлого столетия в СССР и ряде других государств активно развивались исследования по созданию универсальной методологии управления продукционным процессом возделываемых культур. Основоположителем этого направления – программирование урожаев – стал академик Российской академии сельскохозяйственных наук И.С. Шатилов.

Программирование урожаев – это создание комплекса агротехнических, мелиоративных и защитных мероприятий, своевременное выполнение которых обеспечивает (с заранее рассчитанной вероятностью) получение экономически обоснованного урожая при удовлетворении требований охраны окружающей среды. По мнению проф. Х.Г. Тооминга: «...Программирование урожаев можно рассматривать, как земледелие по принципу максимальной продуктивности. Земледелие по такому принципу означает обеспечение максимального урожая культур и сортов в существующих почвенных, климатических и экономических условиях. Однако максимальные урожаи большинства сельскохозяйственных культур и сортов в разных условиях не известны. Следовательно, первоочередной задачей программирования урожаев является прогноз или расчет максимально возможных урожаев, а также разработка и использование мероприятий (оправданных экономически), обеспечивающих расчетный максимальный уровень урожаев» (1984, с. 225).

При разработке этой методологии использовались достижения многих наук: агрономии, агрометеорологии, почвоведения, агрофизики, математического моделирования, информатики и др. Впервые были описаны три

уровня продуктивности посева (агроценоза): 1) *потенциальный урожай*, 2) *климатически обусловленный урожай* и 3) *действительно возможный урожай*. Основная идея авторов сводилась к тому, что в процессе принятия решений следует использовать естественную временную изменчивость погодных условий, влияющих на рост, развитие растений и продукционный процесс в целом. Академик И.С. Шатилов обосновал три временных уровня принятия решений:

- *перспективный* (или *проектный*) уровень, нацеленный на стратегические решения с временным периодом 10 и более лет;
- *плановый* уровень – тактический, рассчитанный на период одного (текущего) года;
- *оперативный* уровень, предусматривающий принятие решений на ближайшие сутки и декаду.

Теория поддержки решений по управлению продукционным процессом сельскохозяйственных культур, развивавшаяся в рамках методологии программирования урожаев, учитывала изменчивость агрометеорологических условий формирования урожаев и была направлена на совершенствование самих технологических программ. Важнейшими направлениями стала разработка дифференцированных агротехнологий и динамических моделей в системе «погода – урожай», в которых учитывалась временная изменчивость физиологических процессов в растении в связи с динамикой погодных условий и характеристики почвы в корнеобитаемых горизонтах. При этом развивались информационные технологии, создавались базы данных и экспертные системы (табл. 16.1)

Таблица 16.1

Уровни информационных технологий
(Полуэктов Р.А. и др., 1978; Бондаренко Н.Ф. и др., 1986)

Уровень информационных технологий	Точное земледелие	Программирование урожаев
Первый	Традиционные технологии	Традиционные технологии
Второй	Использование компьютеров и программ для экономических расчетов и информации от внешних источников	Программирование урожаев по обобщенным почвенно-климатическим показателям, дифференцировка агротехнологий
Третий	Использование моделей и информации как из внешних источников, так и получаемой непосредственно в хозяйстве	Программирование урожаев с использованием динамических моделей

Интеллектуальным ядром информационных технологий, используемых в точном земледелии, должны являться динамические модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Точное земледелие,

не оставляя в стороне традиционные вопросы обеспечения высокой суммарной продуктивности посевов, выдвигает и ряд других, не менее важных критериев успешности землепользования: поддержание экологической устойчивости агроэкосистем, получение продукции заданного качества и т.п. Для этого в динамические модели должны быть введены показатели экологического состояния агроэкосистем и характеристики качества получаемой продукции (Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И. и др., 2006).

Теория точного земледелия представляет собой естественное развитие и усовершенствование программирования урожая на новом этапе технического прогресса. Современное состояние в агрономической науке сформировалось благодаря появлению новых программно-аппаратных средств, в частности географических информационных систем (ГИС-технологий), а также новых средств измерительной и вычислительной техники. Все это открывает возможности качественно нового информационного обеспечения агротехнологий для принятия решений (различного уровня) в процессе выращивания урожая.

Активно развивающиеся в последние годы ГИС-технологии начали внедряться в сельскохозяйственные отрасли, что позволяет проводить анализ состояния сельскохозяйственного производства на более высоком качественном уровне, в частности:

- оценивать точные площади пахотных земель в зонах интенсивного и рискованного земледелия, продуктивность пахотных земель;
- оценивать динамику сокращения сельскохозяйственных угодий и вывода их из хозяйственного оборота;
- выявлять негативные почвенные процессы, распространение засух, загрязнения, опустынивания;
- обнаруживать признаки поражения культур и ареалов распространения вредителей;
- проводить мониторинг чрезвычайных ситуаций (пожаров, паводков, поздних весенних и ранних осенних заморозков).

В результате использования новых систем информационного обеспечения хозяйствующие субъекты и органы управления Агропромышленного комплекса различных уровней могут получать полномасштабную оперативную информацию о состоянии сельскохозяйственных угодий, о динамике развития основных возделываемых культур, что повысит эффективность производственной деятельности и качество принимаемых управленческих решений.

Применение современных методов ГИС-технологий содействует значительному снижению потерь времени на таких основных направлениях организации сельскохозяйственного производства, как построение математико-картографических моделей, проведение прикладного районирования и т.п. (Гордеев А.В., Клещенко А.Д. и др., 2006).

Процесс целенаправленного производства первичной растениеводческой продукции на промышленной основе тесно связан с природными закономерностями конкретных почвенно-климатических условий территории, ее биоклиматического потенциала, сменой сезонов года и др.

Важнейшим физиологическим принципом любого организма является поддержание на постоянном уровне необходимого количества воды в клетках и тканях. Питательные вещества циркулируют по растению в форме водных растворов. В таком же виде транспортируются и выносятся из организма продукты диссимиляции. От количества воды и растворенных в ней солей зависит метаболизм на клеточном и межклеточном уровнях. В то же время растения-мезофиты неэкономно расходуют воду, поступающую в основном через корневые системы. Установлено, что продуктивность транспирации (отношение прироста величины сухой массы к расходу воды в единицу времени) составляет от 1/200 до 1/1000 (чаще 1/300). При усвоении 1 г углекислоты (CO_2) растение в среднем теряет с транспирацией 360 г воды. Однако эта величина соответствует потребностям растения, хотя и является в основном бесполезным расходом воды (Максимов Н.А., 1944). Следовательно, растения усваивают только незначительную часть водных ресурсов, которые доступны ему.

Любое растительное сообщество развивается в двух средах – в верхних слоях почвогрунтов и в приземном слое атмосферы. Жизнедеятельность растений в значительной мере определяется физическими, химическими и биологическими свойствами почвы. В процессе взаимодействия почвы с атмосферой и растительным покровом в почвенных горизонтах формируется тепловой, водный и воздушный режимы, определяющие запасы влаги и минерального питания, характерные для конкретных типов почвы, сезонов года и применяемого агротехнического комплекса.

Состав и режим воздушной и почвенной сред обитания растений, находясь под непосредственным и определяющим воздействием внутренних компонентов агроэкосистемы, прежде всего растительности, испытывают значительное влияние внешних атмосферных и почвенных процессов. Происходящие в растительном покрове обменные процессы веществом и энергией изменяют воздушную и почвенную среду своего обитания, смягчая в известной степени резкие колебания внешних условий (см. главу 3).

Почва – основа агроэкосистемы. Внесение в нее различных химических соединений (удобрений, ядохимикатов и т.п.), изменение теплового, водного и воздушного режимов корнеобитаемых горизонтов почвы путем проведения агротехнических мероприятий создают условия, которые значительно отличаются для растений, произрастающих в естественных экосистемах.

Известно также, что с урожаем сельскохозяйственных культур из почвы выносятся большое количество питательных веществ, изменяющее

уровень ее плодородия. Некоторое представление об этом процессе дает упрощенная схема поступления веществ в почву и выноса их из почвы (см. рис.3.4).

Однако эта так называемая антропогенная энергия играет лишь роль катализатора, стимулирующего более интенсивное использование растениями солнечной энергии в процессе фотосинтеза, запасов почвенной влаги и питательных веществ.

Крупнейший российский ученый акад. Н.И. Вавилов писал: «Культура поля идет рука об руку с культурой человека». Начало начал многих возделываемых человеком растений надо искать там и только там, где обнаруживается настоящее разнообразие их форм, диких и окультуренных, а значит, и центров происхождения земледелия. Эта главная мысль пронизывает две важнейших монографии Н.И. Вавилова: «Центры происхождения культурных растений» и «Мировые центры происхождения земледелия...». Согласно его теории, центры и очаги земледелия совпадают с центрами происхождения культурных растений.

Основным континентом, давшим начало земледелию и большинству культурных растений, является Азия. Н.И. Вавиловым было выделено семь мировых центров мирового земледелия – Юго-западно-азиатский, Юго-восточно-азиатский, Южно-азиатский, Средиземноморский, Абиссинский (Эфиопский), Центрально-американский, Андийский (от названия гор Анды).

На карте отчетливо прослеживается география этих центров – их основное расположение связано с зонами субтропического и тропического климата (рис. 16.2). Именно эти зоны характеризуются оптимальным соотношением количества тепла и влаги, количества поступающей солнечной радиации на единицу площади, наибольшей продолжительностью вегетационного периода. Зонам субтропического и тропического климата присуще максимальное разнообразие родов и видов растений, наибольшая плотность единиц растительного покрова на единице площади.

Конечным результатом фотосинтетической деятельности растений, их роста, развития (применительно к сельскохозяйственным культурам) является формирование их биологической продуктивности и хозяйственно полезной ее части – урожая. *Биологическая продуктивность* – это количество органического вещества (биомасса), производимое сообществом растений или агроценозом на единице площади за единицу времени. Измеряется в единицах массы, площади и времени, например кг/га, т/га, т/год.

Продуктивность полная – это общее количество продуцируемой в процессе фотосинтеза всей органической массы (в том числе вегетативные надземные и подземные части), включая израсходованную на дыхание растений энергию и биогенные вещества (фитонциды, летучие эфирные масла и т.п.).

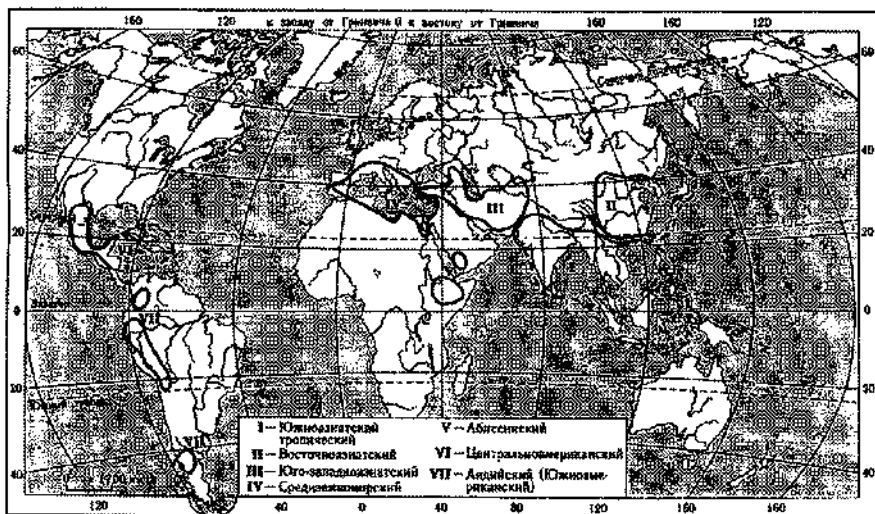


Рис. 16.2. Мировые центры происхождения земледелия (Н.И. Вавилов)

Продуктивность посева – это урожайность ($\text{кг}/\text{м}^2$, $\text{т}/\text{га}$), продуцируемая сельскохозяйственным посевом под влиянием сложившихся погодных (агрометеорологических) условий в течение вегетационного периода и применяемой агротехники. Продуктивность посева возрастает с увеличением интенсивности солнечной радиации на фоне достаточного увлажнения (80 % наименьшей влагоемкости⁶ в слое почвы 0...50 см). При влажности 20 % наименьшей влагоемкости максимальная продуктивность посева снижается в 4 раза. При одинаковой интенсивности солнечной радиации снижение дневной температуры воздуха с 22 до 10 °C снижает продуктивность посева более чем в 2 раза.

Помимо названных агрометеорологических факторов, велико значение уровня плодородия почвы, в значительной степени влияющего на величину формируемого урожая. Напомним, что *урожай* – это полезная продукция, получаемая в результате культивирования сельскохозяйственных растений или использования дикорастущих видов (или фитоценозов в целом).

Специалисты различают *урожай амбарный*, т.е. фактически собранную и включенную в статистическую отчетность продукцию полей; *урожай валовой* – это вся продукция данного вида или видов сельскохозяйственных

⁶ Наименьшей (предельной) влагоемкостью почвы называется наибольшее количество влаги, которое может удерживаться в однородной почвенно-грунтовой толще естественного сложения после ее избыточного увлажнения, стекания влаги под действием силы тяжести и при условии глубокого залегания грунтовых вод.

культур, собранная со всей посевной площади (хозяйства, района, области, страны), например валовой урожай зерна пшеницы или валовой урожай всех зерновых и зернобобовых в конкретном году. Валовой урожай определяется произведением *урожайности* (т/га) на всю посевную площадь (га) в конкретном году, выражается в тоннах.

Еще одно понятие – *урожай в производстве* – это фактическая величина собранного урожая в конкретном году, применительно к той или иной территориальной единице (хозяйство, район, область и т.п.). *Урожайность* – это потенциальное или фактическое количество полезной продукции растениеводства или естественного сообщества (фитоценоза), отнесенное к единице площади, выражается в т/га, кг/га; в теплицах урожайность выражают в кг/м² или в кг/м³. Иногда урожайность выражают качественно условной характеристикой: высокая, средняя, низкая, на уровне прошлого года и т.п.

В последние десятилетия в агрометеорологии получили широкое применение понятия, предложенные акад. И.С. Шатиловым и развитые проф. Х.Г. Тоомингом (1984), более широко трактующие понятие «урожай».

Действительно возможный урожай (ДВУ) – это возможный урожай сельскохозяйственной культуры или сорта в существующих в конкретной местности (территории) агроклиматических условиях. ДВУ определяется по средним многолетним значениям метеорологических факторов (температура, осадки, особенности зимнего периода и т.п.). ДВУ в «идеальных» почвенных условиях называют также *климатически обеспеченным урожаем*.

$$Y_{ДВУ} = Y_{ном} F_1(f_1) F_2(f_2) \dots F_k(f_k), \quad (16.1)$$

где $Y_{ДВУ}$ – действительно возможный (максимальный) урожай, $Y_{ном}$ – урожай потенциальный, $F_i(f_i)$ – функция, выражающая зависимость урожая от фактора f_i .

Задача агротехники, мелиорации, системы районирования возделываемых культур, селекции и методов (принципов) повышения эффективности использования посевами ФАР – уменьшить разницу между $Y_{ДВУ}$ и $Y_{ном}$, т.е. уменьшить разность:

$$\Delta Y = Y_{ном} - Y_{ДВУ} = Y_{ном} [1 - \prod_{i=1}^k F_i(f_i)]. \quad (16.2)$$

Главной предпосылкой получения высокого урожая, близкого к ПУ, является создание оптимального водного режима в посеве при условии $E = E_0$, т.е. когда суммарное испарение растительности (E) равно испаряемости растительности (E_0). При условии $E < E_0$ урожай лимитируется водным дефицитом, тогда:

$$Y_{ДВУ} = Y_{ном} E / E_0. \quad (16.3)$$

Недобор урожая из-за водного дефицита $\Delta E = E_0 - E$ определяют по формуле:

$$\Delta Y = Y_{nom} - Y_{ДВУ} = Y_{nom} (1 - E / E_0) \quad (16.4)$$

или
$$\Delta Y = \eta / q = \sum Q_{\phi} (1 - E / E_0), \quad (16.5)$$

где η – функция потенциального КПД посева в течение вегетационного периода; q – калорийность растений, кДж/г.

Таким образом, потери урожая из-за водного дефицита возрастают с повышением ПУ и КПД посева.

ДВУ отличается от потенциального урожая (ПУ) тем больше, чем больше текущие метеорологические условия отличаются от оптимальных.

Потенциальный урожай – это урожай, полученный в «идеальных» метеорологических условиях, определяемый биологическими свойствами сельскохозяйственных культур, необходимым количеством ФАР и оптимальными условиями водно-теплового режима. ПУ определяется по формуле (Тооминг Х.Г., 1984; Полевой А.Н., 1992):

$$ПУ_{сред.} = \eta_{nom} \sum Q_{\phi} / q, \quad (16.6)$$

где η_{nom} – средний за вегетационный период потенциальный (максимальный) КПД посева, обеспечиваемый биологическими свойствами сорта, современной агротехникой и уровнем плодородия почвы в оптимальных метеорологических условиях для данной культуры или ее сорта; $\sum Q_{\phi}$ – приход ФАР за вегетационный период (мДж/м²); q – калорийность растений (кДж/г).

Разность между ПУ и ДВУ – это недобор урожая, вызванный тем, что конкретные погодные условия «не идеальны» для произрастания сельскохозяйственных культур в каждый конкретный год. Разность между ДВУ и ПУ – это недобор урожая из-за неполного использования погодных и климатических условий. Отношение ДВУ к ПУ называют *коэффициентом благоприятности погоды и климата* (K_n), который изменяется от 0 до 1. Чем он выше, тем лучше погодные условия для возделывания сельскохозяйственных культур или сорта. Отношение ПУ к ДВУ называют *коэффициентом эффективности использования климатических ресурсов* (K_s).

По значениям ДВУ, ПУ–ДВУ, K_n судят о природных ресурсах для растениеводства. Значения разности ДВУ и ПУ и K_s позволяют оценивать качество организации сельскохозяйственного производства, эффективность программирования урожайности или уровень культуры растениеводства (Тооминг Х.Г., 1984).

Необходимо отметить, что значения потенциального КПД посева и ПУ непостоянны. В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства, внедрением новых сортов, усовершенствованием агротехнических приемов возделывания посевов (в том числе минеральных и органических удобрений) КПД и ПУ возрастают.

Возделываемые сельскохозяйственные культуры отличаются от развития и формирования продуктивности естественных фитоценозов более высокими потребностями в комплексе агрометеорологических факторов. Этим во многом обусловлена необходимость проведения различных агротехнических мероприятий. В то же время известно, что амплитуда различий в потребности сельскохозяйственных культур значительно уже, чем разнообразие естественной растительности в различных почвенно-климатических зонах мира. Это определяет весьма высокое сходство в агротехнических приемах земледелия.

Воздействие человека на почву принципиально отличается от влияния природных факторов. Пахота, рыхление верхних слоев почвы, внесение в них разнообразных органических и минеральных удобрений, ядохимикатов и т.п., все эти формы влияния не имеют аналогов в естественных условиях (Семенов В.А., 1977).

Естественно, что достигнуть полного выравнивания условий возделывания культур даже в эксперименте практически невозможно. На массовых лабораторно-полевых опытах сельскохозяйственных органов удалось выявить некоторые наиболее общие закономерности влияния различных факторов почвенного плодородия на динамику формирования урожайности некоторых сельскохозяйственных культур.

На рис. 16.3 и 16.4, заимствованных из книги В.А. Семенова, хорошо видно влияние различных параметров плодородия почвы на динамику урожая капусты белокочанной и озимой ржи. Весьма характерно, что коэффициенты корреляции весьма незначительны (0,18...0,40), поскольку проведенный анализ не учитывает влияния важнейших параметров, определяющих уровень урожая: приход солнечной радиации, температуру и влажность почвы. Не учтены также сортовые различия в потенциальной урожайности различных по своим биологическим возможностям сельскохозяйственных культур. Так, по данным нескольких опытных сельскохозяйственных станций в Европе (Демолон А., 1961), различия в урожайности некоторых сельскохозяйственных культур достигают 48...72 % (между минимумом и максимумом).

С физиологической точки зрения взаимоотношения роста растений и интенсивности фотосинтеза отражают непрерывную перестройку фотосинтетического аппарата в течение онтогенеза. В этой связи постоянно меняется динамика формирования и активности растущих органов, потребляющих *ассимиляты*. Начальный этап развития листа осуществляется за счет деления и роста клеток, а позднее – только за счет растяжения клеток. За это время делятся и развиваются хлоропласты, число которых увеличивается, пока растет объем клетки. Новообразование хлоропластов завершается довольно рано, но рост клеток опережает увеличение числа хлоропластов, благодаря чему их количество в онтогенезе на 1 см²

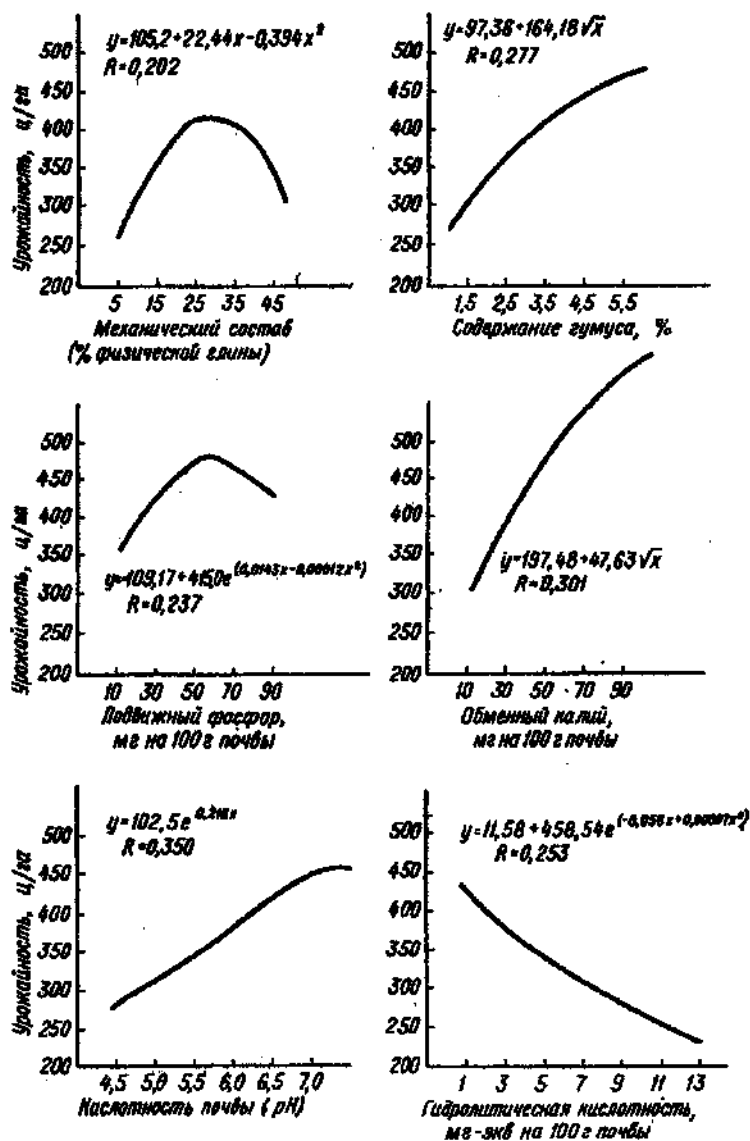


Рис. 16.3. Зависимость урожая капусты белокачанной от свойств почвы (по сводке 197 полевых опытов)

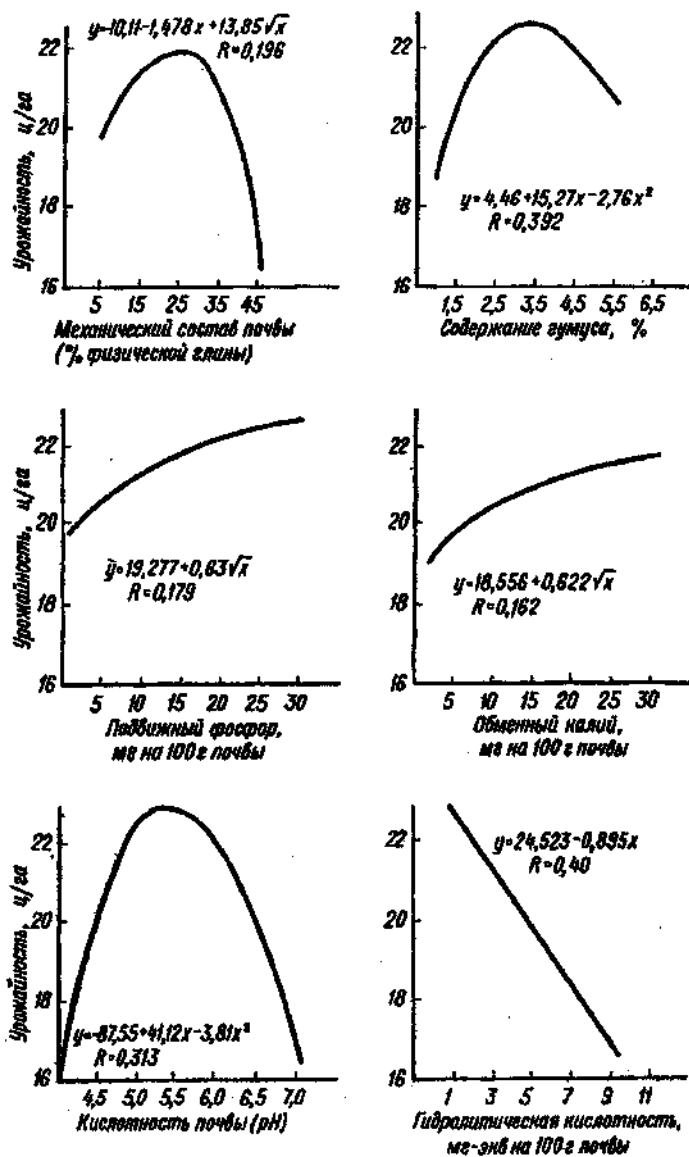


Рис. 16.4. Зависимость урожая ржи озимой от свойств почвы (по сводке 545 полевых опытов)

убывает приблизительно вдвое. Однако содержание хлорофилла в хлоропласте продолжает увеличиваться и после достижения хлоропластом наибольшей величины.

Максимальная интенсивность фотосинтеза наблюдается во время роста клеток растяжением и начинает несколько снижаться, когда площадь листа достигает 0,4...0,8 от конечной его величины (характерной для каждого вида растений). Затем процесс фотосинтеза несколько снижается по мере старения листа (или слабо изменяется у вечнозеленых растений).

На ранних стадиях роста (до разворачивания 30...45 % площади) лист сам потребляет ассимиляты из более зрелых листьев или из запасующих тканей. По мере роста листа усиливается транспорт ассимилятов из него в другие листья и органы и постепенно взрослый лист становится донором ассимилятов. Эта функция устанавливается при достижении 60...90 % конечной площади листа. Взрослые листья отдают свои ассимиляты в растущие органы, оставляя на собственные нужды 10...40 % ассимилятов, и почти не обмениваются между собой продуктами фотосинтеза. Стареющие листья со слабой фотосинтетической активностью отдают другим органам не только ассимиляты, но и продукты распада структур цитоплазмы. Такого рода смена функций листа в онтогенезе важна при формировании урожая. Потребление ассимилятов молодым листом приводит к построению добавочного фотосинтетического аппарата, чем обеспечивается увеличение фотосинтетической активности в геометрической прогрессии.

Наиболее полно вопросы фотосинтетической деятельности растений в посевах, связанной с образованием хозяйственного урожая, освещены в исследованиях крупнейшего российского физиолога растений проф. А.А. Ничипоровича. Кратко суммируя его выводы, можно отметить, что наивысшие урожаи могут быть обеспечены созданием следующих оптимальных условий:

- увеличением площади листовой поверхности в посевах (рис. 16.5);
- удлинением времени активной работы фотосинтетического аппарата в течение каждых суток и вегетационного периода, в частности, за счет поддержки агротехникой и минеральными удобрениями (рис. 16.6);
- высокой интенсивностью и продуктивностью фотосинтеза, максимальным суточным приростом сухого вещества;
- максимальным притоком продуктов фотосинтеза из всех фотосинтезирующих органов в хозяйственно важные органы и высоким уровнем использования ассимилятов в ходе биосинтетических процессов (Полевой В.В., 1989).

Для получения высоких и устойчивых урожаев необходима селекционно-генетическая работа, направленная на повышение интенсивности фотосинтеза, скорости оттока ассимилятов, на увеличение чистой продуктивности фотосинтеза. Согласно А.А. Ничипоровичу, Л.Е. Строгоновой и др. (1961), *чистая продуктивность фотосинтеза* ($\Phi_{ч.пр.}$) характеризует

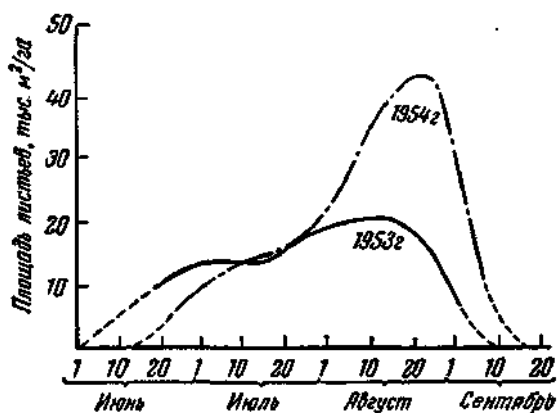


Рис. 16.5. Ход роста площади листьев в посевах картофеля в течение вегетации 1953 и 1954 гг.

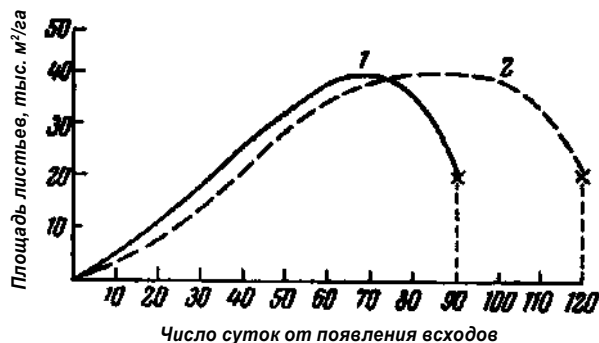


Рис. 16.6. Ход роста площади листьев в посевах с различной продолжительностью вегетационного периода

интенсивность образования и накопления (прироста) сухой органической массы урожая растений за определенный период времени в расчете на единицу листовой поверхности (обычно на 1 м²). Этот параметр рассчитывают по формуле:

$$\Phi_{ч.пр.} = (B_2 - B_1) / ((L_1 + L_2) \cdot 1/2 \cdot n), \quad (16.7)$$

где B_1 и B_2 – сухая масса проб урожая в начале и в конце учетного периода (сутки, декада, месяц и т.п.); $(B_2 - B_1)$ – привес сухой массы за учетный период в n суток; L_1 и L_2 – площадь листьев пробы в начале и в конце периода; $((L_1 + L_2) \cdot 1/2)$ – средняя работавшая площадь листьев за этот промежуток времени; n – число суток в учетном промежутке времени.

Например, сухая масса первой пробы (B_1) в расчете на 1 м² посева (или на 10, или 5 растений) составила 200 г, площадь листьев (L_1) 1,75 м². Следующие пробы были взяты через 10 суток ($n = 10$ суток). Те же показатели составили: $B_2 = 300$ г, $L_2 = 2,25$ м². Можно считать, что в среднем на протяжении каждых суток на растениях работали листья площадью $(1,75 + 2,25) : 2 = 2$ м². Привес массы урожая за это же время составил $(300 - 200) = 100$ г, или в среднем $100:10 = 10$ г в сутки, а в расчете на 1 м² работавшей в среднем листовой поверхности $10:2 = 5$ г.

При этом следует учесть, что эта формула позволяет рассчитывать не только чистую продуктивность фотосинтеза, применительно к урожаю зерновых культур, но и к урожаю других, хозяйственно полезных органов растений, например корнеплодов, клубней или всей фитомассы.

Ранее отмечалось, что одним из известных путей повышения продуктивности фотосинтеза является увеличение (до определенных пределов) площади ассимилирующих органов, особенно листьев, с целью максимального поглощения хлоропластами лучистой энергии. Известно также, что величина урожая зависит от оптимальной структуры посевов, создаваемой агротехническими приемами. К таким приемам относятся: подбор оптимальных норм высева семян на единицу площади и оптимальных сроков посева; выбор такого расположения рядков, который обеспечивает максимальную освещенность растений и наиболее эффективное использование лучистой энергии листовыми пластинками растений и др.

Установлено также, что подкормка посевов (стандартным комплексом минеральных удобрений) на разных этапах развития растений способствует увеличению площади листовой поверхности на единице площади, что изменяет физиологические возможности фотосинтетического аппарата – способность поглощать и усваивать лучистую энергию, т.е. повышать КПД посева, что обеспечивает формирование максимального биологического и хозяйственного урожая. Например, более развитая листовая поверхность подкормленных растений кукурузы в период вегетации (при прочих равных условиях) поглощала большее количество ФАР (табл. 16.2).

Таблица 16.2

**Влияние площади листьев на количество поглощенной ФАР
в квадратно-гнездовом посеве кукурузы (Лебедев С.И., 1982)**

Вариант посева	Дни после всходов					
	27	36	46	59	68	87
Площадь листьев, тыс. м ²						
Без подкормки	6,6	11,4	17,2	19,8	19,8	19,3
Подкормлено NPK	7,4	11,8	20,3	21,9	21,3	19,6
Поглощено ФАР, тыс. кДж / мин						
Без подкормки	11,0	84,9	109,3	130,8	141,7	137,5
Подкормлено NPK	68,1	91,1	139,6	157,2	163,9	149,2

Экспериментальным путем установлено также, что в посевах, особенно высокоствольных, подобно кукурузе, кенафу, сорго и др., различные вертикальные слои травостоев неодинаково поглощают лучистую энергию. Например, верхний слой листьев кукурузы составляет 23,7 % всей листовой поверхности, а поглощает 47 % энергии, поступающей на посев. Средний слой, составляющий 60,4 % этой поверхности, поглощает только 36,6 % энергии от всего количества поглощенной ФАР. Проведенная подкормка NPK увеличила процент поглощения ФАР средним слоем листьев травостоя с 36,6 до 49,7 %, но зато уменьшила количество энергии, поглощаемой нижним слоем листьев посева с 26,4 до 8,6 % (Лебедев С.И., 1982).

Это происходит за счет того, что после подкормки площадь листьев среднего слоя значительно увеличивается и затеняет слой листьев, расположенный ниже.

Условия среды обитания растений и даже посевов сельскохозяйственных культур чрезвычайно разнообразны. Еще раз повторим, что сущностью жизнедеятельности растений (и животных) являются единые процессы обмена веществ: ассимиляции и диссимиляции.

Единство этих двух взаимодействующих процессов обеспечивает непрерывное обновление органических веществ живых организмов в природе и формирование продуктивности растений и животных.

16.2. Продукционный процесс растений

Общеизвестна зависимость сельскохозяйственного производства, его продуктивности и качества от климатических условий территории и погоды (агрометеорологических условий) конкретных лет. Сельскохозяйственные растения в процессе своего развития от формирования семени до их созревания находятся в сложном взаимодействии со средой обитания. Поэтому продуктивность посева в конечном итоге определяется не только генетическим потенциалом вида (или сорта) культуры, но и совокупностью всех процессов обмена энергией и веществом в системе «почва – растение – атмосфера». Являясь термодинамически открытой, эта система нуждается в непрерывной «подпитке» за счет внешних источников, частично контролируемых человеком (Бондаренко Н.Ф., Жуковский Е.Е., Мушкин И.Г. и др., 1982). В то же время интенсификация растениеводческого производства за счет проведения масштабной мелиорации, химизации и селекции новых, высокоурожайных сортов неизменно связана с увеличением энергетических и материальных затрат на условный гектар пашни.

Основой существования растений является *продукционный процесс растений (ППР)*, – это гармоничная совокупность отдельных взаимосвязанных процессов, из которых фундаментальными являются фотосинтез, дыхание и рост, в ходе которых происходит формирование урожая (продуктивности растений).

Продукционный процесс, его динамика и интенсивность зависят и регулируются условиями внешней среды и биологическими особенностями растений посредством газового, теплового и водного обмена в системе «почва – растение – атмосфера». Естественно, что и сам этот процесс преобразует среду в основном через структуру (густоту, высоту, ярусность и т.п.) растительного покрова (посева), газообмен и транспирацию растений.

Растения, поглощая из атмосферы CO_2 своими наружными органами и корневой системой влагу, создают в процессе *фотосинтеза* под воздействием солнечной энергии органическое вещество в виде ассимилятов. Одновременно происходит транспирация, регулирующая водный баланс и тепловой режим растения. В зависимости от интенсивности ФАР, водного и температурного режимов, концентрации CO_2 в воздухе, скорости ветра, уровня плодородия почвы и биологических особенностей растения процесс фотосинтеза протекает с различной интенсивностью (скоростью).

Второй фундаментальный процесс – *дыхание* растений. Дыхание обеспечивает снабжение энергией различных биохимических процессов синтеза, связанных с ростом, построением новых структурных элементов растений и с транспортом веществ, а также поддержание живых структур органов растений. Для этого затрачивается органическое вещество, накопленное ранее в органах растений.

Третий фундаментальный процесс – *рост* растений. Он сопряжен с процессом фотосинтеза путем энергетического обеспечения ростовых функций. При росте происходит необратимое увеличение размеров тканей и органов, складывающееся за счет деления и растяжения клеток, их дифференциации, обеспечивающей специализацию тканей и органов. Важным свойством роста является ритмичность, зависящая от продолжительности светлой части суток («длина» светового дня), от температуры и влажности воздуха, а также от запасов влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы и других факторов.

Процесс фотосинтеза является донором энергии, а принимающей стороной (акцептором) становится рост растения. Между донором и акцептором формируются временные промежуточные фонды ассимилятов. Такие фонды находятся в каждом органе, но более мобильные – в листьях и стеблях. В оптимальных условиях период между созданием фонда ассимилятов и их использованием на рост составляет обычно несколько часов, а при низкой температуре – несколько суток. Ассимиляты, запасаемые на более длительный период, большей частью накапливаются в корнях и клубнях. Этот фонд расходуется, когда процессы фотосинтеза подавляются, сдерживаются неблагоприятными условиями внешней среды (слабая освещенность в дневные часы, снижение температуры воздуха, низкая влагообеспеченность растений и др.), а также при росте растений

в ночные часы. Роль фонда ассимилятов в формировании урожая сельскохозяйственных культур особенно возрастает в условиях экологического стресса (длительные периоды похолоданий, почвенная засуха, суховеи и др.), а величина фондов становится решающим фактором формирования продуктивности растения. Такие фонды обеспечивают частичную автономность функции фотосинтеза и роста. Возможен ограниченный рост без фотосинтеза при условии, что энергетическое снабжение происходит за счет запасных фондов предшествующего фотосинтеза. Например, рост побегов и листьев из почек, прорастание семян (до появления первых листьев или семядолей). За счет запасенных фондов происходит рост растений в темное время суток. Налив зерна у зерновых культур и формирование клубней у картофеля осуществляется не только за счет «свежих» ассимилятов, но и путем использования фондов ассимилятов (Тооминг Х.Г., 1984). Рост обеспечивает увеличение массы и размера органов, площади листовой поверхности, органелл и живого организма в целом.

В течение вегетационного периода часть сформировавшейся фитомассы растения стареет естественным путем. Опавшие части растений составляют *опад*, наиболее значительный в лесных экосистемах, в которых за многие годы формируется особый слой, называемый *подстилкой*, выполняющей определенную экологическую функцию в жизни этих экосистем.

Ресурсы внешней среды используются растением на основе максимального сопряжения физиологических процессов ассимиляции (светового, водного и минерального питания) и диссимиляции. Таким образом, ППР – это совокупность процессов создания и трансформирования живого вещества, усвоения и прохождения энергии через экосистемы (агроэкосистемы) разных уровней организации, конечным результатом которых является реальная продукция фитоценоза или агроценоза (рис. 16.7).

Общие принципы построения количественной теории продукционно-го процесса растений впервые предложены японскими и американскими учеными. В СССР эти работы были начаты в исследованиях выдающихся советских ученых А.А. Ничипоровича, М.И. Будыко и Л.С. Гандина, Ю.К. Росса, Х.Г. Тооминга, А.И. Будаговского и др. В дальнейшем эти принципы были реализованы в прикладных динамических и динамико-статистических моделях профессоров О.Д. Сиротенко, А.Н. Полевого, Е.П. Галямина и др. Подробнее эти вопросы описаны в главах 7 и 8.

Как отмечалось выше, *процесс фотосинтеза* регулируется условиями внешней среды и транспирацией, влияющих на формирование теплового и водного режимов растений.

Часть образованных в процессе фотосинтеза ассимилятов (питательных веществ) немедленно используется для построения и увеличения тканей растений, а некоторая часть откладывается в резерв, в так называемый *фонд ассимилятов*.

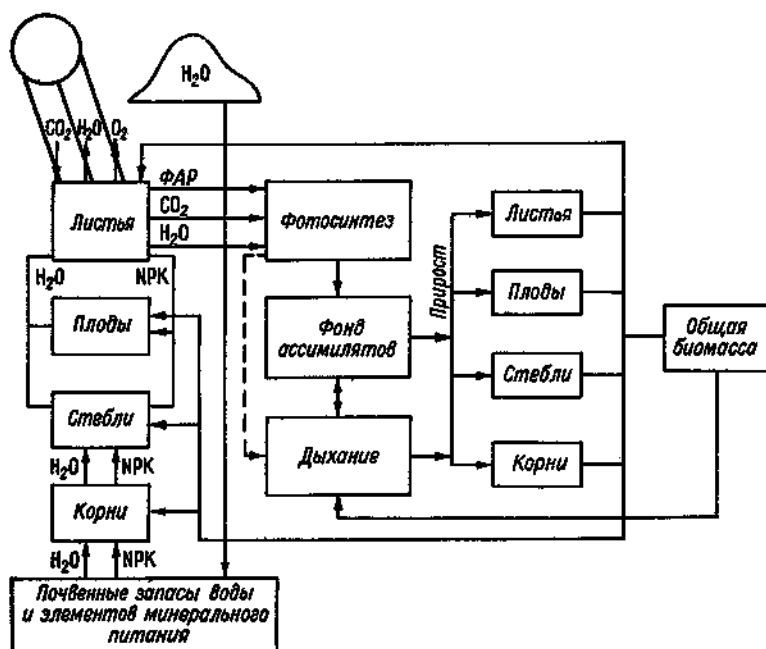


Рис. 16.7. Блок-схема продукционного процесса

В современной агрометеорологической и экологической литературе понятие «фонд ассимилятов» получило признание и широкое использование.

Развитие количественной теории продукционного процесса растений позволило приступить к созданию математических моделей формирования урожая сельскохозяйственных культур и естественной пастбищной растительности. Построение моделей заключается в описании продукционного процесса растений с помощью уравнений, алгоритмов и других математических средств. Такие модели, реализованные в современных компьютерных программах, позволяют рассчитывать динамику накопления фитомассы и других параметров растений. Они также позволяют рассчитывать динамику процессов, протекающих в надземной и подземной средах обитания органов растений. В качестве примера на рис. 16.8 представлена «блочная» структура модели продукционного процесса растений, реализованная в рамках системы имитационного моделирования AGROTOOL. Эта система, разработанная учеными Агрофизического научно-исследовательского института Российской сельскохозяйственной академии (АФИ), включает динамические модели основных сельскохозяйственных культур, выращиваемых в полевом севообороте: озимая и яровая пшеница, озимая рожь, яровой ячмень, овес, картофель и

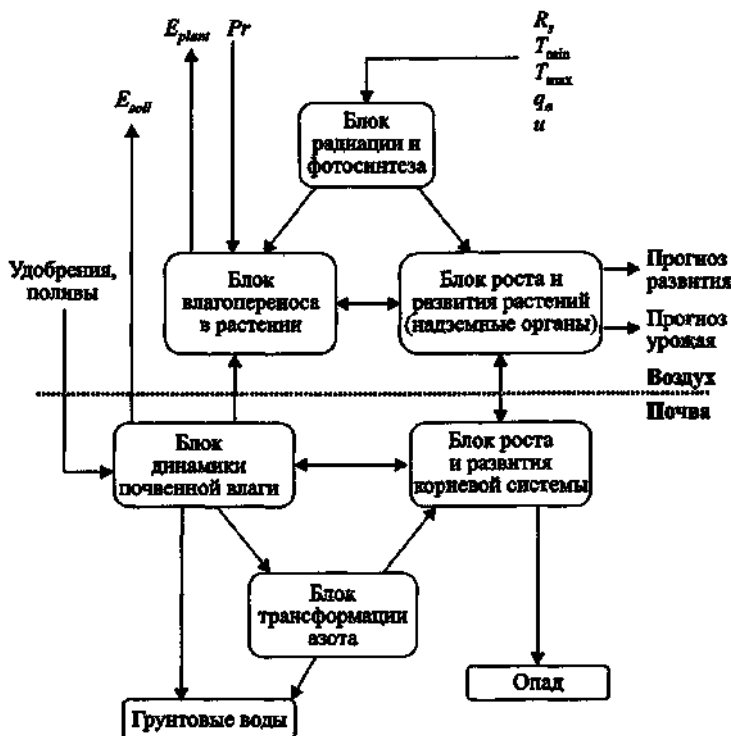


Рис. 16.8. Блок-схема модели

многолетние травы (Полуэктон Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г., 2006). «Блочная» структура модели включает математическое описание процессов, происходящих в системе «почва – возделываемая культура – приземный слой воздуха»:

- радиационный режим посева, включая поглощение растениями ФАР;
- турбулентный режим в растительном покрове;
- фотосинтез и дыхание растений;
- развитие растений (по биологическому времени сроков наступления фенологических фаз);
- накопление продуктов фотосинтеза, формирование урожая;
- транспирация растений и испарение влаги с поверхности почвы;
- динамика тепло- и влагопереноса в почвенном профиле;
- прогнозирование темпов развития и формирования урожая растений;
- выбор сроков и норм орошения в поливном земледелии;
- выбор норм и сроков внесения азотных удобрений.

Модели имеют суточный шаг по времени, т.е. накопленные в процессе фотосинтеза за светлые часы суток ассимиляты суммируются и являются входной величиной ростового блока. В качестве входных данных о погоде используются измеренные (и рассчитанные) величины: минимальная и максимальная температуры воздуха (T_{min} , T_{max}), минимальная относительная влажность воздуха (q_a), скорость ветра (u), длительность солнечного сияния (R_s) и осадки (P_r).

Современные динамико-статистические и синоптико-статистические методы оценки и прогноза состояния, роста и формирования продуктивности основных сельскохозяйственных культур широко используются в практике оперативного гидрометеорологического обеспечения аграрного сектора экономики России (см. главу 5).

Понятно, что количественно продукционный процесс агроэкосистемы зависит не от разрозненно действующих на растения абиотических, биотических и антропогенных факторов, а одновременно от всего их комплекса, как результата взаимодействия межфакторных комбинаций. Таким образом, формирование продуктивности сельскохозяйственного растения или фитоценоза в целом представляет собой совокупность различных физиологических процессов, интенсивность которых определяется не только биологическими особенностями растений, экзогенными (внешними) факторами среды их обитания, но и сложной взаимозависимостью и взаимообусловленностью между этими процессами.

Отметим в заключение, что преимущество динамических и динамико-статистических моделей (перед статистическими моделями) заключается в том, что в них формирование продуктивности растений рассматривается как процесс, изменяющийся во времени в зависимости от состояния посева, влияния факторов внешней среды и параметров самой модели. Такие модели позволяют одновременно учитывать влияние комплекса факторов окружающей среды, использовать большое количество расчетной и оперативной информации. Наиболее ценным качеством моделей такого типа является их прикладная значимость.

Теоретическая модель продукционного процесса растений является научной основой для современного растениеводства. Она позволяет диагностировать и прогнозировать урожайность возделываемых культур – общей биомассы и биомассы отдельных органов растений (листья, стебли, колосья, корни) за различные интервалы времени. С ее помощью проводят расчеты сроков и норм поливов, внесения минеральных удобрений и ядохимикатов для подавления популяций вредителей, осуществляют агроклиматическое районирование и т.п.

ГЛАВА 17

ПОТРЕБНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР И ПАСТБИЩНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Климатические и погодные условия возделывания сельскохозяйственных культур на территории России и сопредельных государств СНГ весьма разнообразны. Это позволяет выращивать большое разнообразие культур, за исключением тропических. Как было отмечено выше, из всей площади, используемой для сельского хозяйства, только третья часть территории России получает в среднем достаточное количество осадков, необходимое для формирования урожая. Остальные две трети посевных площадей подвержены периодическим засухам, поздним весенним и ранним осенним заморозкам, сильным морозам зимой, недостаточной теплообеспеченности посевов, избыточному увлажнению и другим видам неблагоприятных и опасных условий погоды теплого и холодного полугодий. Этим в значительной мере объясняются колебания урожайности и валового сбора зерновых и других сельскохозяйственных культур от года к году (табл. 17.1).

Следствием значительных колебаний урожайности и валовых сборов сельскохозяйственных культур является необходимость заблаговременного планирования с целью обеспечения населения страны продуктами питания, а промышленность – сельскохозяйственным сырьем.

Таблица 17.1

**Суммарное производство зерновых и зернобобовых культур в России
по данным Госстатиздата (1955...2010 гг.)**

Россия в целом	Годы								
	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995
Урожайность, т/га	0,7	1,02	0,85	1,48	0,94	1,29	1,45	1,85	1,16
Валовой сбор, млн т	54,7	72,6	66,2	107,4	72,4	97,2	98,6	116,7	63,4

Россия	Годы						
	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Урожайность, т/га	1,44	1,79	1,81	1,84	23,1	20,4	14,1
Валовой сбор, млн т	65,5	78,2	78,6	81,8	108,2	97,1	61,0

Для своевременной оценки сложившихся и ожидаемых условий формирования урожайности возделываемых культур, сеяных трав и естественных сенокосов и пастбищ необходимо знать их потребность в агрометеорологических условиях, и в первую очередь в режиме тепло- и влагообеспеченности растений, в физико-химических особенностях почвы, ее механическом составе и плодородии.

17.1. Зерновые культуры

Зерновые культуры – зерно этих культур имеет решающее продовольственное и кормовое значение, является сырьем для различных отраслей промышленности. Продукты переработки зерна используются, в первую очередь в хлебопечении, при изготовлении различных видов макаронных изделий, в кондитерской, спиртовой, пивоваренной, крахмалопаточной, комбикормовой и даже в текстильной промышленности и т.п.

Злаковые культуры обычно подразделяют на хлебные и бобовые культуры. К хлебным культурам относятся пшеница, рожь, ячмень, овес, кукуруза. В группу хлебных культур включаются и некоторые крупяные культуры – гречиха, рис, просо, сорго, чумиза и др. Группу *зерновых бобовых* культур составляют горох, фасоль, соя, арахис, бобы, нут и др.

Зерно и зеленая растительная масса (кукуруза, сорго и др.) скормливаются скоту в виде комбикормов, силоса и травяной муки. Солома, а также сухая грубостебельная масса злаковых и крупяных культур используется в животноводстве на корм скоту, в качестве подстилок на фермах, в форме удобрений и т.д.

Зерно – важнейшая составляющая государственных запасов (резервов) и важнейший объект импорта и экспорта. В соответствии с целями использования зерно подразделяют на две большие группы: зерно для выпечки хлеба и зерно для корма скоту и птице, т.е. для производства мяса, яиц и других продуктов животноводства. В зависимости от качества зерна и произведенной муки хлебопекарные качества, вкусовые и питательные особенности каждого вида хлеба оказываются различными. По качеству зерна различают *мягкую и твердую пшеницу*.

Мягкая пшеница – наиболее зимостойкая, засухоустойчивая и скороспелая из всех зерновых культур. Это самый распространенный вид пшеницы, возделываемый во всех земледельческих районах мира, насчитывающий более 4 тысяч сортов.

В результате скрещивания дикого вида пшеницы и двух видов диких злаков новый вид приобрел более широкие приспособительные свойства к различным условиям среды, закрепленные на генетическом уровне.

Новые физические свойства белкового комплекса проявились в уникальной способности образования клейковины. *Клейковина* – это белковая часть муки (приготовленной из зерна злаков), остающаяся в виде эластичного сгустка после вымывания крахмала из теста водой. Клейковина состоит из различных запасных белков, находящихся в эндосперме зерна. От их содержания и свойств зависит ценность клейковины и хлебопекарных качеств муки. Обычно сырой клейковины в зерне содержится от 20 до 40 % от общего количества белка. Содержание клейковины в пшеничном зерне варьирует (в зависимости от агроклиматических и агротехнических условий возделывания) от 13 до 52 %, а

белка (протеина) – от 7 до 22 % (Созинов А.А., 1976). Клейковину называют белковым «каркасом» хлеба. При выпечке хлеба под влиянием постепенного повышения температуры (от 20 до 220 °С) в тесте происходят сложные биохимические процессы, закрепляющие пористую структуру, характерные для хлеба аромат и вкусовые качества.

Наиболее распространенным методом определения содержания белка является сжигание навески зерна в концентрированной серной кислоте и определение содержания азота (аммиака). Далее путем умножения процентного содержания азота на коэффициент 5,7 вычисляют уровень «белковости» зерна. Этот эмпирический коэффициент взят для удобства расчета, исходя из того, что в белках пшениц в среднем содержится 17,5 % азота. Для сравнения, в странах Западной Европы (Шотландия, Великобритания, Германия и др.) с умеренно-влажным и влажным климатом содержание белка в зерне пшеницы составляет 12,1...13,9 %, по Европейской территории России – в среднем 17,9 %, в Западной и Восточной Сибири – около 18,7 %, на Дальнем Востоке – 16,9 %, в Казахстане – 19,2%.

Установлено, что содержание белка в зерне пшеницы напрямую связано с регионом возделывания, с особенностями климатических условий. Еще в работах академика Д.Н. Прянишникова (1900) отмечалось, что содержание белка в зерне пшениц находится в прямой зависимости от степени континентальности климата. Такая зависимость установлена им от влажности почвы, являющейся прямым показателем степени увлажнения вегетационного периода пшениц (табл. 17.2).

Таблица 17.2

Влажность почвы (% полной влагоемкости)	40	50	60	70
Содержание азота в зерне	3,0	2,7	2,5	1,8
Содержание белка (N • 5,7)	17,2	15,5	14,3	10,3

Следовательно, в районах с континентальным климатом, характеризующихся относительно малым количеством осадков, зерно выращиваемых пшениц имеет более высокое содержание белка, по сравнению с таковым, выращенным во влажных регионах (Шарапов Н.И., Смирнов В.А., 1966).

Наиболее высокий процент клейковины, обеспечивающей необходимые хлебопекарные свойства муки, содержится в зерне пшениц, выращенных в степных районах Украины, Западной и Восточной Сибири, в северных областях Казахстана, на юго-востоке России.

Технологические достоинства зерна пшеницы определяются также и другими свойствами, такими, как стекловидность, твердость эндосперма, во многом определяющие мукомольные свойства вида и сорта пшеницы. Стекловидность зерна – это плотность «упаковки» крахмальных зерен в

эндосперме, «сцементированных» белками зерна. Это качество определяется визуально, по внешнему виду зерна, а также с помощью специальной аппаратуры. Мягкозерные виды пшеницы размалываются плохо, при помоле их мука забивает сита, плохо отделяются частицы эндосперма от оболочек зерна.

Твердость зерна – это сопротивление твердого тела (зерна) изменению его формы (разрушению) под влиянием механических усилий. Измеряется это качество зерна с помощью специальных приборов.

Твердая пшеница – типичная степная культура, широко распространенный вид пшеницы, возделываемый во многих районах мира. Клейковина твердых сортов пшеницы и ржи имеет высокую упругость и слабую растяжимость. Зерно таких пшениц является незаменимым для производства высших сортов макаронных изделий и круп.

По циклам развития злаковые культуры подразделяются на *озимые* и *яровые* формы.

Озимые формы – это однолетние сельскохозяйственные растения, вегетационный период которых охватывает сезоны двух смежных лет, при этом их нормальное развитие связано с условиями перезимовки. Озимые культуры обладают высокой пластичностью приспособления к условиям среды, благодаря которым они получили широкое распространение в различных почвенно-климатических зонах России и на многих континентах мира. «О высокой пластичности озимых культур свидетельствует большое разнообразие форм, экологических групп и сортов, значительно отличающихся по своим требованиям к почвам, агротехнике, климату, по устойчивости к морозам и другим неблагоприятным факторам внешней среды» (Моисейчик В.А., 1975). Их цикл развития имеет два активных периода (осенний и весенне-летний) и малоактивный период относительного зимнего покоя. Первый из них длится в среднем 40...60 дней: от периода посева озимых до прекращения осенней вегетации растений (рис. 17.1). В этот период происходит начальное формирование корневой системы и надземных вегетативных органов (стебли, листья), выполняющих важные функции питания, дыхания, фотосинтеза и водообмена. Оптимальными условиями осеннего периода для озимых посевов считаются годы, когда влажность верхних горизонтов почвы составляет 60...70 % полевой влагоемкости, а среднесуточная температура воздуха варьирует в пределах 13...18 °С.

При посевах озимых культур в зависимости от широты и долготы их возделывания, а также от конкретных погодных условий конца августа и сентября растения попадают в различные условия, отличающиеся по продолжительности светлого времени суток, интенсивности освещения, температуры и влажности почвы. Средние многолетние (оптимальные) сроки сева озимых культур приведены на рис. 17.2.

Рис. 17.1. Продолжительность осеннего периода (в сутках) с температурами от 10 до 0 °С

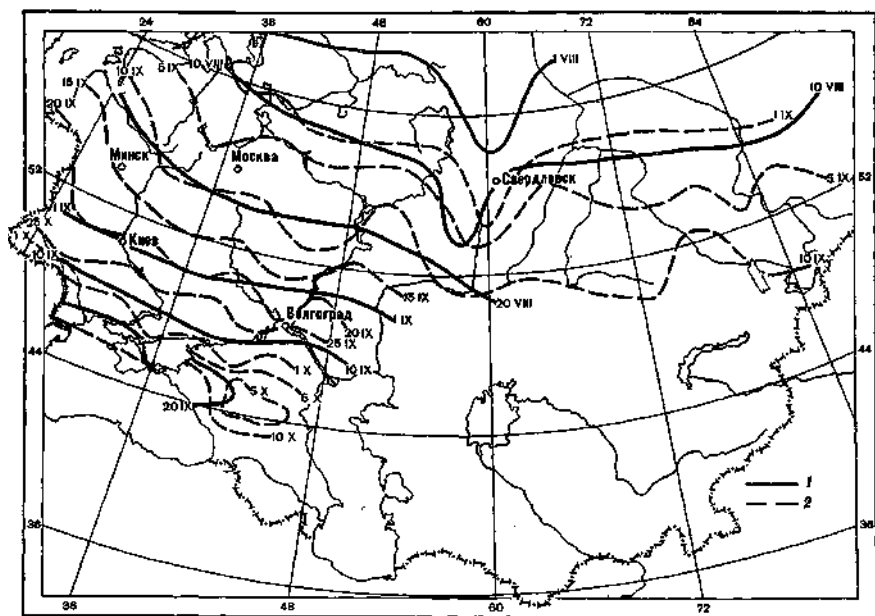
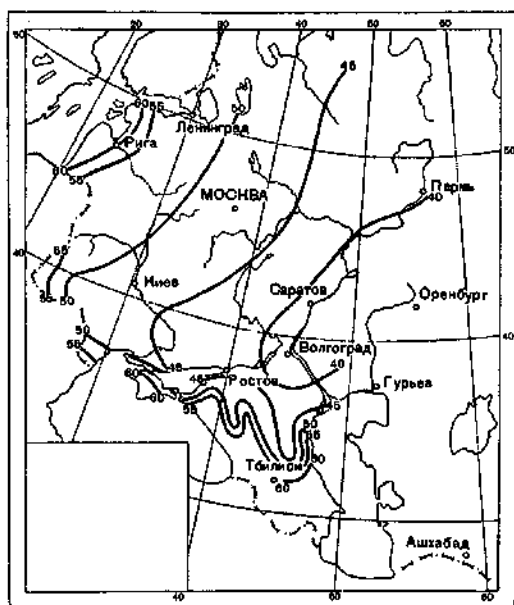


Рис. 17.2. Средние многолетние оптимальные и предельно поздние сроки сева озимых культур (А.А. Шиголев): 1 – оптимальные, 2 – предельно поздние

В жизненном цикле озимых культур очень важным периодом являются благоприятные по комплексу агрометеорологических условий осенние месяцы, в течение которых у озимых происходит закладка и формирование узла кущения, новых побегов и узловых корней, накопление пластических веществ. По мнению М.С. Кулика (1964), основным показателем условий роста озимых культур являются запасы влаги в пахотном слое почвы. Например, 20 мм влаги и более в этом слое в течение второй и третьей декад вегетации озимых обеспечивают в фазу кущения образование 3...4 побегов высотой 15...25 см и проникновение корней до глубины 40...50 см.

Накопление пластических веществ определяет устойчивость растений к неблагоприятным условиям зимнего периода и в конечном итоге их продуктивность. «Свойство озимых культур – сохраняться осенью в вегетативном состоянии и не развивать репродуктивные органы – является адаптивным признаком, способствующим их перезимовке. При снижении интенсивности роста у озимых культур осенью происходит изменение направленности и интенсивности обмена веществ, а также накопление определенных ингибиторов роста, способствующих переходу растений в состояние зимнего покоя» (Моисейчик В.А., 1975 и др.). Напомним, что *ингибиторы* – это природные, биологические вещества, нарушающие в организме нормальный обмен веществ, тормозящие, например, функции роста растений.

В умеренных и северных широтах зимний период разделяет активные периоды вегетации на продолжительное время вынужденного покоя – от 3 до 6 (7) месяцев. Этот период покоя является относительным, так как жизненные процессы зимующих растений не прекращаются полностью: развитие, дыхание, фотосинтез и метаболизм протекают замедленно, они «заторможены» условиями низких температур и слабой освещенностью (в зависимости от наличия и мощности снежного покрова). Даже в экстремальных условиях растения находятся в состоянии относительного покоя.

Второй активный период наступает с приходом весны и лета, под влиянием увеличивающегося притока солнечной радиации, нарастающих температур воздуха и почвы, обеспечивающих возрастающую активность процессов фотосинтеза, дыхания, метаболизма, роста и развития. После возобновления вегетации весной кущение озимых культур продолжается, однако далеко не все новые (весенние) побеги оказываются способными вступить в фазу колошения, т.е. такие побеги являются малопродуктивными. Поэтому специалисты различают *общую кустистость* и *продуктивную кустистость*.

Второй активный период характеризуется формированием генеративных органов зерновых культур: колоса и колосков, цветков, зерновок и семян. Заканчивается второй период плодоношением и естественным отмиранием растений.

В конечном итоге условия двух активных периодов и малоактивного – зимнего – обеспечивают общее формирование фитомассы растений, включая ее продуктивную часть – урожай.

А.И. Коровин (1984) выделяет еще два переходных подпериода: это подготовка и вхождение растений в зиму и переход растений от зимнего относительного покоя к весеннему, активному периоду. Приблизительная схема смены условий жизнедеятельности озимых культур представлена на рис.17.3. Графическая зависимость озимого растения от температурного фактора всего вегетационного цикла выражается, по мнению А.И. Коровина, следующим образом (рис. 17.4).

В ранне-осенний период (август-сентябрь) в условиях снижения интенсивности солнечной радиации важная роль принадлежит степени освещенности озимых посевов (в фазах всходы – кущение) в накоплении запаса питательных веществ, необходимых для успешной перезимовки растений. На экспериментальных материалах было показано, что проникающий под слой снега (высотой до 10 см) свет при температуре верхних горизонтов почвы 0°C заметно повышает зимостойкость озимых.

Таким образом, важным экологическим признаком озимых культур является приспособление начала развития растений «к вогнутому типу годового хода температуры» (Яковлев Н.Н., 1966), когда температуры снижаются от 13...15°C и ниже.

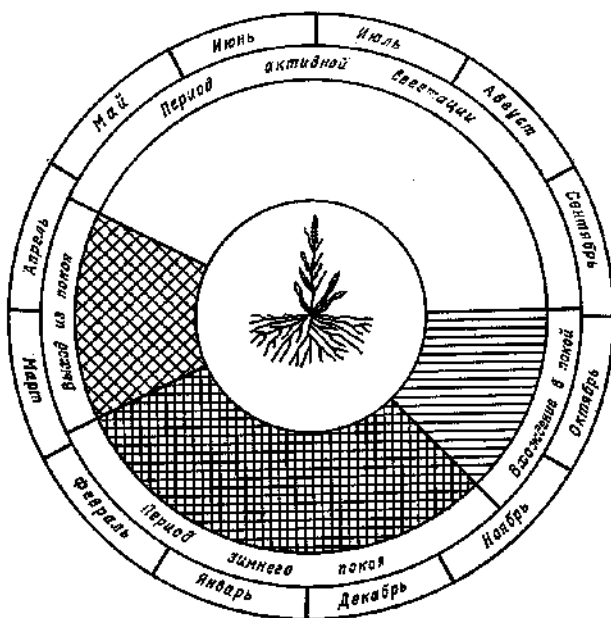


Рис. 17.3. Схема смены условий жизнедеятельности зимующих растений

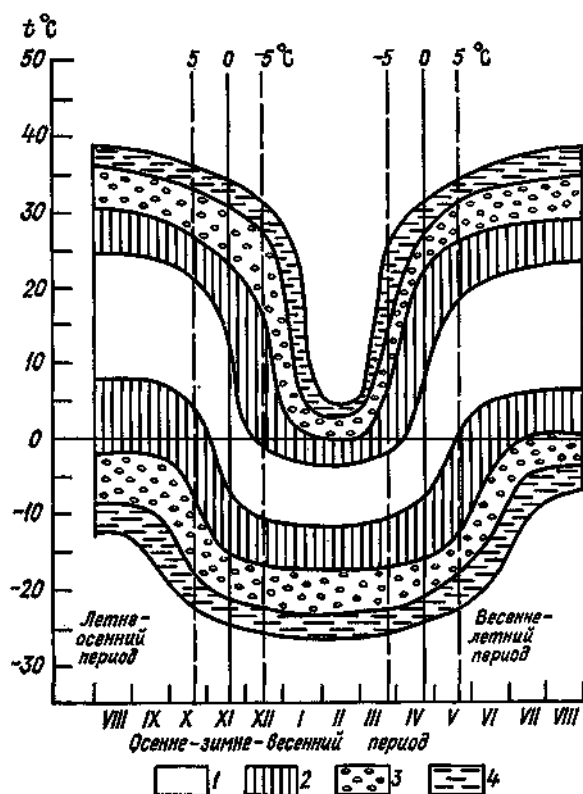


Рис. 17.4. Схема зон реакции зимующих травянистых растений на температуру: 1 – зона активной вегетации и оптимальной перезимовки, 2 – зона адаптационных температур (к центру – нижняя, к периферии – верхняя), 3 – зона повреждения (к центру – нижняя, к периферии – верхняя), 4 – летальная зона

Яровые формы – это однолетние сельскохозяйственные растения, высеваемые весной и дающие урожай в год посева. К основным яровым культурам относятся: *зерновые* – пшеница, рожь, ячмень, овес; *крупяные* – просо, гречиха, кукуруза; *зернобобовые* – горох, фасоль, соя, чечевица, нут; *масличные* – подсолнечник, рапс, кунжут, лен; *прядильные* – лен, хлопчатник, конопля; *овощные* – огурец, кабачок, тыква и многие другие. К яровым также относится ряд двулетних растений, выращиваемых в первый год ради хозяйственно-ценного урожая (капуста, свекла, редис и другие корнеплоды), а во второй год – для получения семенного материала этих культур.

Вегетационный период яровых форм сельскохозяйственных культур проходит в весенне-летне-осенние месяцы, когда наблюдается «выпуклый тип годового хода температуры воздуха» (рис. 17.5). При этом циклы развития яровых культур определяются биологическими и сортовыми свойствами культуры, закрепленными генетически, в частности в отношении их потребностей в режимах освещения, тепла и влаги.

Рассмотрим главные особенности роста, развития и формирования урожая основных сельскохозяйственных культур под влиянием складывающихся агрометеорологических условий.

Озимая пшеница – ценная продовольственная зерновая культура, посевы которой занимают значительные территории. Для ее возделывания наиболее благоприятными являются почвенно-климатические условия Предкавказья, южных районов Ставропольского и Краснодарского краев. Севернее этих краев складываются благоприятные агроклиматические

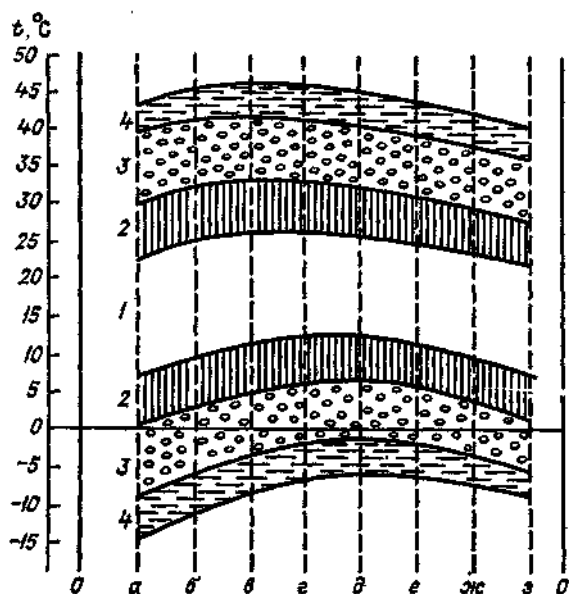


Рис. 17.5. Принципиальная схема зон реакции однолетних холодостойких злаковых растений на температуру: 1 – зона активной вегетации, 2 – зоны адаптационных температур (к центру – нижняя, к периферии – верхняя), 3 – зоны повреждений (к центру – нижняя, к периферии – верхняя), 4 – зоны летальные (к центру – нижняя, к периферии – верхняя); а – всходы, б – кущение, в – трубкование, г – колошение, д – цветение, е – молочная спелость зерна, ж – восковая спелость, з – полная спелость; 0 – семена в сухом состоянии

условия, в том числе в Центрально-Черноземных областях, в Молдавии, в центральных областях Украины и Беларуси (северо-западнее Полесья). Удовлетворительные условия имеют место на юге и юго-востоке Украины и прилегающих областях России, в Центрально-Нечерноземных областях и на северо-западе России.

Северная граница возделывания озимой пшеницы условно проходит по 60-й параллели в Ленинградской области и далее на юго-восток, по линии Вологда – Киров – Казань – Ульяновск – Саратов – Волгоград. Восточнее этой линии агроклиматические условия для посева этой культуры неблагоприятны, поскольку в этих районах наблюдается длительное залегание снежного покрова (более 160 суток), что отрицательно сказывается на перезимовке озимой пшеницы (рис. 17.6). Поэтому посевы озимых культур в Западно-Сибирском регионе составляют не более 5 % площади. Снижение урожайности озимой пшеницы здесь от 6 до 8 лет из десяти составляет 40...50 % от достигнутого максимума. Причины такого существенного недобора урожая связаны с неблагоприятными условиями перезимовки посевов и последующими за ними засушливыми условиями весенне-летнего периода.

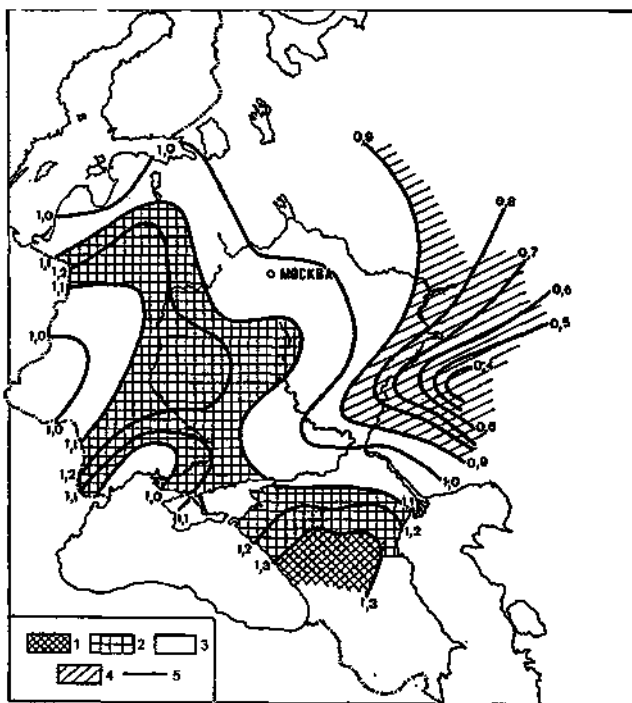


Рис. 17.6. Влияние бонитета климата на урожайность озимой пшеницы: 1 – наиболее благоприятные условия; 2 – благоприятные; 3 – средние; 4 – неблагоприятные; 5 – изолинии значений бонитета климата

Урожайность озимой пшеницы благодаря лучшему использованию агроклиматических условий осенне-зимне-весеннего периода (особенно ресурсов увлажнения) значительно превышает урожайность яровой пшеницы. В среднем урожайность озимой пшеницы составляет 2,0...2,8 т/га, в отдельных районах в благоприятные по погодным условиям годы достигает 5,0...7,0 т/га. Приведем также карту средней областной урожайности озимой пшеницы, составленной В.М. Пасовым (1973) с учетом агротехники, применяемой в 70-х гг. прошлого века (рис. 17.7).

Выбор оптимальных сроков для посева озимых культур, в том числе и озимой пшеницы, относится к числу важных агрономических решений, поскольку сроки сева в значительной степени определяют формирование высоких урожаев зерна (см. рис. 17.2).

По данным А.И. Носатовского (1950), нормальная перезимовка и формирование высокого урожая этой культуры происходят в те годы, когда до наступления зимы растения формируют не менее трех листьев. Это происходит в условиях достаточного увлажнения пахотного горизонта почвы и при наборе суммы средних суточных температур, равной 580 °С.

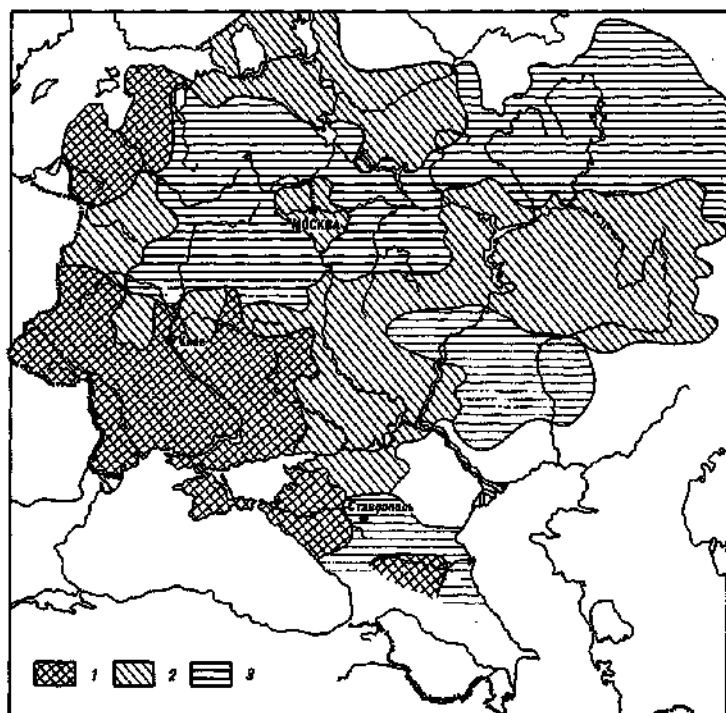


Рис. 17.7. Средняя областная урожайность озимой пшеницы: 1 – 22, 1 – 28 ц/га; 2 – 16,1–22 ц/га; 3 – 10,1–16 ц/га

Лучшими культурами – предшественниками для посевов озимой пшеницы – считаются горох, выращиваемый на зеленый корм и на зерно, кукуруза на зеленый корм и *чистый* (или *черный*) пар, т.е. поля, не занимаемые посевами в течение всего вегетационного периода.

Озимые, посеянные по чистым парам, при одинаковых агрометеорологических условиях осенью имеют в среднем на 1,5...2,0 побега больше, чем растения, посеянные по непаровым предшественникам (Уланова Е.С., 1975).

Известно, что в сухом предпосевном зерне содержится 12...14 % влаги, при соприкосновении с влажной почвой происходит набухание зерна. Скорость процесса набухания зерна находится в прямой зависимости от степени увлажнения почвы и ее температуры. В хорошо увлажненной почве при температуре 9...19 °С набухание заканчивается через 42 часа, при температуре 14...16 °С – через 36 часов. Экспериментально показано, что для набухания требуется 55 % воды от массы зерна.

Прорастание зерна озимой пшеницы происходит при влажности 40...42 %, при влажности 35...37 % и ниже прорастания не отмечалось. Установлено, что чем раньше проведен сев и чем дольше семена находятся в недостаточно и неравномерно увлажненной почве, тем более изреженным оказывается посев. На территории Северокавказского региона, а также Ростовской и Волгоградской областей вероятность осенних периодов с незначительными осадками, которые не обеспечивают появления всходов семян этой культуры, составляет 20...40 % лет. Соответственно, процент лет, обеспеченных осенними осадками для проведения сева культуры в оптимальные сроки, в этом регионе составляет 80...60 % (рис. 17.8). Средние многолетние, предельно поздние сроки сева районированных в этом регионе сортов озимой пшеницы представлены на рис.17.9. В южных районах ареала возделывания озимой пшеницы, в зимние месяцы нередко оттепели, продолжительность которых может достигать нескольких недель. В такие периоды озимые культуры часто возобновляют вегетацию. При этом на степень интенсивности отрастания листьев влияют температурные условия и состояние увлажнения верхних слоев почвы. Так, при оптимальном увлажнении почвы и наборе суммы положительных средних суточных температур ≥ 50 °С *интенсивное* отрастание достигает 2,9 см, при суммах температур 31...49 °С *активное* отрастание составляет 1,7...2,8 см; *слабое* отрастание происходит при сумме температур 12...30 °С, *очень слабое* – при сумме температур < 12 °С. В условиях недостаточного увлажнения верхних слоев почвы требуются большие суммы температур для возобновления отрастания листьев пшеницы (Свислюк И.В., 1980).

В условиях избыточного увлажнения почвы и, следовательно, при недостаточном доступе воздуха к семенам в анаэробных условиях

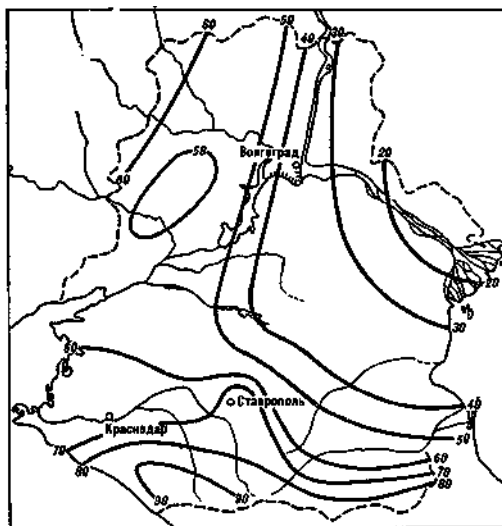


Рис. 17.8. Процент лет, обеспеченных осадками для проведения сева озимой пшеницы по непаровым предшественникам в оптимальные сроки

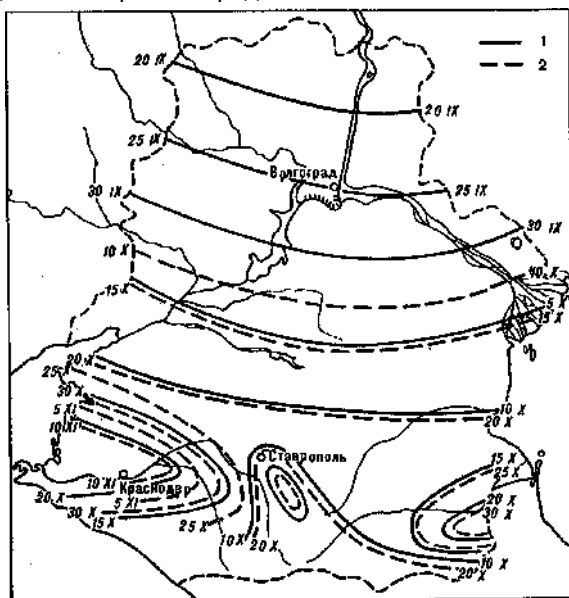


Рис. 17.9. Средние многолетние предельно поздние сроки сева районированных сортов озимой пшеницы: 1 – средние сроки для озимой пшеницы наиболее зимостойких сортов (Мироновская-808, Краснодарская-39), 2 – средние сроки для озимых менее зимостойких сортов (Безостая-1, Аврора, Кавказ)

происходит активное развитие бактериальной флоры, разрушающей семенной материал и способствующей его загниванию. Кроме того, в переувлажненных условиях нарушаются обменные процессы, снижающие жизнеспособность зародышей семян, что также приводит к плохой всхожести семян и изреженности посева в целом.

Семена озимой пшеницы начинают прорастать уже при температуре 1...2 °С, однако для дружного прорастания и появления всходов оптимальной считается температура 14...20 °С. При такой температуре и хорошей влажности пахотного горизонта почвы массовые всходы обычно появляются через 7...9 суток после сева. Температура выше 24 °С неблагоприятна для прорастания семян. При запасах продуктивной влаги в пахотном слое менее 5 мм всходы не появляются.

Е.С. Улановой (1975) установлено, что наименьшая продолжительность периода «посев-всходы» (5...7 суток) наблюдалась при запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы от 30 до 60 мм и при температуре воздуха выше 14 °С. При снижении запасов влаги до 15 мм всходы появлялись через 12 суток, а при уменьшении до 6...7 мм – через 20...25 суток. При снижении температуры воздуха до 10 °С всходы появлялись через 10...12 суток, при температуре 7...8 °С – через 17...20 суток. При температуре 2...3 °С всходы появляются через 40...44 суток или вообще не появляются, и семена уходят в зиму не проросшими. В период зимних оттепелей семена, не проросшие с осени, в условиях оптимального увлажнения почвы прорастают и дают всходы: при средних суточных температурах около 2 °С (при наборе суммы положительных температур 83 °С).

Когда посевы произведены в оптимальные сроки в условиях достаточного увлажнения почвы, всходы озимой пшеницы появляются при накоплении суммы эффективных температур, выше 5 °С, равной 67 °С от дня посева.

Одним из важных условий, обеспечивающих нормальную «зимовку» озимой пшеницы, является фаза развития, в которой растение входит в зимний период. Хорошо укоренившиеся растения в фазе кущения оказываются наиболее стойкими к комплексу неблагоприятных условий зимнего периода (см. часть IV, главу 19). В зависимости от складывающихся условий увлажнения и температуры верхнего слоя почвы (0...10 см) всходы озимой пшеницы вступают в фазу кущения. Мощность и степень кустистости определяется продолжительностью периода от посева до наступления зимних условий: чем короче этот период, тем меньше мощность и кустистость растений. Кустистость выражается *коэффициентом кустистости зерновых культур*, который представляет собой отношение числа стеблей к числу растений на единице площади (рис. 17.10).

Для успешной перезимовки оптимальным считается формирование на растении 2...4 (3...5) стеблей. Зависимость продолжительности периода

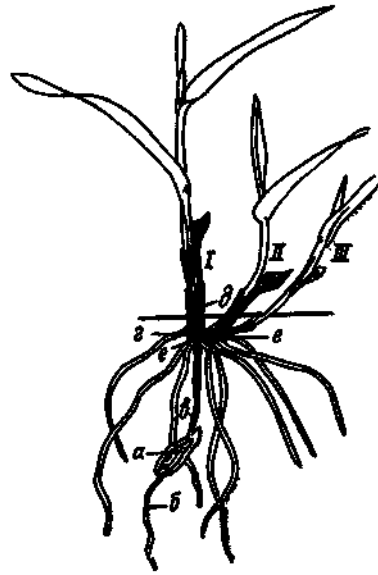


Рис. 17.10. Кущение рыхлокустового злака: I, II, III – побеги первого, второго и третьего порядков; а – семя; б – главный корень; в – надсемядольное колесо; г – узел кущения; д – зародышевое листовое влагалище; е – первичное листовое влагалище (В.Р. Вильямс, 1949)

всходы – кущение озимой пшеницы от температуры воздуха в условиях оптимального увлажнения почвы представлена на рис.17.11. При благоприятных условиях эта фаза наступает и заканчивается осенью, при неблагоприятных – фаза не завершается до ухода растений в зиму или не наступает вообще и «переносится» на весну.

Наступление фазы кущения озимой пшеницы находится в тесной зависимости от температуры и запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы. При запасах влаги 30 мм и более кущение озимой пшеницы начинается после фазы всходов при накоплении суммы эффективных температур воздуха (выше 5 °C), равной 67 °C (Шиголов А.А., 1957). По данным Н.Н. Яковлева (1966), в условиях хорошего увлажнения почвы, при наборе сумм эффективных температур (≥ 5 °C) 200 °C формируется в среднем до трех стеблей озимой пшеницы, при наборе 300 °C – до шести стеблей. Однако эта закономерность часто «нарушается» биологическими особенностями различных сортов культуры и агрометеорологическими условиями конкретных осенних периодов.

На многочисленных опытах показано, что степень кустистости зависит от многих агрономических причин: сроков и способов осеннего сева, качества семян, нормы высева и глубины заделки семян, типа почвы и уровня ее плодородия, а также от агрометеорологических условий – режимов влажности и температуры почвы. В отдельные теплые и влажные осени происходит израстание (перерастание) озимых растений, которое выражается в обилии стеблей, вытянутости их соломины (до 25 см и более) и др.

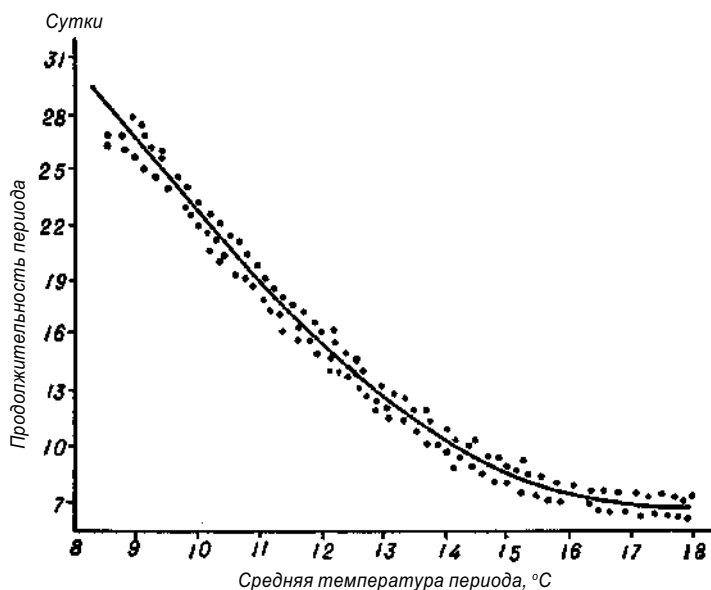


Рис. 17.11. Продолжительность периода «всходы – кущение» в зависимости от средней температуры (Яковлев Н.Н., 1966)

Такие мощные, равно как и недоразвитые, слабые растения обычно легко повреждаются в зимний период: выпревают, поражаются грибковыми заболеваниями и насекомыми.

Наименьшая продолжительность периода «всходы – кущение», составляющая 8...10 суток, наблюдается при запасах влаги 30...50 мм в слое почвы 0...20 см и температуре воздуха 13...18 °C. При такой же температуре, но при снижении запасов влаги до 15 мм период от всходов до кушения увеличивается до 16...18 суток; при дальнейшем снижении запасов влаги до 6...8 мм фаза кушения наступает только через 25...30 суток.

Наиболее благоприятной для кушения озимой пшеницы является температура воздуха 9...12 °C при запасах продуктивной влаги более 20 мм в пахотном слое. При температуре 1...3 °C кушение не наступает, и растение уходит в зиму ослабленным в фазе всходов, что крайне неблагоприятно для формирования будущего урожая.

Активная вегетация озимой пшеницы прекращается после перехода среднесуточной температуры воздуха осенью через 5 °C в сторону понижения. Однако в южных регионах переход от осени к зиме более продолжителен по времени, происходит постепенно благодаря более интенсивному дневному прогреву воздуха. Поэтому процесс кушения озимой пшеницы

наблюдается и в период от даты перехода температуры воздуха через 5°C до даты перехода ее через 3°C . Во время длительных возвратов осенней теплой погоды возможно не только продолжение процесса кущения, но и «израстание» озимых посевов. Это явление выражается в образовании значительного количества побегов, которые в условиях малого притока солнечной радиации вытягиваются, теряют предзимнюю закалку, остаются слабыми и при наступлении зимних холодов погибают. При благоприятных условиях озимая пшеница, посеянная в оптимальные сроки, формирует к концу осени 3...6 побегов на одном растении.

Продолжительность периода от всходов до прекращения вегетации озимой пшеницы составляет в среднем 40...45 (до 60) суток (рис. 17.12). Именно в этот период происходит стадия биологического развития растений – *стадия яровизации*, после которой озимые приобретают способность образовывать плодonoсящие побеги. У переросших растений в теплые и влажные осени эта стадия проходит в более поздние сроки – до устойчивого перехода средней суточной температуры через 0°C в сторону понижения. В отдельные неблагоприятные годы прохождение этой стадии возможно в зимние месяцы или ранней весной. Наиболее

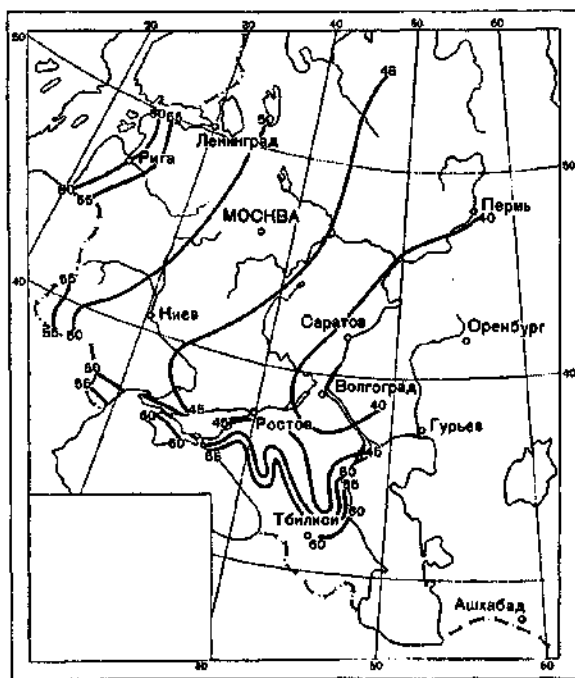


Рис. 17.12. Продолжительность осеннего периода (в сутках) с температурами от 10°C до 0°C (Яковлев Н.Н., 1966)

благоприятными агрометеорологическими условиями для стадии яровизации являются температура воздуха в пределах 1...-10 °С и запасах влаги 25...45 мм в слое почвы 0...20 см; при запасах менее 20 мм в слое 0...20 см кущение озимых растянуто во времени и дает малое число боковых побегов, при запасах 10 мм боковые побеги не образуются.

В ареале возделывания озимой пшеницы осеннее увлажнение почвы складывается под влиянием атмосферных осадков, количество которых изменяется от года к году в широких пределах. Общая картина различий в запасах почвенной влаги к началу осени представлена на рис. 17.13.

Поскольку осенью температура верхнего слоя почвы (0...10 см) имеет высокую корреляционную связь с температурой воздуха (коэффициент корреляции 0,97), в практической работе удобнее пользоваться данными о температуре воздуха (Моисейчик В.А., 1975).

Таким образом, после посева озимые культуры проходят следующие фазы развития в осенне-зимний, ранневесенний периоды: набухание и прорастание семян, всходы, третий лист и кущение. При этом процесс кущения может продолжаться и в ранневесенний период до перехода к IV этапу органогенеза (подробнее об этапах органогенеза см. в Части II).

В основных районах возделывания озимых зерновых культур зимний период в жизни растений является критическим. Озимые, находясь в состоянии вынужденного относительного покоя, находятся под воздействием метеорологических условий, различные сочетания которых могут наносить повреждения зимующим органам растений. Причинами повреждения (вплоть до гибели посевов озимых на больших площадях) в зимние месяцы являются *вымерзание, выпревание, вымокание, вредное влияние притертой к почве ледяной корки, выпирание, выдувание, зимняя и весенняя засуха*. Влияние неблагоприятных условий холодного периода в жизни озимых культур рассмотрено в Части IV.

В формировании урожая озимой пшеницы значительная роль принадлежит складывающимся агрометеорологическим условиям весеннего периода. Перезимовавшие растения весной частично теряют свою корневую систему, листья, стебли, нередко за зимний период у них повреждаются узлы кущения. При благоприятных условиях весны – постепенном нарастании тепла, достаточной влагообеспеченности корневой системы, при отсутствии резких колебаний температуры воздуха в течение суток и т.п. – перезимовавшие растения быстро выправляются. Для проведения полевых работ по подкормке ослабленных посевов минеральными удобрениями используют информацию о средних многолетних сроках оттаивания почвы, помещаемую в агроклиматических справочниках (рис.17.14).

Неблагоприятные условия в ранневесенний период (от схода снега до начала активной вегетации) для озимых культур проявляются в быстром подъеме температуры воздуха и пересыхании верхних горизонтов

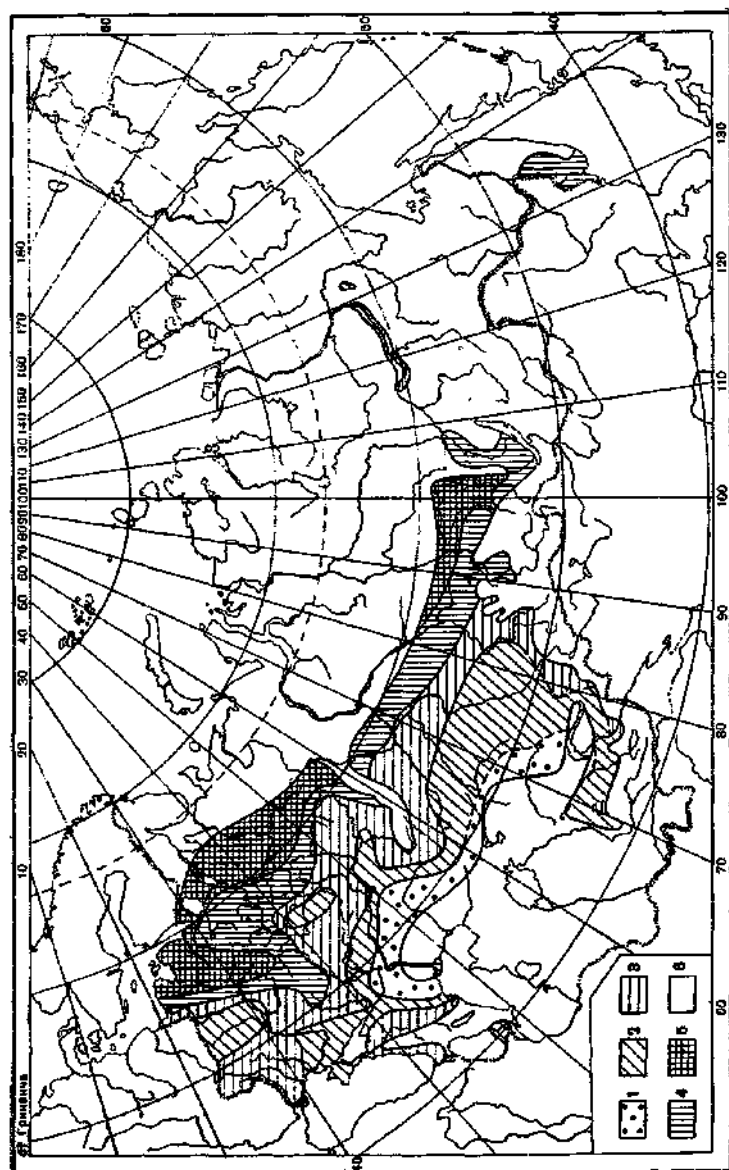


Рис. 17.13. Средние многолетние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы по чистому пару ко времени наступления средней суточной температуры $+15^{\circ}\text{C}$ осенью: 1 – менее 50 мм, всходы озимых задерживаются су-
хостью пахотного слоя почвы более 50 % лет; 2 – 50–100 мм; 3 – 100–150 мм; 4 – 150–200 мм; 5 – более 200 мм;
6 – районы горные, поливные и слабо изученные в отношении влажности почвы (Яковлев Н.Н., 1966)

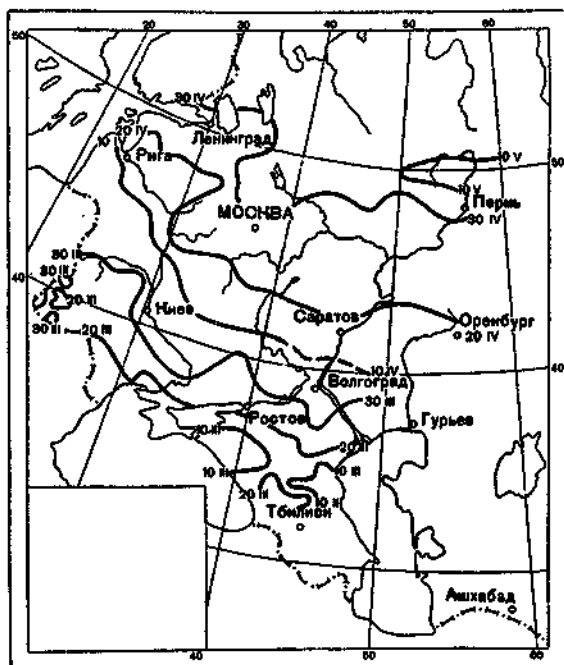


Рис. 17.14. Средние многолетние даты оттаивания почвы

почвы. Высокие суточные амплитуды температуры воздуха и сильные ночные заморозки на оголенной почве также оказываются вредными для ослабленных после зимнего периода растений (Яковлев Н.Н., 1966).

В черноземных районах, где тепловые ресурсы достаточны для этой культуры, величина весенних запасов продуктивной влаги определяет уровень будущего урожая. По данным Е.С. Улановой, хорошими весенними запасами влаги в метровом слое почвы являются 150...200 мм, удовлетворительными – 120...150 мм, плохими – менее 100 мм.

В период «выход в трубку – колошение» у озимой пшеницы проявляется наибольшая потребность во влаге вследствие интенсивного роста, характерного для этого периода. На рис.17.15 представлены средние многолетние даты начала колошения озимой пшеницы и запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в эту фазу. Наиболее высокие урожаи формируются в годы, когда в этот период запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы составляют 100...125 мм. При небольших запасах продуктивной влаги в почве весной урожайность озимой пшеницы в значительной степени зависит от количества выпадающих осадков. Майские осадки в количестве 40...80 мм обеспечивают хорошие условия для формирования урожая, особенно при температурах воздуха 15...20 °С.

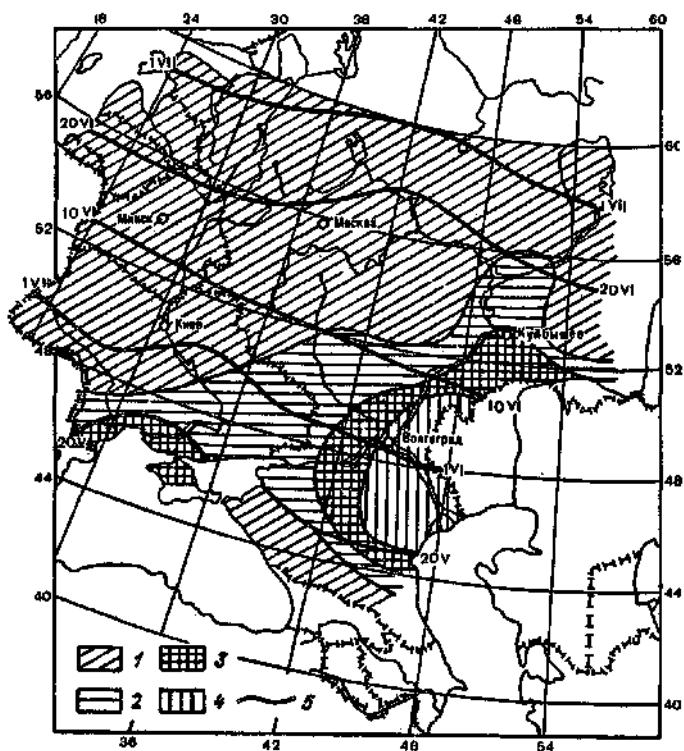


Рис. 17.15. Средние многолетние даты начала колошения озимой пшеницы и запасы влаги в мм в метровом слое почвы в эту фазу.

Запасы влаги: 1 – хорошие (более 80 мм); 2 – удовлетворительные (60–80 мм); 3 – недостаточные (40–60 мм); 4 – плохие (менее 40 мм); 5 – изохроны средних многолетних дат начала колошения озимой пшеницы

В период цветения и созревания потребность в тепле у растений возрастает. Однако при высоких температурах в период цветения резко снижается жизнеспособность пыльцы, что ухудшает опыление и снижает будущий урожай. Минимальная температура для цветения считается 6...7 °С, максимальная – около 40 °С. При снижении относительной влажности воздуха до 30 % и ниже, повышении температуры до 25 °С и выше и скорости ветра 5 м/с и более, при недостатке продуктивной влаги в почве отмечается пожелтение, скручивание и подсыхание листьев, формируется щуплое зерно и образуется череззерница.

По данным С.А. Вериги, запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы 40 мм и более в среднем за период «цветение – начало восковой спелости» способствуют формированию полноценного зерна; при

влагазапасах 10 мм и менее процесс формирования зерна прекращается, растение засыхает.

В табл. 17.3 представлены показатели запасов продуктивной влаги в метровом горизонте почвы, которыми пользуются при оценке состояния посевов озимой пшеницы в основные фазы развития этой культуры в весенне-летние месяцы ее вегетации.

Общая продолжительность вегетационного периода озимой пшеницы, включая зимний период, в зависимости от сорта и сложившихся агрометеорологических условий варьирует от 275 до 330 суток. Эта культура хорошо использует осеннюю и весеннюю влагу, поэтому ее урожайность в значительно меньшей степени зависит от условий увлажнения весенне-летних месяцев, чем яровых зерновых культур.

Таблица 17.3

Показатели оценки запасов продуктивной влаги (мм) в слое почвы 0...100 см в основные периоды осенне-летней вегетации озимой пшеницы (Уланова Е.С., 1975)

Период	Запасы продуктивной влаги, мм			
	хорошие	удовлетворительные	недостаточные	плохие
Возобновление вегетации	150...200	120...150	100...120	< 100
Рост стебля	140...180	100...140	80...100	< 80
Колошение	80...140	60...80	40...60	< 40
Налив зерна	80...100	40...80	30...40	< 25

Для озимой пшеницы характерно развитие мощной, хорошо разветвленной корневой системы, глубоко проникающей в почву, благодаря которой растение меньше подвержено влиянию засух и суховеев (см. часть IV, главу 18).

Известно, что высота растений, особенно злаков, является весьма информативным критерием при оценке видов на урожай. Е.С. Улановой (1975) установлена зависимость урожайности (ц/га) озимой пшеницы двух наиболее распространенных сортов, возделываемых по высокой агротехнике от конечной средней высоты стеблей (X) этой культуры (рис. 17.16).

Зависимость урожайности озимой пшеницы (Мироновская-1), имеющей различную степень развития осенью и количества сохранившихся после перезимовки стеблей, имеет нелинейный характер:

$$Y = 0,086kp + 1,02, \quad (17.1)$$

$$\eta = 0,86; E_Y = \pm 2,5 \text{ ц/га},$$

где Y – урожайность зерна в ц/га; k – средняя кустистость пшеницы по полю осенью (определяется в полевых условиях); p – среднее по полю количество стеблей у растений, сохранившихся после перезимовки (в процентах от осеннего их количества); E_Y – средняя квадратическая ошибка расчета урожайности по уравнению.

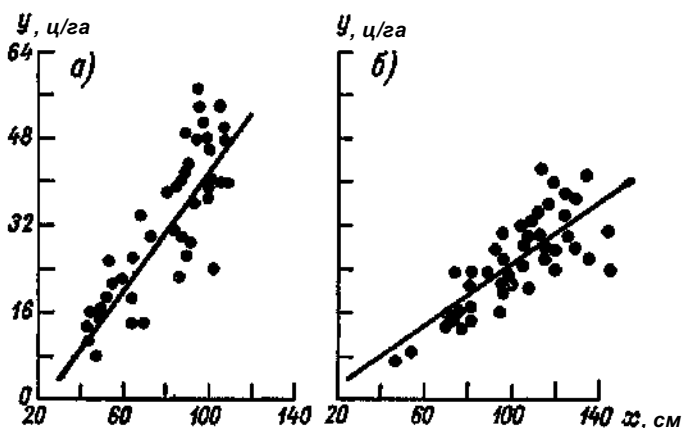


Рис. 17.16. Зависимость урожайности (y) ц/га озимой пшеницы Безостая-1 (а) и Одесская-3 (б) от конечной высоты (x) см при высокой агротехнике

Установлено, что наиболее высокие урожаи зерна озимой пшеницы формируются в годы, когда запасы продуктивной влаги в фазу выхода в трубку достигают 160...180 мм в метровом слое почвы (рис. 17.17). При этом важное значение имеет средняя густота стеблестоя на единице площади: при увеличении числа стеблей от 500 до 1000 на 1 м² урожайность культуры повышается с 8 до 16...30 ц/га. Для условий Северного Кавказа и ряда областей Украины и Молдавии зависимость средней областной урожайности озимой пшеницы сортов Безостая-1 и Мироновская-808 (Y , ц/га) от средних по области запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы (W , мм) и среднего числа стеблей на 1 м² (X) имеет следующий вид:

$$Y = -35,75 + 0,55W - 0,0017W^2 + 0,03X - 9 \cdot 10^{-6} X^2. \quad (17.2)$$

Обеспеченность этого уравнения 87 %. Графически эти зависимости, применительно к различным регионам представлены на рис. 17.18.

Уборка озимой пшеницы происходит обычно на 7...10 суток раньше уборки яровых зерновых культур, что позволяет более равномерно распределять трудовые затраты и сельскохозяйственную технику.

Степень благоприятности агроклиматических условий весенне-летнего периода для формирования урожайности озимой пшеницы оцениваются (Уланова Е.С., 1975) по коэффициенту увлажнения K_y :

$$K_y = W_{\text{в}} + R_{\text{вс}} / 0,01 \sum t_{\text{вс}}. \quad (17.3)$$

где $W_{\text{в}}$ – весенние запасы продуктивной влаги (мм) в слое почвы 0...100 см; $R_{\text{вс}}$ – сумма осадков и $\sum t_{\text{вс}}$ – сумма активных температур воздуха выше 5 °С за период возобновления вегетации – восковая спелость этой культуры.

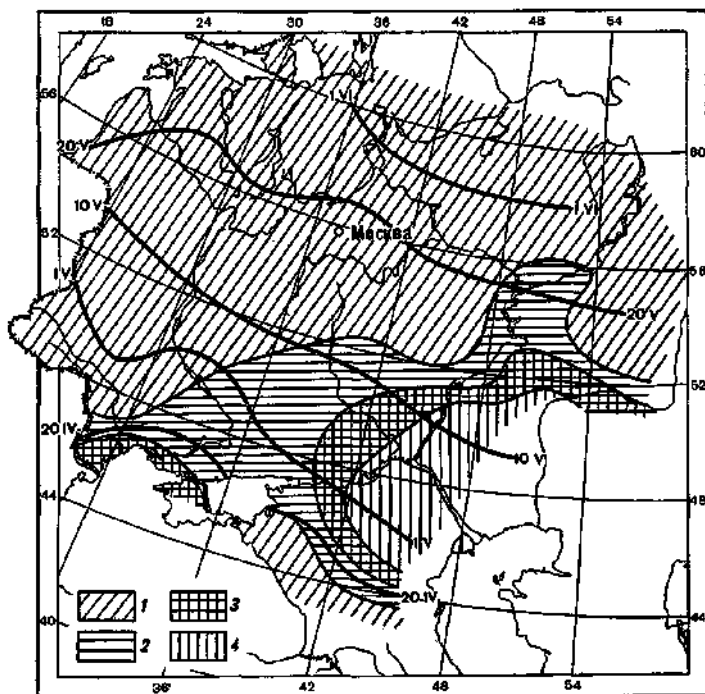


Рис. 17.17. Средние многолетние даты выхода в трубку озимой пшеницы (изолинии) и запасы влаги в метровом слое почвы в эту фазу (штриховка): 1 – хорошие (более 100 мм); 2 – удовлетворительные (90...80 мм); 3 – недостаточные (70...50 мм); 4 – менее 50 мм

Многолетние исследования зависимости урожайности озимой пшеницы от складывающихся агрометеорологических условий и биометрических факторов (количество стеблей на единице площади, высота растений и др.) позволили Е.С. Улановой (1975, 1988) сделать следующие выводы:

1. Наиболее высокая связь урожайности этой культуры наблюдается с числом стеблей на 1 м² весной (и колосonoсных стеблей в фазу колошения) – $\eta = 0,74...0,81$ (рис. 17.19).

2. Высокие значения связи урожайности с высотой растений, начиная с фазы колошения, $\eta = 0,69...0,73$.

3. Запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы через 10 суток после весеннего возобновления вегетации и в декаду фазы выхода в трубку находятся в удовлетворительной связи с урожайностью, $\eta = 0,67...0,68$. Зависимости урожайности культуры от запасов влаги в почве (0...100 см) в последующие фазы развития – колошения и молочной спелости несколько снижаются ($\eta = 0,51...0,52$), поскольку формирование

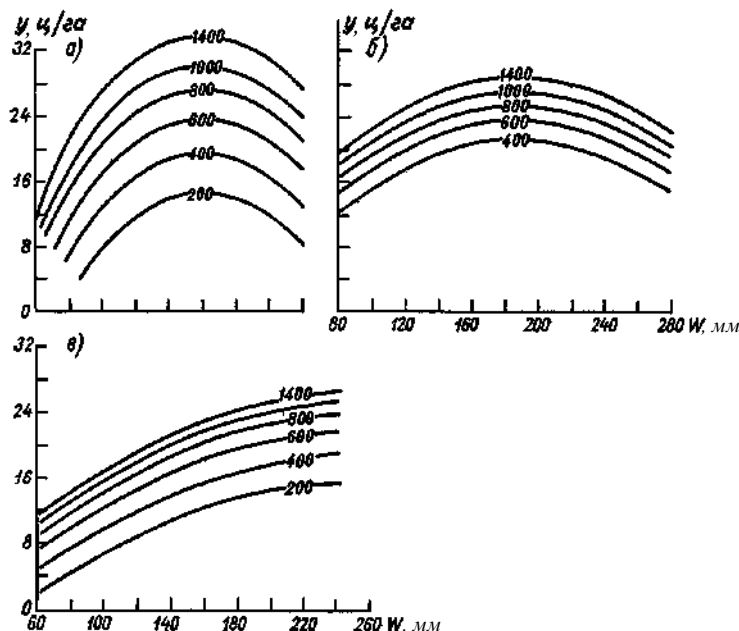


Рис. 17.18 Зависимость средней областной урожайности Y (ц/га) озимой пшеницы сортов Безостая-1 и Мироновская-808 от средних по области запасов влаги W (мм) в метровом слое почвы и числа стеблей на 1 м^2 в фазу выхода в трубку (в поле графика). а – Северный Кавказ, Украина и Молдавия, б – северные и западные области Украины, в – Центрально-Черноземная зона и Среднее и Нижнее Поволжье

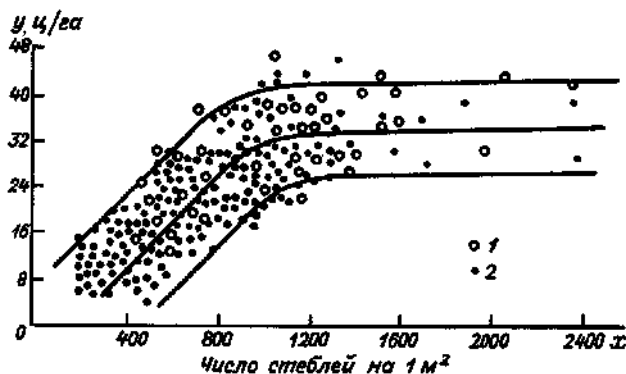


Рис. 17.19. Зависимость урожайности y озимой пшеницы Безостая-1 от общего числа стеблей в весеннее обследование по разным предшественникам (x) на черноземных почвах (поля колхозов). Предшественники: 1 – черный пар, 2 – другие

числа колосков в колосе, от которых зависит число зерен в колосе, определяется запасами влаги в предшествующие фазы развития растений.

4. Зависимость величины урожайности от продолжительности межфазных периодов (возобновление вегетации весной – до выхода в трубку) и (от молочной до восковой спелости) выражается $\eta = 0,51 \dots 0,64$.

5. Корреляционные отношения урожайности с температурой воздуха наиболее устойчивы в период «выход в трубку – колошение», $\eta = 0,50 \dots 0,62$.

6. С суммами осадков апреля, мая и июня корреляционные отношения связей урожайности озимой пшеницы варьируют в пределах $0,34 \dots 0,41$.

Озимая рожь посевная – одна из древнейших зерновых культур, выращиваемая на территории России со II – I тысячелетия до н. э. Возделывается почти во всех почвенно-климатических зонах (Центрально-Черноземная зона, Урал, Алтай, Казахстан, Сибирь, Дальний Восток), но в основном в Нечерноземной зоне России, где сосредоточено около 80 % ее посевных площадей, отличающихся благоприятными для озимой ржи природными условиями. Средняя областная урожайность ее составляет $1,5 \dots 1,7$ т/га. Среди продовольственных культур по посевным площадям и валовым сборам занимает второе место после озимой пшеницы. Это пищевая, кормовая и техническая культура. По содержанию белка в зерне она уступает озимой пшенице, но близка к ней по содержанию жира и углеводов. В зерне больше, чем в пшенице, витаминов и зольных элементов. Из зерна ржи изготавливается мука для выпечки хлеба, крахмал, патока, комбикорма для сельскохозяйственных животных, которые поедают также зеленую массу и сено ржи.

Это холодостойкая, зимостойкая и довольно засухоустойчивая культура. Из всех озимых культур озимая рожь наиболее устойчива к неблагоприятным условиям зимнего периода. Критическая температура вымерзания ее различных сортов в зависимости от осеннего состояния и зимовки после прохождения второй фазы закалки колеблется в отдельные годы от -18 до -24 °C, а в Восточной Сибири даже до $-25 \dots -28$ °C. В литературе имеются указания, что в малоснежные зимы местные сорта ржи выдерживают морозы до $30 \dots 35$ °C (Иванов А.П., 1961; Моисейчик В.А., 1975 и др.).

Основными биологическими особенностями культуры являются меньшие, чем у пшеницы, потребности в агрометеорологических и почвенных условиях произрастания. Она хорошо развивается на различных почвах, кроме заболоченных. На черноземах эта культура дает наиболее высокие урожаи, устойчива к повышенной кислотности почв.

Лучшими предшественниками озимой ржи являются чистые (черные) пары, однолетние и многолетние травы, лен. Рожь интенсивно кустится и укореняется, легко переносит дефицит почвенной влаги и избыточное увлажнение почвы. Вегетационный период составляет $120 \dots 150$ суток (в том числе осенний период – $45 \dots 50$ суток, весенне-летний – $75 \dots 100$ суток).

Средние многолетние сроки сева озимых культур представлены на карте, составленной А.А. Шиголевым (см. рис. 17.2).

Весеннее возобновление вегетации этой культуры происходит при температуре воздуха около 5 °С. При наличии влаги в почве семена ржи начинают прорастать при температуре 1...2 °С; оптимальная температура для их прорастания 20...22 °С. Дружные всходы озимой ржи появляются через 6...8 суток после посева при температуре 12...14 °С и при хороших запасах влаги (30...40 мм) в верхних 20 см почвенного слоя. Наименьшая продолжительность периода «посев – всходы» (до 10 суток) наблюдается при температуре 13 °С и запасах продуктивной влаги в пахотном горизонте почвы более 30 мм. Продолжительность этого периода увеличивается до 15...20 суток при температуре 9...11 °С и хороших запасах влаги или при температуре 13 °С, но при более низких запасах влаги (15...20 мм в слое 0...20 см). Для условий Западной Сибири Е.С. Улановой (1956) получена количественная зависимость между продолжительностью периода «посев – всходы» N , (сутки) и запасами продуктивной влаги в слое почвы 0...20 см W (мм):

$$N = 74,2 / W^{0,74} . \quad (17.4)$$

Рожь хорошо кустится преимущественно осенью, при средней суточной температуре воздуха около 12 °С, хотя слабое кущение наблюдается и при температуре около 5 °С. На посевах, проведенных в оптимальные сроки, фаза кущения продолжается 35...40 суток. При наличии достаточных запасов влаги в почве в период от даты посева до образования третьего побега кущения растению необходима сумма эффективных температур (≥ 5 °С) 200 °С, а до появления шестого побега кущения – 300 °С. Стадия яровизации озимой ржи длится от 20 до 70 суток, при температуре воздуха 0...–2 °С в зависимости от географического района посева средняя продолжительность яровизации составляет 35...40 суток.

Влияние запасов продуктивной влаги в слое почвы 0...20 см на продолжительность периода «всходы – начало кущения» озимой ржи при оптимальном обеспечении растений теплом выражается уравнением:

$$N = 93,4 / W^{0,64} . \quad (17.5)$$

Зависимость коэффициента кущения (K) озимой ржи от средних за период запасов влаги в пахотном слое почвы в пределах 30...80 мм ($W_{\text{сред}}$) и суммы эффективных температур воздуха ($\sum t_{\geq 5^{\circ}\text{C}}$) за период кущения выражается уравнениями регрессии (Моисейчик В.А., 1975):

$$K = 0,02W_{\text{сред}} + 1,4 ; \quad (17.6)$$

$$K = 0,005 \sum t_{\geq 5^{\circ}\text{C}} + 1,3 . \quad (17.7)$$

Размерность коэффициентов: $W_{\text{сред}}$ – 1/мм, $\sum t_{\geq 5^{\circ}\text{C}}$ – 1/°С.

Закладка элементов колоса – числа колосков и числа цветков в колосе – происходит в конце фазы кущения и завершается в начале фазы выхода в трубку. В период выхода в трубку благоприятна температура воздуха 11...12 °С. К началу колошения рост растений составляет 50...60 % их конечной высоты. В период колошения (май – июнь) хорошими условиями считается температура 14...15 °С, в период цветения и созревания благоприятна температура воздуха 16...17 °С.

Период цветения длится обычно 7...8 суток. Однако цветение каждого отдельного цветка продолжается всего 12...25 мин. В теплую погоду пыльники раскрываются, из них вылетает обильная пыльца, которая разносится ветром; опыление происходит перекрестно. При жаркой и сухой погоде пыльца пересыхает и теряет свою жизнеспособность. В пасмурную, дождливую погоду пыльники не раскрываются.

Рожь относится к числу засухоустойчивых культур, что объясняется, в частности, хорошим развитием ее корневой системы. Наибольшее потребление влаги посевами ржи отмечается в период быстрого роста растений – от выхода в трубку до колошения. Недостаток влаги в этот период угнетает рост листовой поверхности, биомассы всего растения, корневой системы, вызывает образование пыльцы, обладающей низкой жизнеспособностью (даже стерильностью). В результате происходит формирование мелких и малопродуктивных колосьев. На урожайность озимой ржи заметное влияние оказывают осадки, выпавшие в течение трех декад после наступления фазы колошения, и температурный режим этого периода (рис. 17.20).

При избыточном увлажнении почвы в критический период развития растений происходит резкое снижение аэрации почвы, нарушающей нормальное функционирование корневой системы озимой ржи и повышающей вязкость протоплазмы клеток. Более того, происходит нарушение нормального обмена веществ во всем растении, включая репродуктивные органы: накопленные питательные вещества расходуются в усиливающемся процессе дыхания без достаточного пополнения их в процессе фотосинтеза.

Однако наибольшее снижение урожайности зерна происходит при недостаточном увлажнении почвы в критические периоды развития растений. Согласно исследованиям Ф.М. Куперман (1955), больше всего растения повреждаются засухой в период формирования репродуктивных органов (VI...IX этапы органогенеза).

Продолжительность вегетационного периода озимой ржи колеблется в зависимости от сорта и сложившихся агрометеорологических условий от 150 до 250 суток. От даты весеннего возобновления вегетации до созревания зерна этой культуры необходим набор сумм средних суточных температур воздуха: для раннеспелых сортов – 1300 °С, для позднеспелых – 1400 °С.

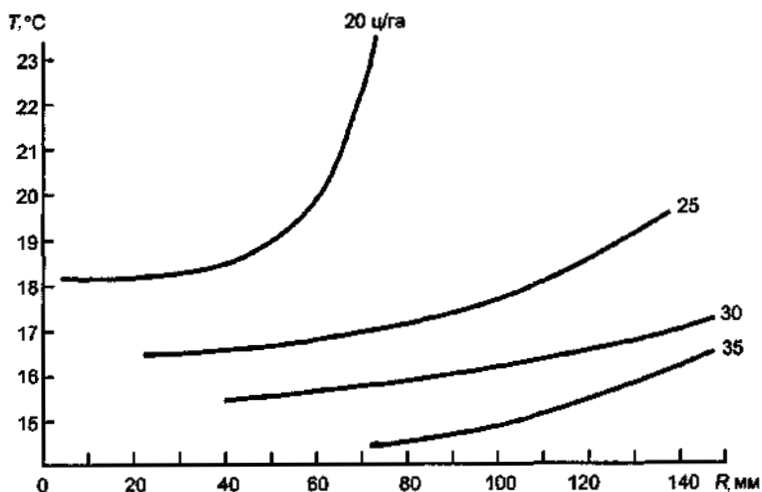


Рис. 17.20. Зависимость урожайности озимой ржи от количества осадков, выпавших в течение трех декад после наступления фазы колошения, и средней температуры воздуха за этот период

По данным А.Н. Дервянко (1978), наибольшее влияние на урожайность этой культуры оказывают уровень увлажнения (суммы осадков за апрель–июль) и температуры воздуха в мае–июле. Средняя кустистость растений по полю осенью (k) и средняя густота стояния растений озимой ржи, сохранившихся к началу вегетации весной в процентах от осеннего их количества (p), в значительной мере определяют урожайность озимой ржи:

$$Y = 0,063kp, \quad (17.8)$$

$$\eta = 0,84, \quad E_Y = \pm 2,3 \text{ ц/га.}$$

Эти данные получены для озимой ржи сорта Вятка.

Яровая пшеница относится к числу важнейших зерновых продовольственных культур, возделываемых на больших площадях в мире, в России и в сопредельных странах СНГ. Основные посевные площади этой культуры расположены в Нечерноземной зоне России, в Поволжье, в Уральском регионе, в Западной и Восточной Сибири, а также в Казахстане и в других районах. Она уступает озимой пшенице по уровню урожайности, но успешно заменяет ее в тех регионах, где из-за суровых и малоснежных зим выращивание озимой пшеницы нецелесообразно.

Способность яровой пшеницы быстро развивать мощную корневую систему обеспечивает ее относительную засухоустойчивость в тех районах, где на фоне повышенной температуры велика повторяемость засушливых явлений, засух и суховеев. Северная граница возделывания

скороспелых мягких сортов этой пшеницы проходит по изолинии сумм температур 1350...1400 °С, а сортов твердой пшеницы – по изолинии 1600...1700 °С.

Прорастание семян яровой пшеницы начинается при температуре 1...2 °С, всходы появляются при 4...5 °С, что позволяет производить посевы в ранние весенние сроки. Набухшие и наклюнувшиеся в почве семена способны без серьезных повреждений переносить кратковременные понижения температуры воздуха до -10...-13 °С. При температуре почвы на глубине заделки семян 5 °С всходы появляются на 20-е сутки, при 10 °С – на 9-е сутки, при 15 °С – на 7-е сутки, при 20 °С – на 5-е сутки, при 25 °С – на 4-е сутки. Всходы пшеницы переносят заморозки до -6...-8 °С.

В центральных районах Нечерноземной зоны России запоздание в сроках посева на 10...20 суток приводит к недобору урожая зерна на 25...40 %. При отклонении сроков сева от оптимальных лишь на несколько суток критические периоды в развитии растений проходят, как правило, в неблагоприятных условиях, следствием которых становится недобор урожая зерна.

Оптимальными условиями увлажнения в начале развития растений являются запасы продуктивной влаги в пахотном горизонте почвы 30...40 мм. В условиях хорошей влагообеспеченности начало кущения яровой пшеницы наблюдается при накоплении суммы эффективных температур воздуха (выше 5 °С) 67 °С. Оптимальные условия для кущения растений наступают при температуре воздуха 13...18 °С. В районах с засушливой весной и влажным летом (Северный Кавказ, Западная Сибирь) после прошедших дождей нередко развиваются поздние побеги кущения, так называемые *подгоны*, зерно которых чаще всего не дозревает ко времени восковой спелости зерна главных стеблей, готовых к уборке.

Недостаток влаги в почве после выхода в трубку (критический период) приводит к снижению количества развитых и увеличению бесплодных зерновок в колосе. Выпадающие впоследствии даже обильные осадки не могут повлиять на увеличение количества зерновок в колосе. Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в этот период менее 80 мм неблагоприятны для нормального развития растений.

Яровая пшеница – растение «длинного дня». После фазы выхода в трубку у нее проявляются сортовые различия по потребности к теплу. Например, для прохождения периода развития от выхода в трубку до колошения различным сортам требуется сумма эффективных температур (выше 5 °С), равная 282...400 °С, а от колошения до фазы восковой спелости – 450...540 °С.

Для роста и развития растений в период колошения и фазы молочной спелости наиболее благоприятной считается температура воздуха

16...23 °С. Из сортов яровой пшеницы наименьшая потребность в тепле в период созревания характерна для сибирских сортов, созревающих при температурах 10...12 °С. В период цветения и налива зерна яровая пшеница повреждается заморозками -1...-2 °С. Чаще всего такие повреждения наблюдаются в северных подтаежных районах, в лесостепных и степных районах Сибири и Северного Казахстана, где они являются одной из причин, определяющих северную границу ареала возделывания этой культуры. После наступления восковой спелости семенные качества сохраняются даже при заморозках -5...-7 °С.

Яровая пшеница относится к засухоустойчивым культурам, однако, атмосферная и почвенная засухи в период «колошение – молочная спелость» заметно снижают урожай зерна. Например, если во время интенсивных суховеев запасы продуктивной влаги в пахотном горизонте снижаются до 10 мм, а в метровом слое – до 30 мм и менее, то наблюдается сильное увядание растений, пожелтение и преждевременное отмирание листьев, а также прекращение ростовых процессов. При снижении относительной влажности воздуха до 10...20 % и высоких дневных температурах (≥ 40 °С) даже в условиях орошения зерно может созреть преждевременно и оказывается щуплым, неполноценным. Наиболее благоприятными для растений в этот период являются запасы продуктивной влаги в почве в пределах 70...75 % наименьшей влагоемкости.

Летом в условиях теплой и дождливой погоды, когда зерновые культуры находятся в фазах молочной спелости или в начале восковой спелости наблюдается явление, называемое *истеканием зерна*. Этот процесс происходит в результате вымывания излишней влагой, находящейся в колосьях, растворимых органических и минеральных веществ из зерна. Из трещин молодых, еще не полностью сформировавшихся зерен на их поверхность *истекает* вязкая жидкость, называемая «медвяной росой». На этой «росе» поселяются плесневые грибы, которые вызывают потемнение зерен и значительное ухудшение пищевых качеств зерна. Истекание зерна снижает потенциальную урожайность пшеницы на 20...30 %. Это явление наблюдается в отдельные годы на посевах зерновых колосовых культур в Западной Сибири, на Северном Кавказе, в Крыму и других районах.

Суммарное потребление влаги яровой пшеницей распределяется в течение ее вегетации по фазам развития примерно следующим образом: в период всходов расходуется 5...7 % влаги, в фазе кущения – 15...20, в период выхода в трубку и колошения – 50...60, в фазе молочной спелости – 20...30 и восковой спелости – 3...5 %.

Продолжительность ее вегетационного периода колеблется от 90 до 120 суток в зависимости от сорта, сложившихся агрометеорологических условий года и зоны возделывания. Урожайность этой культуры варьирует в различные по увлажнению годы от 1,2 до 2,2 т/га (рис. 17.21).

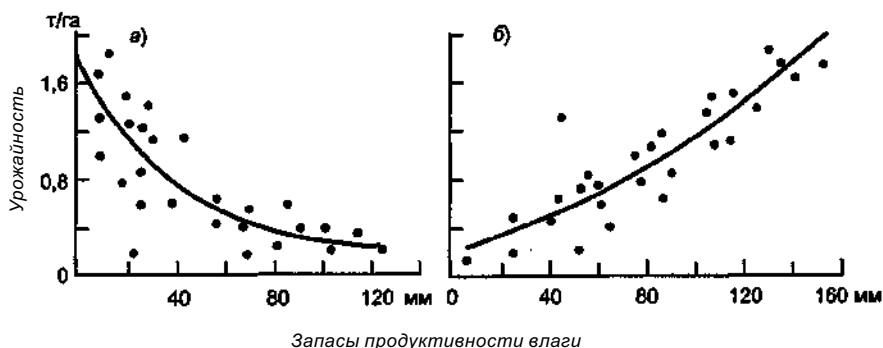


Рис. 17.21. Зависимость урожайности яровой пшеницы от осенних запасов продуктивной влаги (а) и прибавки запасов влаги в почве весной от аккумуляции зимних осадков в слое почвы 0...100 см (б). Сорт Альбидум-43, каштановые почвы (Дегтярева Г.В., 1981)

К.В. Кириличевой (1973) проведен анализ влияния агрометеорологических условий на урожайность яровой пшеницы в основных регионах ее возделывания. Так, в областях Поволжья частные коэффициенты корреляции урожайности с осадками составили 0,78...0,81. При этом вклад в величину урожайности осенне-зимне-ранневесенних осадков составил около 30...40 %, а весенне-летних – 60...70 %. Автором показана зависимость средней областной урожайности этой культуры ($Y_{\text{сред}}$, ц/га) от средней высоты растений ($H_{\text{сред}}$ по области) и от уровня влагообеспеченности (V , %) за период «выход в трубку – колошение»:

$$Y_{\text{сред}} = 0,122H_{\text{сред}} + 0,077V - 0,4, \quad (17.9)$$

$$R = 0,91; E_Y = \pm 1,9 \text{ ц/га.}$$

Влагообеспеченность (V , %) рассчитывается по формуле:

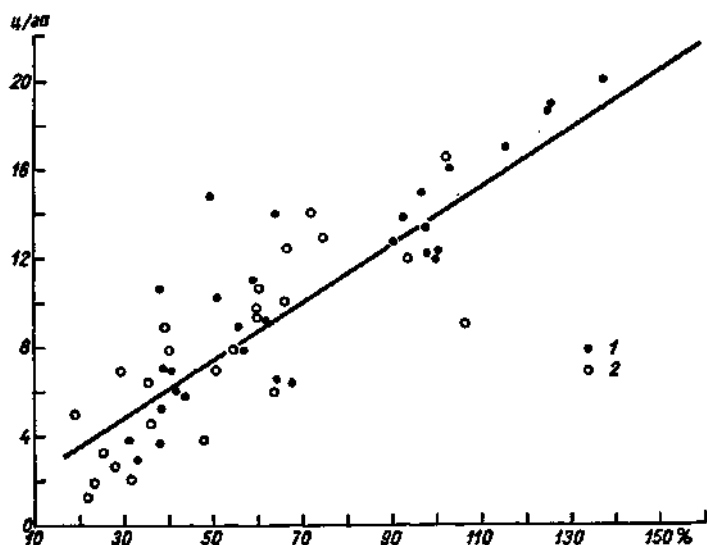
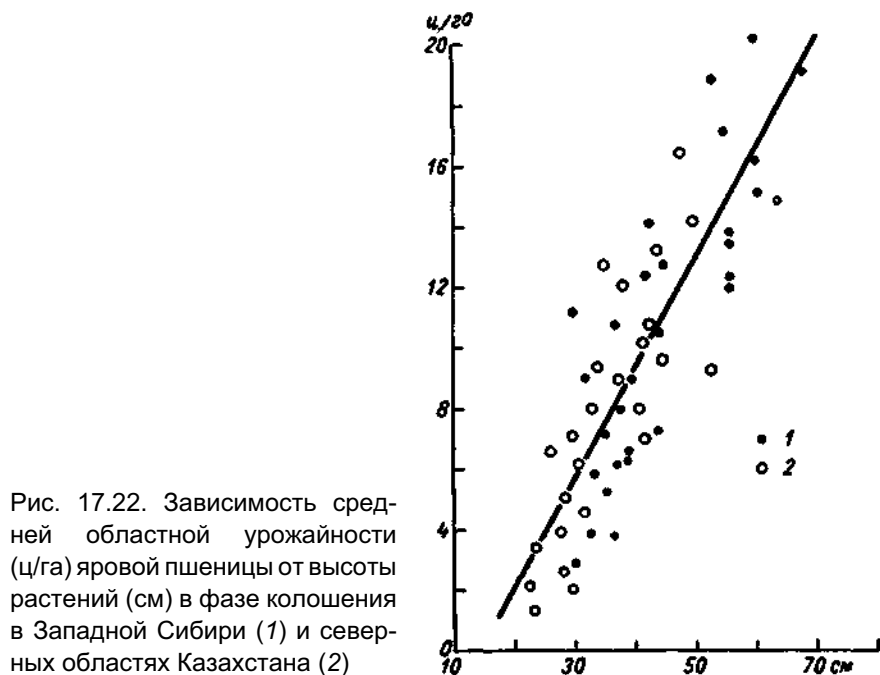
$$V = W_1 - W_2 + R / 0,45 \sum d, \quad (17.10)$$

где W_1 и W_2 – запасы продуктивной влаги в слое почвы 0...100 см (или 0...50 см) в начале и конце периода «выход в трубку – колошение»; R – сумма осадков за этот период; $\sum d$ – сумма средних суточных дефицитов влажности воздуха (мм), 0,45 – эмпирический коэффициент.

Средняя областная урожайность ($Y_{\text{сред}}$, ц/га) определяется величиной средней областной влагообеспеченности ($V_{\text{сред}}$, %) за период «посев – колошение»:

$$Y_{\text{сред}} = 0,26V_{\text{сред}} - 4,8. \quad (17.11)$$

Коэффициент корреляции этой связи $r = 0,95$, ошибка уравнения $S_y = 1,4$ ц/га (рис. 17.22 и 17.23).



Ячмень – древнейшая зерновая культура, возделываемая с XII... XVII-го тысячелетия до н.э. во многих странах Европы, Азии и Северной Америки. Зерно используется для выработки различных пищевых продуктов (перловые и ячневые крупы, толокно, мука), для приготовления комбикормов и кормления сельскохозяйственных животных и птицы, а отдельные сорта ячменя используют в пивоваренной промышленности.

Это наиболее скороспелая и не требовательная к почвенно-климатическим условиям культура. В посевах используются яровая и озимая формы ячменя. Основные площади посевов ярового ячменя находятся на Северном Кавказе, в Поволжье, в центральных областях России, а также в Украине и в Казахстане. Посевы озимого ячменя сосредоточены в районах с мягкими зимами – в Крыму, в государствах Центральной Азии, в Закавказье и в ряде республик Северного Кавказа. В среднем продолжительность вегетационного периода ярового ячменя составляет от 55 до 110 суток, озимого – 280...300 суток.

На достаточно окультуренных почвах и при правильной агротехнике, особенно в благоприятные по влагообеспеченности годы, дает стабильные и высокие урожаи: средняя областная урожайность ячменя составляет 2,0...2,5 (3,0) т/га и более.

Озимый ячмень по урожайности значительно превосходит свою яровую форму, но его размещение на Северном Кавказе ограничено условиями перезимовки. В отличие от озимой пшеницы, озимый ячмень неустойчив к низким температурам. Например, при температуре почвы на глубине залегания узла кущения (3 см) -10...-12 °С отмечается значительная изреженность посевов. Температура почвы на этой глубине -14...-16 °С даже за непродолжительное время вызывает массовую гибель растений (Свислук И. В., 1986).

При посеве в ранние сроки в непрогретую и переувлажненную почву яровой ячмень дает слабые и разреженные всходы. Однако его всходы достаточно морозоустойчивы: они начинают повреждаться при заморозках -2...-4 °С.

Семена ячменя прорастают при температуре 1...2 °С. Всходы появляются при средней суточной температуре воздуха 8...10 °С на 12–17-е сутки в условиях хорошего увлажнения пахотного горизонта почвы (30...40 мм); при 16...18 °С – на 6...7-е сутки. При ранних сроках сева ячмень достаточно морозоустойчив: его всходы начинают повреждаться при заморозках -7...-8 °С.

В условиях хорошей влагообеспеченности кущение ярового ячменя начинается при накоплении суммы эффективных температур (выше 5 °С) от даты посева 134 °С.

Ячмень – влаголюбивое растение (до начала налива зерна). Запасы продуктивной влаги в метровом слое более 160 мм благоприятствуют

формированию высоких урожаев зерна, а менее 80 мм в этом же слое являются недостаточными, и урожай оказывается сниженным.

Колошения ячменя начинается при накоплении суммы эффективных температур после фазы выхода в трубку около 330 °С, а для прохождения периода «колошение – восковая спелость» требуется около 400 °С. Цветки и завязи ячменя повреждаются заморозками -1...-2 °С, а в период налива зерна опасны заморозки от -1,5 до -4 °С.

Благоприятными для формирования урожая ячменя в период колошения являются запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы от 110 до 130 мм или уровень влагообеспеченности (70–80 % от средней многолетней величины) в период от посева до колошения. Для восточных районов Центрально-Черноземного региона, Уральской и Актыбинской областей Н.Н. Желтой (1973, 1980) установлены количественные зависимости урожайности ярового ячменя от агрометеорологических условий и некоторых биометрических параметров. Например, в фазу выхода в трубку основными факторами, определяющими конечную урожайность этой культуры (Y , ц/га), являются запасы продуктивной влаги (мм) в слое почвы 0...100 см (W_{0-100}) и количество колосоносных стеблей на 1 м² (L), определенные в сроки массового наступления этой фазы; сумма осадков, выпавших в период «посев – выход в трубку» (P):

$$Y = 0,326W - 0,001W^2 + 0,288P - 0,002P^2 + 0,088L - 0,00006L^2 - 48,2; \quad (17.12)$$

$$R = 0,78; \quad E_y = 2,5 \text{ ц/га.}$$

Зависимость средней областной урожайности ячменя от влагообеспеченности в период «посев – колошение» представлена для ряда областей Сибири и Алтайского края (рис. 17.24). В различных районах Северного Кавказа урожайность озимого ячменя в благоприятные годы варьирует в пределах 2,0...4,1 т/га.

Повышение средней суточной температуры воздуха выше 23 °С в этот период неблагоприятно для формирования урожайности культуры. Однако на завершающем этапе налива зерна высокие дневные температуры (38...40 °С) ячмень переносит лучше, чем пшеница. В условиях укороченного светового дня развитие ячменя задерживается, поскольку он относится к группе растений «длинного дня». В среднем продолжительность вегетационного периода ярового ячменя составляет от 55 до 110 суток, озимого – 280...300 суток.

По материалам многолетних наблюдений, выполненных Д.В. Козинцев, урожайность ячменя, зависящая от сложившихся в конкретных почвенно-климатических зонах агрометеорологических условий и применяемой агротехники, определяется также и нормой высева семян. Как видно из рис. 17.25, в условиях различных почвенно-климатических зон нормы высева семян, определяющие максимальную урожайность, неодинаковы.

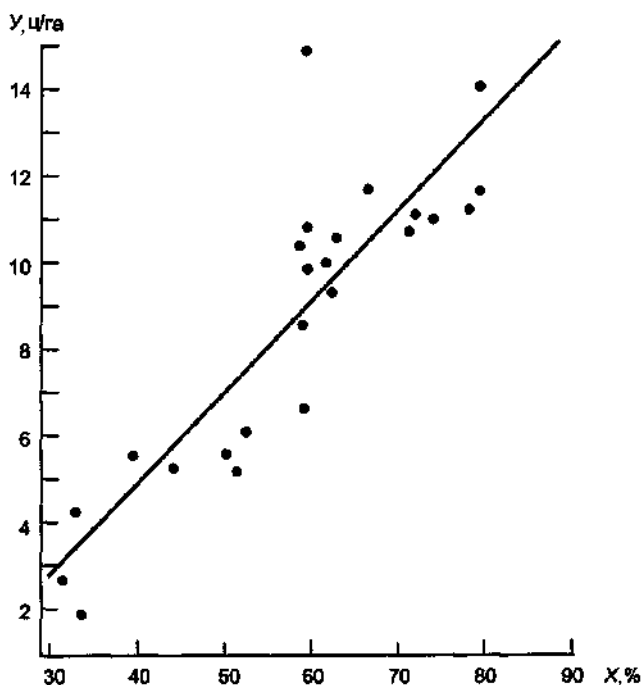
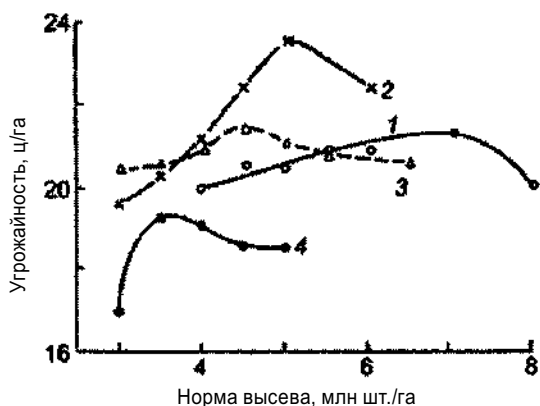


Рис. 17.24. Зависимость средней урожайности ячменя (Y , ц/га) от средней влагообеспеченности за период «посев–колошение» (X , %) для Омской, Курганской областей и Алтайского края

Рис. 17.25. Средние зональные зависимости динамики урожайности ярового ячменя (ц/га) от нормы высева семян (млн шт./га) (Федосеев А.П., Козинец Д.В., 1972): 1 – широколиственно-хвойная подзона дерново-подзолистых почв; 2 – лесостепь; 3 – степь; 4 – сухая степь



Благодаря скороспелости яровой ячмень реже попадает под влияние летних засух и суховеев, кроме этого он считается наиболее устойчивой культурой к явлениям «захвата» и «запала» зерна за счет его засухоустойчивых качеств.

Овес посевной – зерновая и зернофуражная культура умеренного климата. Его возделывают со II тысячелетия до н. э.; на территории России – с VII века нашей эры. Это влаголюбивое яровое или озимое, не требовательное к теплу растение «длинного дня», с коротким вегетационным периодом (80...120 суток). Зерно овса перерабатывают на крупу и муку, используют в качестве добавок в комбикорма для сельскохозяйственных животных; им же скармливают овсяную «зеленку» обычно в смеси с зеленой массой бобовых трав – вики и гороха, а также и солому. Основные посевные площади этой культуры сосредоточены в Нечерноземной зоне России, в Западной Сибири, в Красноярском крае и в Украине.

Семена овса начинают прорастать при температуре 2...3 °С, поэтому наиболее урожайными оказываются посевы в ранние сроки в переувлажненную почву; народная пословица гласит: «Сей овес в грязь – будешь князь». Всходы овса переносят кратковременные весенние заморозки до -8...-9 °С. В период от всходов до кущения наиболее благоприятной считается температура 15...18 °С.

По мере развития растения его устойчивость к низким температурам воздуха снижается и в период цветения возможны повреждения слабыми заморозками (-1...-2 °С).

В условиях хорошей влагообеспеченности от посева до кущения сумма эффективных температур (выше 5 °С) составляет 134 °С, т. е. так же, как у яровой пшеницы и ячменя. После выхода в трубку фаза «выметывание метелки» наступает при накоплении суммы эффективных температур 378 °С. Период от выхода в трубку до выметывания метелки у овса считается критическим по отношению к уровню запасов почвенной влаги. Уровень оптимальной влажности почвы для получения максимального урожая овса не остается постоянным и колеблется в пределах 60...80 % полной ее влагоемкости в зависимости от степени обеспеченности растений элементами минерального питания. При повышении уровня минерального питания потребность растений овса во влаге возрастают. В производственных посевах продуктивная кустистость овса составляет 1,2...1,5.

Однако его продуктивность в большей степени снижается от избытка влаги (свыше 100 % полной влагоемкости), чем от засухи (30 % полной влагоемкости). При переувлажнении почвы в период активной вегетации этой культуры урожайность ее снижается на 70...84 %, а в засушливых условиях – лишь наполовину.

Засушливая погода при влажности почвы 30 % (и менее) полной влагоемкости вызывает торможение роста ассимиляционной поверхности

(листьев) и стерильность цветков. Недостаток почвенной влаги в период налива зерна приводит к нарушению баланса влаги благодаря усиленной транспирации растений и, как следствие, к снижению урожайности (Шевелуха В.С. и др., 1978).

Для цветения овса наиболее благоприятной является умеренно-влажная погода с температурой воздуха 18...20 °С. Высокие температуры (38...40 °С) и летние засухи овес переносит хуже яровой пшеницы и ячменя, сильнее подвержен явлению «захвата» и «запала» зерна.

Для полного цикла развития различных сортов овса необходима сумма активных температур 1200...1900 °С.

В зависимости от сложившихся агрометеорологических условий вегетационного периода, от сорта урожайность этой культуры варьирует от 1,5...2,0 до 4,0...4,5 т/га.

Среднюю областную величину урожайности (Y , ц/га) обычно рассчитывают с наступлением фазы «выметывания». Предикторами уравнения корреляционной связи являются: среднее число развитых колосков на 1 м² (K) и запасы продуктивной влаги в полуметровом слое почвы (W , мм) в эту фазу или вместо предиктора (K) используют среднюю величину высоты растений (H , см) в эту же фазу (Плучек С.Л., 1978):

$$Y = -0,1264 + 0,0010K + 0,0605W_{0-50}; \quad (17.13)$$

$$Y = -0,7503 + 0,1525H + 0,0501W_{0-50}. \quad (17.14)$$

Питательность 1 кг сухого зерна овса принята за одну кормовую единицу. В странах СНГ это – условная единица измерения и сравнения общей питательности кормов, определяемая по жиросодержанию 150 г жира у крупного рогатого скота (1414 ккал или 5,92 мДж). В кормовые единицы переводят величины урожайности пастбищной и сенокосной растительности, определяемые обычно в ц/га (т/га) – в нормы кормления сельскохозяйственных животных, поскольку кормовая ценность различных растений (пастбищных угодий) не одинакова.

Кукуруза – важнейшая зерновая и кормовая культура; она относится к древнейшим растениям, введенным человеком в сельскохозяйственную культуру около 5200 лет до нашей эры, в России ее возделывают с XVII века. Кукуруза является одним из наиболее полиморфных видов, поскольку образует различные экологические группы и сорта, значительно различающиеся по скороспелости, продуктивности и другим сортовым признакам. В России и сопредельных странах возделывается более 70 сортов и гибридов кукурузы, почти во всех почвенно-климатических зонах. Это яровая, теплолюбивая культура, ее основные посевы на зерно сосредоточены в южных регионах рассматриваемой территории. Так, в Северо-Кавказском регионе расположено до 80...90 % посевных площадей, на которых выращивается основная часть валового сбора зерна кукурузы.

В Нечерноземной зоне России, в Сибири и на Дальнем Востоке она выращивается в основном на силос для скота.

Из зерна кукурузы готовят муку, крупу, пищевые хлопья и палочки, масло. Зерно используется также в пивоваренной, крахмалопаточной, спиртовой и комбикормовой промышленности. Зеленая масса – питательный корм для скота. Из кукурузных стеблей и стержней початков вырабатывают техническую бумагу, вискозу, изоляционную ленту и т.п. Рыльца пестиков применяют в фармакологии, при изготовлении медицинских лекарств.

Урожайность зерна варьирует в зависимости от сорта и сложившихся погодных условий от 2...3 до 5...6 т/га, зеленой массы – от 17...18 до 30...60 т/га.

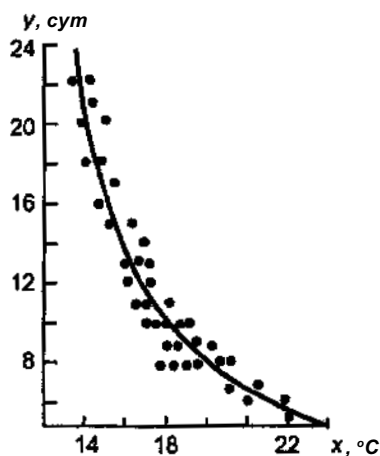
Семена кукурузы начинают прорастать при температуре около 8 °С. Однако при такой температуре прорастание протекает очень медленно, проростки часто загнивают и посевы изреживаются. Ю.И. Чирков установил, что при запасах продуктивной влаги более 15 мм в слое почвы 0...10 см и температуре 11...12 °С всходы появляются через 20...25 суток, при температуре 18...22 °С – через 6...8 суток (рис. 17.26). При заделке семян в почву на глубину 4 см всходы кукурузы появляются при накоплении суммы эффективных температур (выше 8 °С), равной 83 °С. Эта сумма возрастает на 7 °С на каждый последующий сантиметр углубления при посевной заделке семян (от 4 до 12 см). При запасах продуктивной влаги менее 8 мм в слое 0...10 см продолжительность периода от посева до всходов почти удваивается, соответственно, возрастает и накопление суммы эффективных температур.

Весенние заморозки до -2...-3 °С повреждают всходы. Сортосовые различия в этот период вегетации мало заметны.

Уровень температуры определяет сроки появления очередных листьев кукурузы, а различия в продолжительности периода листообразования между ранними и поздними сортами достигает 20...30 суток. Нижний предел температуры воздуха в период листообразования близок к 10 °С. С повышением средней суточной температуры воздуха от 10 до 20 °С скорость листообразования и интенсивность накопления растительной массы увеличивается. При более высоких температурах скорость накопления зеленой массы замедляется и при температурах 33...36 °С приостанавливается. В этих случаях возрастает значение так называемых *балластных температур*, не ускоряющих, а задерживающих скорость развития и роста растения за счет снижения интенсивности фотосинтеза и увеличения затрат на дыхание.

В условиях Нечерноземной зоны очередной лист кукурузы появляется при накоплении суммы эффективных температур (выше 10 °С), равной 30 °С. В южных районах для появления нового листа требуется большая

Рис. 17.26. Зависимость продолжительности периода «посев–всходы» (Y , сут) кукурузы от средней температуры воздуха (X , °C) при глубине заделки семян 4 см и запасах продуктивной влаги 15 мм и более в слое почвы 0...10 см (Чирков Ю.И., 1968)



сумма эффективных температур, так как в жаркие дни кукуруза использует тепло менее эффективно из-за балластных температур.

Раннеспелые сорта кукурузы образуют 11...12 листьев (на это требуются меньшие ресурсы тепла), по сравнению с позднеспелыми сортами, формирующими 19–21 лист (табл. 17.4).

Таблица 17.4

Суммы эффективных температур воздуха (выше 10 °C), необходимые для наступления основных фаз развития среднеспелых сортов кукурузы в Нечерноземной зоне России (Чирков Ю.И., 1978)

Сорта, гибриды	Количество листьев (сортовой признак)	Межфазный период		
		посев – выметывание метелки	посев – молочная спелость	посев – восковая спелость
Среднепоздние (Стерлин и др.)	17...18	550...580	830...860	970...1000
Среднеспелые (Буковинский-3)	15...16	490...520	740...770	870...900
Среднеранние (Воронежский-80)	13...14	430...460	680...710	800...830

Средние многолетние суммы эффективных температур выше 10 °C на юге Нечерноземной зоны составляют 800...850 °C, а на широте 60° они варьируют около 500 °C и при продвижении к северу быстро убывают (в районе г. Архангельска – 100...150 °C).

На рис. 17.27 показано распределение сумм эффективных (безбалластных) температур за безморозный период в Нечерноземье.

В отдельные аномальные годы вегетационный период оказывается более теплым, когда суммы эффективных температур (>10 °C) оказываются

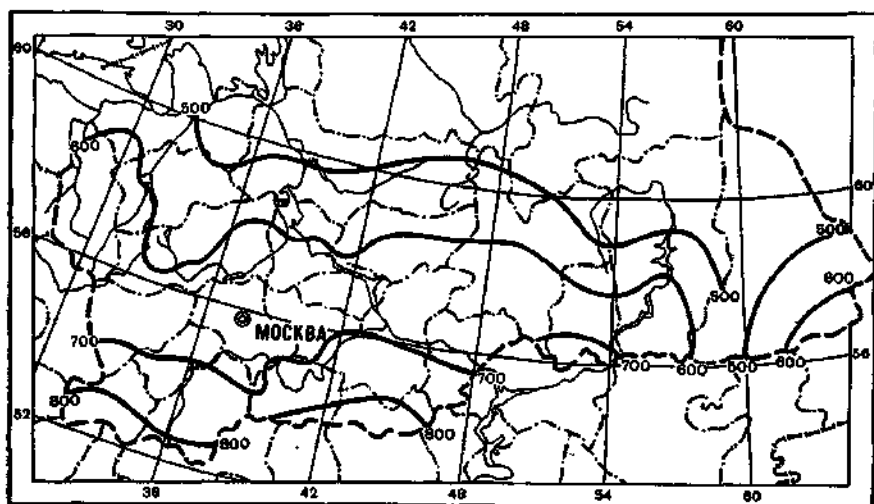


Рис. 17.27. Суммы эффективных безбалластных температур воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за безморозный период (50 % лет)

на 200...300 $^{\circ}\text{C}$ выше нормы, как, например, в 1954, 1972, 1975, 2010 гг. Однако повторяемость таких лет составляет всего 5...10 %.

В период вегетации кукурузы в Нечерноземной зоне выпадает в среднем 200...250 мм осадков. Запасы продуктивной влаги в почве к началу сева кукурузы обычно близки к наименьшей полевой влагоемкости (180...200 мм на суглинистых почвах и 120...140 мм на супесчаных). В пахотном слое почвы они обычно выше на 20 мм.

Влажность почвы существенно влияет на накопление фитомассы, тогда как на скорость развития растений она оказывает слабое воздействие. Заметное снижение скорости развития отмечается только при уменьшении запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы ниже 40 мм. При значительном иссушении почвы наступление фазы выметывания метелки кукурузы задерживается на 4...6 суток.

Оптимальными условиями для формирования урожая зеленой массы кукурузы являются средняя декадная температура воздуха 20...24 $^{\circ}\text{C}$ при запасах продуктивной влаги 35...45 мм в пахотном слое подзолистых почв и 60...70 мм – в полуметровом слое черноземных почв и приходе солнечной радиации в среднем за день $>0,6$ кал/см ^{2} . В этих условиях интенсивность фотосинтеза достигает 100...120 г/м ^{2} листовой поверхности за декаду.

При возделывании кукурузы на силос величина зеленой массы возрастает с увеличением густоты посева (число растений на единице площади). Накопление зеленой массы кукурузы происходит особенно

интенсивно в период листообразования (табл. 17.5). Площадь листовой поверхности растения и его масса увеличиваются по параболической кривой в процессе накопления сумм эффективных температур, в условиях достаточного увлажнения корнеобитаемых горизонтов почвы.

Таблица 17.5

Осредненные величины площади листовой поверхности (см²) на одно растение в зависимости от числа листьев (Чирков Ю.И., 1969)

Станция	Число образовавшихся листьев					
	3	7	11	15	17	19
Херсон (полив)	22	360	1500	3350	4500	5750
Херсон (без полива)	20	320	900	2140	3000	3980
Луговая (без полива)	18	300	1200	2800	3900	5100

Из таблицы видно, что при прочих равных условиях одинаковая интенсивность накопления растительной массы на 1 см² в целом на одно растение в конце периода листообразования в сотни раз больше, чем в начале листообразования. Следовательно, урожай пропорционален площади листовой поверхности. Понятно, что для получения высоких урожаев зеленой массы необходимо, чтобы растения в этот период находились в условиях, близких к оптимальным. В Нечерноземной зоне такие условия обычно наблюдаются в июле – начале августа.

Уравнение этой связи (при запасах продуктивной влаги в слое 0...50 см не ниже 60 мм) получено Ю.И. Чирковым (1969):

$$Y = 0,0024X^2 - 0,4X + 20,8, \quad (17.15)$$

где Y – масса растения (г), X – сумма эффективных температур, рассчитанная от даты фазы всходов; $\eta = 0,81$.

Зависимость динамики массы растения кукурузы от накопления суммы эффективных температур (выше 10 °С) и при запасах продуктивной влаги > 60 мм в слое почвы 0...50 см приведена в табл. 17.6.

Таблица 17.6

Сумма температур, °С	100	200	300	400	500	600	700
Масса одного растения, г	8	45	110	240	415	610	870

Для обеспечения выращивания максимальной величины зеленой массы кукурузы важно правильно определить густоту посева. Поэтому агрометеорологи рекомендуют устанавливать густоту посева для каждого сорта (гибрида) исходя из вероятной площади листьев, свойственной каждому сорту в конце периода листообразования, что совпадает с фазой выметывания метелки. Густота посева m (тысяч растений на 1 га), обеспечивающая заданную площадь листовой поверхности (S /га) при средней площади листовой поверхности одного растения (S_1), выражается уравнением:

$$m = S / S_1. \quad (17.16)$$

Например, рассчитаем густоту посева, обеспечивающую площадь листьев, равную 30 тыс. м²/га в конце периода листообразования, для сорта Буковинский-3. Известно, что этот среднеспелый сорт образует 15–16 листьев. В табл. 17.5 по станции Луговая площадь листьев этого сорта в фазе 15 листа равна 0,28 м². Тогда $m = 30\,000/0,28 = 107\,143$, т.е. для получения заданной площади листовой поверхности следует установить густоту посева около 110 тыс. растений на каждом гектаре.

Зоны обеспеченности теплом и влагой основных фаз развития различных по скороспелости сортов и гибридов кукурузы, установленные проф. Ю.И. Чирковым (1969), представлены на рис. 17.28.

Критический период у этой культуры по отношению к влаге начинается за 10 суток до фазы выметывания метелки и длится около 30 суток. Недостаток влаги в этот период значительно снижает урожайность культуры. При повышении температуры воздуха в дневные часы до 30...35 °С, низкой относительной влажности воздуха и запасах влаги менее 20...30 мм в слое 0...50 см в период после завершения фазы «выметывание метелки» заметно снижается озерненность початка и урожайность кукурузы.

Наиболее благоприятные условия для налива зерна складываются при средней суточной температуре 20...24 °С и запасах продуктивной влаги 60...70 мм и более в полуметровом слое почвы. Исследованиями Ю.И. Чиркова (1969), Л.В. Комоцкой и А.И. Страшной (1987) установлено, что формирование и уровень урожайности кукурузы определяется комплексом агрометеорологических факторов. Основными предикторами зависимости продуктивности кукурузы от условий произрастания, включая уровень агротехники, являются запасы продуктивной влаги в слое почвы 0...50 см к началу сева и ко времени выметывания метелки (W_{0-50}), сумма осадков (R), уровень температуры (T , °С) и ГТК Селянинова ($ГТК$) в основные месяцы вегетации культуры. Кроме того, установлены связи продуктивности кукурузы с биометрическими характеристиками – высотой растений в фазу выметывания метелки и числом зерен в початке (n). В качестве примера выбрана Ростовская область, для которой приведены статистические связи урожайности зерна кукурузы (Y , ц/га) с различными предикторами для использования при прогнозировании продуктивности этой культуры:

– с трехмесячной заблаговременностью –

$$Y = 6,482 ГТК_{май-июнь} + 0,152 R_{июль} + 6,452, \quad (17.17)$$

$$R = 0,81; S_y = 3,1 \text{ ц/га};$$

– с двухмесячной заблаговременностью –

$$Y = 0,170 W_{0-50} - 1,564 T_{июль} - 0,770 T_{август(1-2 декады)} + 65,288, \quad (17.18)$$

$$R = 0,87; S_y = 2,6 \text{ ц/га};$$

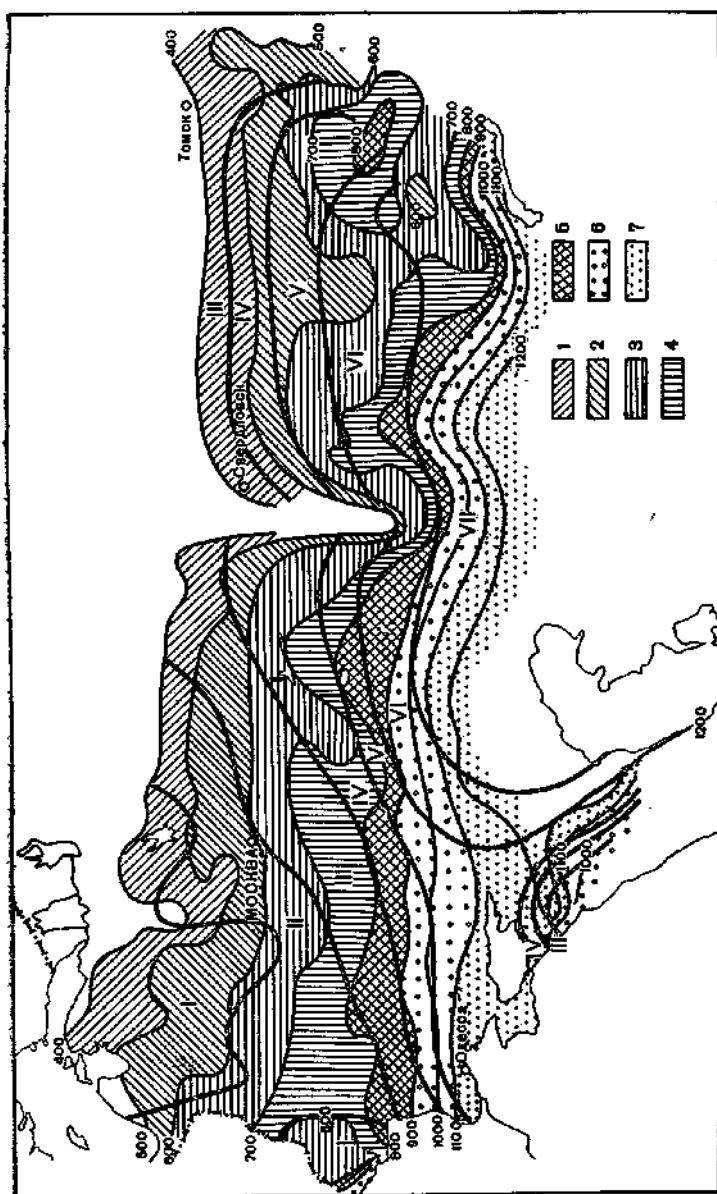


Рис. 17.28. Зоны обеспечения теплом и влагой основных фаз развития различных по скорости сортов и гибридов кукурузы (пояснения к рисунку на стр. 398)

Обеспеченность теплом развития кукурузы в зависимости от термической зоны и скорости

Термические зоны	% в 80% лет	Фазы развития	Скорость сортов и гибридов в свойственные им число листьев			
			13-14 среднезрелые	15-16 среднезрелые	17-18 среднезрелые	19-20 позднеспелые
1	400-500	Выметывание Молочная спелость Восковая спелость	80-90 15-40 5-10	55-80 8-20 <5	45-70 3-10 —	85-55 <5 —
2	500-600	Выметывание Молочная спелость Восковая спелость	90-100 40-60 15-85	80-98 20-40 5-10	70-90 8-25 <5	55-75 5-10 —
3	600-700	Выметывание Молочная спелость Восковая спелость	100 60-80 35-60	98-100 40-65 10-35	90-100 25-80 5-15	75-95 10-30 <5
4	700-800	Выметывание Молочная спелость Восковая спелость	100 80-95 60-80	100 65-80 35-60	100 50-70 15-40	95-100 30-55 5-15
5	800-900	Выметывание Молочная спелость Восковая спелость	100 95-100 80-95	100 80-98 60-82	100 70-90 40-55	100 55-75 15-40
6	900-1100	Выметывание Молочная спелость Восковая спелость	100 100 100	100 100 82-100	100 90-100 55-90	100 75-100 40-80
7	> 1100	Выметывание Молочная спелость Восковая спелость	100 100 100	100 100 100	100 100 90	100 100 80

Ресурсы влаги, обеспеченные в 80% лет (летние запасы 400 мм в слое почвы 0-100 см ± осадки за период вегетации)

Ресурсы влаги, мм	Зоны
> 400	I
350-400	II
300-350	III
250-300	IV
200-250	V
150-200	VI
< 150	VII

с месячной заблаговременностью –

$$Y = 0,197W_{0-50} - 1,806T_{июль} + 0,014_n + 48,437; \quad (17.19)$$

$$R = 0,88; S_y = 2,6 \text{ ц/га.}$$

Осенние заморозки $-2...-3^{\circ}\text{C}$ повреждают листья, тогда как початки в период молочно-восковой спелости могут переносить заморозки до $-4...-5^{\circ}\text{C}$.

Продолжительность вегетационного периода кукурузы в зависимости от сорта и агрометеорологических условий колеблется от 90 до 160 суток. Кукуруза является светолюбивым растением и требует интенсивного солнечного освещения. Загущение посевов приводит к ухудшению освещенности вегетативных органов растения и к снижению урожайности зерна. Наибольшая урожайность зерна кукурузы отмечена при площади ее листовой поверхности 30...35 тыс. $\text{м}^2/\text{га}$. При дальнейшем увеличении площади листьев на единице площади среднее число початков на одном растении, а, следовательно, и выход зерна сокращаются (рис. 17.29). Это связано с тем, что, по мере увеличения густоты посева, проникновение солнечной радиации в среду растений уменьшается, ухудшаются условия освещенности листовой поверхности, подавляется фотосинтетическая деятельность листьев.

Кукуруза относится к сравнительно засухоустойчивым культурам: на образование единицы сухого вещества она потребляет меньше воды, чем яровые зерновые культуры. Однако на единицу площади посева кукурузе необходимо больше влаги, чем другим зерновым культурам, в связи с ее более высокой урожайностью. Эта культура очень отзывчива на орошение в засушливых регионах. Например, в степной зоне при влажности почвы, поддерживаемой на уровне 70...80 % наименьшей влагоемкости,

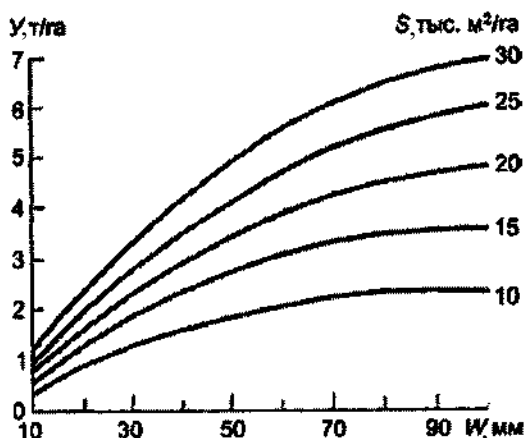


Рис. 17.29. Зависимость урожайности зерна кукурузы Y (т/га) от запасов продуктивной влаги W (мм) в слое почвы 0...50 см и площади листовой поверхности (S , тыс. $\text{м}^2/\text{га}$) (Чирков Ю.И., 1969)

ее урожайность возрастает в 3...3,5 раза, по сравнению с посевами, находящимися в условиях естественного увлажнения.

Просо обыкновенное (посевное) относится к числу важнейших крупных культур, возделываемых человеком с третьего тысячелетия до н. э. во многих земледельческих районах мира. Основные посевные площади его сосредоточены в Поволжье, на Северном Кавказе, на Урале, в Центрально-Черноземных областях, в Западной Сибири, в Украине и Казахстане. На рис. 17.30 представлены основные агроклиматические зоны прососеяния на Европейской территории бывшего СССР. Просо обыкновенное – это яровое, теплолюбивое, засухоустойчивое и жаростойкое растение «короткого дня». Сумма активных температур ($\geq 10^{\circ}\text{C}$) за вегетацию составляют для среднеспелых сортов 1800°C , для позднеспелых $2000...2300^{\circ}\text{C}$. В условиях «короткого» дня, в период от всходов до фазы выхода в трубку развитие ускоряется, а при «длинном дне» – замедляется. Прорастание семян начинается при температуре почвы $6...8^{\circ}\text{C}$, но оптимальной температурой считается 20 ($19...23$) $^{\circ}\text{C}$, в связи с чем просо принадлежит к числу культур относительно поздних сроков посева. При прорастании зерно поглощает влагу в количестве до 25 % своей массы.

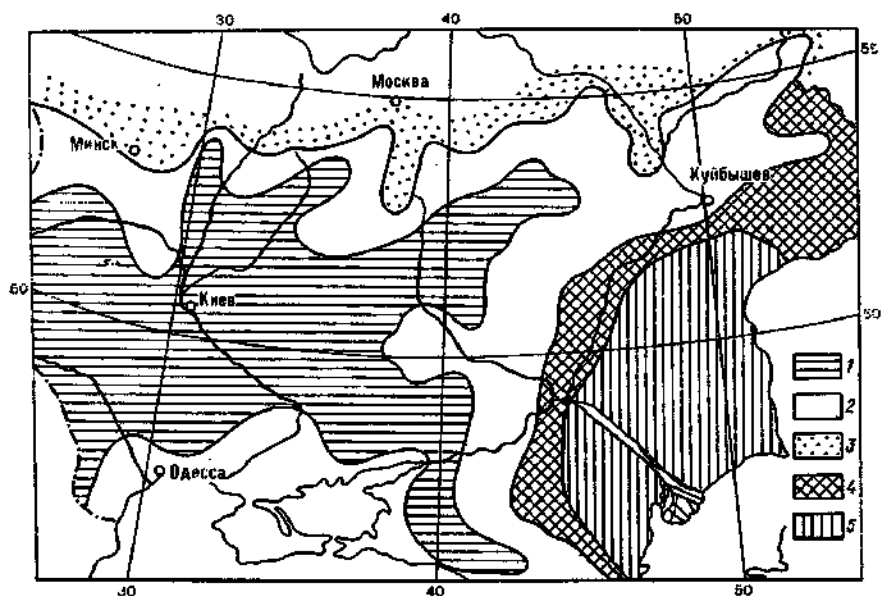


Рис. 17.30. Агроклиматические зоны прососеяния на европейской части страны (ЕЧС): 1 – урожайность более 2,5 т/га (1-я зона); 2 – 2,0–2,5 т/га (2-я зона); 3 – менее 2,0 т/га (3-я зона); 4 – 1,5–2,0 т/га (4-я зона); 5 – менее 1,5 т/га (5-я зона)

Для этой культуры характерен более интенсивный начальный рост корней в глубь почвы, чем рост надземной части растения в первые фазы развития. Этим обеспечивается гарантированность всходов и первых этапов развития растений в засушливых условиях. Корни проса достигают глубины 150 см, а по горизонтали распространяются до 100...120 см. После фазы цветения корневая масса проса увеличивается незначительно.

Всходы проса появляются при накоплении суммы эффективных температур 150 °С в условиях оптимального увлажнения почвы. Всходы повреждаются заморозками -2...-3 °С.

Ускоренный рост проса обычно начинается после наступления фазы «выход в трубку» и в последующем продолжается 3...4 декады. Высота растений и скорость прироста главного побега ($H_{\text{сред}}$) являются показателями благоприятности условий произрастания, поэтому этот предиктор может быть использован не только для оценки условий роста посевов этой культуры, но и для оценки ожидаемой ее урожайности. Линейный прирост проса за период «выход в трубку – созревание» имеет тесную прямолинейную зависимость от количества осадков (R), выпавших в этот межфазный период (Иванова-Зубкова Н.З., 1973):

$$H_{\text{сред}} = 0,31R + 1,0. \quad (17.20)$$

Коэффициент корреляции (r) равен $0,84 \pm 0,05$ (рис. 17.31). Согласно данным этого же автора, зависимость средних областных урожаев ($Y_{\text{сред}}$) от среднего по области линейного прироста растений проса ($H_{\text{сред}}$) за период «выметывание – созревание» ($r = 0,71 \pm 0,03$) имеет вид:

$$Y_{\text{сред}} = 0,50H_{\text{сред}} - 0,6. \quad (17.21)$$

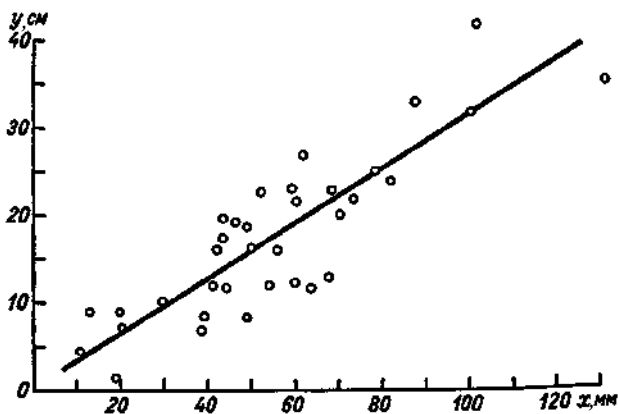


Рис. 17.31. Зависимость линейного прироста проса за период «выметывание–созревание» (y) от количества осадков за период «выход в трубку – созревание» (x)

Аналогичные корреляционные связи для периода созревания проса получены Н.З. Ивановой-Зубковой (1970) и для условий Украины:

$$Y_{\text{сред}} = 0,15R + 0,07H_{\text{сред}} + 3,0. \quad (17.22)$$

Коэффициент корреляции $r = 0,85 \pm 0,02$, ошибка расчета составляет 3,9 ц/га, что не превышает $0,67\sigma$.

Наиболее благоприятная температура для роста и развития растений 18...24 °С.

Самая высокая потребность во влаге наблюдается в межфазный период от выхода в трубку до выметывания метелки. Фаза выметывания наступает после накопления суммы эффективных температур 600 °С. Минимальная температура для фазы цветения проса 15 °С. Высокие температуры (35...40 °С) просо переносит легче, чем пшеница и овес. Особенно высокой жароустойчивостью оно отличается во второй половине вегетации благодаря глубокой корневой системе, более высокой сосущей силе корневых волосков, мелкоклеточному строению паренхимы листьев и эластичным устьичным клеткам, экономно расходующим влагу при транспирации.

Просо лучше переносит засуху в начале своего развития (от всходов до выхода в трубку) и в конце – в фазу созревания.

От ассимилирующей поверхности листьев зависят, как известно, продуктивность фотосинтеза и интенсивность налива зерна. Наибольшая интенсивность фотосинтеза наблюдается в период от начала налива зерна до полной его спелости.

Наибольшая потребность во влаге наблюдается в межфазный период от выхода в трубку до выметывания. Рост листьев продолжается в период интенсивного роста стебля (фазы выметывания и цветения), что повышает потребность растений во влаге. Число и размеры листьев сильно варьируют в зависимости от сортовых особенностей этой культуры. В благоприятных условиях площадь листовой поверхности может достигать 5...60 тыс. м²/га. При температурах 30...35 °С интенсивность фотосинтеза достигает своего максимума (плато).

Продолжительность цветения и опыления цветков проса на полях обычно продолжается 20...25 суток. В период от начала налива зерна до фазы полной спелости у проса наблюдается наивысшая интенсивность фотосинтеза. Поэтому пасмурная погода во второй половине вегетации подавляюще действует на формирование продуктивности растения: недостаточная интенсивность освещения в период цветения культуры вызывает значительное бесплодие колосков.

Биологической особенностью этой культуры является «обратный ход» процесса цветения и созревания плодов, начинающийся от верхней части метелок и продолжающийся к нижней их части. Сумма средних суточных температур за всю вегетацию проса варьирует в зависимости от сорта от 1800 до 2300 °С.

Для формирования высокой урожайности проса оптимальными запасами влаги в почве является 60...80 % наименьшей влагоемкости в течение всего периода вегетации. За оптимальную величину влагообеспеченности принята степень увлажнения γ , равная 1 (рис. 17.32). Урожайность этой культуры определяется также ее сортовыми особенностями, агрометеорологическими условиями каждого вегетационного периода, уровнем агротехники и составляет в среднем 0,8...1,6 т/га.

Для степных районов Поволжья разработана методика предварительной количественной оценки уровня урожайности (Y , ц/га) зерна проса с использованием зависимости ее величины от суммы осадков ($\sum R$) за период от посева до созревания (Савздарг С.Ф., 1965):

$$Y = 0,12 \sum R + 0,66; \quad (17.23)$$

$$E_{\gamma} = 1,41 \text{ ц/га.}$$

Н.З. Ивановой-Зубковой рассчитана вероятность (в процентах) средней областной урожайности проса (ц/га) при различном среднем по области количестве осадков за июль-август (табл. 17.7).

Таблица 17.7

Количество осадков (мм) за июль-август	Урожайность зерна (ц/га) по областям							
	Саратовская				Нижегородская			
	до 3,0	3,1...6,0	6,1...9,0	9,1...12,0	до 3,0	3,1...6,0	6,1...9,0	9,1...12,0
До 50	60	40	—	—	100	—	—	—
51...100	20	35	40	5	20	35	30	15
101...150	—	30	—	70	—	15	50	35

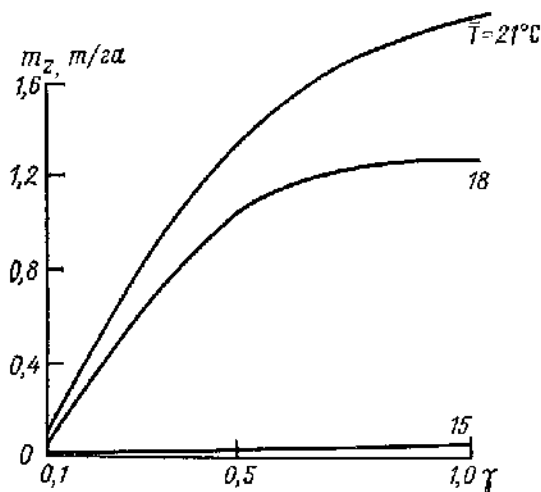


Рис. 17.32. Зависимость урожайности (т/га) зерна проса от влагообеспеченности при разных значениях температуры воздуха

При орошении в засушливые годы урожайность проса в 6–7 раз превышает таковую, по сравнению с посевами, выращенными в неполивных условиях.

Значительный вклад в изучение агрометеорологических условий возделывания этой культуры и разработку статистических и динамико-статистических моделей формирования ее продуктивности внесли Н.З. Иванова-Зубкова (1970, 1973), А.Г. Просвирина (1987 и др.). Для территории Центрально-Черноземных районов России, Поволжья и Украины установлена прогностическая зависимость урожайности (Y , ц/га) проса от агрометеорологических условий в период формирования и налива зерна:

$$Y = -45,4X^2 + 48,6X + 4,4, \quad (17.24)$$

где X – отношение суммы осадков к сумме дефицита влажности воздуха.

Как засухоустойчивая культура, просо является незаменимой культурой в засушливых районах и широко используется в качестве страховой для посева погибших озимых или ранних яровых зерновых культур. При орошении в засушливые годы урожайность проса в 6–7 раз превышает таковую, по сравнению с посевами, выращенными в неполивных условиях.

Гречиха, как и просо, возделывается человеком со времен глубокой древности – с третьего тысячелетия до н. э. Это растение считается одной из важных крупяных культур, широко распространенной во многих европейских странах, в том числе и в России. Основные посевные ее площади сосредоточены в Центрально-Черноземном регионе, на юге Центрального и Волго-Вятского регионов, на юге Западной Сибири, на севере Поволжья и в Уральском регионе. Значительные площади находятся также в лесостепных районах Украины, в Беларуси и в северной половине Казахстана.

Это яровая, влаголюбивая и теплолюбивая культура. Вегетационный период различных сортов длится от 60 до 120 суток. Средние сроки посева гречихи представлены на рис. 17.33. Семена гречихи начинают прорастать при температуре воздуха около 6...8 °С, а дружные всходы появляются на 5...7 сутки при температуре 15...20 °С. Всходы гречихи весьма чувствительны к заморозкам и повреждаются при снижении температуры воздуха до -1...-2 °С, при -4 °С растения полностью погибают. При температуре 12...13 °С рост растений замедляется.

Интенсивный рост гречихи обычно начинается с фазы образования соцветий и продолжается в течение 2...3 декад во время цветения. Наибольший линейный прирост растений за 10 суток (до 30...40 см) наблюдается при средних температурах воздуха 20...23 °С и запасах влаги в пахотном горизонте почвы более 30 мм. При запасах влаги в слое 0...20 см около 5 мм рост гречихи прекращается. Таким образом, линейный прирост растений гречихи хорошо коррелируется с запасами продуктивной влаги в почве к началу образования соцветий и суммой осадков, выпадающих в период «образование соцветий – созревание. Знание этой зависимости

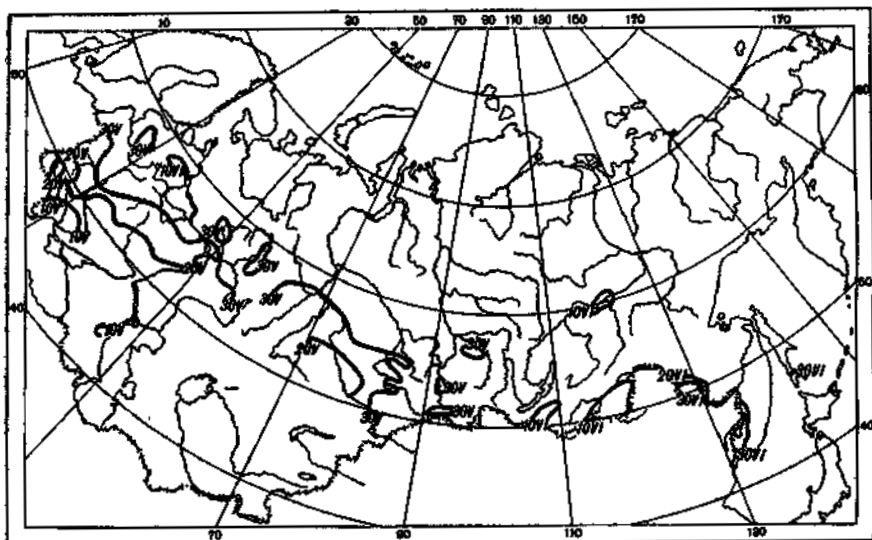


Рис. 17.33. Средние сроки посева гречихи. Госсортосеть.
Карта составлена Е.В. Бессоновой

используется для расчета ожидаемой высоты растений для машинной уборки гречихи.

Линейный прирост гречихи определяет также количество зерен на одном растении (коэффициент корреляции $R = 0,80 \pm 0,02$), а также данные о фактической густоте растений на единице площади позволяют рассчитать ожидаемую урожайность этой культуры (Иванова-Зубкова Н.З., 1967).

При оптимальных температурах воздуха и хорошей влагообеспеченности происходит быстрое развитие гречихи: через 25...30 суток после появления всходов растения зацветают. В период цветения наиболее благоприятна солнечная погода с относительной влажностью воздуха не менее 50 %, при средней суточной температуре воздуха 16...25 °C и с кратковременными, слабыми дождями. Такие условия благоприятны также для активного лета пчел – основных опылителей цветков гречихи.

В период цветения гречиха плохо переносит высокие температуры (30 °C и более) и сухую погоду, способствующих неполному опылению и засыханию завязей. Снижение ночных температур воздуха до 10 °C и ниже прекращает цветение и налив зерна гречихи. В этот период неблагоприятными считаются ливневые дожди и туманы. Ранние заморозки до -1 °C повреждают цветки и листья, а до -2 °C вызывают гибель бутонов, цветков, листьев и повреждают стебли растений.

Формирование хорошего урожая гречихи происходит в условиях высокой влагообеспеченности растений в фазы цветения и образования

зерна. На образование единицы органического вещества она расходует в 3 раза больше влаги, чем просо, и в 2 раза больше, чем пшеница и ячмень. *Транспирационный коэффициент* гречихи равен 360...650 (см. параграф 1.3.5). Средняя урожайность зерна составляет 0,8...1,2 т/га, а в передовых хозяйствах достигает 2,0...2,5 т/га (рис. 17.34).

Поскольку гречиха имеет растянутый период созревания, отдельную уборку культуры начинают при побурении на растениях 75...80 % образовавшихся плодов и заканчивают в течение 4...5 суток. В благоприятные годы с цветущих плантаций гречихи пчелы собирают до 60 кг/га высококачественного меда.

Относительно короткий период вегетации гречихи (в зависимости от сорта) и возможность посева ее в поздние весенние сроки позволяет использовать эту культуру в качестве страховой для пересева погибших озимых и ранних яровых зерновых культур.

Рис посевной – древнейшая продовольственная крупяная культура тропических регионов мира и субтропических районов умеренного климата, возникшая в Юго-Восточной Азии более семи тыс. лет назад. Наибольшее развитие рисосеяние получило в Китае, Индии, Бангладеш, Индонезии и других странах. В Европе рис выращивают с VIII века н.э., в Америке – с XV–XVI вв. н.э. Широко возделывается рис в республиках Центральной Азии (Средней Азии), в Закавказских республиках, в Украине, Казахстане и других суверенных государствах. В России основные посевные площади риса расположены на Северном Кавказе, в Нижнем Поволжье и Приморском крае.

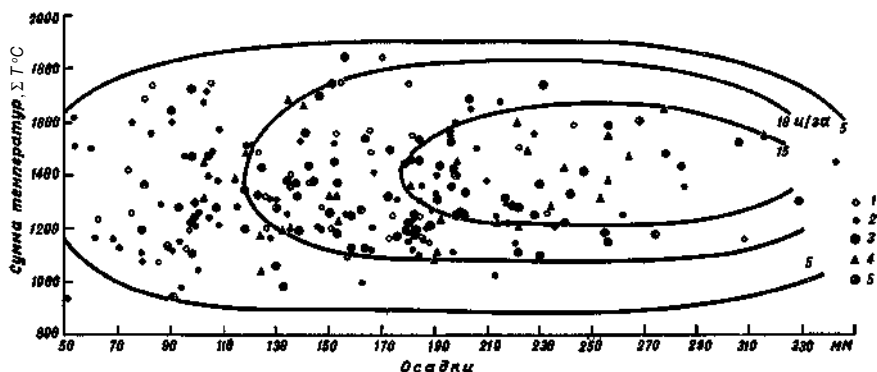


Рис. 17.34. Урожай гречихи при различной обеспеченности теплом (сумма температур) и влагой (осадки в мм) в период от всходов до созревания. Госсортосеть, 1945–1961 гг. Урожай в ц/га: 1 – менее 5,0; 2 – 5,0–9,9; 3 – 10,0–14,9; 4 – 15,0–19,9; 5 – 20,0 и более

Из зерна риса производят крупу, крахмал, масло (из зародышей); из рисовой соломы изготавливают бумагу, картон, плетеные изделия; отруби скормливают скоту.

Рис – яровое, очень влаголюбивое и теплолюбивое растение. Выращивается в районах с большим количеством осадков (не менее 1800...2000 мм в год) или в условиях постоянного затопления водой путем строительства специальных рисовых оросительных систем. Оросительные нормы варьируют в зависимости от почвенных условий в пределах 12...20 тыс. м³/га. При этом в чеках создается слой воды от 15 до 25 см, который поддерживается в период от фазы кущения растений до наступления фазы молочной спелости. На рис. 17.35 показана схема чековой системы орошения посевов риса, заключающаяся в периодическом сбросе воды (с последующим наполнением чеков водой) на почвах различной засоленности. Перед уборкой зерна вода из чеков сбрасывается в специальные каналы. Транспирационный коэффициент риса изменяется в зависимости от сорта и условий выращивания от 230...290 до 980...1100. Рис ускоренно развивается при коротком световом дне. Продолжительность вегетационного периода составляет от 85...100 суток у скороспелых сортов, а у позднеспелых – до 135...145 суток.

Семена риса прорастают при температуре 11...12 °С, а всходы появляются при температуре увлажненной почвы 14...15 °С. В период кущения для риса необходима температура не ниже 15...18 °С, в период цветения – 18...20 °С. Рис – самоопыляющаяся культура. При температуре 25 °С цветение происходит при открытых колосковых чешуях (открытое цветение), при температуре ниже 20 °С цветение происходит внутри колосков (закрытый тип цветения). При снижении температуры до 15 °С условия для опыления внутри колосков резко ухудшаются, в результате чего стерильность цветков в метелках возрастает до 30...40 %. Наиболее благоприятная температура для роста и развития растений 25...30 °С, но не выше 40 °С.

В период молочной спелости требуется температура не ниже 15...18 °С, при наступлении восковой спелости – не ниже 12...15 °С. При снижении температуры воздуха в период молочной и восковой спелости до 10 °С налив и созревание зерна приостанавливаются. Для образования полновесных зерновок наиболее благоприятна температура воздуха 24...25 °С, температура слоя воды – 19,5...21 °С.

Согласно В.М. Просунко (1985), в условиях возделывания риса при орошении формирование его урожайности зависит от величины суммарной ФАР_φ (мДж/м²) за период «всходы – выметывание метелки» (рис. 17.36):

$$Y_{m/za} = 0,007Q_{\phi} - 3,165; \quad R = 0,81 \pm 0,04. \quad (17.25)$$

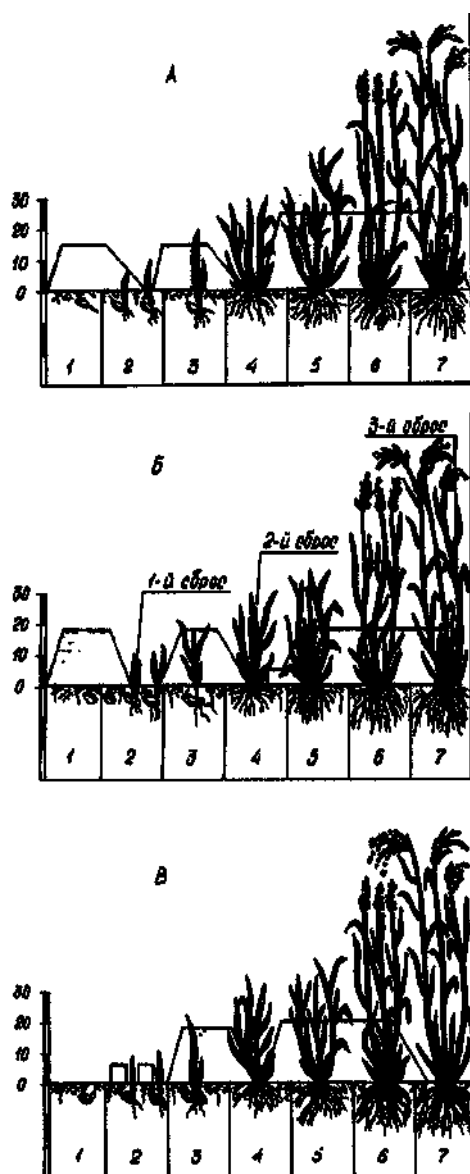


Рис. 17.35. Схема орошения риса: А – на незасоленных почвах, Б – на засоленных почвах, В – при раннем посеве с глубокой заделкой семян; 1 – сев – прораствание; 2 – прораствание – начало всходов; 3 – полеглые всходы – начало кущения; 4 – кущение; 5 – выход в трубку; 6 – выметывание – молочная спелость; 7 – восковая спелость – полная спелость

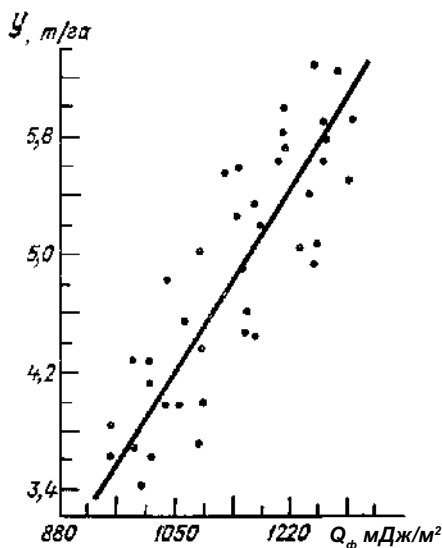


Рис. 17.36. Зависимость урожайности риса (Y) от средней ФАР за период «всходы–выметывание метелки». Сорт Краснодарский-424

Другим надежным показателем продуктивности культуры риса ($Y_{т/га}$) автор считает фитометрический показатель общей площади ассимилирующей поверхности листьев ($S_{\text{вых. трубку}}$) в фазу выхода в трубку и температуру воздуха (T) за период от всходов до фазы выхода в трубку:

$$Y = 0,297S_{\text{вых. трубку}} + 0,182T - 0,192. \quad (17.26)$$

При $S_{\text{вых. трубку}} = 1,2...4,2 \text{ м}^2/\text{м}^2$; $T = 17...23^\circ\text{C}$; $R = 0,70 \pm 0,03$; $E_Y = \pm 0,56 \text{ т/га}$.

По данным Н.В. Гулиновой (1971), в зоне рисосеяния Северокавказского региона России средняя урожайность (ц/га) риса в условиях орошения зависит от продолжительности периода в днях (X), начиная от даты 1 сентября до даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 15°C в сторону понижения (осенью):

$$Y = 7,178 / X^{0,32}; \eta = 0,86. \quad (17.27)$$

Заморозки $-0,5^\circ\text{C}$ вызывают частичные повреждения растений, а снижение температуры воздуха до -1°C губительно для риса во все фазы развития.

Урожайность зерна риса, зависящая от сорта, от сложившихся агрометеорологических условий и уровня применяемой агротехники, варьирует от 7 до 10 т/га.

Сорго – ценная зерновая и кормовая культура разнообразного использования. В культуру растение было введено с IV...III-го тысячелетия до н. э. Около 50 диких и культурных видов этого растения произрастают

в Африке, Азии, Америке, Австралии и на юге Европы. В России и сопредельных государствах различные сорта и гибриды сорго выращивают в Поволжье, на Северном Кавказе, в республиках Центральной Азии, в Казахстане, на юге Украины. Наиболее распространенные однолетние виды сорго по-разному называются в различных странах: сорго обыкновенное, джугара, гаолян, сорго веничное, суданская трава; многолетняя форма сорго – гумай – является хорошим кормовым растением, но в посевах считается сорным растением.

Зерно сорго перерабатывают на крупу, муку, крахмал; из соломы изготавливают плетеные изделия, бумагу, веники; зеленую массу силосуют для скота. Это яровая, теплолюбивая, светолучивая, наиболее засухоустойчивая и солеустойчивая культура. Отличается легкой приспособляемостью к различным почвенным условиям.

Зерно прорастает при температуре 11...12 °С. Всходы повреждаются заморозками -2...-3 °С. Растения хорошо растут и развиваются при температуре воздуха до 33 °С и удовлетворительно переносят температуру до 38...40 °С. Сорго весьма чувствительно к понижению температуры ночью: при средней ночной температуре 14 °С и дневной 20 °С рост и развитие растений замедляются.

Засухоустойчивость растений выражается в способности выдерживать относительно длительные периоды почвенной засухи, во время которых листья сорго скручиваются, сокращая испаряющую поверхность. В клетках растения происходит изменение в физиологических процессах, направленное на экономное расходование влаги, а рост тканей приостанавливается до улучшения условий обеспеченности влагой. Транспирационный коэффициент сорго варьирует от 200 до 300 (340). Будучи засухоустойчивым растением, сорго в то же время очень отзывчиво на хорошую влагообеспеченность и может давать при орошении до 11...12 т/га зерна и до 100...120 т/га зеленой массы. Без орошения урожайность зерна составляет 2,5... 3,0 т/га. На рис. 17.37 показаны различия в урожайности (в баллах) этой культуры: баллу 1 соответствует наиболее низкая урожайность, баллу 6 – наиболее высокая. Эта культура очень отзывчива на внесение удобрений (100...140 кг/га NPK).

Продолжительность вегетационного периода в зависимости от сорта и условий возделывания этой культуры составляет 90...150 суток.

17.2. Зерновые бобовые (зернобобовые) культуры

Растения этой группы, относящиеся к *семейству Бобовых*, возделываются для получения зерна (семян), богатого белком, и имеют большое продовольственное и кормовое значение. Зрелое зерно используют в пищу в виде крупы и муки; из него приготавливают консервы, пищевые концентраты. Незрелые семена и плоды, например, зеленый горошек,

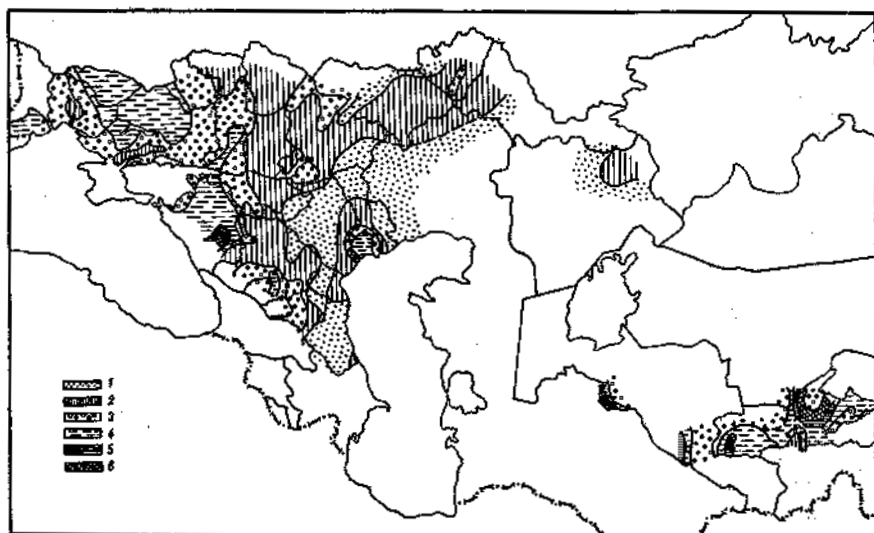


Рис. 17.37. Урожайность сорго в баллах (1962...1966 гг.). Номер условного обозначения соответствует баллу урожайности

зеленые лопатки (бобы) гороха и фасоли используют как овощи. Извлекаемое из семян сои и арахиса масло имеет пищевое и техническое применение. Зерно, жмых, шрот (ценный протеиновый продукт, получаемый в процессе экстрагирования масла из семян масличных растений), зеленая масса, а также силос и сено из нее являются ценным кормом для скота и птицы. Зерно также широко используется в промышленных масштабах для приготовления комбикормов для сельскохозяйственных животных. Зеленая масса бобовых растений в фазе цветения (люпин, сераделла, донник и др.) иногда запахивается в почву в качестве очень ценного зеленого удобрения (сидерация), обогащающего почву органическим веществом и азотом.

Большинство этих культур обладают способностью использовать атмосферный азот с помощью азотфиксирующих бактерий, развивающихся на корнях в форме хорошо различных клубеньков. Практически все бобовые культуры считаются хорошими предшественниками для других сельскохозяйственных культур в севооборотах. Зерновые бобовые культуры возделываются во всех земледельческих районах мира.

Горох посевной является наиболее распространенной зернобобовой культурой, возделываемой в Европе, Западной Азии, Северной Африке и в других земледельческих регионах мира с IV века до н. э. В России и сопредельных странах горох высевается в Европейской и Азиатской частях

страны, в Беларуси, в Украине, Северном Кавказе и др. Наиболее скороспелые его сорта можно возделывать до широты полярного круга. Это яровая, влаголюбивая культура «длинного светового дня», с вегетационным периодом от 45 до 120 суток. Прорастание семян гороха происходит при температуре, близкой к 0 °С, что позволяет сеять его в ранние весенние сроки. При температуре воздуха 8...10 °С семена прорастают за 4...6 суток. Всходы появляются во влажной почве при накоплении сумм эффективных температур (выше 3 °С) 110 °С и без значительных повреждений могут переносить заморозки до -7...-8 °С. Оптимальная температура воздуха для роста и развития растений гороха 18...25 °С.

Высокая урожайность гороха, достигающая 3,5...4,0 т/га, формируется при влажности почвы 70...80 % наименьшей влагоемкости и интенсивной агротехнике.

Биологической особенностью этой культуры является неглубокая корневая система, едва проникающая на 20 см в почву. Следствием наступления засушливых периодов и иссушение верхних горизонтов почвы становится прекращение цветения гороха и быстрое созревание бобов. В этой связи целесообразны ранние посевы культуры и проведение окуливания для максимального использования растениями почвенной влаги.

При хорошем развитии корневой системы посевы нормально переносят кратковременную почвенную засуху.

Транспирационный коэффициент в зависимости от сорта и условий агротехники варьирует от 250 до 780. Агрометеорологами установлены корреляционные зависимости урожайности гороха ($Y_{y/za}$) от величины основных предикторов, определяющих формирование продуктивности этой культуры (А.Г. Новиков), например:

– для Тамбовской области:

$$Y = 0,012 \sum R - 0,252T + 0,010 \sum R_1 + 34,3; \quad (17.28)$$

$$R = 0,752 \pm 0,06; E_y = \pm 2,6 \text{ ц/га};$$

– для Воронежской области:

$$Y = 0,004 \sum R - 0,289 \sum T - 0,498T_1 + 52,2; \quad (17.29)$$

$$R = 0,727 \pm 0,07; E_y = \pm 3,6 \text{ ц/га},$$

где $\sum R$ – сумма осадков за ноябрь – июнь; $\sum R_1$ – сумма осадков за июль; $\sum T$ – сумма средних значений температуры воздуха за май – июнь; T_1 – средняя температура июля.

На рис. 17.38 приведена зависимость урожайности зерен гороха от средней температуры воздуха и продолжительности периода «цветение – созревание». Многие сорта гороха хорошо переносят избыток влаги в почве, но близость грунтовых вод неблагоприятно влияет на рост и развитие растений.

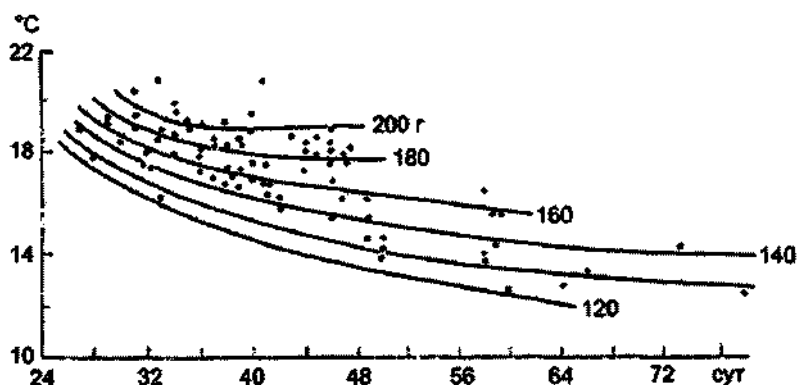


Рис. 17.38. Зависимость массы 1000 зерен гороха (г) от средней температуры воздуха и продолжительности периода «цветение–созревание» (Иванова-Зубкова Н.З., 1978)

Фасоль обыкновенная, известная человеку с IV – III-го тысячелетия до н. э., выращивается во многих земледельческих районах мира для зернового, овощного и консервного производства и использования. В Россию фасоль обыкновенная была завезена в XVIII веке. Известно более 200 видов фасоли, широко распространенной в тропиках и субтропиках, главным образом в Западном полушарии.

В России и сопредельных странах основные посевные площади сосредоточены в Центрально-Черноземном регионе, на Северном Кавказе и Дальнем Востоке, в Украине, Молдавии и в Среднеазиатских республиках.

Фасоль – яровая, теплолюбивая, светолюбивая и влаголюбивая и, одновременно засухоустойчивая культура. Это растение «короткого дня», но имеются сорта нейтральные и даже положительно реагирующие на продолжительный световой день. Семена во влажной почве прорастают при температуре 10... 12 °C, а всходы повреждаются при заморозках -1,0...-1,5 °C. Поэтому посевы ее производятся после окончания весенних заморозков и наступления устойчивого прогревания почвы до 12...15 °C.

В сухой почве семена фасоли, если они не успели набухнуть, могут сохранять всхожесть в течение длительного периода и дать всходы после дождя или полива. Продолжительность периода «посев – всходы» варьирует в зависимости от этих условий от 9 до 22 суток при наборе суммы эффективных температур (≥ 12 °C) 166...183 °C. Кроме того, глубина заделки семян также влияет на продолжительность этого периода: при посеве на глубину 4 см всходы появляются на 10 сутки, при глубине заделки семян 12...16 см – через 15...16 суток. Лучшие условия для роста и

развития фасоли складываются при температуре воздуха 20...25°C и высокой обеспеченности почвенной влагой. Плоды начинают завязываться при температуре воздуха 15 °C.

Продолжительность вегетационного периода изменяется от 75 до 120 суток в зависимости от сорта и условий возделывания. Для фасоли в зависимости от сортовых особенностей за весь вегетационный период необходима сумма положительных температур от 1400 до 3000 °C. В центральных районах Европейской территории страны урожайность фасоли варьирует от 10,0 до 14,6 ц/га, на Северном Кавказе урожайность несколько выше за счет лучшей теплообеспеченности растений (10,6...18,5 ц/га). В этих районах суммы эффективных температур ($\geq 10^\circ\text{C}$), необходимые для созревания бобов, составляют 1750...1900 °C. В годы с прохладным и дождливым летом урожайность фасоли заметно снижается.

Эта культура, несмотря на ее важное продовольственное значение, недостаточно изучена агрометеорологами.

Соя обыкновенная возделывается человеком с V-го тысячелетия до н. э., в России – с конца XIX века. Это яровая, теплолюбивая, светолюбивая и влаголюбивая культура «короткого светового дня», выдерживающая кратковременную засуху. Основные посевы ее сосредоточены во влажных тропических и субтропических регионах Африки и Юго-Восточной Азии, в Америке. Родина этой культуры – Китай. В России соя стала возделываться в конце XIX столетия, в основном на Дальнем Востоке (рис. 17.39), на Северном Кавказе (рис. 17.40). Благоприятные условия для ее выращивания имеются также на Северном Кавказе, в Молдавии, Украине, республиках Закавказья и в Центральной Азии. В зоне возделывания сои за вегетационный период выпадает около 350...450 мм осадков. Соя занимает первое место среди других культур по разнообразию использования – это зерно, мука, масло, маргарин, соевое молоко и творог, кондитерские изделия; искусственное волокно, пластмассы, мыло; корма для сельскохозяйственных животных – зеленая масса, жмых, сено, *шрот* (от нем. *schrot* – мелкие куски, обрезки) – концентрированный корм, получаемый после извлечения жира из семян масличных растений.

Известно более двадцати различных по скороспелости сортов этой культуры. Особенности их потребности в агроклиматических ресурсах и агрометеорологических условиях произрастания подробно исследованы В.М. Степановой (1972, 1985) и другими учеными. Вегетационный период сои около 200 суток, в том числе период с температурами воздуха выше 15 °C составляет 130...150 суток. Семена начинают прорастать при температуре 8 °C, но хорошие условия для прорастания создаются при температуре воздуха в период сева 15...16 °C. При средней суточной температуре воздуха 19...22 °C всходы появляются через 6...7 суток. Повреждение всходов заморозками происходит при температуре -3...-4 °C.

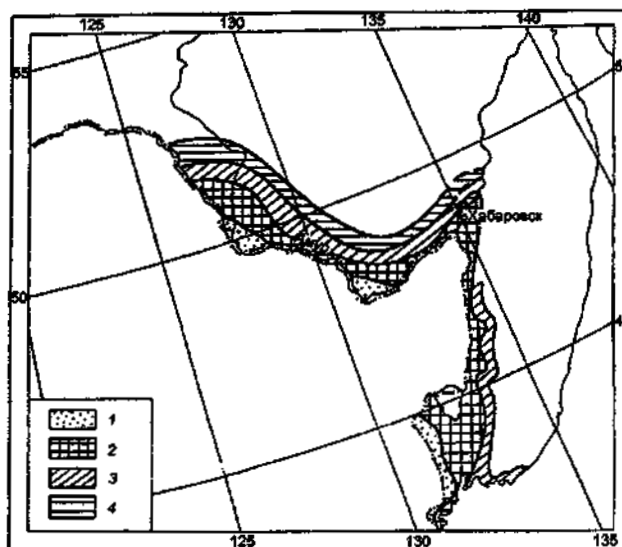


Рис. 17.39. Ареал возделывания сои и расчетное значение ее урожайности при климатической обеспеченности 75 % для Дальнего Востока (Степанова В.М., 1972): 1 – 7 ц/га; 2 – 6 ц/га; 3 – 5 ц/га; 4 – 4 ц/га

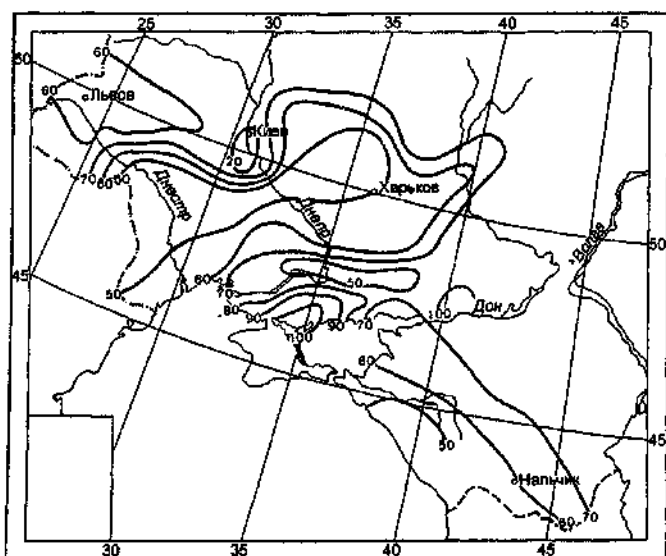


Рис. 17.40. Устойчивость урожайности сои (в процентах от средней урожайности за 1960... 1968 гг.) на территории Украины и юга Российской Федерации (Степанова В.М., 1972)

Продолжительность периода от всходов до цветения изменяется (в зависимости от температурного периода) от 50 до 75 суток; оптимальная температура для этого периода – 20...21,5 °С. Появление цветков и плодов возможно в широком температурном диапазоне 11,5...27,0 °С, но наилучшими условиями теплообеспеченности являются температуры воздуха 23...25 °С. В период цветения и формирования бобов потребность сои во влаге составляет 80% наименьшей влагоемкости.

Установлено, что изменение средних величин суммарного испарения с поля, занятого посевом сои, при оптимальной влажности почвы имеет характерный для развития растений параболический ход. Максимальные значения суммарного испарения приходятся на период интенсивного ветвления растения, велико оно и в период «цветение – образование бобов». Так, по экспериментальным данным, проведенным в Украине, суммарное испарение за период от фазы настоящий лист до образования бобов составляет 2,3...4,5 мм/сутки. Для того чтобы возместить эти потери влаги, необходимы осадки от 70 до 135 мм в месяц. Наиболее высокие коэффициенты корреляции ($r = 0,93...0,95$) между средними урожаями сои в производственных условиях и суммарным испарением за период вегетации были получены в условиях относительно равномерного увлажнения почвы. Например, при урожайности сои 13,4 ц/га суммарное испарение составило 400 мм, при 3,5 ц/га – 195 мм.

Поскольку на корнях сои, как и многих других бобовых культур, формируются клубеньковые бактерии (см. Часть II), успешно развивающиеся в нейтральной среде ($pH = 7,0$), эта культура усваивает азот из почвы и из воздуха. Так, по данным В.М. Степановой (1972), в Приморском крае на почвах с pH , равным 6,0...6,3, формируется урожай зерна сои более 0,84 т/га, а при $pH = 5,2...5,5$ урожай составил лишь 0,53 т/га.

При известковании кислых почв и внесении минеральных удобрений урожайность сои повышается. По мнению многих ученых, условия европейской части бывшего СССР благоприятны для расширения посевов этой важной культуры. Максимальная урожайность сои, по данным государственных сортоучастков, на Дальнем Востоке, в зависимости от почв, составила 1,47... 2,21 т/га, минимальная – 0,58...0,98 т/га.

Кормовые бобы – наиболее распространенный вид – конские бобы, одна из древних культур земледелия в лесных и лесостепных регионах. Их посевы сосредоточены в районах с достаточным увлажнением: в Центрально-Черноземной зоне, в ряде районов Нечерноземья, на Урале, в Алтае, в Западной Сибири, в Беларуси, на западе Украины и в Прибалтийских странах.

Для возделывания кормовых бобов лучшими считаются суглинистые и глинистые, богатые гумусом и кальцием почвы. Прорастание семян начинается при температуре воздуха 1...2 °С, наиболее

благоприятная температура для этой фазы 7...8 °С. Прорастание бобов происходит очень медленно из-за толстой кожуры семян. Именно поэтому для прорастания необходима влага в количестве от 110 до 120 % от массы семян. Оптимальной влажностью для прорастания бобов являются запасы продуктивной влаги выше 15 мм в слое почвы 10 см. При запасах менее 5 мм бобы не всходят. Зависимость продолжительности периода «посев – всходы» N (в сутках) при достаточных запасах влаги от температуры воздуха T (°С) за этот период выражена уравнением (Калинин Н.И., 1967):

$$N = 26,2 - 0,94T . \quad (17.30)$$

Для расчета продолжительности периода «всходы – цветение» в зависимости от температуры воздуха пользуются аналогичным уравнением:

$$N = 75,3 - 2,1T . \quad (17.31)$$

По данным того же автора, расчет продолжительности периода «цветение – созревание бобов» в зависимости от температуры воздуха достаточно надежно описывается аналогичным уравнением:

$$N = 142,2 - 4,9T . \quad (17.32)$$

Для всех изученных сортов кормовых бобов продолжительность этого межфазного периода сокращалась при средней температуре воздуха 22 °С, составляя 32 суток. Минимальная сумма средних суточных температур воздуха равнялась 704 °С. Следствием понижения температуры воздуха до 14 °С является увеличение продолжительности этого периода в 2,3 раза. Урожайность бобов (ц/га) основных сортов, высеваемых в хозяйствах, при прочих равных условиях зависит от количества осадков за вегетационный период. Так, при осадках 80 мм урожайность составляла 2,3 ц/га, при 200 мм – 8,2...13,5 ц/га, при 360 мм – 16,2...23,0 ц/га.

Для расчета урожайности зеленой массы позднеспелых сортов бобов (Y , ц/га) в зависимости от суммы осадков (R) за период «посев – созревание» автор предложил уравнение:

$$Y = 0,8R - 29,7 , \quad (17.33)$$

для раннеспелых сортов бобов:

$$Y = 0,54R + 1,0 . \quad (17.34)$$

Всходы выдерживают кратковременные заморозки до -5...-6 °С. Потребности этой культуры в тепле аналогичны гороху. В условиях высокой влагообеспеченности эта культура дает средние урожаи 13,0...13,4 ц/га бобов и растительной массы, используемой для корма скоту. Транспирационный коэффициент – около 800.

В засушливые годы продуктивность посевов бобов низкая. Вегетационный период кормовых бобов составляет 90... 145 суток. На кислых почвах бобы растут плохо, критической величиной является $pH = 4,1$.

17.3. Прядильные и масличные культуры

Хлопчатник относится к многолетним древесно-кустарниковым растениям субтропических и тропических широт обоих полушарий, где он возделывается с древнейших времен, в основном как однолетняя сельскохозяйственная культура. Это техническая культура, являющаяся сырьем для текстильной, химической, пищевой и комбикормовой промышленности. Из хлопчатника вырабатывают около 100 видов промышленной продукции: хлопковое волокно, хлопковое пищевое и техническое масло, различные виды спирта, смолы, мыло, глицерин, смазочные материалы, жмых, корд для автопокрышек и ремней и т. п.

На территории бывшего Союза хлопчатник выращивается на больших площадях в государствах Центральной Азии, особенно в Узбекистане, Туркменистане и Таджикистане, а также в Азербайджане. Изучением агрометеорологических проблем этой культуры занимались многие ведущие ученые: Л.Н. Бабушкин, Ф.А. Муминов, А.К. Абдуллаев и многие другие, выполнившие капитальные исследования в области влияния погоды и климата на рост, развитие и формирование продуктивности этой культуры во всех возделываемых регионах на территории бывшего СССР. Это теплолюбивая культура, которая выращивается только в условиях орошаемого земледелия: за период вегетации проводится 4...6 поливов с расходом воды за один полив 6...8 тыс. м³ на каждый гектар посева. Транспирационный коэффициент изменяется в зависимости от сорта от 350 до 1651. На протяжении вегетационного периода различных по скороспелости сортов (110...145 суток) потребности растений в тепле и влаге не остаются постоянными. Хорошими условиями для появления всходов считается средняя суточная температура воздуха 14 °С и несколько выше при запасах продуктивной влаги на глубине заделки семян (0...5 см) 6...10 мм. Для появления всходов необходима сумма эффективных температур выше 10 °С, равная 84 °С. Для всходов хлопчатника большую опасность представляют поздние весенние заморозки (-0,5...-1,0 °С), а также почвенная корка и сильные ветры и суховеи. Хлопчатник плохо переносит засоление почвы.

Для наступления фазы бутонизации необходима сумма эффективных температур выше 10 °С, равная 500 °С, рассчитанная от даты посева. В период от фазы бутонизации до цветения дневная температура воздуха выше 38 °С угнетает растения, сдерживает его развитие. Фаза цветения наступает у скороспелых сортов при накоплении суммы эффективных температур (выше 10 °С) 970 °С, у среднеспелых – 1000 °С, у позднеспелых, тонковолокнистых сортов – 1100 °С, рассчитанных от даты посева. От цветения до раскрытия первых коробочек при среднем уровне агротехники скороспелым сортам хлопчатника необходимо накопление суммы эффективных температур (выше 10 °С) 760 °С, среднеспелым – 850...880 °С, позднеспелым – 1100 °С.

Количество сформировавшихся коробочек на кусте хлопчатника определяется биологическими особенностями сорта и комплексом агрометеорологических условий: режимом температуры воздуха, влагообеспеченностью посевов, интенсивностью и продолжительностью неблагоприятных для культуры погодных явлений, уровнем агротехники и др. В среднем многолетнем у среднеспелых сортов хлопчатника формируется по 10...12 коробочек, достигающих полной спелости (рис. 17.41 и 17.42). Ранние осенние заморозки (1...2 °С мороза в воздухе) прекращают вегетацию хлопчатника, сокращают период созревания коробочек, что снижает конечную урожайность хлопка-сырца. Наиболее ценным по качеству хлопка-сырца является доморозный сбор урожая. Урожайность хлопка-сырца, являющаяся сложной функцией биологических особенностей сорта, сложившихся агрометеорологических условий вегетационного периода и применяемой агротехники, варьирует от 2,0 до 4,5 т/га.

Лен относится к числу лучших лубоволокнистых растений, возделываемых человеком с древнейших времен: его культура была известна в Индии, Китае, Египте и Закавказье за IV...V тысяч лет до н. э. В X...XIII веках эта культура распространилась повсеместно в России. Для Нечерноземной зоны России лен является одной из важных технических культур, где сосредоточено около половины всех засеваемых им площадей.

Лен-долгунец – растение высотой до 120 см, дающее наиболее ценное, длинное и прочное волокно, возделывается в Нечерноземной зоне России, в Прибалтийских государствах, в Украине, а также в Польше, Чехии и Словакии, Финляндии, Нидерландах и в ряде других государств. Его волокно в два раза превышает прочность хлопкового волокна и в три раза – шерстяного. Из волокна изготавливают разнообразные ткани – полотно, батист,

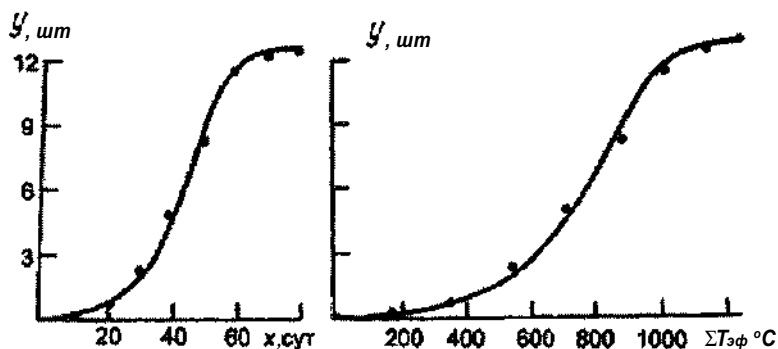
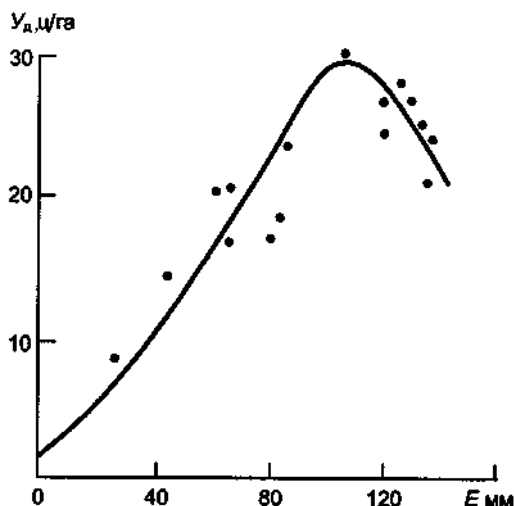


Рис. 17.41. Зависимость накопления количества коробочек хлопчатника (y , штук) от продолжительности периода плодообразования (x) и сумм эффективных температур ($\sum T_{эф}$) (Муминов Ф.А., 1991)

Рис. 17.42. Зависимость доморозной урожайности (Y_d , ц/га) хлопка-сырца от суммарного испарения (E мм) за период от фазы раскрытия первых коробочек до даты первого осеннего губительного заморозка (Муминов Ф.А., 1991)



парусину, брезент, мешковину, канаты и т.п. Семена льна содержат 35...42 % масла, широко используемого в химической и пищевой промышленности; льняной жмых – хороший концентрированный корм для скота.

Это растение «длинного дня», не требовательное к теплу, возделывается в районах хорошо обеспеченных влагой; его вегетационный период варьирует от 75 до 90 суток. Однако лен плохо переносит избыточное увлажнение и высокий уровень стояния грунтовых вод.

Наиболее дружные всходы льна появляются при температуре воздуха 10...12 °С, как и у других растений, скорость прорастания семян в условиях достаточного увлажнения почвы зависит от температуры почвы; так, при 1...3 °С всходы появляются через 25...30 суток, при 18...20 °С – через 4...6 суток. Всходы льна выдерживают заморозки до -2...-3 °С.

В период интенсивного роста (от всходов до цветения) лен очень требователен к высокому увлажнению почвы, его транспирационный коэффициент составляет 400...500.

Зависимость высоты растений льна-долгунца от величины влагообеспеченности представлена на рис. 17.43. Оптимальной температурой этого периода является 10...15 °С. При более высоких температурах воздуха (17...25 °С) и высокой солнечной радиации развитие растений ускоряется, но задерживается рост стебля, усиливается ветвление, что снижает техническую ценность волокна. Биологически рост стебля прекращается с наступлением фазы цветения. Благоприятными условиями для формирования полноценного волокна этой культуры считается не жаркое лето с частыми несильными дождями. Осадки ливневого характера с сильным

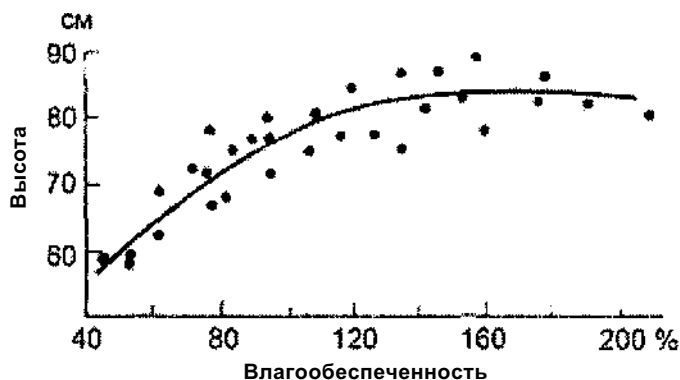


Рис. 17.43. Зависимость высоты растений льна-долгунца (см) ко времени уборки от средней влагообеспеченности (% оптимума) за межфазный период «елочка – массовое цветение» (Комоцкая Л.В., 1978)

ветром вызывают полегание посевов, в результате чего ухудшаются условия уборки льна, снижается качество его волокна. Урожайность льноволокна изменяется в зависимости от сорта, агрометеорологических условий вегетационного периода и применяемой агротехники от 1,0 до 1,6 т/га.

Поскольку основная продукция льна формируется в его стебле, высота растений является основным параметром (наравне с густотой стояния растений на единице площади), определяющим выход, т.е. урожайность льноволокна (рис. 17.44).

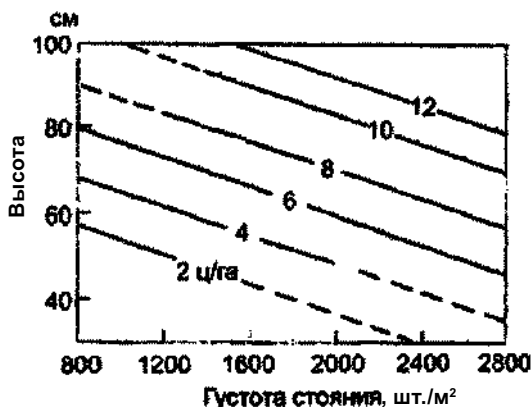


Рис. 17.44. Зависимость урожайности льноволокна от средней высоты стебля и средней густоты стояния растений на 1 м² (Комоцкая Л.В., 1978)

Л.В. Комоцкая (1978) предложила уравнение связи урожайности льна-волокна (Y , ц/га) от высоты стебля (L , см) и густоты стояния растений (N , м²):

$$Y = 0,18L + 0,003N - 10,6. \quad (17.35)$$

Эта зависимость получена автором для полей с высоким уровнем агротехники: ко времени уборки высота растений достигает 70...80 см, при густоте стояния 2000...2500 растений на 1 м². При этих параметрах урожайность льна-долгунца составляет 8...10 ц/га. При высоте 60 см и густоте стояния 1600...2000 растений урожайность составляет менее 7 ц/га.

В восточных районах Нечерноземной зоны страны, где климат значительно суше, чем в западных и центральных районах, урожайность льна-волокна при густоте стояния 2000 растений на 1 м² составляет 3...4 ц/га в восьми годах из десяти. В то же время обильные осадки в период «цветение – ранняя желтая спелость» снижают крепость волокна. Наиболее крепким получается волокно, когда в этот межфазный период число ясных дней (по нижней облачности) не менее 12, а сумма осадков не превышает 30 мм.

Лен-кудряш (масличный) – более теплолюбивое и менее требовательное к влаге, чем лен-долгунец, растение. Поэтому его ареал возделывания охватывает более южные регионы страны: Поволжье, Северный Кавказ, а также Украину и некоторые Центрально-азиатские и Закавказские государства. Высота льна-кудряша – всего 30...50 см, сильно ветвящийся от основания стебель несет большое количество коробочек (до 50 и более). Вегетационный период до 150 суток. В семенах содержится до 52 % жирного масла, которое используется в пищевой и лакокрасочной промышленности, при изготовлении олифы, лаков, красок. Жмых после получения масла из семян скармливают скоту. Волокно используется для выработки грубых тканей (мешковина, брезент), шпагата и т. п. Урожайность семян 0,6...1,0 т/га. Агрометеорологические особенности его возделывания менее изучены, чем льна-долгунца.

Подсолнечник – важнейшее сельскохозяйственное растение, завезенное в XVI веке из Америки в Европу и получившее в дальнейшем широкое распространение как декоративная, затем масличная и силосная культура. В Россию подсолнечник был завезен из Нидерландов в XVIII веке. С 30-х гг. XIX в. возделывается как масличная культура. В его семенах содержится до 50...54 % (и более) высокопитательного масла. Урожайность семян современных сортов в среднем составляет 1,6... 1,7 т/га, а в условиях высокой агротехники достигает 2,0... 2,5 т/га.

Как теплолюбивая и светолюбивая культура подсолнечник выращивается на семена в районах Северного Кавказа, в Центрально-Черноземных областях, в Поволжье, на Алтае, а также в Украине, Молдавии, Казахстане, в качестве силосной культуры – в Нечерноземной зоне и в восточных районах России.

Семена этой культуры начинают прорастать при температуре 5...7 °С, оптимальной считается температура около 20 °С, при которой всходы появляются на 6...8-е сутки после посева при достаточном увлажнении почвы. Всходы легко переносят кратковременные заморозки до -3...-4 °С, отдельные сорта – до -5...-6 °С.

От всходов до фазы цветения потребность растений в тепле возрастает. Оптимальной считается температура воздуха 25...27 °С, угнетающее действие на растения оказывают температуры воздуха 30 °С и выше. В период цветения поздние весенние заморозки -1...-2 °С оказывают губительными для всего растения.

Продолжительность вегетационного периода в зависимости от сорта изменяется от 75 до 140 суток, а сумма эффективных температур (выше 10 °С), необходимая для созревания семян, составляет 1400 °С для раннеспелых сортов и 2500 °С – для позднеспелых.

Подсолнечник считается влаголюбивым растением, хотя способен выдерживать непродолжительные засушливые периоды благодаря развитию мощной и глубокой корневой системы (до 100...120 см) и опушению надземных вегетативных органов. Наибольшая потребность во влаге отмечается у растения в периоды образования корзинок, цветения и налива семян, когда расходуется до 60 % всей необходимой растению влаги за весь период вегетации. Транспирационный коэффициент варьирует в зависимости от сортов от 290 до 705.

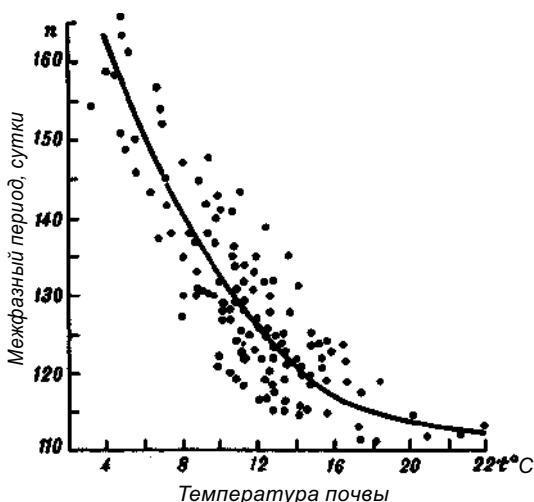
Подсолнечник светолюбив, поэтому продолжительная пасмурная погода или затенение молодых растений (при загущенных посевах) ослабляют его рост и развитие, снижают качество семян. Устойчивость подсолнечника к весенним заморозкам и высокая потребность во влаге позволяют высевать эту культуру ранней весной, а в южных регионах – под зиму, благодаря чему растения используют зимне-весенние запасы почвенной влаги.

Формирование соцветий происходит у скороспелых сортов в фазе 3...5-й пары листьев, у среднеспелых – 5...6-й пары и у позднеспелых – 8...10-й пары листьев. При недостатке питательных веществ в почве и света (загущенный посев) образуется незначительное количество цветков с последующим резким снижением урожайности.

Наиболее интенсивный рост стебля и листьев происходит в период от фазы образования соцветий до цветения. При хорошем уходе на одном растении закладывается от 1500 до 2000 цветков. Период цветения одного растения продолжается 8...10 суток, а период налива семян – около 35 суток. В этот период происходит интенсивный отток питательных веществ из листьев, стеблей и корзинки в семена.

Зависимость продолжительности периода «посев – всходы» (N , суток) определяется температурой почвы на глубине 10 см ($T_{10\text{см}}$) (рис. 17.45). Выражение этой связи имеет вид (Мельник Ю.С., 1972):

Рис. 17.45. Зависимость продолжительности периода «посев – созревание» подсолнечника n (в сутках) от температуры почвы t° на глубине 10 см в среднем за 20 суток от даты посева



$$\lg N = 2,3297 - 0,2113 \lg T_{10\text{см}}; \quad \eta = 0,79. \quad (17.36)$$

В течение вегетационного периода подсолнечника потребность растений во влаге различна, хотя в целом роль условий увлажнения почвы в формировании урожая семян подсолнечника очень велика. В межфазный период от всходов до образования соцветий надземная масса еще слабо развита, происходит интенсивное развитие корневой системы при большом физическом испарении влаги из верхнего слоя почвы (0...50 см). Изменение запасов продуктивной влаги под подсолнечником рассчитывается по уравнению:

$$W = 19,6 + 0,85W_0 + 0,37R - 1,01T, \quad (17.37)$$

где W и W_0 – запасы продуктивной влаги (мм) на конец и начало декады; R – сумма осадков за декаду (мм); T – средняя за декаду температура воздуха.

В межфазный период от образования соцветий до цветения происходит интенсивный рост листьев и стебля; корневая система заканчивает свой рост. Изменение запасов продуктивной влаги в слое 0...100 см под подсолнечником в этот период рассчитывается по уравнению:

$$W = 25,8 + 0,79W_0 + 0,52R - 1,58T. \quad (17.38)$$

В межфазный период от цветения до созревания происходит постепенное затухание фотосинтезирующих поверхностей растения, резко снижается транспирация, а нижние листья подсолнечника засыхают. Изменение запасов продуктивной влаги под подсолнечником рассчитывается по уравнению:

$$W = 12,2 + 0,71W_0 + 0,70R - 0,77T. \quad (17.39)$$

В этих уравнениях множественный коэффициент корреляции для отдельных межфазных периодов равен от 0,84 до 0,87, а обеспеченность уравнений находится в пределах 92...98 %. Между водопотреблением (E , м³/га) подсолнечника в целом за вегетационный период и урожаем (Y , ц/га) выявлена весьма устойчивая зависимость:

$$Y = 2,83 + 0,059E; r = 0,87; S_y = \pm 3,6 \text{ ц/га}. \quad (17.40)$$

П.Е. Миусским установлена количественная зависимость урожайности семян подсолнечника (по величине выхода подсолнечного масла, кг/га) от суммы температур за вегетационный период и от показателя увлаженности K . Этот показатель представляет собой отношение суммы запасов продуктивной влаги в слое почвы 0...100 см (W_{0-100}) к началу сева и суммы осадков за вегетационный период ($\sum R$) за период с первой декады мая до фазы цветения плюс 10 суток после цветения к сумме средних суточных температур воздуха выше 10 °C ($\sum T_{>10^\circ}$) за этот же период, уменьшенной в 10 раз (рис. 17.46).

$$K_0 = (W_{0-100} + \sum R) / \sum T_{>10^\circ} : 10. \quad (17.41)$$

Зависимость масличности семян подсолнечника (m) от показателя увлаженности K_0 получена также Ю.С. Мельником и А.В. Мурга:

$$m = -0,039K_0 + 45,838. \quad (17.42)$$

По утверждению авторов, эта зависимость масличности от K_0 выражена более четко в хорошо увлажняемых регионах, чем в засушливых. Зависимость формирования урожайности семян подсолнечника от показателя увлажнения K_0 , полученная Ю.С. Мельником и Н.Б. Мещаниновой, представлена на рис. 17.47.

Среди других масличных культур, имеющих пищевое значение, назовем коноплю, клещевину, сафлор, кунжут, горчицу и арахис.

17.4. Корнеплоды и клубнеплоды

К *корнеплодам* относятся сельскохозяйственные культуры, имеющие «специальный» запасующий орган, в образовании которого участвуют главный побег, подсемядольное колено (гипокотиль) и главный корень. Наиболее известные овощные культуры этой группы – свекла (столовая, сахарная, кормовая), морковь, репа, дайкон и др. Их особенности рассмотрим на примере сахарной свеклы.

Сахарная свекла является основным источником сырья для сахарной промышленности на всем постсоветском пространстве. Отходы сахароварения используют на корм скоту (меласса, жом) и на удобрения. Наибольшие посевные площади ее сосредоточены на Северном Кавказе, в Центрально-

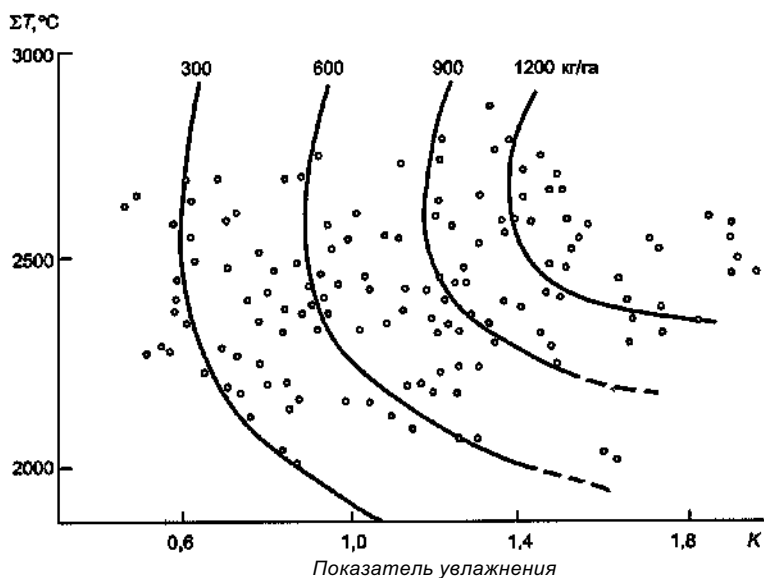


Рис. 17.46. Зависимость урожайности семян подсолнечника (по показателю выхода подсолнечного масла, кг/га) от суммы температур за вегетационный период и показателя увлажнения K (Миусский П.Е., 1965)

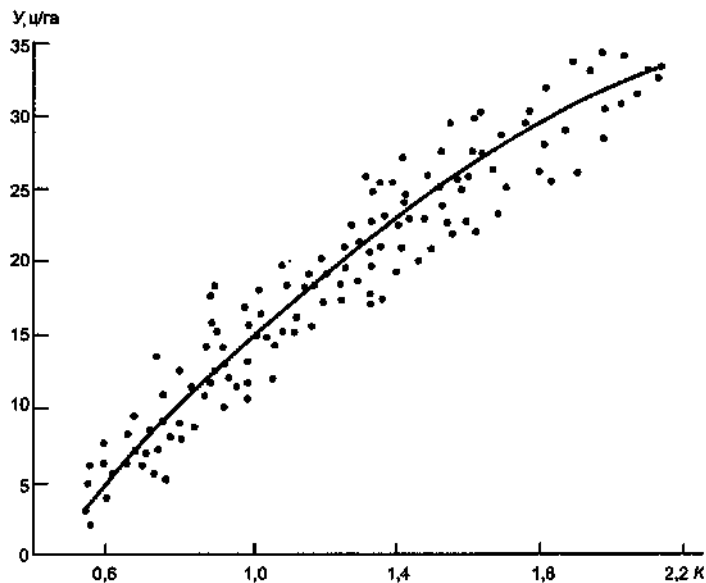


Рис. 17.47. Зависимость урожайности семян подсолнечника (Y , ц/га) на сортоучастках от показателя увлажнения K

Черноземной зоне, в Поволжье, а также в Украине, Молдавии, Казахстане и Кыргызстане. Эта культура теплолюбивая, светолюбивая и влаголюбивая; легко переносит непродолжительную почвенную засуху.

Семена свеклы начинают прорастать при температуре 1...4 °С, дружные всходы появляются при температуре воздуха 10...12 °С через 12...14 суток, а при температуре 15...17 °С – через 7...8 суток. Всходы погибают при заморозках -4...-5 °С. Оптимальная температура для роста и развития 20...22 °С. Рост корнеплодов начинается при накоплении суммы эффективных температур (выше 5 °С) 500 °С. Активный их рост и накопление продолжают в условиях достаточной влажности почвы в течение лета до снижения средней суточной температуры воздуха осенью до 6 °С. Летние температуры воздуха выше 30 °С угнетают развитие и рост растений. За вегетационный период в основных районах свеклосеяния этой культуре необходима сумма эффективных температур 2200...2400 °С, в Нечерноземной зоне и в Сибири – 1800...2000 °С, а на юге Кыргызстана – до 3000 °С.

В год посева развивается корнеплод средней массой 300...600 г, при средней сахаристости 14...20 %, иногда – 24 %. Во вторую половину вегетационного периода сахарной свеклы недостаток освещенности снижает урожайность и сахаристость корнеплодов. Потребность во влаге у этой культуры высокая. Она возрастает по мере роста растений и достигает максимума в восьмую декаду вегетации (июль-август), а затем снижается. Общий расход влаги за период вегетации при урожайности 40...50 т/га составляет 3500...4000 м³. Транспирационный коэффициент сахарной свеклы равен 230...670 в зависимости от сложившихся агрометеорологических условий и применяемой агротехники. По данным О.М. Контрощиковой, хорошие условия для формирования урожайности сахарной свеклы складываются при запасах продуктивной влаги в метровом слое почвы больше 100 мм в период до начала роста корнеплодов и более 70 мм в период их роста. А при средних многолетних условиях влагообеспеченности и высокой агротехнике возможная урожайность сахарной свеклы в зоне ее возделывания представлена на рис. 17.48.

Автором установлена количественная зависимость средней урожайности сахарной свеклы ($Y_{\text{сред.}}$) от суммы температур воздуха $\sum T_{>10^\circ}$ за период от даты перехода температуры через 10 °С весной до 1 августа и биологического урожая, определенного на 20 июля (Y , ц/га) и средних запасов влаги (W , мм) в почве в слое 0...100 см за период от посева до 1 августа:

$$Y_{\text{сред.}} = 0,45 \sum T_{>10^\circ} - 0,0002 \sum T^2 + 2,11y - 2,46W_{0-100} + 0,007W_{0-100}^2 + 62,48; \quad (17.43)$$

$$\eta = 0,75.$$

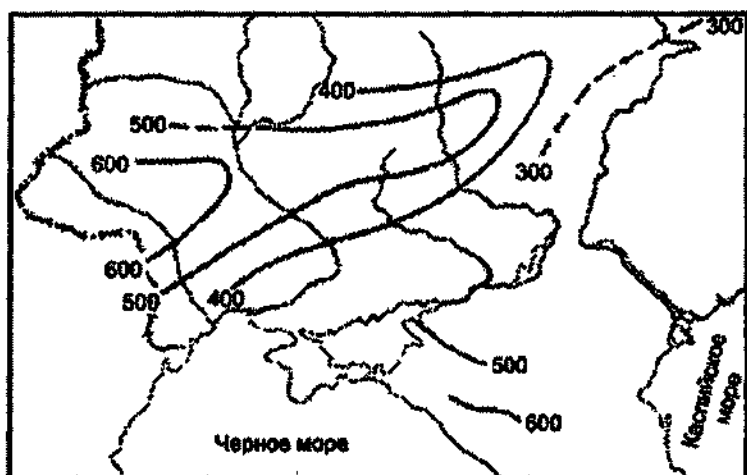


Рис. 17.48. Возможная урожайность сахарной свеклы (ц/га) при средних многолетних условиях влагообеспеченности посевов и агротехнике на уровне передовых хозяйств (Контрощикова О.М., 1968)

На рис. 17.49 представлен график зависимости средней урожайности сахарной свеклы от условий теплообеспеченности и сформировавшегося ее биологического урожая на дату 20 июля. Оправдываемость расчета составляет 80 %.

Ценность сахарной свеклы в первую очередь определяется уровнем ее сахаристости. Установлено, что в условиях Центральной черноземной

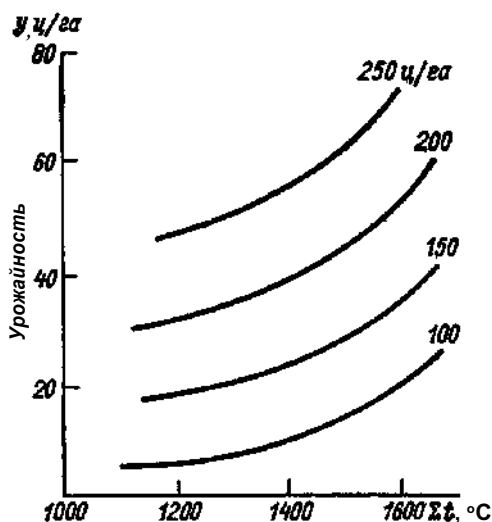


Рис. 17.49. Зависимость средней урожайности сахарной свеклы от суммы температур $\sum t$ за период от перехода температуры через 10°C весной до 1 августа и биологического урожая на 20 июля (у) при оптимальном увлажнении

зоны страны высокая сахаристость свеклы (18 % и более) формируется при сумме ФАР более 8 ккал/см² за период с 1 августа до 20 сентября и средней влагообеспеченности посевов от 40 до 70 % оптимальной влажности. При сумме ФАР менее 5 ккал/см² и влагообеспеченности более 80 % накопление сахаров в клубнях свеклы составляет ≤ 15 %. Коэффициент корреляции $r = 0,88 \pm 0,02$.

Клубнеплоды. К этой группе сельскохозяйственных культур относятся растения, образующие запасающие органы корневого, стеблевого и листового происхождения, часто выполняющие функции вегетативного размножения: картофель, топинамбур, батат, кольраби (разновидность огородной капусты) и др. Рассмотрим особенности этих культур на примере картофеля.

Картофель принадлежит к числу важнейших сельскохозяйственных культур разностороннего использования и возделывается во многих странах мира. В культуру картофель был введен местным населением Америки примерно 14 тыс. лет назад. В Европу картофель был завезен в 1565 году. В России эта культура выращивается с конца XVII века. Основные площади его посадок сосредоточены в Нечерноземной, Черноземной и лесостепной зонах России, а также в Беларуси, Украине, Казахстане, в Прибалтийских, Закавказских и Центрально-азиатских государствах.

Картофель – влаголюбивое (особенно во время цветения и клубнеобразования), светолюбивое и довольно холодостойкое растение. Прорастание почек клубней картофеля в почве начинается при температуре почвы 5...8 °С.

При температуре 10...12 °С всходы картофеля появляются на 23-и сутки. Повышение температуры почвы до 18...25 °С сокращает продолжительность периода от посадки до всходов до 12...13 суток. Яровизированные клубни могут давать всходы на 6...8-е сутки. Всходы и взрослые растения повреждаются кратковременными заморозками -2...-3 °С, однако с наступлением теплой погоды из спящих почек образуются новые побеги. Незащищенные клубни картофеля гибнут при -2 °С и теряют способность к прорастанию. Наиболее благоприятной температурой для роста побегов, листьев и цветения считается 20...21 °С.

Условия тепло- и влагообеспеченности в период образования клубней определяют уровень урожайности в каждом конкретном году. За показатель степени благоприятности агрометеорологических условий в этот период принята средняя температура почвы на глубине 20...30 см, равная 16...18 °С, и достаточная влажность корнеобитаемых горизонтов почвы.

Дневные температуры воздуха до 30 °С вызывают ослабление, а у скороспелых сортов почти полную остановку роста побегов. Высокие температуры не только задерживают рост клубней, но и становятся причиной так называемого «теплового», или экологического, вырождения клубней.

При средней суточной температуре 24°C вырождение клубней достигает 50 % и более (рис. 17.50). Вырожденные, мелкие клубни при их посадке в следующем году дают ослабленные, малоурожайные, с мелкими (часто большими) клубнями растения. Поэтому в регионах с жарким летом проводят ранневесенние посадки скороспелых сортов картофеля, которые обеспечивают сбор урожая до наступления сухой и жаркой погоды. Широко практикуются также летние сроки посадки картофеля с таким расчетом, чтобы период клубнеобразования совпал с прохладной погодой сентября - октября.

Вегетационный период различных по скороспелости сортов картофеля составляет 70...120 суток. В течение этого периода отношение растений к увлажнению почвы меняется: по мере нарастания надземной фитомассы потребность во влаге увеличивается, достигая максимума в фазу цветения и начала клубнеобразования. Наиболее благоприятные условия для формирования хорошей урожайности картофеля создаются при влажности почвы около 80 % наименьшей влагоемкости и достаточной освещенности. По данным О.М. Поповской прирост клубней картофеля, независимо от температуры, практически приостанавливается при запасах продуктивной влаги 20 мм в слое почвы 0–50 см. Наибольший прирост массы клубней происходит при запасах влаги в этом слое 60...70 мм и температуре $16...18^{\circ}\text{C}$. Переувлажнение почвы приводит к быстрому загниванию и гибели клубней. Транспирационный коэффициент картофеля

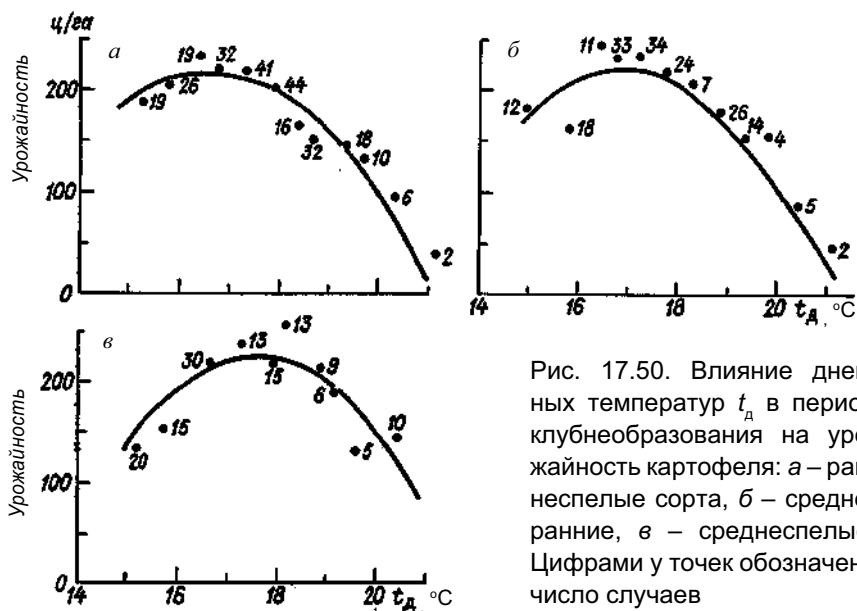


Рис. 17.50. Влияние дневных температур t_d в период клубнеобразования на урожайность картофеля: а – раннеспелые сорта, б – среднеранние, в – среднеспелые. Цифрами у точек обозначено число случаев

равен 167...659, варьируя в зависимости от сорта, сложившихся агрометеорологических условий и применяемой агротехники.

Урожайность картофеля определяется биологическими особенностями сорта, сложившимися погодными условиями и уровнем применяемых агротехнических приемов при его возделывании и изменяется от 0,9 до 50 т/га. Агроклиматолог Е.К. Зоидзе (1978) выделил четыре зоны в пределах Нечерноземья с различной климатической обеспеченностью (%), где возможно получение урожая клубней картофеля до 250...300 ц/га (рис. 17.51).

Зависимость величины урожайности картофеля (Y , ц/га) от суммы осадков ($\sum H$) за период клубнеобразования и суммы активных температур воздуха ($\sum T$) за тот же период представлена уравнением:

$$Y = 65,26 \lg \sum H + 0,28 \sum T - 67,9, \quad (17.44)$$

$$R = 0,854; S_y = 15,5 \, \%.$$

Условия погоды в период уборки клубней картофеля влияют не только на производительность уборочных работ, но и на размеры потерь урожая. Так, в сырую, прохладную погоду посевы на супесчаных почвах несут потери от 5 до 35 %, на среднесуглинистых почвах – от 15 до 50 %, на тяжелосуглинистых почвах – от 40 до 70 %. При увлажнении пахотного слоя почвы (запасы ≥ 15 мм) условия для механизированной уборки считаются плохими. На рис. 17.52 показаны потери урожая при различных сочетаниях температуры воздуха и запасах продуктивной влаги в пахотном горизонте.

17.5. Овощные и бахчевые культуры

В эту группу сельскохозяйственных культур входят травянистые растения, относящиеся к различным семействам. В рационе питания человека используются плоды, листья, стебли, корни, клубни этих культур. На территории России и сопредельных стран в различных почвенно-климатических зонах районированы десятки сортов разнообразных овощных и бахчевых культур. Каждая культура, каждый ее сорт характеризуется набором наследственных признаков, наиболее полно проявляющихся в определенных условиях освещенности, продолжительности светового дня, температурного режима, увлажнения, минерального и органического питания и других условий, корректируемых агротехническими приемами.

Рассмотрим особенности нескольких широко распространенных культур этой группы растений.

Капуста огородная. Этот вид представлен многими видами и сортами, возделываемыми в качестве овощных или кормовых культур: *белокочанная, краснокочанная, цветная, савойская, брюссельская, кольраби, листовая, китайская* и др. Наибольшее распространение в России

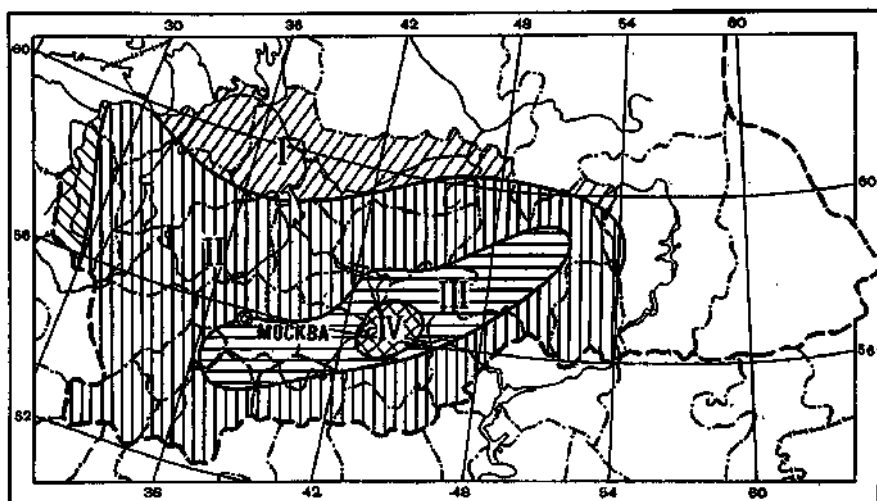


Рис. 17.51. Климатическая обеспеченность (%) урожая клубней картофеля 300 ц/га: I – <30 %, II – 10–30 %, III – 30–50 %, IV – >50 %

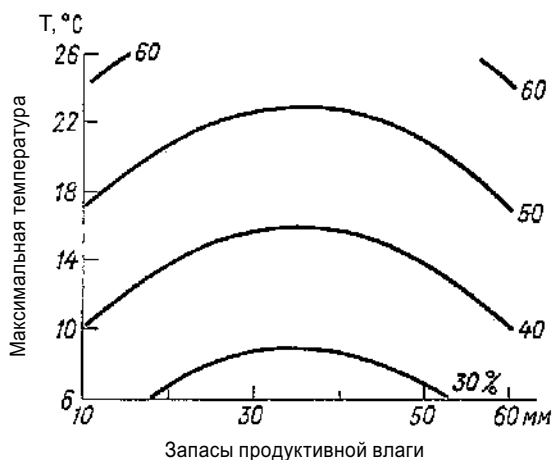


Рис. 17.52. Потери урожая клубней картофеля (%) при уборке в зависимости от запасов продуктивной влаги в пахотном слое почвы в декаду уборки (мм) и максимальной температуры воздуха в день уборки (°C) на подзолистых тяжелосуглинистых почвах

имеют различные сорта белокочанной и цветной капусты. Капуста возделывается со времен глубокой древности (II–III тысячелетие до н. э.) практически во всех земледельческих регионах мира.

В России наиболее благоприятными для ее выращивания считаются центральные и северо-западные регионы с умеренно теплым и влажным климатом. Это светолюбивая, влаголюбивая и холодостойкая культура, выращиваемая, как правило, рассадным способом. Вегетационный период раннеспелых сортов *капусты белокочанной* составляет 100 суток, позднеспелых – 200.

Продолжительность периода прорастания семян целиком определяется температурой воздуха. При температуре воздуха от 2 до 6 °C всходы появляются, соответственно, на 47 – 21 сутки, а при температуре 18...28 °C – на 6...4 сутки соответственно. В период выращивания рассады оптимальной является температура воздуха 12...24 °C.

Качество рассадного материала во многом определяет будущий урожай капусты. При температуре более 30 °C у нее формируются уродливые листья и плохо «завязываются» кочаны. Рассада, высаженная в открытый грунт, выдерживает заморозки до -3...-7 (-10) °C. Оптимальной температурой роста растений считается 15...18 (20) °C.

В полевых опытах исследовалась динамика нарастания биомассы кочана (по сухому веществу) сортов Слава и Амагер (рис. 17.53). Различия в уровне влагообеспеченности вегетационных периодов полевых работ сказались на скорости и величине накопления биомассы этих сортов. Недостаток влаги в почве в любой межфазный период развития сдерживает развитие кочана. В засушливые годы или длительные засушливые периоды заметно снижается величина урожайности этой культуры. Г.Г. Васяниной установлена зависимость величины урожайности капусты от суммы дефицита влажности воздуха в течение июня-июля (рис. 17.54).

Почти все разновидности капусты, кроме цветной и пекинской, – двулетние растения. В первый год жизни развиваются вегетативные органы (розетка листьев, кочан, стеблеплод), во второй – растения цветут (при температуре 20...25 °C) и дают семена.

Капуста – растение «длинного дня» – нуждается в хорошем и продолжительном освещении; отзывчива на условия нормальной аэрации почвы. В южных регионах вредное влияние высоких летних температур на капусту не снижается даже в условиях обильных поливов. Поэтому раннеспелые сорта высаживаются в грунт весной, а позднеспелые – во второй половине лета. Урожайность капусты белокочанной в северных и центральных регионах России, как правило, выше, чем в южных регионах, и варьирует от 20 до 100 т/га.

Капуста цветная – однолетнее растение, возделываемое от северной границы земледелия до крайнего юга Центрально-азиатских

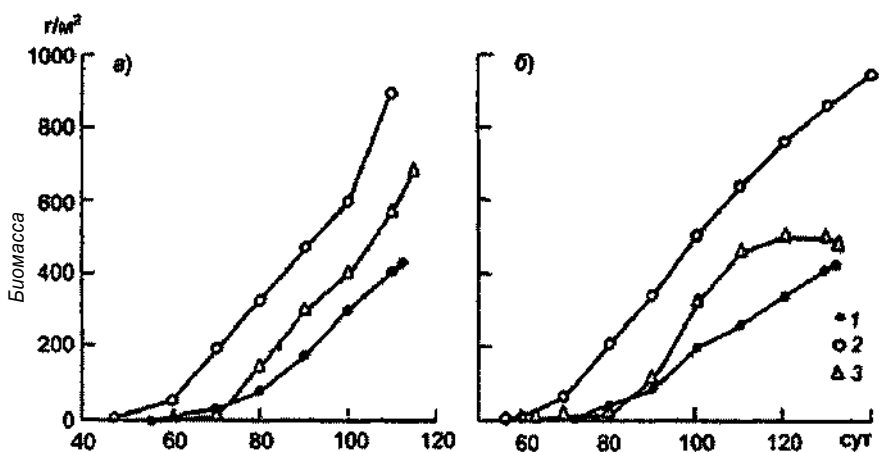


Рис. 17.53. Динамика биомассы кочана капусты (по сухому веществу) сортов Слава-1305 (а) и Амагер (б) (Грингоф М.И., 1991): 1 – 1985 г.; 2 – 1986 г.; 3 – 1987 г.

государств, а также во многих странах мира. Рассада, высаженная в грунт, выдерживает заморозки до $-2...-5^{\circ}\text{C}$. Оптимальной температурой воздуха для роста рассады и формирования головок считается $15...18^{\circ}\text{C}$ днем и $10...12^{\circ}\text{C}$ ночью. Эта капуста очень влаголюбива: влажность почвы

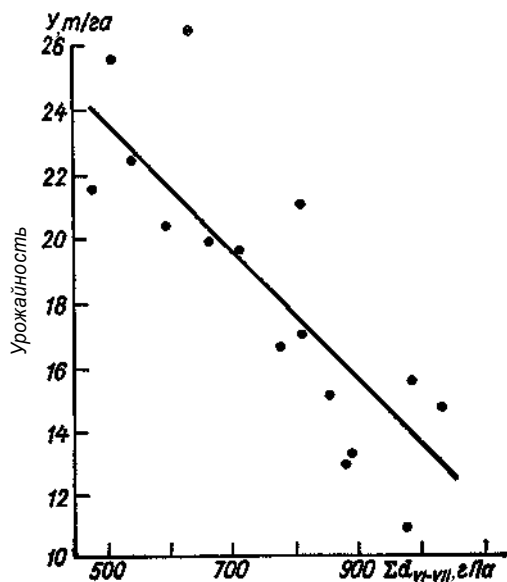


Рис. 17.54. Связь урожайности капусты (т/га) с суммой дефицита влажности воздуха за июнь-июль

70...80 % наименьшей влагоемкости благоприятна для развития головок, которые используются в пищу. Головка состоит из многочисленных нежных, сочных побегов с зачатками соцветий; при недостаточной влагообеспеченности растений головка оказывается мелкой и грубой, т.е. низкого качества.

Цветная капуста – светлюбивое растение; затенение посадок, особенно в первый период развития, снижает урожай и его качество. При оптимальной агротехнике урожайность цветной капусты достигает 18 т/га.

Остальные разновидности капусты, перечисленные выше, близки к описанным разновидностям по их отношению к температурному режиму, увлажнению и освещенности.

Томат обыкновенный был завезен из Южной Америки в Европу в середине XVI века. Первые сведения о томатах в России относятся к 1780 году. На местном языке это растение называлось «томати», но при интродукции в Испанию и Португалию его стали называть «золотым яблоком» (*pomo d'oro* – отсюда произошло название «помидор»). Это однолетняя, теплолюбивая и засухоустойчивая овощная культура. Томаты широко возделываются в открытом и защищенном грунте (теплицы) во многих регионах России и сопредельных государств, а также во многих странах мира. Северной границей выращивания этой культуры в открытом грунте считается изолиния суммы эффективных температур (выше 10°C) 1500°C.

Как рассадная культура, томаты менее подвержены весенним заморозкам, поскольку в открытый грунт их высаживают в сроки, когда вероятность заморозков становится менее 20 %. Начало беззаморозкового периода в большинстве районов Нечерноземной зоны отмечается с 5 по 20 мая и совпадает по времени с устойчивым переходом средней суточной температуры воздуха через 10 °C в сторону повышения. В этот период в Центрально-Черноземных областях России средняя суточная температура воздуха обычно достигает 12...14 °C. От сроков высадки рассады в грунт в значительной степени зависит урожайность томатов и степень их зрелости (табл. 17.8).

Непосредственно в грунт томаты высевают только в южных регионах, в период, когда опасность заморозков минует.

Таблица 17.8

Влияние сроков высадки 60-дневной рассады томатов в грунт на урожайность плодов для территории Среднего Урала и Сибири (Коняев Н.Ф., 1980)

Дата высадки	Урожайность плодов, т/га		Дата высадки	Урожайность плодов, т/га	
	общих	красных		общих	красных
22 мая	62,1	33,2	10 июня	47,0	15,6
1 июня	50,0	19,7	20 июня	19,5	9,8

Урожайность томатов определяется условиями тепло- и влагообеспеченности растений в вегетационный период. Оптимальные условия для активного развития и роста томатов складываются при температуре 15...25 °С. Образование соцветий наступает при температурах выше 15 °С. При средней суточной температуре 10 °С и ниже рост побегов прекращается, а соцветия опадают. При 30 °С рост растений замедляется, при 35 °С – прекращается. В среднем ниже 7...9 °С и выше 37...39 °С находятся зоны повреждения растений томатов. Поздние весение и ранние осенние заморозки губительны для этой культуры.

При влагообеспеченности растений 60...70 % наименьшей влагоемкости и при накоплении 2000 °С суммы эффективных температур (≥ 15 °С) томаты формируют высокую урожайность: в открытом грунте 4...5 т/га (рис. 17.55), в теплицах – 12...15 кг/м². При снижении суммы эффективных температур (выше 10 °С) от 2000 до 1700 °С урожайность томатов снижается на 35 %; при снижении до 1500 °С снижение урожайности достигает 66 %. На рис. 17.56 дана карта зон с различной обеспеченностью наступления бланжевой спелости томатов.

Огурец посевной – однолетняя овощная культура, возделываемая практически во всех земледельческих районах мира. В Индии культура огурца известна с III-го тысячелетия до н. э. Это очень влаголюбивая и теплолюбивая культура. Как и большинство растений южного происхождения, огурцы являются растениями «короткого светового дня». Это означает, что с уменьшением продолжительности дневного освещения в умеренных широтах развитие их ускоряется, цветение и плодоношение наступает раньше. Наибольшие урожаи ранних и среднеспелых сортов получают при 12-часовом освещении, позднеспелых и тепличных сортов – при 9,5-часовом. Одним из важных факторов, влияющих на скорость развития растений «короткого дня», является интенсивность света.

Свет высокой интенсивности вызывает ускорение зацветания, слабая освещенность, напротив, задерживает наступление фазы цветения. В исследованиях физиологов (Шульгин И.А., Подольский В.З., 1963) показано, что прямая зависимость ростовых процессов от интенсивности радиации наблюдается у огурцов только в первые фазы развития. Однако увеличение интенсивности солнечной радиации влияет на генеративные процессы, скорость которых повышается: растения переходят к цветению при сравнительно небольшом накоплении общей фитомассы.

Северной агроклиматической границей выращивания огурцов является изолиния сумм эффективных температур (выше 10 °С) 1600 °С. На этой границе один сбор раннеспелых сортов обеспечен в открытом грунте в 50 % лет. Изолиния сумм эффективных температур 1900 °С ограничивает с севера территорию, где обеспеченность сбора огурцов составляет 90 %. В районах севернее 62 – 65° с. ш. огурцы выращиваются только в

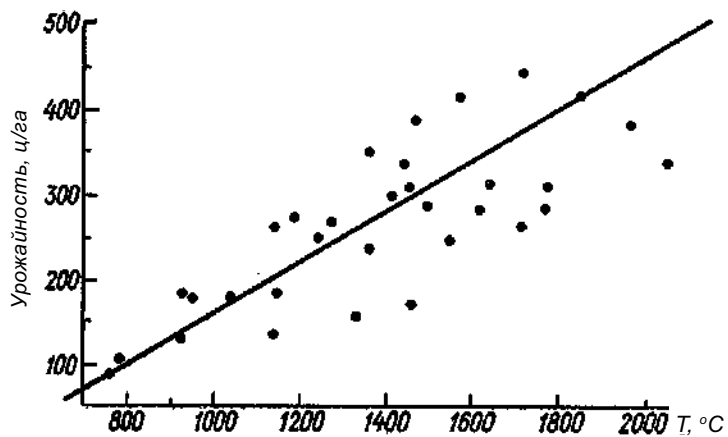


Рис. 17.55. Зависимость урожайности помидоров (ц/га) от суммы температур выше 15 °C (Побетова Т.А., 1978)

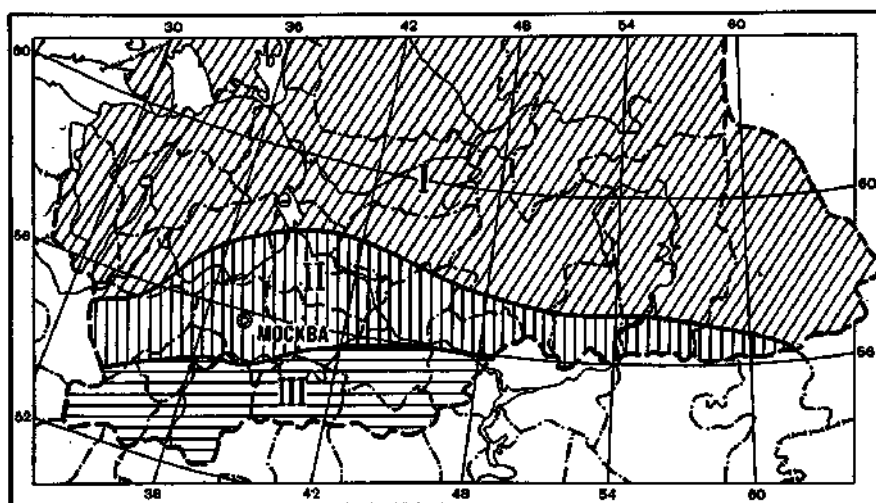


Рис. 17.56. Обеспеченность наступления бланжевой спелости помидоров: I – ≤50 %, II – 51–70 %, III – 71–90 % (Побетова Т.А., 1978)

теплицах. В условиях тепличного выращивания огурцов их урожаи оказываются пропорциональными количеству поступающей световой энергии, режиму температуры и влагообеспеченности, близких к оптимальному, поддерживаемых искусственно.

Использование парников и теплиц различных типов в сочетании с тепловой мелиорацией почвы (укладка слоя свежего навоза в качестве подпочвы) способствует значительному повышению теплообеспеченности растений. Эти приемы позволяют выращивать огурцы значительно севернее. Оптимальная температура для прорастания семян 25...30 °С. В условиях достаточного увлажнения почвы семена начинают прорастать при температуре 12...15 °С.

Продолжительность межфазных периодов развития этой культуры находится в тесной зависимости от температуры воздуха в условиях достаточной влагообеспеченности растений. Например, для сорта огурцов «Успех-221» продолжительность периода «посев-всходы» при средней температуре воздуха за этот период 12 °С составляет 20 суток, а при средней температуре 21 °С – всего 7 суток. Снижение температуры воздуха до 0 °С – губительно для этой культуры. Оптимальными условиями для роста и развития огурцов считается температура воздуха 25 °С, относительная влажность воздуха – 90...95 %, влажность почвы – не ниже 80 % наименьшей влагоемкости. Температура выше 35 °С угнетает растения и способствует снижению урожайности. При средней декадной температуре воздуха 13...15 °С растения повреждаются и погибают на 20 % в результате недостатка тепла, при более низкой температуре – 11...12 °С – погибает до 80 % растений. При понижении температуры почвы до 10 °С на сутки и более корни огурцов быстро загнивают под влиянием микроорганизмов.

Вегетационный период огурцов длится 60...80 суток. Накопленная за это время сумма эффективных температур воздуха (выше 10 °С) составляет 1600...2000 °С.

На рис. 17.57 показана зависимость урожайности (Y , ц/га) огурцов сорта Вязниковский-37 от средней температуры воздуха ($T_{\text{сред}}$) за период начало цветения женских цветов – первый сбор. Эта связь аппроксимируется выражением (Абрамов В.К., 1974):

$$Y = 154T_{\text{сред}} - 3,49T_{\text{сред}}^2 - 1439; \quad \eta = 0,71. \quad (17.45)$$

Как видно на рисунке, при средней температуре воздуха 13...14 °С за этот период урожайность огурцов незначительна. С увеличением температуры урожайность достигает максимума при температурах 20...21 °С. При дальнейшем повышении температуры урожайность постепенно снижается. Этот же автор установил, что увеличение суммы температур с начала плодоношения на каждые 100 °С дает прибавку урожайности этого сорта от 20 до 50 ц/га, а при накоплении суммы эффективных температур 1800 °С урожайность достигает 370 ц/га.

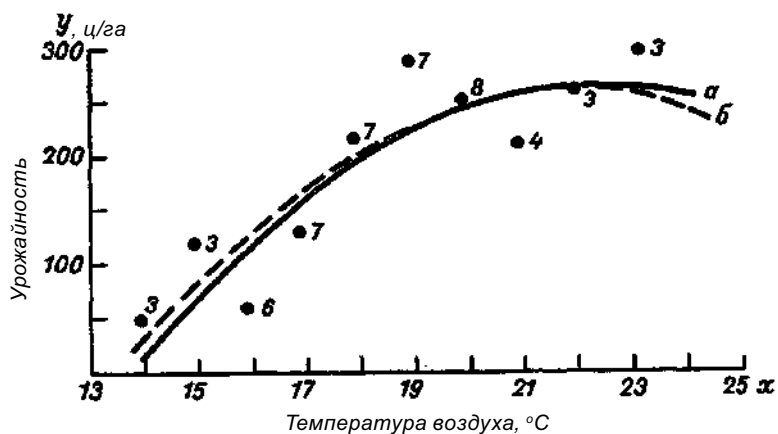


Рис. 17.57. Зависимость урожайности огурцов сорта Вязниковский-37 (y , ц/га) от средней температуры воздуха за период «начало цветения женских цветков – первый сбор» (x). Линии регрессии: a – эмпирическая; b – теоретическая (парабола второго порядка). Цифры на рис. обозначают число случаев

Урожайность огурцов определяется теплообеспеченностью их вегетационного периода при прочих равных условиях. Так, если принять урожайность огурцов за 100 % для территории, обеспеченной средней многолетней суммой эффективных температур (выше 10 °C) 2000 °C, то на территории с суммой 1900 °C урожайность составит 80 %, при сумме 1700 °C – 46 % и при сумме 1500 °C – всего 27 %.

Урожайность различных сортов в однотипных условиях выращивания неодинакова: например, раннеспелый гибрид «Криница» отличается высокой урожайностью в открытом грунте – до 40 т/га при одноразовой машинной уборке плодов; гибриды Эстафета и ТСХА-28 в условиях теплицы дают урожайность до 40...43 кг плодов с 1 м².

Дыни и арбузы относятся к группе бахчевых (от персидского бахче – садик) культур. Они возделываются во многих странах Азии, Африки, Восточной и Южной Европы, в Америке для пищевых, кормовых и технических целей. В России эти культуры выращиваются в южных регионах страны – на Северном Кавказе, в Среднем и Нижнем Поволжье, а также в Республиках Центральной Азии, Южном Казахстане, в Украине, в Молдавии. Северной границей их ареала является 52 – 53° с.ш.

Дыни и арбузы однолетние, теплолюбивые растения. Снижение температуры почвы до 10 °C в течение 24...30 ч вызывает повреждение корней, а температура воздуха 4 °C является порогом, ниже которого

повреждаются цветки, листья и побеги. Гибель этих растений в результате продолжительного охлаждения (до 4 °С и ниже) объясняется необратимыми нарушениями в обмене веществ и в их энергетическом балансе, приводящими к разрушению клеток.

Дыни и арбузы – светлюбивые и засухоустойчивые растения, благодаря их разветвленной и глубокой корневой системе, плотному опушению поверхности листьев и побегов, регулирующих процессы транспирации. При выращивании этих растений в условиях избыточного увлажнения (например частые поливы при орошении) плоды получают менее сахаристыми с худшими вкусовыми качествами.

Семена этих культур прорастают во влажной почве (при запасах продуктивной влаги 20...30 мм в слое 0...20 см) при температуре 16...17 °С на 8...10 сутки. Для появления их всходов необходимо накопление сумм эффективных температур (выше 15 °С) 30...70 °С в зависимости от сортовых особенностей культур. Продолжительность периода от всходов до созревания плодов варьирует у различных по скороспелости сортов от 68 до 119 суток. Оптимальной температурой воздуха для развития плодов считается 25...30 °С. При температурах выше 30 °С в период плодообразования опадают завязи. Фаза цветения у дынь наступает при накоплении сумм эффективных температур (выше 15 °С) от даты всходов 240...400 °С, у арбузов – 290...490 °С, что объясняется сортовыми особенностями этих культур. В период от посева до созревания плодов дынь накапливается сумма эффективных температур, равная 770...1170 °С, плодов арбузов – 870...1240 °С.

Урожайность бахчевых культур составляет в среднем 20...40 т/га. Дыни и арбузы очень отзывчивы на органические и минеральные удобрения. Завышенные дозы минеральных удобрений увеличивают размеры плодов (и, следовательно, общую урожайность с единицы площади посева), но при этом плоды теряют вкусовые качества, становятся не пригодными для еды и могут привести к пищевому отравлению.

17.6. Плодовые и ягодные культуры

Это группа культурных растений, выращиваемых человеком для получения фруктов, ягод и орехов. Их подразделяют на: *семечковые* (яблоня, груша, айва и др.), *косточковые* (вишня, черешня, слива, абрикос, персик, облепиха и др.), *ягодные* (виды смородины, крыжовника, земляника, виноград и др.), *орехоплодовые* (грецкий орех, лесной орех – фундук, фисташка и др.), *цитрусовые* (лимон, апельсин, мандарин, грейпфрут и др.), *субтропические* (гранат, инжир, хурма и др.) и *тропические* (банан, ананас, манго, папайя и др.). Плоды, ягоды и орехи имеют большое значение в питании человека, поскольку содержат витамины, биологически активные вещества, растительный белок и жиры (например орехи), особенно, если используются в свежем или сушеном виде.

Плодовые культуры выращивают в умеренном, субтропическом и тропическом поясах (от 60 °с.ш. до 60 °ю.ш.). Все они многолетние растения, большинство – листопадные, некоторые – вечнозеленые. Независимо от возраста все многолетние плодово-ягодные культуры имеют ежегодно повторяющийся цикл развития, состоящий из двух периодов – вегетации и покоя.

Эти культуры различаются по долговечности, морозостойкости, жаровыносливости, по урожайности, особенностям циклов развития, по их потребности в освещенности, влаге, в температурном режиме. Плодовые и ягодные культуры – светолюбивые растения. При недостатке освещенности снижается интенсивность фотосинтеза, что приводит к опаданию завязей, к снижению ароматических качеств и вкусовых достоинств ягод и плодов. Наиболее требовательными к освещенности являются персик, абрикос, виноград; частичное затенение выдерживают черешня, айва, груша, слива, яблоня и вишня. Самыми теплолюбивыми культурами считаются лимон, апельсин, мандарин, персик и все тропические культуры. К менее теплолюбивым культурам относятся зимние сорта яблони, поздние сорта сливы, вишни, летние сорта груши и яблони.

Набухание почек начинается после перехода температуры воздуха весной через 5 °С, а распускание их – после перехода через 10 °С. Интенсивный рост побегов и соцветий происходит при температуре 23...28 °С. Важным периодом у плодовых культур является цветение, которое наступает при накоплении сумм эффективных температур (выше 5 °С): от 88 °С – абрикос, у груши и сливы – 125 °С, вишни – 150 °С, у яблони – 185 °С (в зависимости от вида и сорта). Косточковые породы более скороспелы, зацветают рано и почти все одновременно.

В сухую и жаркую погоду цветение проходит быстро – примерно за 5...7 суток, а во влажную и прохладную продолжается 12...20 суток. Для цветения вишни и сливы наиболее благоприятна температура воздуха 10...18 °С, яблони и груши – 15...20 °С, персика – 18...20 °С. Понижение температуры воздуха ниже 10 °С неблагоприятно для цветения и оплодотворения, так как из-за слабого выделения нектара насекомые-опылители малоактивны и плохо посещают цветущие деревья. Температуры воздуха выше 30 °С также отрицательно влияют на процесс опыления и оплодотворения цветущих растений. В период цветения наиболее благоприятна относительная влажность воздуха 70...80 %, а при влажности воздуха ниже 25 % затрудняется процесс опыления. Сильные ветры и продолжительные осадки также затрудняют опыление цветков. Заморозки от -0,6 до -3,0 °С повреждают цветки и завязи плодов. Средняя суточная температура воздуха в первые дни после цветения <15 °С значительно снижает продуктивность плодовых культур.

В период образования завязей оптимальные условия складываются при температуре 17...18 °С, в период роста плодов – 15...25 °С. Наиболее

интенсивный рост ягод винограда происходит при температуре 23...28 °С. Температура выше 33...35 °С угнетающе действует на плодовые деревья, нарушая обмен веществ и вызывая повреждения отдельных тканей; температура выше 40 °С способствует засыханию ягод винограда.

Общая потребность различных сортов яблони в тепле за вегетационный период, выраженная суммами эффективных температур выше 10 °С, составляет 1300...2300 °С, винограда – 2200...4000 °С, цитрусовых – более 3500 °С. Например, наибольшая урожайность винограда отмечена в Центрально-азиатских государствах в годы, когда сумма активных температур за период вегетации составляла 4500...5000 °С, а в Грузии – 3900...4300 °С.

Хорошие условия влагообеспеченности плодово-ягодных культур обеспечиваются влагозапасами в почве, составляющими 70...80 % наименьшей влагоемкости. Наибольшая потребность во влаге у плодовых деревьев наблюдается в период цветения и активного роста вплоть до фазы созревания плодов.

Недостаток влаги в этот период отрицательно сказывается на формировании урожайности следующего года и подготовке деревьев к зиме, ведет к ослаблению их роста, снижению облиственности, к образованию мелких плодов. При снижении влагозапасов в корнеобитаемых горизонтах почвы до 30 % наименьшей влагоемкости рост побегов прекращается. При усилении почвенной засухи многие плодовые деревья сбрасывают листья и переходят в состояние летнего покоя (вишня, черешня и др.). В то же время переувлажнение почвы в большей степени, чем ее недостаток, отрицательно сказывается на росте и развитии плодовых деревьев. Нормальные условия влагообеспеченности, например яблони, складываются при равномерном выпадении осадков в течение года не менее 750...800 мм.

В период созревания урожая температура несколько выше 20 °С в сочетании с сухой погодой способствует быстрому накоплению сахаров и снижению кислотности плодов и ягод.

После завершения периода формирования урожая и его сбора благоприятной для подготовки растений к зиме является теплая и умеренно-влажная погода с постепенным снижением ночных и дневных температур воздуха. Такие условия способствуют физиолого-биохимической перестройке в клетках растений, накоплению в тканях пластических веществ и вызреванию древесины. Чем полноценнее произойдет вызревание древесины, тем более низкую температуру сможет выдержать плодовая культура в зимний период.

На Европейской территории России среди плодовых культур яблони занимают примерно 70...80 % площадей, занятых садами. По мере роста и развития потребности яблони к агрометеорологическим условиям меняются. В табл. 17.9 приведены обобщенные данные по температуре, необходимой для наступления различных фаз развития разных сортов этой культуры, выращиваемой в Краснодарском крае России (Адрианова Г.П., Драгавцева И.А. и др., 2004).

Таблица 17.9

**Оптимальная средняя суточная температура,
необходимая для прохождения фаз развития яблони**

Фазы фенологического развития	Оптимальная температура воздуха, $T_{\text{сред.}}^{\circ}\text{C}$
Набухание почек	7,5...9,5
Распускание листьев	10...11
Цветение	12...14
Рост плодов	15...25

Сумма эффективных температур воздуха ($\geq 5^{\circ}\text{C}$), необходимая для зацветания яблони, равна $200 \pm 35^{\circ}\text{C}$. Сдвиг сроков наступления фазы цветения в южных регионах России при продвижении в северном направлении составляет 3 дня на 1° широты.

Средняя продолжительность периода формирования плодов составляет 112 суток, с колебаниями ± 15 суток за счет условий увлажнения и температуры. Для осенних сортов яблони для созревания плодов необходим набор сумм эффективных температур, начиная от фазы цветения, 1270°C . Установлено, что для созревания плодов яблони летних сортов необходимо не менее 50 суток с температурой воздуха выше 15°C , для осенних сортов – не более 60, а для зимних – более 80 суток. Продолжительный избыток тепла угнетает плодовые растения. В условиях умеренного климата температуры воздуха $30...35^{\circ}$ и выше угнетают физиологические процессы, протекающие в тканях и клетках деревьев.

При недостатке тепла увеличивается период вегетации деревьев и ухудшается качество плодов (снижается сахаристость, ослабляется интенсивность окраски плодов, не вызревают семена). На рис. 17.58 показана зависимость динамики накопления сахаров от условий теплообеспеченности вегетационного периода. Влияние суммы активных температур воздуха ($\sum T_{\text{актив.}}$) за период от даты окончания цветения до даты съемной спелости плодов с содержанием в плодах сахаров (N , %) сортов Антоновка, Пипина шафранного и Оранжевого выражено уравнением (Лосев А.П., 1979):

$$\sum T_{\text{актив.}} = 0,0111 - N_{\%} - 11,62. \quad (17.46)$$

Оптимальные условия влагообеспеченности плодовых деревьев наблюдаются при влажности почвы $70...80\%$ наименьшей полевой влагоемкости в течение всего вегетационного периода. При таких условиях повышается зимостойкость плодовых деревьев, снижается повреждаемость коры солнечными ожогами. Все это положительно сказывается на величине и качестве будущего урожая. В зоне недостаточного увлажнения средней полосы России составной частью водного баланса неполивных садов являются осадки вегетационного периода $30...50\%$ от их средней годовой

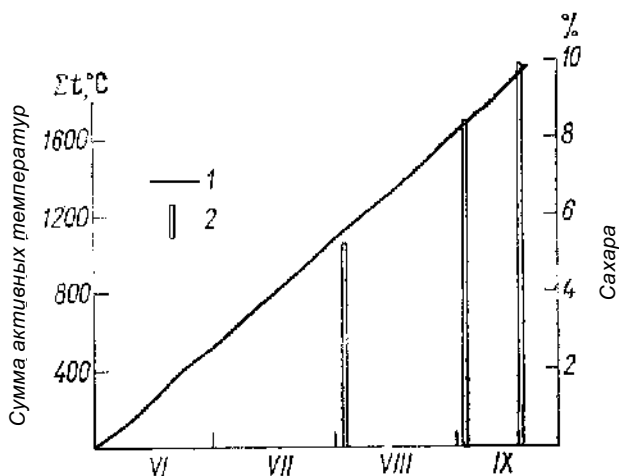


Рис. 17.58. Динамика накопления сахаров (%) в зависимости от суммы активных температур (°C) за период от даты окончания цветения до дат проведения химического анализа. Оранжевое на сильнорослом подвое: 1 – сумма температур; 2 – содержание сахара в плодах

суммы. В период максимального развития площади листового полога и в годы с высоким урожаем водопотребление достигает наибольшей величины. Суммарное водопотребление плодоносящих яблоневых садов со свободным формированием кроны составляет 4000...5000 м³/га. Из этого количества более 50 % расходуется на испарение с поверхности почвы. Потребность плодовых деревьев в воде зависит от сорта, фазы развития и возраста деревьев. Повышенная потребность во влаге плодоносящих деревьев отмечена в период цветения, интенсивного роста побегов и созревания плодов. В засушливые годы полив в период закладки цветочных почек способствует образованию обильной завязи и прочному удержанию их на побегах. На рис. 17.59 показана зависимость роста объема плодов (V , см³) яблони сорта Оранжевое от величины водопотребления (W , мм) в пределах запасов продуктивной влаги в слое почвы 0...120 см от 220 до 370 мм и суммы эффективных температур воздуха выше 10 °C ($\sum T_{>10^\circ}$). Эта зависимость выражена уравнением (Лосев, А.П., 1979):

$$V = 0,031W + 0,174T_{>10^\circ} - 64,9, \quad (17.47)$$

$R = 0,85$; ошибка уравнения – 12,4 см³.

Величина урожайности яблони, равно как и других косточковых и семязковых культур, зависит также от условий зимнего периода. По данным Т.А. Побетовой (1977), урожайность яблони в значительной степени определяется условиями предшествующего зимнего периода.

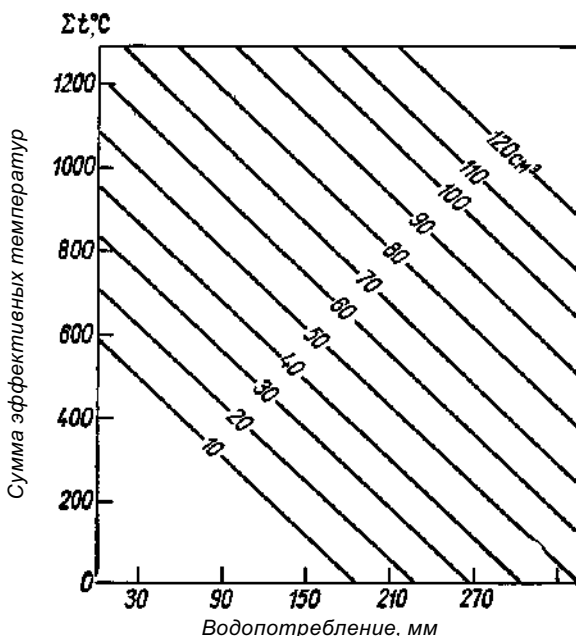
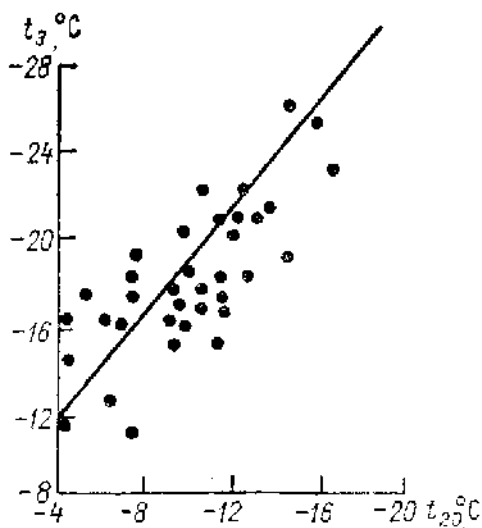


Рис. 17.59. Зависимость объема плодов яблок z (см^3) от водопотребления (мм) и суммы эффективных температур более 10°C . Оранжевое на сильнорослом подвое. $z = 0,25x + 0,08y - 36,8$

При сопоставлении значений средней областной урожайности с числом суток с температурой ниже -20°C автором было установлено, что в годы с аномально теплыми и аномально холодными зимами урожайность яблонь была пониженной. Наибольшая урожайность семячковых культур отмечается в годы, когда число дней с температурой -20°C и ниже варьирует в пределах от 10 до 30. Зимние повреждения надземной части дерева лишают возможности формирования плодов на 1...3 года. Повреждения низкими температурами корневой системы плодового дерева (особенно в условиях бесснежной или малоснежной зимы) отмечаются при температуре -10°C на глубине 20 см (рис. 17.60). В таких и более холодных условиях возможна полная гибель плодовых садов.

Большое значение при длительном хранении плодов имеет определение сроков съемной зрелости: плоды, рано снятые с дерева, подвергаются физиологическим нарушениям дыхания и обмена веществ, имеют пониженные вкусовые качества. У поздно снятых плодов сокращается период возможного их хранения. Плоды, выращенные в годы с умеренным количеством тепла и осадков, отличаются хорошими вкусовыми качествами

Рис. 17.60. Связь минимальной температуры почвы на глубинах 3 и 20 см



и длительной лежкостью. Значительное количество осадков (выше нормы) и высокая температура в период вегетации вызывают усиленный рост плодов, быстрое их созревание и снижение лежкости. В холодное и дождливое лето плоды отличаются слабой окраской и худшими вкусовыми качествами, а в период хранения отмечено их интенсивное поражение грибковыми болезнями. Плоды, снятые при меньшем накоплении активных температур (ранние сроки съема), сохраняются дольше, а при запаздывании сроков съема продолжительность лежкости плодов сокращается. Плоды, снятые в ранние сроки, обладают худшими вкусовыми качествами, поэтому их съем в период до накопления суммы активных температур менее 2000...2100 °C нецелесообразен. Установлена зависимость сроков хранения плодов яблони (сутки) от суммы активных температур (в десятках градусов) и величины ГТК за период вегетации (Лосев А.П., 1979):

$$N = 132 \sum T_{>5^{\circ}} - 0,856 ГТК + 191; \quad R = 0,81 \pm 0,16. \quad (17.48)$$

При хранении в плодохранилищах необходимо соблюдать условия, обеспечивающие нормальное состояние плодов. Оптимальными условиями считается температура воздуха в помещении от 0 до 2 °C и относительная влажность воздуха 86...96 %. Плоды, снятые с деревьев в состоянии полной спелости, лучше лежат при хранении. Плоды из загущенных крон сохраняются хуже, чем с хорошо освещенных деревьев: освещенность плодов в течение второй половины вегетационного периода способствует равномерному их созреванию и завершению физиологических процессов подготовки к длительному хранению. Ревизию состояния плодов с осени рекомендовано проводить один раз в месяц, зимой – через каждые

15 суток. При этом определяется количество убыли плодов (шт), средняя масса убыли плодов, ухудшение вкусовых качеств, появление «мучнистости мякоти» и т.п. Установлено, что наиболее интенсивное размягчение плодов при хранении характерно для сорта Антоновка, менее интенсивное – у Пепина шафранного.

Абрикос – широко распространенная плодовая культура, возделываемая человеком во многих странах и континентах с IV...III вв. до н.э. Это теплолюбивое и светолубивое, засухо- и жароустойчивое дерево. Хорошо растет на аэрируемых различных типах почвы, не переносит застойной почвенной влаги. Для абрикоса характерен короткий период зимнего покоя; в условиях умеренного климата он переносит зимний период без укрытий.

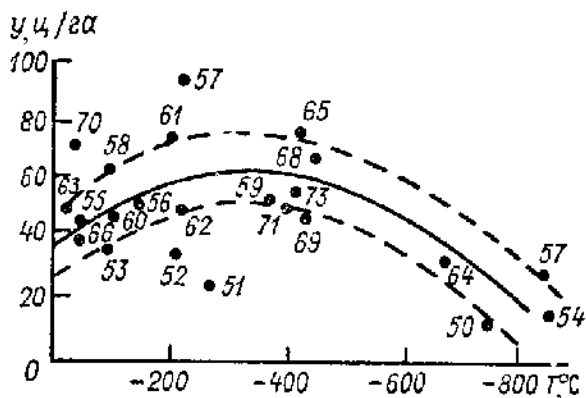
Весеннее развитие зимующих почек на взрослых деревьях абрикоса начинается у различных сортов при средней суточной температуре воздуха 3...7 °С. Для наступления фазы цветения необходим набор суммы эффективных температур 65...124 °С (≥ 5 °С). Этот весенний период, отличающийся возвратом холодов, для абрикоса опасен губительными заморозками. Цветы погибают при понижении температуры воздуха до 0...-1 °С, молодая завязь плодов выдерживает радиационные заморозки до -2 °С. Ветер усиливает отрицательное влияние холода на молодые плоды.

Для созревания плодов абрикоса ранних сортов необходим набор суммы активных температур (≥ 10 °С) 1160...1250 °С, для позднеспелых сортов – 1730...2150 °С (Драгавцева И.А., 1999). Формирование плодов проходит в температурном диапазоне от 16,5 до 29 °С. Ежегодное плодоношение абрикоса чрезвычайно не стабильно и зависит при прочих равных условиях от температурного и влажностного режимов, от морозоопасности весеннего периода. В урожайные (без заморозков в период цветения) годы обильного плодоношения тяжести плодов не выдерживают хрупкие ветви деревьев. При этом плоды оказываются слабоароматными и несладкими. В годы умеренного плодоношения урожайность плодов хорошего качества достигает 22...30 ц/га. В годы с губительными весенними заморозками абрикосовые сады практически не дают урожая. Для защиты цветущих садов абрикоса и других плодовых культур проводится комплекс защитных мероприятий, заметно снижающих процент гибели цветущих деревьев. Подробно об этом рассказано в Части IV настоящего пособия.

Многочисленные исследования плодовых культур физиологами растений показали, что в период зимнего покоя необходим определенный промежуток холодного времени (обычно 2,5...3 месяца) для прохождения морфофизиологических процессов и дифференциации клеток в зимующих генеративных почках. У различных сортов абрикоса потребность в зимних температурах составляет около 300...500 °С. В центральных районах европейской части России выявлена существенная зависимость урожайности абрикоса от суммы отрицательных температур воздуха за зимний период

(рис. 17.61). Сопоставляя значения средней областной урожайности с числом дней с температурой $\leq 20^\circ\text{C}$, Т.А. Побетова (1980) установила, что в годы с аномально теплыми и аномально холодными зимами наблюдается пониженная урожайность.

Рис. 17.61. Зависимость урожайности (у) абрикоса от суммы отрицательных температур. Октебрянский район (числа у точек – последние цифры – года)



17.7. Многолетние и однолетние сеяные травы

Возделывание сеяных многолетних и однолетних кормовых трав для сельскохозяйственных животных и на семена составляет основу сбалансированной кормовой базы в различных почвенно-климатических зонах России и сопредельных стран. Кормовые травы выращиваются для приготовления сена, сенажа, силоса, травяной муки, а также получения зеленой массы, используемой во время выпаса скота.

Сеяные травы относятся к числу важнейших источников получения высокопитательных кормов. Они содержат необходимые для животных аминокислоты, минеральные вещества, клетчатку и витамины. Производство кормов из сеяных трав относится к числу наиболее дешевых и рентабельных при соблюдении несложных агротехнических норм.

Травосеяние способствует улучшению структуры почвы, ее водопроницаемости, водоудерживающей способности, аэрации, снижает засоренность посевов сорными и плохо поедаемыми растениями, содействует повышению урожайности возделываемых после трав культур. Травяной клин является естественным компонентом в большинстве схем полевых и почвозащитных севооборотов.

Многолетние травы. Нехватка белка в кормовых рационах сельскохозяйственных животных в значительной степени может быть восполнена такими высокобелковыми бобовыми травами, как виды *клевера*, *люцерны*,

эспарцета, люпина и др., а также злаками: *тимopheевкой*, *ежой сборной*, *житняком*, видами *костра*, *овсяницей* и др. Рассмотрим особенности некоторых кормовых трав на нескольких примерах.

Клевер. В посевах наибольшее распространение получили клевер луговой (или красный), клевер розовый (или шведский), клевер ползучий (или белый) и др. Посев клевера красного в смеси со злаковыми травами (тимopheевкой, овсяницей луговой и др.) дает наиболее высокие урожаи зеленой массы, по сравнению с посевами чистого клевера.

Семена клевера прорастают в условиях достаточного увлажнения почвы (70...80 % наименьшей влагоемкости) при температурах от 1 до 20 °С, причем, чем выше температура воздуха, тем короче период от посева до всходов (табл. 17.10). Сумма эффективных температур (выше 5 °С) для этого периода составляет 65...75 °С.

Возобновление вегетации перезимовавших посевов клевера, как и у большинства сеяных трав, происходит при устойчивом переходе средней суточной температуры воздуха через 5 °С. Средние многолетние даты возобновления вегетации сеяных многолетних трав весной показаны на карте (рис.17.62). Однако в различные по метеорологическим условиям годы даты возобновления вегетации могут отличаться от средних многолетних дат на ± 20 суток.

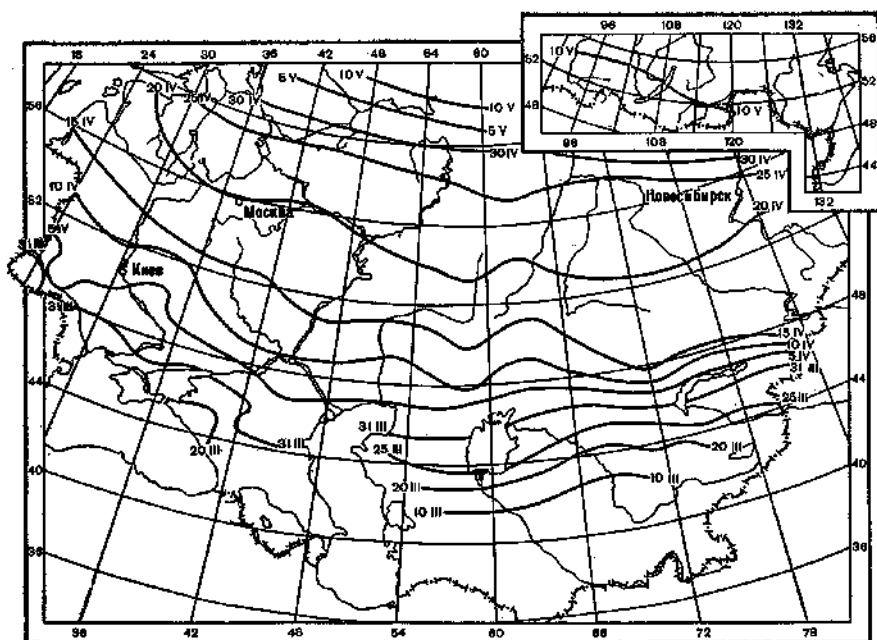


Рис. 17.62. Даты возобновления вегетации сеяных многолетних трав весной

Таблица 17.10

Продолжительность периода посев-всходы у клевера и люцерны
в зависимости от средней температуры воздуха за этот период

Клевер		Люцерна	
Температура, °С	Число суток	Температура, °С	Число суток
1...3	10...18	6...8	17...19
4...6	10...17	10...12	15...16
10...12	8...16	14...16	12...13
18...20	6...10	18...20	9...10

Через 35...40 суток после возобновления вегетации у клевера одноукосного наступает фаза стеблевания, двуукосный клевер вступает в эту фазу на 8...12 суток раньше. За первую декаду после начала роста прирост клевера в высоту составляет 2...4 см. С переходом средней суточной температуры воздуха через 10 °С, декадный прирост увеличивается до 4...10 см. Максимальный прирост за декаду 12...18 см, а в условиях достаточного увлажнения даже 24 см наблюдается при средней декадной температуре воздуха 15...16 °С. Зависимость среднего декадного прироста клевера ($H_{\text{сред.дек}}$, см) от средней декадной температуры воздуха ($T_{\text{сред.дек}}$, °С) при условии достаточного водопотребления растениями представлена на (рис. 17.63) и описана уравнением (Гулинова Н.В., 1982):

$$H_{\text{сред.дек}} = 0,014 T_{\text{сред.дек}}^{2,75}; \quad R = 0,98 \pm 0,007. \quad (17.49)$$

Для роста клевера очень важны условия влагообеспеченности во вторую половину вегетационного периода, поскольку в Нечерноземной зоне к началу этого периода в большинстве лет всегда достаточно влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы. Средние многолетние сроки цветения клевера многоукосного представлены на рис. 17.64.

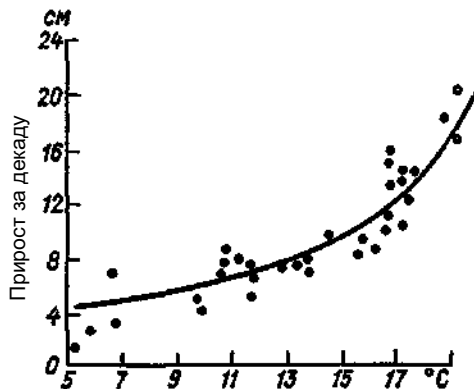


Рис. 17.63. Зависимость прироста клевера (см) за декаду от средней декадной температуры (°С)

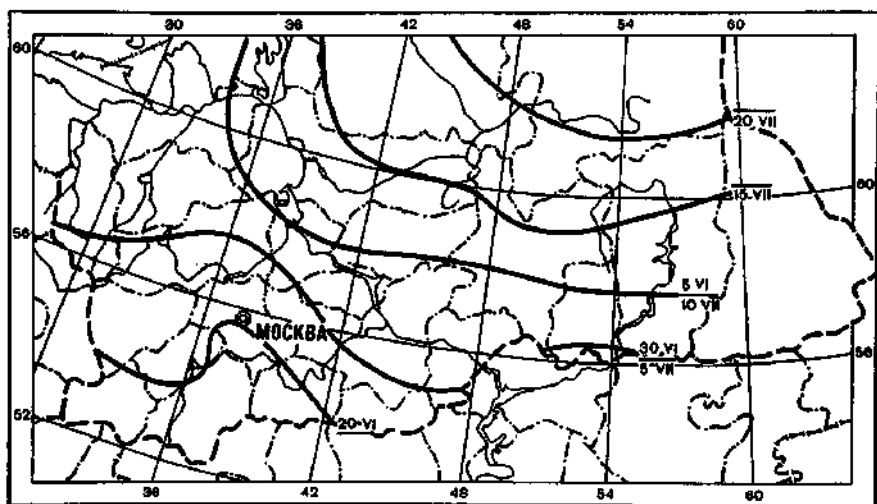


Рис. 17.64. Средние многолетние даты цветения двуукосного (числитель) и одноукосного (знаменатель) клевера

Обычно после начала цветения клевера через 5...10 суток проводят первый укос. Максимальный прирост фитомассы клевера наблюдается через 2...3 (реже через 4...5) декады после первого укоса. Оптимальные условия для формирования растительной массы клевера создаются при среднем дефиците влажности воздуха менее 6 мб, за три декады до наступления фазы цветения, при этом высота растений (H , см) перед цветением достигает ≥ 60 см (рис. 17.65). Эта зависимость выражается уравнением (Гулинова Н.В., 1982):

$$H = 490 / d^{1.23}; \quad \eta = 0,85. \quad (17.50)$$

На второй год жизни клевера двуукосного период от возобновления вегетации до массового цветения охватывает 50...80 суток (при накоплении сумм эффективных температур 650...1000 °С), у клевера одноукосного этот период на 15 суток продолжительнее (сумма эффективных температур 1000...1200 °С). Обильные летние осадки задерживают цветение клеверов и способствуют увеличению продолжительности периода линейного роста растений. В условиях засушливой и жаркой погоды формируются низкорослые клевера с меньшей урожайностью зеленой массы. После первого укоса максимальный линейный прирост наблюдается в первые 2...3 декады. Продолжительность периода «цветение – созревание семян» составляет 28...66 суток в зависимости от температуры воздуха и количества осадков. Поэтому сумма положительных температур варьирует за этот период от 560 до 910 °С.

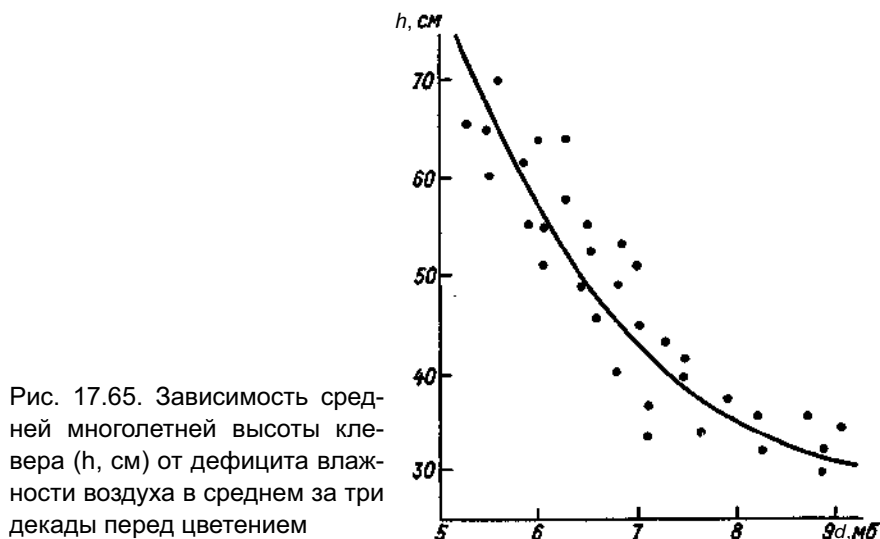


Рис. 17.65. Зависимость средней многолетней высоты клевера (h , см) от дефицита влажности воздуха в среднем за три декады перед цветением

Высокая урожайность клеверов формируется в районах, где за лето выпадает 250...300 мм осадков (зона с годовой суммой осадков 400...500 мм и более). Но посевы клевера плохо переносят затопление: через 7...10 суток стояния водного слоя посевы погибают из-за отсутствия аэрации в зоне корневой системы. В ареале возделывания этой культуры условия естественной влагообеспеченности посевов улучшаются в направлении с юго-востока на северо-запад; в этом же направлении растет урожайность клеверов. В оптимальных агроклиматических условиях и при выполнении комплекса современных агротехнических мероприятий урожайность сена из клеверов достигает 4...5 т/га, при неблагоприятных условиях – до 0,5 т/га и менее. Влияние неблагоприятных условий зимнего периода для зимующих культур рассмотрено в Части IV.

Люцерна. Различные виды, сорта и гибриды этой культуры возделываются во многих земледельческих регионах мира, практически во всех почвенно-климатических зонах России и сопредельных стран. Это связано с хозяйственной ценностью люцерны, высокими питательными свойствами, разнообразием использования ее в виде зеленой массы, сена, брикетов, травяной муки, сенажа, силоса и как пастбищное растение. В государствах Центральной Азии люцерна широко используется в качестве компонента кормовых и хлопково-люцерновых полевых севооборотов. Двух- трехлетние посевы люцерны на полях, где выращивался хлопчатник, содействуют «очищению» почвы от грибкового заболевания – *вилта*, наносящего серьезный урон урожайности хлопчатника.

Люцерна влаголюбивая и теплолюбивая культура. В то же время она обладает высокой зимостойкостью и засухоустойчивостью, которые при современной агротехнике обеспечивают долговечность ее посевов без снижения урожайности в течение многих лет. Люцерна развивает глубокую и мощную корневую систему, что повышает ее устойчивость к засухам.

Прорастание семян начинается при температуре 2...3 °С, а всходы при 6...9 °С. На большей части территории возделывания всходы люцерны выдерживают ночные заморозки до -3...-4 °С, в Восточной Сибири – до -5...-7 °С. Зависимость продолжительности периода посев-всходы от температуры воздуха представлена в табл. 17.10.

Сумма эффективных температур за этот период составляет 310...340 °С. В различные по агрометеорологическим условиям годы, даты всходов люцерны могут отличаться на ±20 суток. От всходов до цветения первого года жизни необходимо накопление около 1200 °С при средней температуре выше 14 °С. В условиях прохладной погоды со средней температурой ниже 12 °С люцерна не цветет.

Весеннее возобновление вегетации люцерны после перезимовки начинается после устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С. В зависимости от складывающихся агрометеорологических условий сроки возобновления вегетации могут отличаться от средних многолетних на ± 10...20 суток. От даты весеннего отрастания до фазы цветения необходимо накопление суммы положительных температур 700...900 °С, до фазы созревания семян – 1200...1600 °С.

Сроки проведения укосов люцерны обычно связывают с наступлением фазы массовой бутонизации и начала цветения.

На европейской части России люцерна выращивается в основном в неорошаемых условиях. Наилучшие условия для развития, роста и формирования высокой урожайности зеленой массы складываются при влажности почвы 70...80 % наименьшей влагоемкости, а для посевов этой культуры, оставленных после цветения на семена, наиболее благоприятна влажность 60...65 %. Прохладная и дождливая погода способствует израстанию люцерны, полеганию ее побегов, ухудшает условия цветения и опыления. Избыточная влажность, затопление посевов более чем на 10...15 суток приводит к их изреживанию и гибели от вымокания.

Укосная масса люцерны определяется высотой стеблей и густотой побегов на единице площади. Зависимость сухой массы отдельного растения люцерны (g) различных сортов и укосов находится в тесной корреляционной связи со средней высотой растений (H , см) на единице площади ($r = 0,972 \pm 0,06$ и $r = 0,934 \pm 0,015$) (рис. 17.66). Согласно Н.В. Гулиновой (1982) высота стеблей люцерны определяется в первую очередь запасами продуктивной влаги в слое 0 – 20 см (W , см), накопившимися к началу весны (устойчивый переход средней суточной температуры воздуха

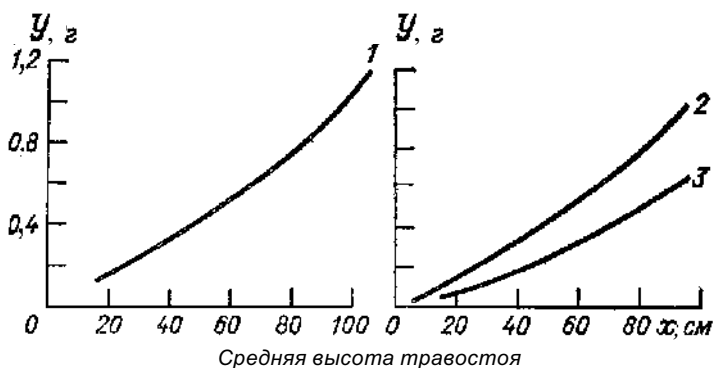


Рис. 17.66. Зависимость массы одного стебля люцерны (y) от средней высоты травостоя (x). Сорт: 1 – Ташкентская-1; 2 – Токмакская местная; 3 – Алмаатинская

через 5°C) перед первым и вторым укосами, например для Краснодарского края и Ростовской области:

$$H = 0,136W + 27,65. \quad (17.51)$$

В неполивных условиях получают 2...3 укоса люцерны в год с общей урожайностью зеленой массы 40...50 т/га, сена – 8...10 т/га. В южных регионах после каждого укоса производится полив в объеме около 600 м^3 воды на 1 га. На орошаемых землях получают по 4...7 укосов с общей урожайностью 80...100 т/га зеленой массы или 20...25 т/га – сена. На рис. 17.67 показана зависимость числа укосов от условий теплообеспеченности, выраженной суммой эффективных температур ($\geq 5^{\circ}\text{C}$), в поливных условиях Среднеазиатских республик (Бабушкин Л.Н., Польстер К.И., 1972).

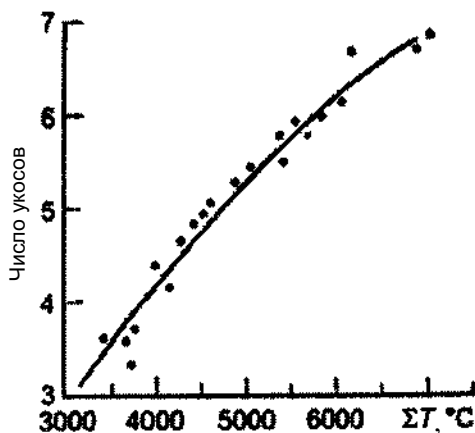


Рис. 17.67. Зависимость числа укосов люцерны от условий теплообеспеченности ($\Sigma T, ^{\circ}\text{C}$)

Злаковые травы. Наибольшее хозяйственное значение имеют многолетние злаковые травы, высеваемые обычно в виде травосмесей с бобовыми травами. Особенно хорошо такие смеси трав развиваются в условиях влажного климата. Некоторые биологические и хозяйственные особенности отдельных представителей этой группы кормовых растений представлены в табл. 17.11.

Таблица 17.11

**Важнейшие биологические и хозяйственные особенности многолетних трав
(Гулинова Н.В., 1982)**

Показатель	Тимофеевка	Овсяница луговая	Ежа сборная	Костер безостый	Житняк
Зимостойкость	Высокая	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая
Засухоустойчивость	Слабая	Средняя	Слабая	Высокая	Высокая
Устойчивость к затоплению (сутки)	30	10...12	7...10	30	15...20
Отрастание весной	Позднее и медленное	Раннее и быстрое	Раннее и быстрое	Раннее и быстрое	Раннее
Отрастание после 1-го укоса	Слабое	Лучше, чем у тимopheевки	Лучше, чем у тимopheевки	Лучше, чем у тимopheевки	Слабое
Высота растений, см	70...100	80...120	60...90	80...120	30...90
Наибольшая урожайность за годы пользования	В первые 3 года	В первые 3 года	В первые 2 года	На 2...4-й год	В первые 2 года
Число укосов (или сжатывания)	2 (4...5)	2 (4...5)	2 и более (5...6)	1...2 (3)	1
Число лет в травостое	8...10	7...12	Более 10	10...15	Более 10

Массовое возобновление вегетации злаковых трав весной происходит в сроки, близкие к дате устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С. Хорошее кущение злаков наблюдается при температуре воздуха 8...9 °С, у житняка – при температуре 10...15 °С и влажности почвы 60...80 % наименьшей влагоемкости (14...15 побегов); в условиях пониженной влажности (40 % наименьшей влагоемкости) образуется лишь 3...5 побегов. Наибольший рост стеблей происходит при температуре 16...18 °С, максимальный прирост за сутки достигает 5 см.

Колошение злаков начинается при средней суточной температуре 15 °С. Чем продолжительнее период от даты возобновления вегетации до начала колошения, тем больше оказывается высота стеблей злаков. Цветение у злаков непродолжительно, всего 6...12 суток. На юге страны сеяные многолетние злаки зацветают в апреле, на севере Архангельской области и в Забайкалье – в первой декаде июля. Цветение трав наступает при накоплении следующих сумм эффективных температур (выше 5 °С) от даты возобновления вегетации: тимopheевки – 470 °С, овсяницы луговой – 450 °С, мятлика лугового и ежи сборной – 400 °С, лисохвоста лугового – 350 °С.

Сроки уборки трав на сено обычно определяются началом фазы цветения. Заранее их можно рассчитать по датам, к которым накапливается сумма эффективных температур 470 °С.

Для роста трав, формирования их биомассы важнейшими агрометеорологическими условиями являются оптимальные значения температуры воздуха, влажности почвы и воздуха, а также глубина залегания грунтовых вод. Например, если при глубине 100...120 см пырей корневищный обеспечивается влагой и высота его достигает 115...120 см, то при глубине грунтовых вод 180 см высота этого злака не превышает 80...85 см.

Однолетние травы. Посевы этих трав дают дополнительный зеленый корм летом и осенью в период между укосами на посевах многолетних трав. Из однолетних трав получают высококачественное сено, силос и травяную муку. Некоторые биологические характеристики однолетних сеяных трав приведены в табл. 17.12.

Таблица 17.12

Некоторые биологические характеристики сеяных однолетних трав
(Гулинова Н.В., 1982)

Культура	Длина стеблей, см	Отношение к влаге	Отношение к теплу	Температура прорастания семян, °С	Заморозки, которые выдерживают всходы, °С
Бобы кормовые	50...200	Влаголюбивы	Холодостойки	3...4	-4...-5
Вика яровая	Полегающие	Влаголюбива	Холодостойка	2...3	-6...-8
Вика мохнатая (озимая)	100...130	Засухоустойчива	Малотребовательна	1...2	Заморозкоустойчива
Горох посевной	Полегающие	Влаголюбив	Холодостоек	1...2	-5...-6
Люпин желтый	50...80	Влаголюбив	Теплолюбив	4...5	-2...-3
Лоббио	200...300 (выющаяся)	Малотребовательна	Теплолюбива	14...15	—
Нут	30...60	Засухоустойчив	Теплолюбив	3...4	-6...-8
Соя	25...150	Влаголюбива	Теплолюбива	10	-2
Чина	25...100	Засухоустойчива	Малотребовательна	2...3	-6...-8
Овес	50...100	Влаголюбив	Нетребователен	1...2	-4
Просо африканское	200	Засухоустойчиво	Теплолюбиво	14...15	0...-1
Ячмень	130	Засухоустойчив	Нетребователен	1	-5...-6
Суданская трава	90...300	Засухоустойчива	Теплолюбива	8...10	0...-1
Райграс однолетний	60...100	Влаголюбив	Малотребователен	2...4	—

Высокая урожайность сена тимopheевки (2...3 т/га) формируется в условиях, когда за два первых месяца вегетации выпадает 80...120 мм осадков, а суммы положительных температур не превышают 600...650 °С; при этом сумма осадков за весь период вегетации должна составлять 350...400 мм. При сумме положительных температур 750...800 °С и более за этот же период урожайность тимopheевки не превышает 0,5...1,0 т/га. На каждые «лишние» 50 °С урожайность сена тимopheевки снижается в среднем на 0,7 т/га. Наибольшая урожайность зеленой массы тимopheевки (более 20 т/га) отмечается при средней температуре воздуха 10...11 °С и ГТК=1,5...1,7; у овсяницы луговой наибольшая урожайность (более 18 т/га) формируется при средней температуре воздуха за период «отрастание – колошение» 9,5...10,5 °С и ГТК 1,4...1,7.

Даты проведения первого укоса тимopheевки и овсяницы луговой обычно соответствуют времени накопления суммы положительных температур выше 600 °С при подсчете их от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 5 °С. По данным Н.В. Гулиновой (1982), урожайность сена однолетних сеяных трав в определенной мере определяется величиной среднего дефицита влажности воздуха в июне (рис. 17.68). В поле графика указаны годы наблюдений сети станций за состоянием и урожайностью сеяных трав; в расчеты включены максимальные величины урожайности, отмеченные в каждом конкретном году. Посевы клевера в смеси с тимopheевкой и овсяницей луговой дают более равномерную по годам урожайность, превышающую на 1,0...2,0 т/га урожайность посевов чистых клеверов.

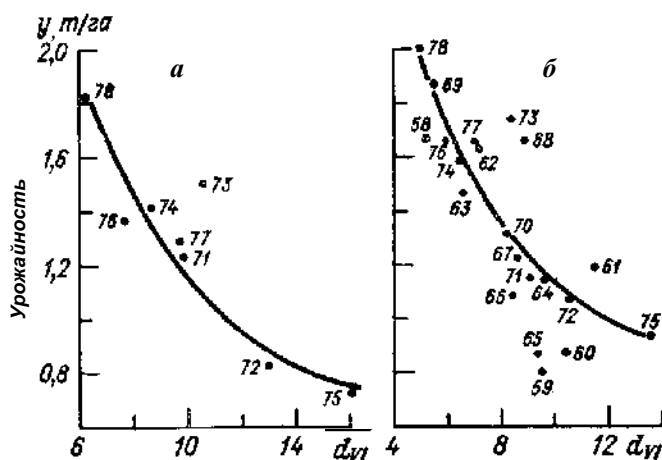


Рис. 17.68. Зависимость урожайности сена однолетних трав от дефицита влажности воздуха d_{vl} в июне: а – Поволжский район; б – Пензенская область

17.8. Естественные пастбища и сенокосы

Естественная пастбищная и сенокосная растительность в Российской Федерации и сопредельных странах широко представлена от зоны тундры на севере до зоны полупустынь на юге, а в горных районах – от пустынно-степного пояса (низкие предгорья) до альпийских лугов в высокогорье. В различных почвенно-климатических (природных) зонах и высотных поясах этой огромной территории естественные кормовые угодья распределены неравномерно. Краткая агроклиматическая характеристика природных зон представлена в табл. 17.13

Таблица 17.13

Агроклиматическая характеристика основных почвенно-климатических зон
(Чирков Ю.И., Огородников Б.И., 1974; Шашко Д.И., 1985)

Природная зона	Число суток со средней суточной $T \geq 0^\circ\text{C}$	ФАР за период с $T \geq 5^\circ\text{C}$, МДж/м ²	Сумма активных температур воздуха, $^\circ\text{C}$	Средняя суточная температура воздуха за июль, $^\circ\text{C}$	Сумма осадков за год, мм	Испаряемость за год, мм
Тундра и лесотундра	120...165	754...905	0...800	0...15	200...500	240...360
Лесная	138...248	1030...1550	900...2550	14,0...21,0	250...650	300...550
Лесостепная	164...248	1257...1676	1300...2850	16,8...21,0	300...600	350...705
Степная	192...275	1592...2011	2200...3500	19,7...24,0	250...550	550...765
Полупустынная	203...229	1760...1886	2600...3400	21,5...25,0	175...250	650...850
Пустынная	238...326		3200...5400	22,5...31,0	75...200	800...1350

Уровень продуктивности пастбищной и сенокосной растительности зависит от количества тепла и влаги, их соотношения или степени соразмерности.

Пастбища в зоне *тундры и лесотундры* занимают около 340 млн га, практически всю ее территорию. В этой зоне период со среднесуточной температурой воздуха выше 5°C продолжается на западе – около 120...130 суток, на востоке – 90...100 суток. Увлажненность этой территории имеет общую тенденцию понижения влажности от западных районов к восточным: годовая сумма осадков на западе составляет 400...500 мм, на востоке – 150...300 мм. Осадки выпадают в основном в теплый период года. Благодаря незначительной испаряемости территория тундры и лесотундры относится к зоне избыточного увлажнения. Но из-за низкой температуры почвы в течение короткого вегетационного периода ограничено использование влаги растительным покровом. С этим в основном связана относительно невысокая урожайность пастбищной растительности (сухая масса) – 0,05...2,0 т/га.

В *лесной* зоне сенокосы и пастбища занимают всего 4 % площади зоны, в основном это пойменные луга. Годовое количество осадков

(см. табл. 17.13) в этой зоне примерно соответствует испаряемости, что создает оптимальные условия для формирования урожайности сенокосно-пастбищной растительности. Средняя урожайность трав обычных лугов составляет 0,7...1,0 т/га, временно избыточно увлажненных суходолов – 1,2...1,5 т/га и низинных лугов – 1,5...2,0 т/га сена. Пастбищное использование этих угодий – с весны до глубокой осени (130...140 суток). Согласно А.П. Федосееву (1964), формирование величины урожайности сухих (не заливаемых паводковыми водами) сенокосов (Y , ц/га) определяется количеством осадков за апрель – июнь (R_{IV-VI}) и средней температурой воздуха за май ($T_{\text{май}}$, °C):

$$Y = \sum R_{IV-VI} + 6,63T_{\text{сред.май}} - 35,0; \quad R = 0,80. \quad (17.52)$$

На сенокосах с переменным режимом увлажнения зависимость от количества осадков выражена слабее при благоприятном температурном режиме мая:

$$Y = 0,12R + 10,01T_{\text{сред.май}} - 34,0. \quad (17.53)$$

Формирование урожая сена на заливаемых сенокосах определяется дефицитом влажности воздуха за апрель – июль.

В *лесостепной* зоне сенокосы и пастбища занимают около 15 % ее площади, средняя урожайность сенокосов варьирует в зависимости от рельефа от 0,6...0,8 т/га до 2,0...2,5 т/га, пастбищ – 15...20 т/га зеленой массы. Максимум урожайности злаково-разнотравных травостоев приходится обычно на конец июля, что совпадает с наиболее высокими температурами воздуха. Испаряемость превышает годовую сумму осадков. Основное влияние на формирование урожайности трав оказывают осадки апреля – июня и средний дефицит влажности воздуха за май ($d_{\text{сред.май}}$, мм). Чем больше дефицит влажности воздуха, тем ниже урожайность трав:

$$Y = 0,008 R_{IV-VI} - 1,00d_{\text{сред.май}} + 13,1. \quad (17.54)$$

Пастбищный период длится 150...200 суток.

В Нечерноземной зоне России основным источником кормов являются естественные сенокосы и пастбища, распределенные по территории неравномерно в зависимости от почвенно-климатических условий, особенностей рельефа и др. Формирование урожайности естественных сенокосов и пастбищ целиком определяется агрометеорологическими условиями каждого конкретного года. Наибольшие урожаи сена естественных угодий в этой зоне отмечаются в годы с хорошим увлажнением осадками вегетационного периода (более 250 мм), обеспеченного теплом (2000 °C выше 5 °C).

Н.В. Гулиновой (1988) получена высокая зависимость величины урожайности естественных сенокосов с коэффициентом увлажнения за май

(K_V), который представляет собой отношение полусуммы осадков за ноябрь–март ($0,5 \sum R_{XI-III}$) плюс сумма осадков за апрель–май ($\sum R_{IV-V}$) к полусумме дефицита влажности воздуха ($0,5 \sum d_{IV-V}$). Для каждой области Нечерноземья получена количественная зависимость средней областной урожайности сена от коэффициента увлажнения (рис. 17.69).

Как видно на этом рисунке, в Нечерноземной зоне (правая прямая) коэффициент увлажнения изменяется от 1,8 до 3,0; им соответствуют средние областные урожайности сена от 7 до 12 ц/га. Соотношение этих величин обратное: наиболее низким урожаям (7 ц/га) соответствуют высокие коэффициенты увлажнения (2,8...3,0). Эта связь выражена уравнением:

$$Y = -3,9K_V - 18,5; r = 0,72 \pm 0,09. \quad (17.55)$$

На этом рисунке для сравнения приведена графическая связь (точки в левой части поля графика), построенная по данным областей Черноземной зоны. Это прямая зависимость, в которой наиболее низким значениям K_V соответствует низкая урожайность сена. Средние многолетние коэффициенты увлажнения территории Нечерноземной зоны приведены на рис 17.70.

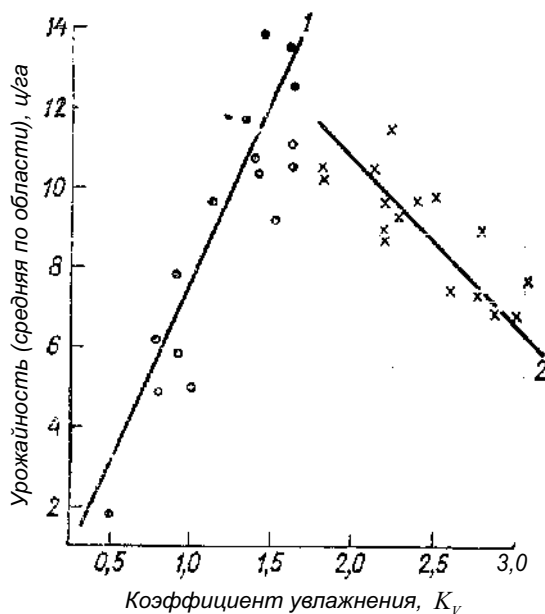


Рис. 17.69. Зависимость средней многолетней областной урожайности сена (ц/га) естественных сенокосов от коэффициентов увлажнения на конец мая для черноземных (1) и нечерноземных (2) областей

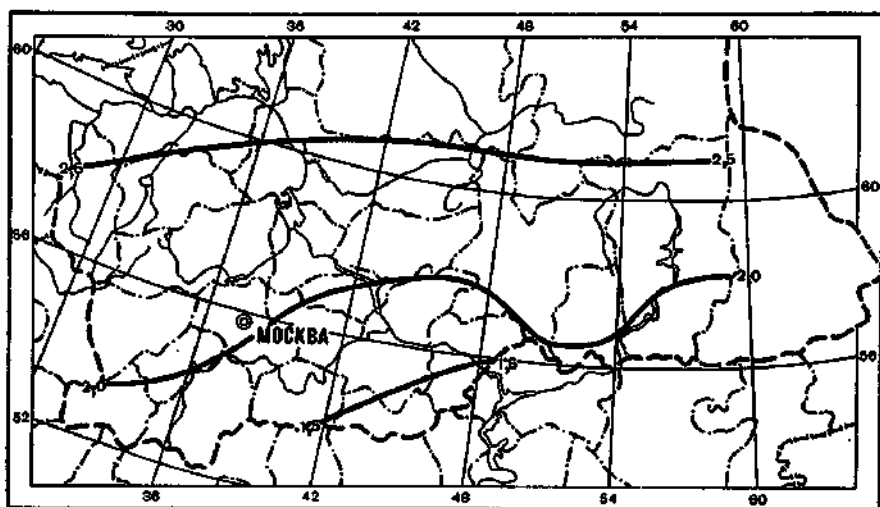


Рис. 17.70. Средние многолетние коэффициенты увлажнения

В Волго-Вятском регионе формирование урожайности фитомассы на лугах (Y , ц/га) зависит от запасов продуктивной влаги (мм) в слое почвы 0...100 см (W_{0-100}), образовавшихся к концу мая:

$$Y = 0,06W + 2,2; \quad r = 0,85 \pm 0,03. \quad (17.56)$$

Запасы влаги в различные годы меняются в зависимости от складывающихся погодных условий. В среднем эта изменчивость составляет от 100 до 200 мм, соответственно этим величинам урожайность луговых трав варьирует от 8 до 16 ц/га.

В *степной зоне* до 40 % территории занимают сенокосы и пастбища. Зона характеризуется значительным сокращением годового количества осадков, повышением температуры и общей засушливостью климата. Максимум накопления растительной массы наблюдается в конце июня, в июле. В условиях повышения засушливости климата все большая роль в формировании урожайности трав принадлежит накоплению атмосферных осадков осенне-зимнего периода. Валовой урожай растительной массы в этой зоне определяется количеством осадков, выпавших за период с октября предшествующего года по июнь текущего. Сенокосы дают до 10 т/га сена, а пастбища – 0,2...2,5 т/га зеленой массы. Пастбищный период составляет 180...200 суток.

В *полупустынной зоне* на долю пастбищ и сенокосов приходится почти 70 % всей площади зоны. Засушливость и континентальность климата являются главными чертами зоны, в которой увеличивается несоответствие между количеством тепла и влаги. Возрастает доля позднелесных и

зимних осадков, соответственно, снижается их количество в теплое время года. Основным фактором формирования урожая трав является количество осадков зимне-весенне-летнего периода. Максимум урожайности приходится на июнь. Урожайность – около 0,4 т/га сена. Пастбищный период длится 220...270 суток.

В *пустынной* зоне пастбища занимают практически всю ее территорию – более 170 млн га (не считая орошаемых площадей). В этой зоне диспропорция между количеством тепла и осадков достигает наибольших значений. При общем незначительном количестве осадков большую роль играет их неравномерное распределение по сезонам года: максимум приходится на весну (февраль–апрель), лето сухое и знойное. Урожайность сухой растительной массы (1,0...4,0 ц/га) в основном определяется величиной запасов почвенной влаги, сформировавшейся в корнеобитаемых горизонтах почвы за позднесенний и зимне-весенний периоды. На величину урожайности влияют также температурные условия холодного полугодия, поскольку они определяют расход влаги на испарение. В теплые осенне-зимние месяцы значительная часть выпавших осадков непродуктивно (для растений) расходуется на испарение с поверхности почвы. В условиях холодных месяцев величина испарения влаги незначительна. Уровень урожайности пастбищной растительности определяется запасами продуктивной влаги, сложившимися к началу весны за счет осадков осенне-зимне-весенних месяцев (с октября по март) и суммой температур ($\geq 5^\circ\text{C}$) за период, обеспеченный запасами почвенной влаги (Федосеев А.П., 1964):

$$Y = 0,032W_{0-50} + 0,0004T_{III-V} + 1,287; \quad R = 0,880 \pm 0,046. \quad (17.57)$$

Искомая связь уровня урожайности может быть выражена только величиной запасов продуктивной влаги:

$$Y = 0,046W_{III-V} + 0,237. \quad (17.58)$$

В горах природные условия чрезвычайно разнообразны и определяются многими факторами: расположением хребтов по отношению к основным влагонесущим потокам, высотой над уровнем моря, экспозицией склонов, местными особенностями горно-долинной циркуляции атмосферы, микроклиматическими условиями и т.п. Особенностью природы гор является их вертикальная зональность или поясность. В горах различают следующие пояса (снизу вверх): предгорная пустыня (низкие предгорья), степной пояс, лугово-степной, лесной (субальпийский), альпийский (высокогорный) и гляциальный (ледниковый). В самом высоком поясе, как правило, растительный покров практически не развивается из-за преобладания отрицательных температур воздуха и подстилающих скальных пород, отсутствия почвенного покрова, высокой солнечной радиации.

Годовая сумма осадков варьирует от 250...400 мм в предгорьях до 1000...1300 мм (и более) – в субальпийском (или среднегорном) поясе. В альпийском, высокогорном поясе количество осадков снижается до

300...800 мм. Различие между количеством осадков, выпадающих на наветренных и подветренных склонах, может в среднем достигать 50...80 %. Например, в горной системе Тянь-Шань годовое количество осадков может варьировать от 200...300 до 1500...2000 мм.

Сумма температур воздуха выше 10 °С изменяется в горах от 3000...4000 °С в низких предгорьях до 500...1000 °С – в высокогорье. Оптимальные условия для формирования урожайности горной сенокосно-пастбищной растительности складываются в лесном (субальпийском) поясе, где соразмерность тепла и влаги около 1.

Урожайность растительной массы в горных районах зависит в основном от условий увлажнения за счет весенне-летних осадков и температурного режима в этот период. Зависимость величины урожайности субальпийских лугов установлена на материалах Института ботаники Республики Таджикистан, собранных в Гиссарском хребте (Грингоф И.Г., Никитина Л.М., 1972):

$$Y = 0,0794 \sum R_{VI-VII} - 0,0132 T_{V-VII} - 0,741 W_{0-50} + 26,39; \quad (17.59)$$

$$R = 0,84 \pm 0,06; \quad S_y = 1,9 \text{ ц/га.}$$

где R_{VI-VII} – сумма осадков за июнь-июль (мм); T_{V-VII} – сумма средних суточных температур воздуха ($> 5^\circ\text{C}$); W_{0-50} – запасы влаги в почве (мм) в слое 0–50 см.

Урожайность варьирует в зависимости от видового состава травостоя и агрометеорологических условий года и составляет 1,0...1,6 т/га сухой массы.

В альпийском поясе за счет увеличения абсолютной высоты над уровнем моря тепло- и влагообеспеченность растений снижаются, резко увеличивается солнечная радиация в летний период (по сравнению с более низкими поясами), сокращается продолжительность вегетационного периода. Весь этот комплекс условий определяет формирование низкорослого растительного покрова с небольшой урожайностью (0,3...0,6 т/га). Ниже субальпийского пояса теплообеспеченность растений возрастает, но уменьшается количество осадков, что также определяет формирование более низкой урожайности растительной массы (0,5...0,8 т/га), чем в субальпийском поясе.

17.9. Влияние агрометеорологических условий на качество урожая сельскохозяйственных культур

В предыдущих разделах было показано, что урожайность возделываемой культуры есть сложный конечный продукт, получаемый от растения в результате определенного сочетания и взаимодействия биологических свойств самого растения, экологических, агрометеорологических факторов и направленной хозяйственной деятельности человека.

Условия погоды каждого текущего вегетационного периода (а иногда и предшествующего года) оказывают влияние не только на величину урожайности сельскохозяйственных культур, но и на качество сельскохозяйственной продукции. Биохимический состав получаемого продукта характеризует качество урожая.

Под *качеством урожая* обычно понимают совокупность определенных биохимических свойств сельскохозяйственной продукции, удовлетворяющих конкретные запросы и потребности ее потребителей. По мнению великого русского ученого-химика Д.И. Менделеева: «Точное суждение о качестве хлебных зерен может дать лишь подробный анализ зерна, показывающий... содержание питательных начал..., ибо они определяют истинные качества зерна с желаемой точностью».

Качество определяется комплексом количественных и качественных показателей с помощью аналитических и органолептических (т. е. с помощью органов чувств) методов. Например, аналитически определяется количественное содержание в единице продукции белка, сахара, крахмала, жира, клейковины и т. п. Органолептическими методами определяются цвет, запах (аромат), форма и другие качества продукции.

Высокая урожайность в сочетании с повышенным качеством продукции являются надежным резервом улучшения питания людей. Известно, что повышение содержания белка в зерне пшеницы на 1 % в масштабах страны обеспечивает получение дополнительного белка в объеме десятков тысяч тонн. Белки служат основным материалом при построении тканей организма человека и животных. Они являются высококалорийным продуктом питания, превосходя крахмал, сахар и другие питательные вещества.

Установлено, что накопление питательных веществ в сельскохозяйственных культурах находится в тесной зависимости от почвенно-климатических условий, агрометеорологических условий конкретного года, от сортовых особенностей и уровня применяемой агротехники. Исследованиями Н.И. Шарапова (1973) установлено, что влияние климата на содержание белка в зерне пшеницы больше, чем влияние агротехники в пять раз, чем влияние внесенных удобрений – в три раза. Так, при высокой температуре воздуха днем, ее большой суточной амплитуде, значительной сухости воздуха и почвы в растениях создаются условия для образования белковых веществ высокого качества. И, наоборот, в умеренно мягком и теплом климате при хорошей обеспеченности растений влагой создаются благоприятные условия для образования в растениях сахаров, жира, масла, крахмала.

Поэтому в районах с континентальным засушливым климатом, где почвы богаты азотом, суточная амплитуда температуры воздуха достаточно велика, в растениях накапливается большое количество белка – 15 % и более. В северных и западных районах России в зерне озимой пшеницы содержится в среднем около 10 % белка. Зависимость содержания

белка в зерне яровой пшеницы (%) от суточной амплитуды температуры воздуха (A_t , %) за вегетационный период на европейской части России, в Казахстане и Сибири, по данным З.А. Мищенко (1962), показана на рис. 17.71.

С увеличением средней суточной амплитуды температуры воздуха повышается содержание белка в зерне яровой и озимой пшеницы.

Опытами акад. Д.Н. Прянишникова, проведенными еще в конце XIX века, установлена обратная связь накопления белка в зерне пшеницы с влажностью почвы в течение периода вегетации:

Влажность почвы, % НВ.....	40	50	60	70
Содержание белка в зерне, %	17,2	15,5	14,3	10,3

Исследования В.Н. Страшного (1978) также показали, что с уменьшением весенних запасов влаги в метровом слое почвы содержание белка в зерне озимой пшеницы возрастает (рис. 17.72).

С ростом влажности почвы в зерне озимой ржи, кукурузы, ячменя и овса содержание белка снижается. Например, в северо-западных районах, где лето прохладное и влажное, зерно ячменя отличается низким содержанием белка (7,3...8,3 %) и успешно используется для приготовления пива; в юго-восточных районах в зерне накапливается от 10...12 % до 18,1 % (Саратовская область) белка и оно используется в продуктах питания человека и кормах животных. Такая же географическая изменчивость содержания белка отмечена и для кукурузы. В то же время при плохой влагообеспеченности растений из-за почвенной или воздушной засухи качество зерна может ухудшиться вследствие ограниченного, а иногда и полного прекращения поступления пластических веществ в зерно и снижения интенсивности

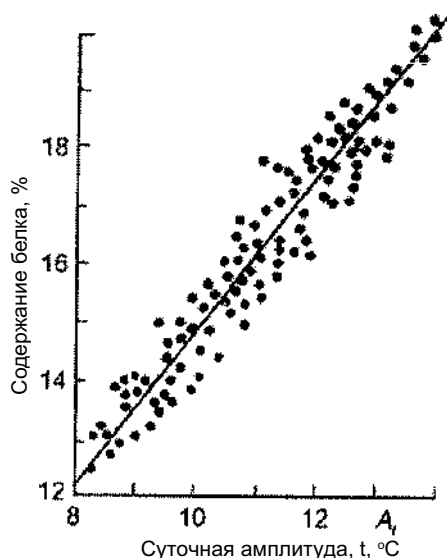


Рис. 17.71. Зависимость содержания белка в зерне яровой пшеницы (%) от суточной амплитуды температуры воздуха A_t , за вегетационный период на европейской части территории России, в Западной и Восточной Сибири и Казахстане (Мищенко З.А., 1962)

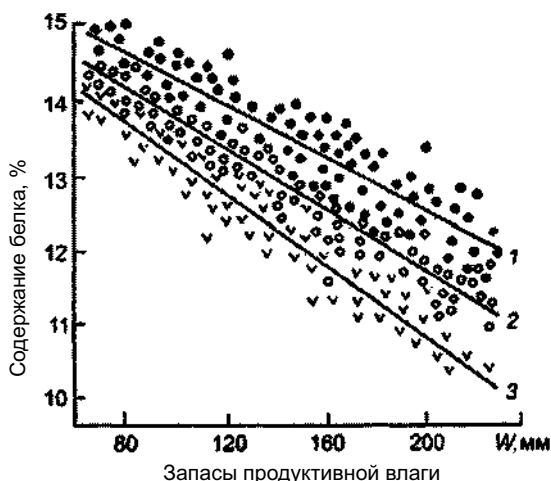


Рис. 17.72. Зависимость содержания белка в зерне озимой пшеницы (%) от запасов продуктивной влаги W в метровом слое почвы на дату устойчивого перехода температуры воздуха весной через 10°C (В.Н. Страшной, 1978). Предшественники: 1 – чистый пар; 2 – занятой пар; 3 – непаровое поле

синтеза белка хлоропластами. Напомним, что хлоропластами называются зеленые тельца в растительной клетке, осуществляющие фотосинтез.

С повышением температуры воздуха в условиях хорошей влагообеспеченности возрастает содержание жира в семенах масличных культур. Исследования Ю.С. Мельника показали, что масличность семян подсолнечника увеличивается с ростом температуры воздуха и улучшением условий влагообеспеченности посевов после фазы образования соцветий у растений.

Сахар накапливается в различных органах растений: в корнеплодах (сахарная свекла), клубнеплодах (батат – сладкий картофель), стеблях (сахарный тростник), плодах – практически во всех плодовых культурах и т.п. Мировое производство сахара базируется на возделывании двух основных культур – сахарного тростника и сахарной свеклы. В мировом производстве из сахарного тростника – тропического растения, содержащего в стеблях до 20 % сахара, получают почти в два раза больше сахара, чем из сахарной свеклы.

Сахарная свекла, выращивается в условиях умеренного климата на территории бывшего СССР. Содержание сахара в корнеплодах сахарной свеклы, изменяющееся от 12 до 24 %, зависит в основном от количества фотосинтетической радиации, попадающей в растение, от условий влагообеспеченности посевов и применяемой агротехники.

О.М. Конторщиковой было установлено, что с увеличением числа солнечных дней и уменьшением запасов влаги в почве сахаристость свеклы возрастает. Неблагоприятные условия для накопления сахаров создаются при высоких запасах продуктивной влаги в метровом слое почвы (более 170 мм) и сумме прямой солнечной радиации менее 419 кДж/м² в период интенсивного сахаронакопления.

Сахаристость является основным показателем качества винограда. Сахаронакопление в ягодах винограда формируется под влиянием большого количества различных факторов: агрометеорологических, почвенных, орографических (от греч. *oros* – гора), однако при идентичности этих условий различные сорта винограда накапливают не одинаковое количество сахаров. Сахаристость ягод даже в пределах одного сорта, выращиваемого в одном и том же районе, подвержена большим колебаниям по годам ($\pm 5\%$). В 1000 см³ сока зрелых ягод винограда содержание сахара в зависимости от сорта, места произрастания и агротехники может изменяться от 120...150 до 250...300 г.

В условиях жаркого и сухого климата республик Средней Азии виноград выращивается на поливе. Содержание сахаров в ягодах обычно колеблется от 22 до 24 %. В винограде, выращенном на юге России, в зоне умеренного климата содержание сахара в среднем 15 %, а в Крыму – 17...20 % (Шарапов Н.И., 1962).

Специальные исследования, выполненные агрономами и агрометеорологами дали основание утверждать, что:

- наибольшее влияние на сахаристость ягод винограда оказывает прямая солнечная радиация при удовлетворительном увлажнении почвы;
- значительное влияние оказывает влажность почвы (в условиях республик Средней Азии проводятся поливы виноградников не более одного-двух за вегетационный период);
- сахаристость ягод зависит не только от суточных амплитуд, но и от уровня температуры воздуха. Особенно интенсивно процесс сахаронакопления проходит при дневных температурах воздуха 26...27 °C и при ночных не выше 17...19 °C.

Влияние агрометеорологических условий периода созревания на интенсивность сахаронакопления в ягодах винограда (всех периодов созревания) описывается уравнением (Турманидзе Т.И., 1981):

$$\Delta C = 0,02T_{\text{сред.}} - 0,0004 \sum R + 0,11; \quad R = 0,93, \quad (17.60)$$

где ΔC – среднесуточный прирост сахара (г/100 см³ сока); $T_{\text{сред.}}$ – средняя суточная температура воздуха (°C) за период созревания ягод; $\sum R$ – количество осадков (мм) за этот период. По материалам этого же автора показана тесная зависимость уровня сахаристости ягод винограда (C , %) от суммы средних суточных температур воздуха за период созревания

($\sum T_{\text{сред.}}$) и от средней за период созревания амплитуды температуры воздуха ($A_{\text{сред.}}$):

$$C = 0,01 \sum T_{\text{сред.}} + 0,45 A_{\text{сред.}} + 0,79; \quad R = 0,85, \quad (17.61)$$

Ошибка точности расчета сахаристости ягод не превышает 1,0...1,5 %, что в условиях исключительного разнообразия природных условий Грузии, различий выращиваемых сортов и применяемой агротехники является более чем удовлетворительной.

Помимо сахара, виноградный сок содержит несколько кислот: винную, яблочную, лимонную, а также муравьиную, янтарную, щавелевую и др. Кислотность ягод – показатель довольно изменчивый в зависимости от сорта, агрометеорологических условий и агротехники. Максимальные значения уменьшения кислотности (0,5 г/л) совпадают с максимальной температурой воздуха ($\geq 36^\circ\text{C}$). Влияние осадков на кислотность сока выражается в двух проявлениях: осадки способствуют понижению температуры воздуха и, тем самым повышают кислотность; проникая через почву в растения, осадки снижают концентрацию ягодного сока, тем самым понижают кислотность. На рис. 17.73 (Турманидзе, 1981) представлена зависимость общей кислотности ягод винограда от сумм средних суточных температур воздуха.

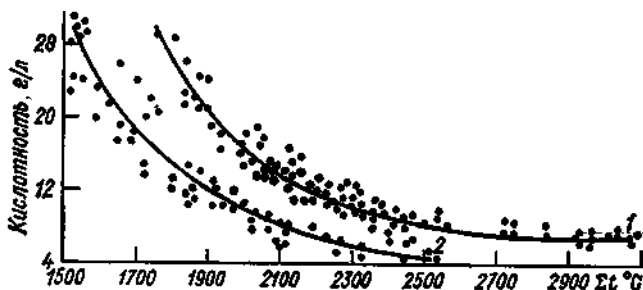


Рис. 17.73. Зависимость общей кислотности винограда (г/л) от сумм средних суточных температур воздуха ($\sum t$, $^\circ\text{C}$):

1 – позднеспелые сорта, 2 – сорта среднего периода созревания

Известно, что различные сорта винограда употребляются в свежем виде, а также используются для производства различных вин. Помимо сахаристости и кислотности ягод винограда, принят еще один показатель для оценки качества виноградного сока – *глюкоацидиметрический показатель* (ГАП), представляющий собой отношение величины сахаристости ягод к их кислотности. Величина ГАП изменчива по годам в зависимости от агрометеорологических условий и находится в прямой зависимости от факторов, обуславливающих накопление сахаров, и в обратной

зависимости – от факторов, определяющих повышение кислотности. На рис. 17.74 видно, что величина ГАП повышается вместе с ростом отношения прямой солнечной радиации к рассеянной радиации.

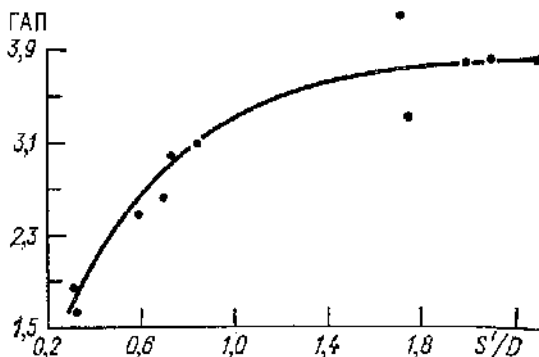


Рис. 17.74. Связь между глюкоацидиметрическим показателем (ГАП) и отношением прямой солнечной радиации к рассеянной (S'/D)

Разные значения этого показателя соответствуют различным видам винодельческой продукции. На примере вин Грузии самые низкие значения ГАП (1,5...2,0) соответствуют виноградному соку, предназначенному для приготовления шампанских вин. При значениях ГАП от 2,0 до 2,5 виноградное сырье используется для приготовления легких высококислотных сухих столовых вин типа рислинг. При ГАП, равном 2,5...3,0 из виноградного сусла получают качественные, достаточно крепкие сухие вина. При ГАП, равном 3,0...3,5 из виноградного сусла приготавливают природно-полусладкие марочные вина типа хванчкара, kindзмараули, тетра, твиши и др. При ГАП $>3,5$ виноградное сусло используется для приготовления крепких десертных столовых вин типа херес. Для приготовления шампанских вин используется виноград с сахаристостью 17...19 % и кислотностью ягод 8...10 г/л, показатель ГАП $< 2,0$. Для приготовления десертных вин (сорта мускат белый) сахаристость ягод должна быть 25...26 %, кислотность – 4...5 г/л, показатель ГАП ≥ 4 и т.п.

Столовые вина, по данным Ф.Ф. Давитая (1952), приготавливают из винограда, выращенного в районах, где сумма активных температур составляет 2800...3600 °С, а количество осадков за месяц, предшествующий сбору винограда, не превышает 170 мм. Десертные, крепкие и сладкие вина получают из винограда в тех районах, где сумма активных температур превышает 3600 °С, а сумма осадков за месяц перед сбором ягод меньше 100 мм.

Клубни картофеля являются важнейшим пищевым продуктом («вторым хлебом») для людей, кормом для домашних животных и сырьем для

выработки многих технических продуктов – спирта, крахмалопаточных продуктов и т.п. Вкусовые качества картофеля, его рассыпчатость в основном зависят от содержания в клубнях крахмала.

Крахмал – это высокомолекулярное вещество – «сложный сахар» – основной запасной углевод растений, состоящий из двух типов полисахаридов. Он образуется в хлоропластах и амилопластах клеток, откладывается в клетках в виде крахмальных зерен. Наиболее крупные зерна образуются в клубнях картофеля. Глюкоза, освобождающаяся при расщеплении крахмала, используется как источник энергии для различных процессов жизнедеятельности или для синтеза необходимых соединений. Крахмал относится к числу важнейших продуктов питания: в пшеничной муке его содержится 50...55 %, в картофеле – 17–20 % и т.п.

В западных и северо-западных районах России в прохладные годы с обильным увлажнением в период клубнеобразования содержание крахмала снижается до 10 %.

По данным В.Д. Ерохина, крахмалистость картофеля (%) увеличивается с повышением температуры в период клубнеобразования (табл. 17.14).

Таблица 17.14

Зависимость крахмалистости картофеля (%) от температуры воздуха

Территория	Средняя температура воздуха, °С			
	14	16	18	20
Европейская часть России	13,4	15,5	17,8	19,6
Северо-западная зона европейской части России	11,5	14,3	17,0	—

Коэффициент корреляции между средней температурой воздуха и крахмалистостью клубней картофеля равен 0,77.

Если в период клубнеобразования картофеля наблюдается прохладная погода с обильными осадками, то количество крахмала может снизиться до 10 %. Картофель, выращенный в условиях умеренно-влажного и теплого климата на легких почвах, имеет наилучшие вкусовые качества. В районах избыточного увлажнения картофель имеет низкие вкусовые качества, плохо хранится в зимний период и используется преимущественно на кормовые цели.

Известно, что в холодное и дождливое лето в средней полосе России плоды яблонь имеют слабую окраску и невысокие вкусовые качества. В жаркую и сухую погоду плоды получают характерную для каждого сорта окраску, в них накапливается больше сахара, ароматических веществ и меньше кислот, создающих в комплексе высокие вкусовые качества.

Таким образом, на этих примерах показано влияние климата и агрометеорологических условий конкретного года на качество выращиваемой сельскохозяйственной продукции. Количественные показатели влияния

агрометеорологических условий на качество урожайности помогают рационально проводить размещение сельскохозяйственных культур, сортов и их гибридов, оценивать складывающиеся агрометеорологические условия и прогнозировать качество выращиваемой сельскохозяйственной продукции.

17.10. Влияние метеорологических условий на развитие и распространение вредителей и болезней сельскохозяйственных культур

В процессе сельскохозяйственного производства нарушаются исторически сложившиеся в биоценозах отношения и связи различных растительных и животных организмов, при этом создаются условия для массового размножения и расселения вредителей, распространения болезней и сорняков.

Вредители сельскохозяйственных культур – это животные, повреждающие культурные растения и/или вызывающие их гибель. Из позвоночных животных к ним относятся в первую очередь разнообразные грызуны (полевые мыши, кроты, полевки, суслики и др.). Из беспозвоночных животных наибольший ущерб урожаю наносят представители класса насекомых, что объясняется прежде всего их биологическими особенностями: большим видовым разнообразием, высокой плодовитостью и быстротой размножения (колорадский жук, озимая и хлопковая совка, луговой мотылек, хлебная или вредная черепашка и др.). К беспозвоночным, наносящим заметный урон урожаю культур, относятся также различные моллюски, круглые черви (нематоды), вызывающие болезни растений.

Распространение вредителей сельскохозяйственных культур и формирование «комплексов» видов в тех или иных растительных сообществах находится в прямой зависимости от динамических условий окружающей среды и экологической приспособленности видов.

Болезни сельскохозяйственных культур – это патологические процессы, протекающие в растениях под влиянием возбудителей болезней и неблагоприятных условий окружающей среды. Болезни проявляются в нарушении процессов фотосинтеза, дыхания и других функций, вызывают поражения отдельных органов или преждевременную гибель растений. Болезни растений снижают их продуктивность и ухудшают качество урожая.

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации (ФАО) ООН от сельскохозяйственных вредителей и болезней ежегодно погибает до 25...40 % потенциального мирового урожая продовольственных культур. Только за счет повреждения посевов насекомыми объемы потери ежегодной сельскохозяйственной продукции в мире достигают 10...15 %. Гибель зерновых культур составляет 20...30 %, а овощных и плодовых культур – до 40...60 %.

Известны случаи, когда массовое размножение вредителей и болезней сельскохозяйственных культур и животных наносило серьезный

ущерб экономике целых государств и крупных регионов. Миграции саранчи, распространение колорадского жука, хлебной черепашки, массовое развитие грибковых заболеваний вызывают гибель посевов на больших площадях, а эпизоотии (массовое заболевание сельскохозяйственных животных) – падеж скота.

Широко известна избирательность различных видов вредителей и болезней растительных объектов. Например, хлебная черепашка паразитирует на злаках, колорадский жук – на картофеле, озимая совка – на хлопчатнике, грибковые заболевания – ржавчина и головня – на зерновых культурах, мильдью – на виноградной лозе и т. п.

Циклы развития различных видов вредителей и болезней тесно связаны с климатическими условиями, а также зависят от складывающихся метеорологических (особенно микроклиматических) условий. Основными климатическими факторами, регулирующими распространение живых организмов по территории и темпы их развития, являются – свет, тепло и влага. Они определяют интенсивность обменных процессов в организме, особенности их поведения, подвижность, скорость развития, продолжительность жизни, плодовитость и выживаемость. Другие климатические и погодные факторы, такие, как ветер, давление, облачность, называемые второстепенными, корректируют влияние основных факторов, однако в экстремальных случаях их воздействие на все физиологические, поведенческие процессы и проявления становятся решающим.

Основным фактором для холоднокровных или *пойкилотермных* (от греч. *poikilos* – пестрый, разнообразный + *therme* – теплота, жар) животных, например насекомых, следует признать тепло – температуру почвы и воздуха. Все биохимические и физиологические процессы в организме зависят от термических условий среды, от излучения и поглощения ими лучистой энергии Солнца. Установлено, что у особей, находящихся в тени, температура тела близка к температуре воздуха и меняется в соответствии с ее динамикой. У особей, освещенных прямыми солнечными лучами, температура тела выше окружающего воздуха на 10...15 °С (Дружелюбова Т.С., Макарова Л.А., 1972). Многим видам насекомых свойственна способность к терморегуляции. Например, у лугового мотылька (плохого летуна) температура в полете повышается на 2...5 °С; у быстролетающих насекомых – азиатской саранчи – температура повышается на 15...20 °С. При высоких температурах среды насекомые способны понижать температуру тела за счет испарения влаги и активного дыхания. При пониженной температуре среды регуляция температуры тела насекомым достигается путем изменения его положения по отношению к солнечным лучам: саранча, вредная черепашка, некоторые гусеницы и др. С явлениями терморегуляции у насекомых связаны различного рода передвижения, сезонные миграции, смена мест обитания и т.п.

Сложность проблемы агро- и зоометеорологической оценки и прогноза возникновения и развития вредителей и болезней растений и животных связана с их большим видовым разнообразием, многофакторной зависимостью от условий внешней среды, с многофазовым циклом развития практически всех видов насекомых (от яйца до взрослого состояния – имаго), различной потребностью вредителей и болезней к этим условиям в процессе прохождения этапов (фаз) их развития. Рассмотрим эти вопросы на нескольких примерах.

Вредители-насекомые. Основную массу вредителей сельскохозяйственных культур составляют насекомые. Вред, наносимый насекомыми в отдельные годы, огромен. Это связано с их массовостью, возможностью динамического перемещения на значительные расстояния, высокой плотностью на единице площади и быстрым заражением больших массивов сельскохозяйственных угодий. Скорость размножения отдельных видов колеблется в широких пределах и связана с комплексом агрометеорологических условий и сельскохозяйственной деятельностью человека.

Температурные границы жизни насекомых лежат в пределах от -30 до 50 °С, а границы температур, при которых может происходить их развитие – от -1 до 44 °С (Кожанчиков И.В., 1961).

Для каждого вида насекомых, так же как и для растений, существуют оптимальные, максимальные и минимальные значения температуры и влажности воздуха и почвы, условий освещенности, определяющие возможность их существования и размножения. Заметное влияние на жизнедеятельность насекомых оказывает общий характер погоды тех или иных сезонов года.

Умеренно холодные зимы с устойчивым и высоким снежным покровом создают благоприятные условия для перезимовки насекомых и их личинок, в то время как зимы с сильными морозами и малым снежным покровом способствуют их массовой гибели. Гибель зимующих насекомых отмечается и в зимы с резкими колебаниями температуры воздуха, частым чередованием оттепелей и сильных морозов.

Активная жизнедеятельность и размножение большинства насекомых наблюдаются при температуре воздуха от 10 до 40 °С. Переход температур за эти пределы обычно способствует понижению их активности, оцепенению и нередко гибели. Некоторые насекомые весьма устойчивы к холоду и способны переносить отрицательные температуры в течение длительного зимнего периода при условии постепенного снижения температуры. Например, гусеницы *яблонной плодожорки* переносят понижение температуры воздуха до -23 °С, а гусеницы *лугового мотылька* – до -27 °С (табл. 17.15).

Таблица 17.15

**Термические показатели развития некоторых вредных насекомых
(Дружелюбова Т.С., Макарова Л.А., 1972)**

Вид насекомого-вредителя	Фаза развития	Температура, °C			
		минимум	оптимум	Σ температур, °C	T °C переохлаждения
Капустная белянка	Яйцо	9,0	–	98	–
	Гусеница	7,0	–	389	–
	Куколка	8,0	–	189	–
	Имаго	16,0	–	24	-7,3
	Генерация	9,0	23	700	–
Совка-гамма	Яйцо	6,0	25–28	56	–
	Гусеница	8,0	22–30	290	до -12
	Куколка	10,0	25	127	-4...-18
	Генерация	10,0	–	470	бабочка -8
Капустная совка	Яйцо	10,0	16–25	60	–
	Гусеница	9,0	16–30	400	–
	Куколка	10,0	19–21	240	–
Луговой мотылек	Яйцо	11,2	20	30–60	–
	Гусеница	9,6	32,7	200	-27
	Куколка	12–13	28	–	–
	Генерация	–	–	460	–
Яблонная плодовая совка	Яйцо	9,4	25–28	95	–
	Гусеница	8,3	–	430	-23
	Куколка	9,6	15–30	150	–
	Генерация	9,0	–	675	–
Вредная черепашка	Личинки	–	25–28	до окрыления	
	Имаго	10,0	22–24	300–350	
Кукурузный мотылек	Яйцо	9,5	22–30	70	–
	Гусеница	9,2	28–30	435	-25
	Куколка	10,0	20–28	142	-6,2
	Имаго	7,0	–	64	–
Хлопковая совка	Яйцо	12	–	50	–
	Гусеница	18	23–27	300	–
	Куколка	11	–	200	-7

Пороговая температура определяется обычно экспериментальным путем – постановкой серии опытов по выращиванию насекомых при различной (заданной) температуре. Скорость развития отдельных особей рассчитывают по формуле:

$$V = 1/n \cdot 100, \quad (17.62)$$

где V – скорость развития за сутки, выраженная в процентах от общей продолжительности периода развития; n – продолжительность периода развития в сутках. На рис. 17.75 приведены зависимости скорости развития трех географических популяций гусениц озимой совки от температуры и их термические пороги.

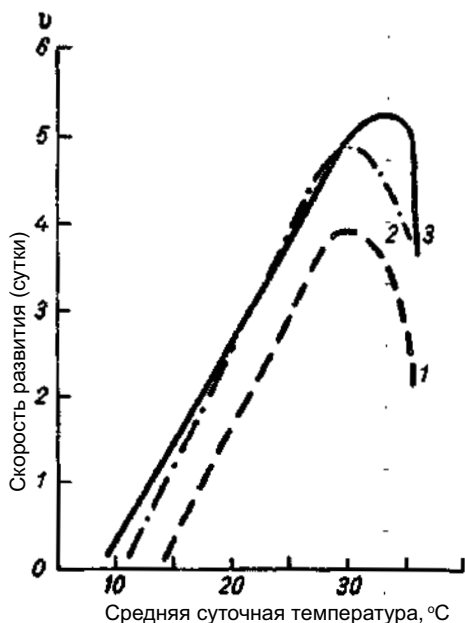


Рис. 17.75. Скорость развития гусениц озимой совки в зависимости от температуры. Популяции: 1 – северная, 2 – украинская, 3 – среднеазиатская.

Установленная энтомологами (от греч. *entomon* – насекомое), т.е. специалистами, изучающими насекомых, сумма эффективных температур для каждого вида насекомого считается «видовой биологической величиной». Вступление в каждую новую фазу развития различных насекомых, происходит при накоплении определенных сумм эффективных температур. Например, отрождение личинки *яблоневой запятовидной щитовки* происходит при сумме эффективных температур (выше 8 °C) 130 °C. Развитие *капустной моли* заканчивается при наборе суммы эффективных температур (выше 14 °C) 180 °C, *озимой совки* (выше 10 °C) – 1000 °C и т.д. Выход *вишневой мухи* из почвы в степной зоне начинается при накоплении суммы эффективных температур (выше 10 °C) 190 °C, в лесостепной зоне, где почва более влажная, – при наборе суммы эффективных температур (выше 10 °C) 225 °C на глубине 5 см.

В то же время выявлена значительная изменчивость этого показателя в зависимости от температуры воздуха и ее динамики, обусловленная экологическими особенностями вида. Например, для развития личинок саранчи при 26...32 °C эта сумма температур составляет 460 °C, при 20...28 °C сумма возрастает до 530 °C, а при 18...24 °C – до 580 °C.

Температура воздуха определяет скорость развития насекомых, что подтверждается такими примерами: период от стадии личинки до взрослой саранчи при температуре 22...27 °C составляет 52 суток; а при температуре 32...39 °C – всего 20 суток, яйца лугового мотылька при

температуре 15 °С развиваются за 10 суток, при 22 °С – за 4 суток, при 28...30 °С – за 2 суток и т. п.

Развитие насекомых при переменной температуре суточного и сезонного ритма ускоряет темпы их роста и развития, по сравнению с лабораторными опытами, которые проводятся при относительно постоянной температуре среды. Показано, что развитие *яблонной плодовой жорки* при нормальных колебаниях температуры ускоряется на 7...8 %. Яйца саранчовых при постоянной температуре (32 °С) развиваются в течение 5 суток, а при переменной температуре, характерной для естественных условий (12...32 °С), для их развития необходимо лишь 2 суток. Отмечена тесная зависимость плодовитости насекомых от температуры воздуха.

Вредитель посевов льна – *совка-гамма* – широко распространена в европейской части России. В северных районах страны развивается одно поколение, в Нечерноземной зоне до границы с лесостепью – два, в степных районах – три поколения этого вредителя. Размножению *хлебной жужелицы* благоприятствует влажная погода в августе-сентябре. На сильно заселенных жужелицей полях встречается до 10...40, а иногда и до 200 личинок на 1 м². В сильную засуху кладка яиц задерживается, гибнет много жуков, яиц и личинок первого возраста.

Недостаток тепла задерживает или прекращает развитие насекомых. Например, гусеницы *лугового мотылька* при температуре ниже 15 °С не превращаются в куколку. Лет *малиновой мухи* из-за холодной дождливой погоды задерживается до 15...20 суток, причем значительная часть их гибнет.

Развитие ряда насекомых связано с температурой верхних слоев почвы. Например, выход *черного (свекловичного) долгоносика* весной начинается при повышении температуры поверхности почвы до 7...10 °С, массовый выход вредителя – при температуре более 15 °С; выход *земляничного листоеда* – при температуре 13 °С. Окукливание личинок *яблонного плодового пилильщика* происходит при температуре почвы 10 °С на глубине 10 см, *сливового черного пилильщика* – при температуре 8 °С. Реакция на влажность воздуха у насекомых не одинакова: *злаковая тля* активно развивается при влажности воздуха от 40 до 100 %; *свекловичный долгоносик* погибает при высокой влажности.

Увеличение холодостойкости насекомых и подготовка их к зимнему периоду сопровождается снижением обмена веществ и интенсивности газообмена, снижением количества свободной воды в тканях тела, повышением концентрации связанной влаги, накоплением энергетических резервных веществ – жиров, белков и т.п.

На формирование холодостойкости насекомых оказывает влияние режим их питания, влажность среды и температурный режим,

предшествующий охлаждению. Следствием резкого наступления низких температур после теплого периода является снижение уровня холодоустойчивости насекомых, вызывающего их гибель при более высоких температурах. Низкая температура среды в холодный период года является фактором, ограничивающим ареалы распространения насекомых на территории. Гибель насекомых под действием низких температур обусловлена образованием кристаллов льда в тканях их тела, что приводит к необратимым физиологическим изменениям.

Установлена пороговая температура гибели насекомых: саранча в фазе яйцо в зимовке – -21°C , весной – -11°C ; озимая совка – -11°C ; луговой мотылек – -30°C ; совка-гамма в фазе куколки – -18°C ; гусеницы – от -12 до -4°C .

Слабые ветры способствуют переносу многих видов насекомых, служат ориентиром на запахи, распространяемые теми или иными цветущими растениями. Очень сильные ветры неблагоприятны для перемещения насекомых и зачастую обуславливают их массовую гибель. Однако воздушные потоки помогают отдельным видам насекомых перемещаться на значительные расстояния.

Саранча. Специалисты насчитывают около 10 тыс. видов саранчовых, обитающих на всех пяти материках. По образу жизни они представлены стадными и нестадными формами. Стадные формы являются злейшими вредителями сельскохозяйственных полей и садов.

В странах африканского континента, Передней Азии, в Индии в годы массового размножения многомиллионные стаи этого вредителя перелетают в европейские страны, в государства Центральной Азии, Казахстана, на Кавказ, в Нижнее Поволжье и даже в районы Западной Сибири. Например, в 1945 г. крупные стаи саранчи перелетели с воздушными потоками из Западной Африки в Испанию и Португалию на расстояние 1250 км за 28 часов со средней скоростью 45 км/ч и нанесли при этом серьезный урон сельскохозяйственным посевам и садам рис. 17.76 .

Хорошо изучены суточные миграции саранчовых, связанные с динамикой температуры окружающей их среды. Так, в ночные часы при температуре $10...15^{\circ}\text{C}$ личинки саранчи неподвижно сидят на поверхности почвы или на растениях, после восхода Солнца и по мере прогревания воздуха ($15...20^{\circ}\text{C}$) личинки активизируются и передвигаются в сторону более нагретых мест. При температуре $25...30^{\circ}\text{C}$ они малоподвижны, но продолжают питание; при температуре $35...40^{\circ}\text{C}$ личинки мигрируют в защищенные от Солнца места, а при температуре выше 45°C прекращают движение и впадают во временное тепловое оцепенение (Дружелюбова Т.С., Макарова Л.А., 1972).

Наибольший вред сельскому хозяйству на территории России наносят стадные формы – перелетная (азиатская) саранча и итальянский прус.



Рис. 17.76. Стаи саранчи в одном из районов африканского континента

Ущерб, наносимый ими, огромен. Годы массового размножения саранчи надолго остаются в памяти, как стихийное бедствие. Саранча практически всеядна. В старых публикациях отмечается, что «немногие растения остаются ею нетронутыми, а при недостатке пищи она довольствуется даже древесною корою и набрасывается на соломенные крыши и паруса». Саранча не только пожирает в огромных количествах фитомассу, но своими укусами создает «ворота», через которые в растения проникают возбудители инфекции и паразиты. От этого погибает в 5...10 раз больше фитомассы, чем поедают эти насекомые (Бондарев Л.Г., 2003).

В последнее десятилетие XX столетия размножение саранчовых в России приобрело характер чрезвычайной ситуации. Эта вспышка массового размножения продолжается уже более 10 лет и охватывает фактически все степные регионы юга России. В 1999 г. общая площадь, где отмечались в большом количестве развивающиеся в почве «кубышки» с личинками саранчи и стаи саранчовых, в России составляла около 1 млн га, а в Казахстане достигла 3 млн га. Массовое размножение саранчовых в конце 80-х – начала 90-х гг. XX века отмечалось в Среднем и Нижнем Поволжье, в Республике Калмыкия, на Северном Кавказе и в Ставропольском крае.

Такое массовое и продолжительное размножение саранчовых, по мнению специалистов, определяется несколькими причинами: общее

потепление климата и увеличение числа жарких и засушливых лет в южных регионах страны; сокращение и изменение структуры посевов; увеличение площадей заброшенных земель; снижение поголовья овец, вытравливающих при выпасе «кубышки» саранчовых, расположенных обычно близко к поверхности почвы (Столяров М.В., 2000). Наиболее устойчивым признаком массового размножения саранчовых в южных регионах России является повышение степени засушливости весенне-летних месяцев на фоне более теплых, чем обычно, зим. Сочетание таких условий на протяжении трех и более лет чаще всего приводит к значительному росту заселенных «стадными» саранчовыми площадей, увеличению их вредоносности и росту интенсивности миграций.

Температура и интенсивность солнечной радиации играют основную роль в жизни саранчовых, тогда как влажность почвы и воздуха имеет для этих насекомых меньшее значение. Температурные критерии обуславливают не только ареалы распространения саранчовых, но и зоны их массового размножения и вредоносности. Ареал азиатской саранчи охватывает территории, простирающиеся от южных границ России на север примерно до 58–60° с.ш. Зона их вредоносности обычно не выходит за пределы 55° с.ш., а зона постоянного массового размножения находится в пределах 40–48° с.ш. (рис. 17.77).

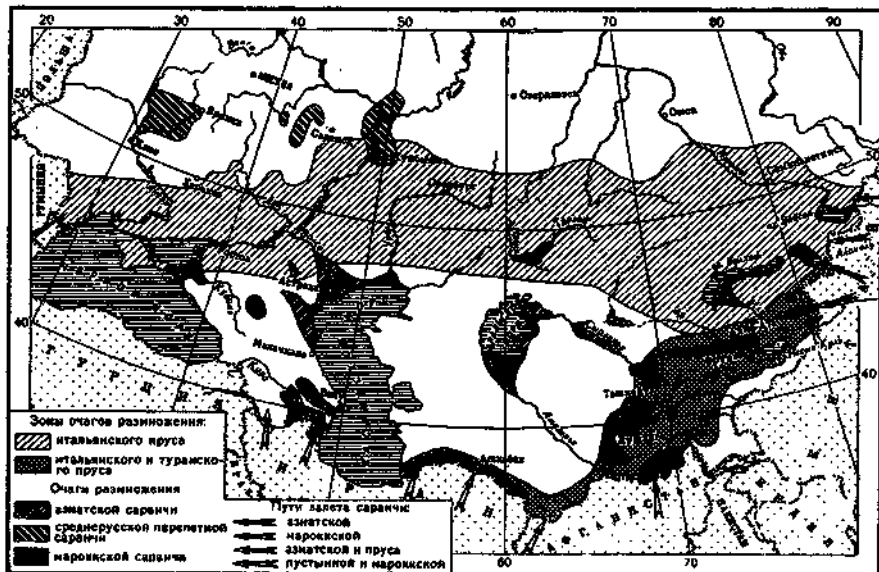


Рис. 17.77. Схематическая карта основных очагов массового размножения стадных саранчовых на территории России и сопредельных государств и путей залета саранчи на территорию России (Жизнь животных. Т.3. М., 1969)

Для большинства районов благоприятными для развития этого вредителя посевов и садов являются годы с суммами температур (выше 10 °С) – 2500...3000 °С, годовым количеством осадков 150...200 мм и ГТК Селянинова 0,3...0,5. В такие годы средняя суточная температура воздуха за май–август варьировала в пределах 15...23 °С, за июль–август (период откладки яиц) от 22 до 27 °С при ГТК от 0,25 до 0,7 (Ермаков А.В., 1998).

Умеренная численность и уровень вреда от саранчи отмечены при годовой сумме осадков 200...250 мм, сумме температур (выше 10 °С) 2250...2500 °С.

Проявление активности саранчовых наблюдается в ясные летние дни при температуре выше 10...12 °С. С повышением температуры воздуха до 20 °С активность насекомых резко увеличивается. При температуре почвы выше 38 °С начинается миграция вначале отдельных особей, а затем и всей стаи саранчи; температура тела при этом у этих насекомых достигает 40...45 °С.

В вечерние часы стаи приземляются при температуре воздуха 20...23 °С. При температуре тела ниже 20 °С саранча полетов не совершает и находится на почве или на растениях в состоянии относительно покоя. При температуре воздуха выше 40 °С и температуре поверхности почвы выше 60 °С наступает период тепловой депрессии саранчи (Цыпленков Е.П., 1970). Таким образом, активная жизнедеятельность саранчовых проходит при температуре около 35...40 °С, которая у разных видов этих насекомых варьирует в пределах от 10 до 55 °С. Температура ниже -5 °С и выше 70 °С приводит к их гибели.

Дальние перелеты саранчи связаны с характером синоптических процессов. В годы массового развития саранчовых их распространение принимает характер крупномасштабных воздушных миграций, отслеживание и контроль которых требует учета синоптических условий, складывающихся в южных регионах России и сопредельных стран. Поэтому при долгосрочном прогнозировании времени наступления нового цикла размножения саранчи необходимо учитывать гелиофизические данные, характеризующие цикличность солнечной активности и связанной с ней циркуляции атмосферы (Макарова Л.А., Доронина Г.М., 1994).

Для прогноза начала отрождения саранчовых (выход личинок из «кубышек») Г.М. Винокуровым (1949) предложена формула:

$$N = A / (T - T_1) \cdot b, \quad (17.63)$$

где N – количество суток, через которое произойдет отрождение личинок саранчовых; A – сумма температур, необходимая для развития эмбриона в перезимовавших яйцах (градусочасы); T – температура почвы (°С); T_1 – нижний порог развития (°С); b – число часов с температурой выше нижнего порога развития. Значения A и T_1 определяются экспериментально. Установлено, что нижний температурный порог развития

итальянского пруса 12 °С, а сумма температур (выше 10 °С), необходимая для развития эмбриона саранчи после зимовки, составляет 4560 градусо-часов. Эта формула используется для расчета начала отрождения саранчовых при условии, что значения $T \geq 20$ °С.

В 70-е гг. XX в. получила развитие наука аэробиология, исследующая крупные миграции насекомых, связанные с особенностями воздушной циркуляции в нижних слоях атмосферы.

Колорадский жук относится к числу наиболее опасных вредителей картофеля и других важных в продовольственном отношении культур из семейства *Пасленовых* (томаты, баклажаны и др.). Его ареал охватывает страны и регионы традиционного картофелеводства – Северную и Центральную Америку, Турцию, Западную Африку, Европу (кроме Великобритании и стран Скандинавии).

Во второй половине 60-х гг. прошлого столетия колорадский жук появился в западных районах России и в течение последующих 10 лет расселился по территории всех картофелеводческих районов Европейской части страны. К 1980 г. отдельные его очаги были обнаружены в республиках Закавказья, в ряде северных и западных областей Казахстана, частично в некоторых Среднеазиатских республиках. В последующие годы распространение колорадского жука продвинулось за Урал, в часть восточных районов страны – Кемеровская, Челябинская, Новосибирская, Омская области и Алтайский край. Таким образом, все территории Российской Федерации к югу от Псковской, Тверской и Ивановской областей стали зонами массового размножения жука (рис. 17.78).



Рис. 17.78. Распространение колорадского жука к началу XXI века на территории стран СНГ и Балтии; схема построена по материалам работы (Афонин и др., 2006)

Его вредоносность в этих районах велика, при этом экономический ущерб картофелеводству наносится регулярно. Только в России этот жук снижает потенциальные урожаи картофеля на одну треть. Отрицательная роль колорадского жука в агроэкосистемах не уступает влиянию таких неблагоприятных факторов, как недостаток или избыток влаги, почвенная или воздушная засуха, недостаток питательных веществ в почве (Вольвач В.В., 1987).

Личинки колорадского жука отличаются большой прожорливостью – в среднем за период своего развития от I до IV возраста личинка съедает 30...40 см² листовой поверхности ботвы картофеля. Одна особь личинки этого жука в среднем за сутки потребляет 1,27 г листьев картофеля, т.е. в течение суток каждая личинка съедает по массе количество пищи, в 2,0...2,5 раза превышающее массу ее тела.

Условия погоды определяют сроки выхода перезимовавших жуков из почвы, продолжительность периодов развития его поколений (генераций), плодовитость самок, гибель особей за период активной деятельности и зимовки. Основным экологическим фактором, определяющим границы распространения жука, является температура.

Установлено, что массовый выход жуков из почвы весной происходит после устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 10 °С. В различных районах ареала его обитания развивается от 1 до 3 генераций жука. Нижним порогом развития считается температура воздуха 10...12 °С. При температурах 13...14 °С полная генерация жука развивается за 70...80 суток, при температуре 25...26 °С – до 29 суток. Более высокие температуры воздуха угнетают его активность и развитие.

Жук размножается в районах с осадками 600...1500 мм/год при температурах воздуха от 16 до 26 °С. Условия вне этих пределов понижают жизнеспособность вредителя. Исключения составляют районы, где наряду с низкими зимними температурами (-35...-40 °С и ниже) высота снежного покрова менее 30 см, а также в тех районах, где температура почвы в зимний период на глубине залегания основной массы зимующих взрослых особей (фаза имаго) опускается ниже -5 °С и удерживается на этом уровне длительный период. Зимует жук в почве на глубине от 10 до 50 см на старых картофельных полях. Наиболее благоприятными условиями зимовки этого вредителя является умеренно-сухая почва с температурой выше -8 °С. Даже в благоприятных условиях зимы в среднем погибает до 70 % особей, в неблагоприятных условиях – до 99 %. Несильный ветер способствует миграции жука, который плохо летает без помощи ветра.

Как и у многих представителей класса насекомых, в онтогенезе колорадского жука различают фазы: взрослых жуков (имаго), яиц, личинок (четыре возраста) и куколок. Напомним, что *онтогенез* – это индивидуальное развитие особи, совокупность последовательных морфологических,

физиологических и биохимических преобразований в организме, проявляющихся в форме различных фаз и стадий развития от момента зарождения до его естественной смерти.

Зависимость продолжительности развития яиц, личинок, куколок и поколения в целом этого вредителя от температуры воздуха достаточно точно описывается уравнением типа:

$$Y = at^2 - bt + c, \quad (17.64)$$

где Y – продолжительность развития (сутки); t – средняя температура за период ($^{\circ}\text{C}$).

В табл. 17.16 приведены коэффициенты этого уравнения и другие статистические характеристики для основных фаз (стадий) и всего периода развития жука.

Таблица 17.16

Статистические характеристики основных фаз и периода развития колорадского жука (Вольвач В.В., 1987)

Фаза и период развития	Коэффициенты уравнения			Ошибка уравнения, сутки	Температурный предел, $^{\circ}\text{C}$
	a	b	c		
Яйцекладки	0,109	-4,92	61,4	1,9	12...26
Личинки	0,135	-6,51	91,8	2,7	13...25
Куколки	0,188	-8,96	117,6	2,8	13...25
От яйцекладки до:					
Личинки 2-го возраста	0,171	-7,68	95,3	2,4	13...25
Личинки 3-го возраста	0,204	-9,09	113,3	2,7	14...25
Личинки 4-го возраста	0,213	-9,77	126,6	3,1	14...25
Куколки	0,470	-20,20	236,8	3,2	14...25
Взрослого жука (имаго)	0,378	-18,54	253,7	4,0	14...25

Используя эти данные и температуру периода, по формуле (17.64) рассчитывают продолжительность различных фаз развития жука. Например, связь продолжительности периода созревания перезимовавших жуков (N , сутки) с температурой воздуха (T $^{\circ}\text{C}$) и показателем календарного срока выхода (Δt) выражается уравнением (Вольвач В.В., 1987):

$$N = 0,22T^2 - 8,74T + 4,15\Delta t + 94,6; \quad (17.65)$$

$$R = 0,92; \text{ ошибка уравнения } S_y = \pm 3,4 \text{ дня.}$$

Уравнение применимо для T $^{\circ}\text{C}$ = 11...21; для Δt = 0...3 ч. Длительность периода созревания перезимовавших жуков при таких условиях изменяется от 30 до 7...8 суток.

Данные табл. 17.16 применимы для всей территории европейской части России и Беларуси, где распространен колорадский жук.

Размножение жуков начинается через 10...25 суток в зависимости от сроков их выхода из почвы и температурного режима. За весь период

яйцекладки (2...3 месяца) самка откладывает до 1000...1500 яиц, из которых в среднем развивается 50 % личинок. За вегетационный период жук успевает дать 2...3 генерации (поколения). Таким образом, при благоприятных условиях численность жука за год может увеличиться в 20...30 раз. Динамика суммарной плодовитости колорадского жука при средних многолетних значениях температуры воздуха в различных ареалах его распространения приведена на рис. 17.79.

В нерегулируемых популяциях колорадского жука численность вредителя даже за короткий период могла бы увеличиться в сотни и тысячи раз. Но в связи с известным сопротивлением среды, ограничивающей плодовитость и вызывающей гибель уже отложенных яиц, отродившихся из них личинок, куколок и имаго, беспредельное увеличение численности популяций имеет естественные ограничения. Например, на гибель вредителя влияет сумма осадков за период развития генераций и длительность этого периода: гибель более 85 % особей отмечается при суммах осадков более 110 мм (рис. 17.80).

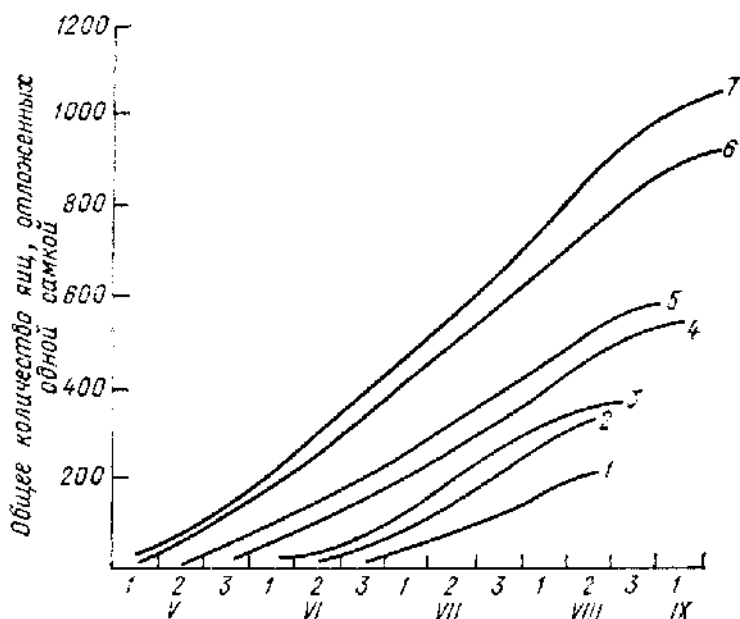


Рис. 17.79. Динамика суммарной плодовитости колорадского жука при средних многолетних значениях температуры в различных зонах его ареала: 1 – Вологодская обл.; 2, 3 – Свердловская обл.; 4 – Брянская обл.; 5 – Воронежская обл.; 6 – Кабардино-Балкарская Республика; 7 – Республика Армения

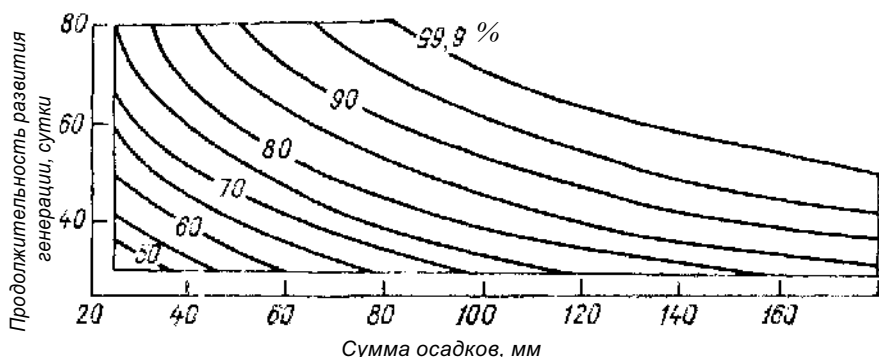


Рис. 17.80. Номограмма для расчета процентов гибели особей колорадского жука

Из естественных врагов, способных эффективно регулировать численность колорадского жука, можно назвать лишь фазанов и цесарок — птиц, встречающихся в природе только в самых южных регионах картофелеводства, а также специально сохраняемых в естественных местах гнездования для этих целей в некоторых странах Европы (Венгрия). При большой численности, быстроте размножения и прожорливости быстрорастущих личинок, съедающих нацело пластинки листьев картофеля, колорадский жук способен наносить значительный урон продуктивности картофельных полей. Уничтожая надземную часть растений, личинки и жук сокращают фотосинтезирующую поверхность листьев, в результате формирование клубней картофеля замедляется, а урожайность культуры оказывается низкой.

Методика агрометеорологического прогноза ожидаемой численности этого вредителя, сроков размножения его популяций, расчета объемов и сроков химических обработок для подавления популяций колорадского жука разработаны в ГУ ВНИИСХМ (Вольвач В.В., 1987). Эти методики, основанные на предложенных автором динамико-статистических моделях, эффективно использовались в советские годы при оперативном агрометеорологическом обеспечении картофелеводства в России и Беларуси.

Клоп – вредная черепашка. Этот вредитель высасывает клеточный сок из молодых побегов (соломин) зерновых культур, что вызывает увядание растений и замедление их роста, в результате чего происходит значительное снижение урожайности и качества зерна. Первоначальный ареал этого теплолюбивого насекомого охватывал территорию Передней Азии (Иран, Афганистан). На территории бывшего СССР вредная черепашка заселяла в основном степные районы. В связи с расширением площадей посевов пшеницы ареал вредителя значительно увеличился

за счет продвижения в более северные и восточные районы страны. В настоящее время он охватывает предгорную, степную и лесостепную зоны с различными площадями посевов озимых и яровых зерновых культур, с разнообразным набором высеваемых сортов. Большое разнообразие условий питания и среды обитания насекомого способствовало образованию различных географических популяций клопа, различающихся по ряду морфофизиологических признаков, которые описаны в специальной научной литературе и нами не рассматриваются.

Одним из основных факторов, обуславливающих особенности поведения и размножения насекомых, их выживаемость, уровень плодovitости, темпы развития является температура окружающей среды. По данным Л.А. Макаровой и Г.М. Дорониной (1983), температурные границы жизни вредной черепашки лежат примерно в пределах от -10 до 47 °С, двигательная активность – от 6...8 до 40 °С. Нижним порогом развития считается обычно температура 10 °С, однако активная жизнедеятельность насекомого начинается при 15 °С и ускоряется по мере повышения температуры воздуха. Оптимальные условия создаются для него при температуре 25...30 °С. Установлены суммы эффективных температур (выше 10 °С) для различных фаз развития клопа. Так, для фазы яйца она составляет 90...95 °С, для личинок – 375...380 °С, а для всего поколения – около 470 °С. Замечено также, что в годы с теплым вегетационным сезоном сумма эффективных температур за период откладки яиц до окрыления молодых насекомых не превышает 370...390 °С. Эти величины несколько варьируют в зависимости от складывающихся погодных условий: тепла и увлажненности территории. У различных географических популяций вредной черепашки температурные границы фаз развития различаются незначительно. На рис. 17.81 приведен график температурных условий популяций этого клопа.

Вымерзание зимующих клопов в почве на глубине 2...3 см происходит при средней температуре ниже -7 °С и незначительной высоте снежного покрова (рис. 17.82). При температуре -10 °С их смертность достигает 70 %. Авторы цитируемого исследования выделили различные агроклиматические зоны динамики численности вредной черепашки (рис. 17.83).

Совка-гамма – вредитель посевов льна, конопли, многих бобовых и овощных культур – широко распространена на территории Евразии, в том числе и на европейской части России. В северных районах страны развивается одно поколение вредителя, в Нечерноземной зоне до границы с лесостепью – два поколения, в степных районах – три. Гусеницы этого вида совки объедают листья, сокращая фотосинтезирующую поверхность растений, при этом растения отстают в своем росте и развитии; нередко вредитель выгрызает бутоны, цветки, завязи и даже незрелые плоды,

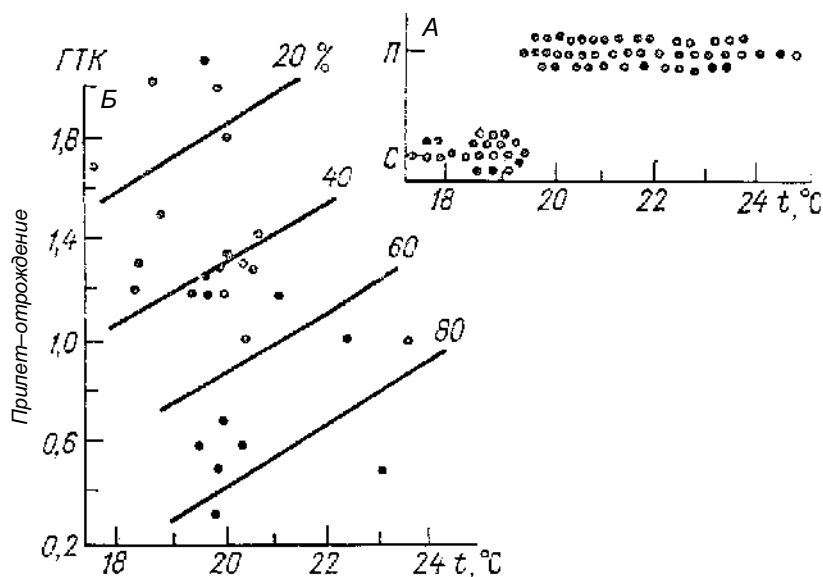


Рис. 17.81. Зависимость состояния популяций вредной черепашки от температурных условий периода «отрождение–окрыление»: А – уровень численности; Б – количество особей (%), окрылившихся к началу массовой уборки зерновых культур; П – подъем численности; С – спад



Рис. 17.82. Критическое соотношение между средними декадными значениями температуры воздуха и высотой снежного покрова для вредной черепашки: А – вымерзание клопов, Б – гибель клопов от болезней

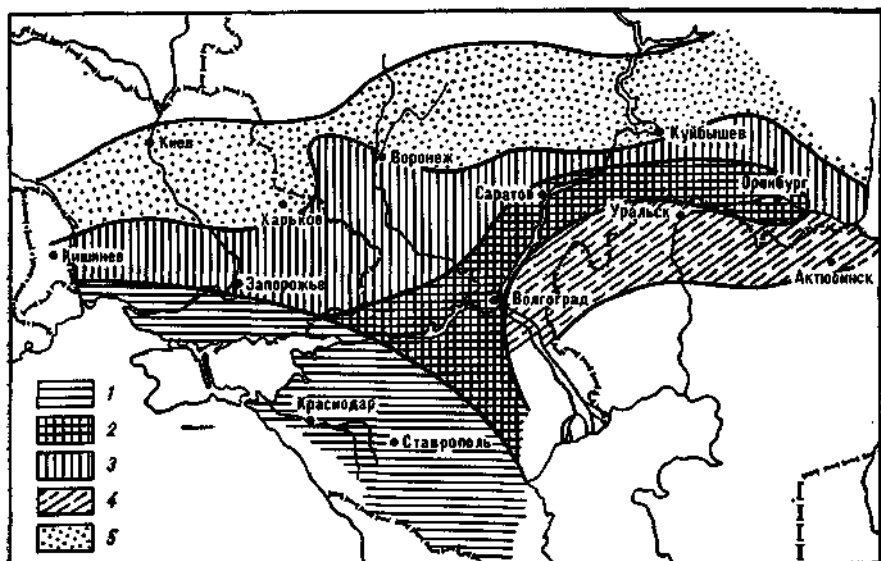


Рис. 17.83. Зоны динамики численности вредной черепашки: 1 – постоянно высокой численности; 2 – периодического массового размножения; 3 – частых подъемов численности; 4 – периодических подъемов численности; 5 – неустойчивой численности

наносит серьезный ущерб урожаю. Яйца откладывает на растения, в растительных остатках и в почву; зимует в различных стадиях развития.

Хлебная жужелица – это жук, опасный вредитель озимой пшеницы, ячменя и ржи. Распространен в Европе, в нечерноземной, степной и лесостепной зонах России. Весной личинки питаются листьями озимой пшеницы и ржи, сильно повреждая возобновившие вегетацию листья. Жуки питаются на колосьях всех видов зерновых культур. Размножению этого жука благоприятствует влажная, умеренно-теплая погода в августе – сентябре. Плотность вредителя на полях обычно составляет от 10...40 до 200 личинок на 1 м². В сильную засуху кладка яиц задерживается, при этом гибнет много жуков, яиц и личинок.

Озимая совка в северных районах Нечерноземной зоны развивается в одном поколении, повреждая всходы озимых хлебов. В средней полосе России (Тула, Рязань, Казань) в течение года развиваются два поколения этого вредителя. Районы с массовым размножением совки ограничиваются изолиниями гидротермического коэффициента (ГТК Селянинова) 1,2...1,4; районы со средней вредоносностью – 1,0...1,2 и 1,4...1,5. Районы с отдельными очагами распространения вредителя и слабой вредоносностью расположены к западу от изолинии 1,5 и к востоку от изолинии 1,0

(рис. 17.84). Гусеницы весеннего (первого) поколения повреждают сахарную свеклу, подсолнечник, кукурузу, бахчевые культуры, а гусеницы второго поколения вредят озимым посевам. В государствах Закавказья и Средней Азии в условиях жаркого климата успевает развиваться и наносить ущерб сельскохозяйственным посевам три поколения озимой совки.

Многоядные вредители. Значительный ущерб сельскохозяйственному производству наносят различные представители отряда *грызунов* (полевки, мыши, хомяки, суслики и т.п.). Их высокая плодовитость, быстротечность наступления стадии половозрелости (короткий жизненный цикл), инстинкт создания запасов корма на зиму, прожорливость и высокая приспособляемость к условиям существования наносят заметный урон сельскохозяйственной продукции, особенно зерновым культурам. Например, потомство одной пары полевок может достичь 400 особей в

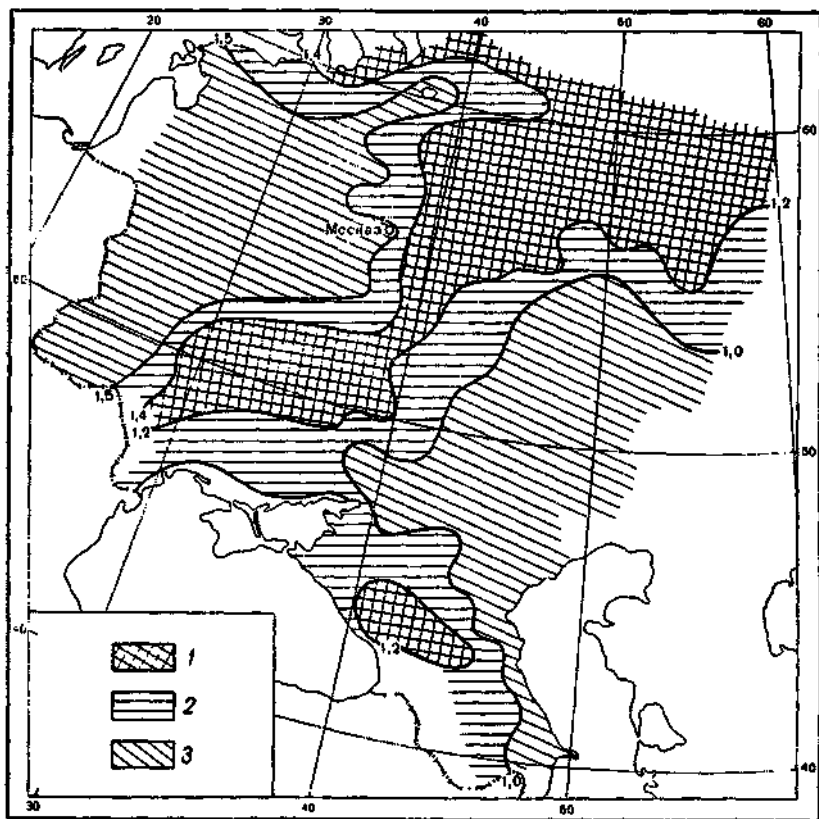


Рис. 17.84. Зоны вредоносности озимой совки на Европейской территории России сопредельных государств. Зоны: 1 – сильного вреда; 2 – среднего вреда; 3 – слабого вреда

год. Каждая полевка съедает в день 5...7 г зерна, что в среднем составляет 1,5...2 кг в год, а каждый суслик съедает за лето до 8 кг зерна.

Обитают грызуны в основном в посевах, в приовражных участках, в лесополосах и т.п. местах. Большую часть жизни они проводят в норах, где и зимуют. При глубоком промерзании почвы значительная часть их гибнет во время зимних месяцев. При возврате весенних холодов погибает много молодняка. Все мышевидные грызуны очень чувствительны к охлаждению и намоканию. Обильные дожди в холодную осень вызывают их массовую гибель. В зимы с сильными морозами или частым чередованием оттепелей и гололедных явлений, а также в холодную затяжную весну численность грызунов резко снижается. В южных регионах летняя жара и длительная засуха сдерживает их размножение. Естественными врагами большинства мышевидных грызунов являются хищные птицы, а также лисы, хорьки, ласки и другие мелкие млекопитающие-хищники.

Многие виды грызунов являются носителями таких опасных инфекций, как чума человека, туляремия, бешенство и др. В пустынях Центральной (Средней) Азии и Казахстана многие виды грызунов (песчанки, суслики, тушканчики и др.) опасны как переносчики чумной инфекции. В целях систематического наблюдения за перемещением возросшей численности пустынных грызунов и борьбы с ними в очагах, зараженных чумой, в теплый период года работают специализированные противочумные отряды, оснащенные транспортом, медицинским оборудованием и средствами связи. В составе таких отрядов работают зоологи и медицинские работники.

В местах с высокой численностью грызунов – на сельскохозяйственных полях, при скоплении их в пунктах хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, на животноводческих объектах и т. п. – проводят комплексные мероприятия по их истреблению и профилактике распространения.

Болезни растений

В засушливых регионах потери урожая зерновых культур связаны с развитием таких болезней, как *ржавчина*, *пыльная и пузырчатая головня*, *корневая гниль* и др. В районах умеренного климата с обильными осадками преобладают болезни – *фузариозы*, *снежная плесень*, *мучнистая роса* и др. Развитие болезней сельскохозяйственных культур определяется сложившимися погодными условиями.

Пыльная головня. Влажная и теплая погода в период цветения яровой пшеницы и ячменя способствует заражению растений и проникновению гриба *пыльной головки* в зерно. Эта болезнь распространена во всех зонах возделывания яровых зерновых хлебов. Вредоносность пыльной головки увеличивается по мере продвижения посевов на восток в связи с расширением ареала и площадей под яровыми культурами.

Прохладная, с повышенной влажностью воздуха погода весны и первой половины лета способствует заражению яровых посевов. При осадках за декаду от даты начала колошения менее 30 мм заражение растений оказывается незначительным, при осадках от 30 до 90 мм за тот же период процент зараженных растений сильно возрастает. Однако обильное выпадение осадков (≥ 100 мм за тот же период) препятствует распространению болезни вследствие уменьшения концентрации спор этого гриба в воздухе.

Снежная плесень. Поражение посевов злаков наблюдается во всех районах, где зерновые высеваются осенью. Эта болезнь развивается в годы с ранним наступлением зимы, длительным залеганием высокого снежного покрова, особенно когда снег ложится на талую почву, а весной наблюдается растянутый период таяния снега. Болезнь поражает чаще всего озимую пшеницу и рожь, растущие в пониженных местах, при медленном таянии снега, высокой влажности воздуха и при температурах, близких к 0°C .

На рис. 17.85 в пределах потенциального ареала болезни выделено четыре зоны, различающиеся по интенсивности и частоте ее проявления. В первой зоне, охватывающей южные регионы Украины, нижнее Поволжье и Северный Кавказ, эта болезнь развивается редко – 1–2 раза за 10 лет, преимущественно в слабой степени (гибель до 10 % всходов). Во второй (центральной) зоне снежная плесень поражает озимые посевы

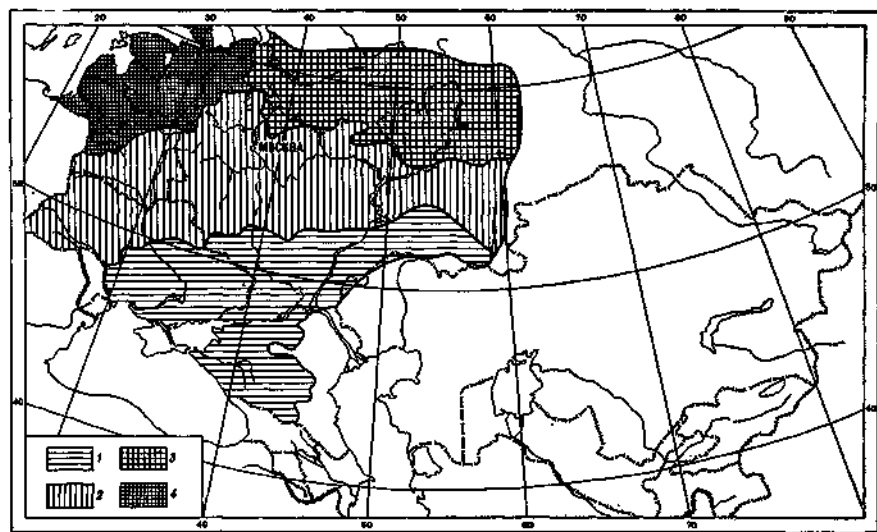


Рис. 17.85. Интенсивность поражения озимых хлебов снежной плесенью (Сидорова С.Ф.). 1 – спорадическая слабая; 2 – умеренная; 3 – сильная; 4 – очень сильная

почти ежегодно, но также в слабой степени. Умеренное развитие болезни (гибель до 30 % растений) отмечается в основном в северных районах в среднем один раз за пять лет. В третьей зоне (северо-восточные районы европейской части страны) заболевание отмечается один раз в три года и поражает всходы озимых в сильной степени (30...50 %). Наиболее интенсивному заражению этой болезнью подвержены посевы озимых, расположенные в северо-западных районах бывшего СССР (четвертая зона). Здесь снежная плесень в сильной степени поражает посевы два раза за 10 лет и один год из 10 характеризуется массовым распространением болезни с гибелью более 50 % растений.

Корневая гниль. Большие потери урожая зерновых культур и хлопчатника наблюдаются при развитии корневой гнили растений. Заболевания проявляются в виде побурения корней подземного междоузлия, узла кущения у яровой и озимой пшеницы. Этот гриб вызывает гибель всходов, щуплость колоса и отставание в росте растений. Сильно пораженные проростки пшеницы (озимой и яровой) гибнут до выхода их на поверхность почвы. При заражении взрослых растений нижняя часть стебля и вторичные корни загнивают, растение не колосится или дает пустой (без зерновок) колос. Часто при этом соломина (стебель) и колос имеют светло-зеленую или почти белую окраску (белоколосность).

Проявление корневой гнили пшеницы определяется условиями накопления в почве «заразного начала» – спор – и состоянием растений. Такое накопления в почве спор происходит в условиях продолжительного послеуборочного периода (до 75 суток) с температурой выше 10 °С при влажности пахотного слоя более 15 мм. Эти условия замедляют скорость микробиологических процессов в почве и способствуют сохранению спор до следующего высева культур. В дальнейшем интенсивное развитие болезни наблюдается при недостаточной влагообеспеченности пшеницы во время ее вегетации. По сочетанию благоприятных условий для сохранения инфекции и интенсивного поражения растений во время их вегетации специалистами установлен основной ареал болезни, охватывающий территорию Среднего и Нижнего Поволжья, а также степные районы Казахстана и Сибири.

Основным фактором, определяющим степень поражения пшеницы, являются запасы влаги в слое почвы 0...100 см в период «цветение – молочная спелость». При влажности почвы менее 60 мм растения начинают страдать от недостатка влаги. Особенно низкие оценки состояния посевов отмечаются при запасах влаги ≤ 40 мм. Для оценки динамики влаги в различных районах ареала предложен показатель: отношение запасов влаги в пахотном горизонте почвы в период «всходы – кущение» (заражение растений) к запасам влаги в метровом слое почвы в период «цветение – молочная спелость» (проявление болезни) табл. 17.17.

Таблица 17.17

**Средняя многолетняя характеристика зон вредоносности корневой гнили
яровой пшеницы**

Зона	Средние многолетние запасы влаги, мм	Число лет с запасами влаги ниже:		Показатель динамики влаги	Вероятность силь- ной вредоносности болезни, %
		60 мм	40 мм		
1	> 80	2...3	0...1	< 0,4	20...30
2	60...80	4...5	1...2	0,4...0,5	40...50
3	40...60	6...7	3...5	0,5...0,6	60...80
4	20...40	8...9	6...7	> 0,6	90...100

Этот показатель использован авторами при выявлении зон различной вредоносности болезни. На рис. 17.86 представлена вероятность (%) сильного заражения корневой гнилью посевов яровой пшеницы.

У теплолюбивых культур – хлопчатника, кукурузы и др. – болезни проростков и плесневение семян происходят при низких температурах почвы сильнее, чем при высоких. У менее теплолюбивых растений – пшеницы, гороха и др. – поражение наблюдается слабее при низких, чем при более высоких температурах почвы.

Для прорастания спор *пузырчатой головки* и заражения растений достаточно незначительного количества влаги, которую получают растения

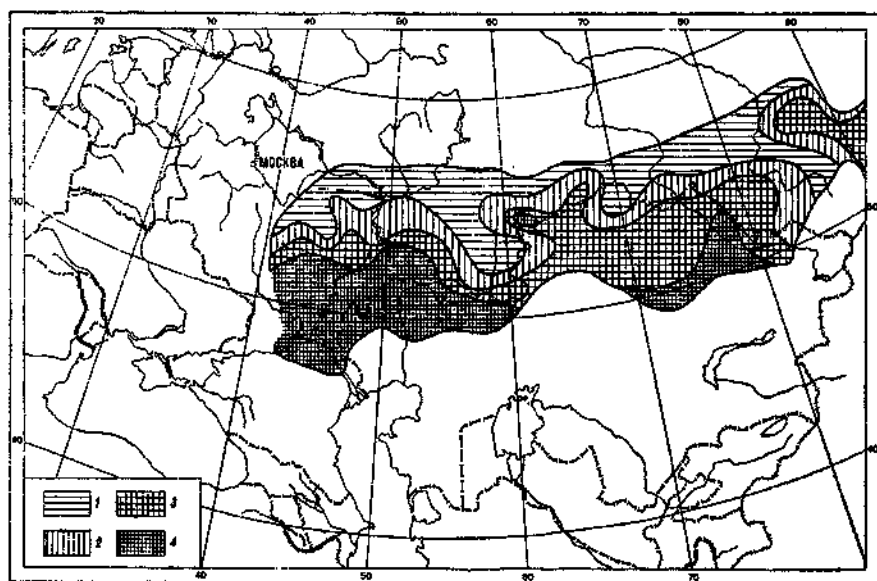


Рис. 17.86. Вероятность сильной вредоносности гельминтоспориозной корневой гнили яровой пшеницы: 1 – 20–30 %; 2 – 40–50 %; 3 – 60–80 %; 4 – более 80 %

во время кратковременных летних дождей и росы. Поражение растений этой болезнью резко возрастает при загущенных посевах и поздних сроках посева, а также при внесении избыточного количества азотных удобрений.

Наиболее распространенной болезнью початков кукурузы является *фузариоз*. Проявляется он в годы с повышенной влажностью в период от конца фазы молочной спелости до начала восковой спелости зерна. Семена пораженных початков имеют невысокую всхожесть; мукомольные и хлебопекарные качества зерна теряются. Развитию этого заболевания способствует предшествующее повреждение початков гусеницами *кукурузного мотылька* и болезнью, называемой «*бель початков кукурузы*». Эта болезнь возникает при засушливой погоде в начале налива зерна, быстро сменяющейся дождями. В результате на зерновках образуются трещины с выступающим эндоспермом, что связано с разной скоростью разрастания эндосперма и оболочек. В такие трещины и попадают споры фузариоза.

Наиболее распространенная болезнь продовольственных культур из семейства *Пасленовых* (картофеля, томатов, баклажан, перца и др.) – *фитофтора* (или *фитофтороз*), которая вызывается грибом, повреждающим надземные части растения, плоды и клубни. Болезнь эта передается через посадочный материал и путем заражения надземных и подземных органов растений спорами гриба. Фитофтороз развивается при температуре от 10 до 30 °С и относительной влажности воздуха более 70 %. Оптимальные условия его развития – температура воздуха 10...25 °С и относительная влажность воздуха 95...100 %. Появлению этой болезни благоприятствует облачная с небольшими осадками погода в сочетании с высокой ночной температурой воздуха (не ниже 10 °С). На загущенных посадках картофеля, в которых относительная влажность воздуха выше, а естественный воздухообмен (продуваемость) посадок затруднен плотностью ботвы культуры, вероятность развития фитофторы значительная. Вероятность *эпифитотий* (от греч. *epi* – сверх, над, после; *phyton* – растение), т.е. широкое распространение инфекционной болезни растения – *фитофтороза* – картофеля представлена на (рис. 17.87).

Условия перезимовки вредителей и болезней (в стадии личинок, спор) в значительной мере определяют уровень их возможного развития в последующий вегетационный период. Степень холодостойкости личинок и спор различна (от 0 до -18 °С). Однако в большинстве случаев они выдерживают лишь кратковременное охлаждение. В дальнейшем вероятность развития личинок и спор зависит от того, насколько складывающиеся погодные условия соответствуют их биологическим потребностям и возможностям расселения. В табл. 17.18 представлены температурные значения развития некоторых возбудителей болезней сельскохозяйственных растений.

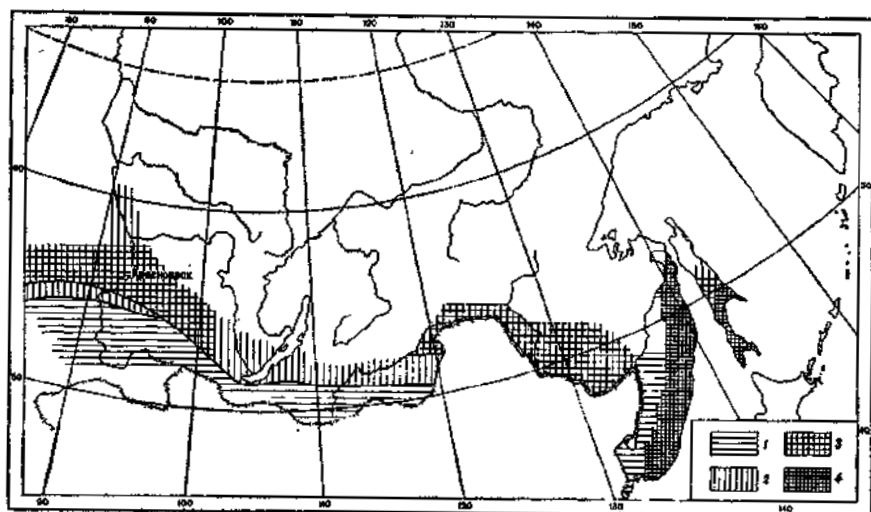
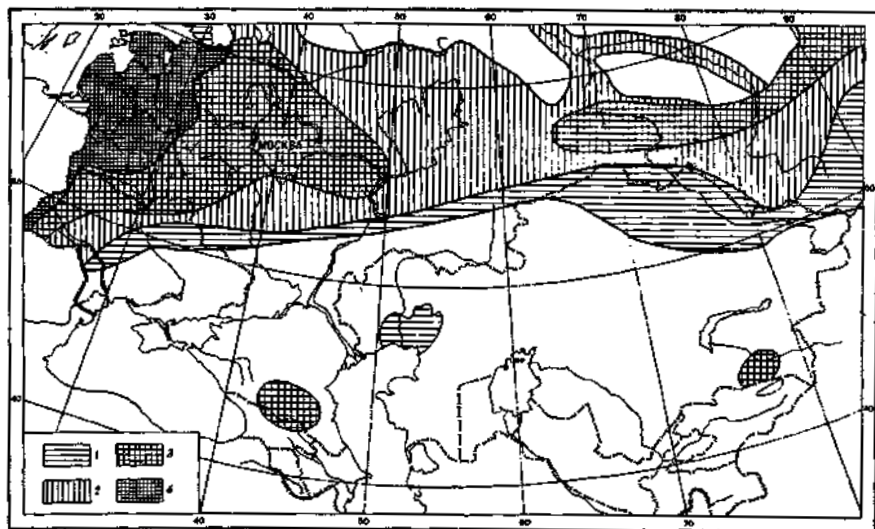


Рис. 17.87. Вероятность эпифитотий фитофтороза картофеля (Т.И. Захарова): 1 – менее 10 %; 2 – 26 %; 3 – 50 %; 4 – более 75 %

Таблица 17.18

Температурные показатели развития некоторых возбудителей болезней сельскохозяйственных культур (Макарова Л.А., Минкевич И.И., 1977)

Стадия развития возбудителя болезни растений	Температура, °С		
	нижний предел	оптимум	верхний предел
Бурая ржавчина пшеницы			
Прорастание спор	2	20	32
Развитие в тканях растения	2	25	35
Пыльная головня пшеницы			
Прорастание спор	4...5	22...30	–
Развитие спор	5	16...18	25...30
Фузариоз колоса пшеницы			
Развитие спор	7...10	25...30	37...38
Спороношение	< 10	24...26	До 40
Мильдю винограда			
Прорастание спор	–	10...15	–
Развитие в тканях растений	8	25	33
Фитофтороз картофеля			
Прорастание спор	6...8	10...15	20
Образование ростковых трубочек	4	25	30

Интенсивность распространения вредителей и болезней сельскохозяйственных культур зависит от сложившихся метеорологических условий, знания биологических особенностей растений, вредителей и возбудителей болезней. Эффективность борьбы с ними определяется своевременностью принятия хозяйственных решений, экологически грамотным использованием ядохимикатов по подавлению популяций вредителей и очагов возникновения болезней (выбор пестицидов и гербицидов, сроки и нормы их внесения). Значительную помощь в этом могут оказать оперативные агрометеорологические прогнозы сроков развития и распространения вредителей и болезней, основанные на комплексных знаниях биологии и экологии названных объектов.

Знание влияния экологических (зоометеорологических) факторов на развитие, и размножение вредителей и болезней сельскохозяйственных растений является основой для деятельности специализированных служб защиты растений.

Для эффективной защиты растений необходима разработка научно обоснованных методов оценок и прогнозов их распространения, динамики численности и уровня потенциального ущерба. Специалисты-энтомологи и агрометеорологи рассматривают три научных аспекта для разработки этой проблемы:

- научное обоснование сезонного и годового прогноза распространения вредителей и болезней сельскохозяйственных культур по основным территориям их возделывания;

– разработка критериев сезонного и годового прогноза развития вредителей-насекомых по отдельным ареалам их распространения; разработка методов оценки опасности (вероятности) развития вредителей и прогноза сроков их массового размножения, а также интенсивности их распространения;

– определение сроков борьбы (сроков и норм внесения ядохимикатов) в случае целесообразного, узконаправленного химического подавления популяций без нанесения экологического ущерба полезным насекомым и другим животным, обитающим на конкретной территории.

Негативным процессам распространения вредителей и болезней сельскохозяйственных культур должна быть противопоставлена интегрированная защита растений, являющаяся одним из элементов технологии сельскохозяйственного производства. В систему мероприятий по защите растений должны входить не только мероприятия по подавлению популяций вредителей возделываемых культур, но и предупреждение (прогноз) сроков их массового появления, определение масштабов распространения вредителей и болезней.

Известно, что в нашей стране особые полномочия предоставлены также государственным и местным карантинным службам по контролю заражения вредителями и болезнями сельскохозяйственной продукции при ее перемещении из одних стран в другие, а также на межрегиональном уровне.

ЧАСТЬ IV

НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ И ОПАСНЫЕ ПОГОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Из года в год засухи, морозы, бесснежье, суховеи, помоха⁷,
градобития и другие атмосферные невзгоды губят
наши нивы и приносят неисчислимые убытки нашему
хозяйству...Засухи и морозы продолжают свое
губительное дело, по-прежнему унося из государственного
бюджета десятки и сотни миллионов рублей, разрушая
надежды хозяев и подрывая веру в науку.*

Проф. П.И. Броунов (из доклада на Первом метеорологическом
съезде при Императорской Академии Наук.
Санкт-Петербург, 25 января 1900 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Территория Российской Федерации и сопредельных Стран Независимых Государств (СНГ) охватывает различные природные (почвенно-климатические) зоны от холодных – тундры и лесотундры на севере до знойных и засушливых полупустынь и пустынь – на юге. На этих огромных равнинных, горных и высокогорных просторах, характеризующихся большим разнообразием климатических условий, развиваются различные сезонные сценарии погодных условий, оказывающие влияние на хозяйственную деятельность людей, включая сельскохозяйственное производство. В экстремальных случаях гидрометеорологические условия могут быть опасными не только для хозяйственной деятельности людей, но и для их жизни.

Гидрометеорологические явления (или комплексы гидрометеорологических величин), которые по своему значению, интенсивности, продолжительности, охвату территорий или времени возникновения представляют угрозу безопасности людей или могут нанести значительный ущерб различным отраслям экономики, в системе Гидрометеорологической службы России называются *опасными природными (гидрометеорологическими и гелиогеофизическими) явлениями (ОЯ)*. Ранее они уже назывались опасными явлениями (ОЯ), затем – особо опасными явлениями (ООЯ), потом стихийными гидрометеорологическими явлениями (СГЯ).

⁷ *Помоха* – это волжское слово, означающее мглу, туман, росу, вредящие хлебным посевам. От помохи бывает пустоколосье. В общем смысле – *вред, бедственный случай* (В.И. Даль).

Известно более 20 видов опасных гидрометеорологических явлений. К их числу относятся: весеннее половодье, заморозки, засухи, суховеи, экстремально высокие температуры, пыльные бури, ураганы, шквалистые ветры, смерчи, град; длительные осадки, интенсивные ливни и грозы, вызывающие переувлажнение почвы на равнине и селевые потоки в горных районах; сильные и продолжительные снегопады, снежные лавины, туманы, длительные оттепели, гололед, изморозь, бесснежье при экстремально низких температурах и др. Гидрометеорологическое явление считается опасным, если при его возникновении оказывается необходимым принимать специальные меры (меры предупреждения, борьбы) для смягчения или предотвращения негативного влияния на отрасли экономики.

Статистический анализ стихийных бедствий только за десятилетний период (1992...2001 гг.) показал, что около 90 % всех стихийных бедствий на территории России имели метеорологическое или гидрологическое происхождение. Количество отрицательных последствий бедствий, связанных с водой, климатом и погодой, в последние годы продолжает увеличиваться. За это десятилетие потери от гидрометеорологических опасных явлений были оценены в 446 млрд. долларов США, что составило 65 % от суммарного ущерба в результате всех стихийных бедствий на планете. Экономические потери от ОЯ возрастают от года к году.

По экспертным оценкам, в России средние годовые экономические потери за период с 1995 по 2003 г., обусловленные гидрометеорологическими причинами, превышают 60 млрд руб. (Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Хондожко Л.А, Шаймарданов М.З., 2007). Это наглядно подтверждает рис. 1, на котором приведено распределение суммарного числа случаев ОЯ и неблагоприятных условий погоды (НУП) за 1991...2005 гг. для различных отраслей экономики в России.

Критерии опасных природных (гидрометеорологических) явлений – это количественные значения гидрометеорологических величин либо их качественные характеристики, при достижении которых стихийное гидрометеорологическое явление следует считать опасным. Обычно такие критерии устанавливаются применительно не только к определенным территориям, но и к конкретным отраслям экономики и объектам, например, сельскохозяйственным культурам, видам и породам животных и т.п. Некоторые примеры, относящиеся к критериям опасных агрометеорологических условий для различных сельскохозяйственных культур, выращиваемых в Российской Федерации, приведены в разделе 19.6.

Гидрометеорологические явления и величины, не достигающие критериев опасных явлений, но затрудняющие деятельность различных отраслей экономики и конкретных предприятий, относятся к *неблагоприятным условиям погоды (НУП)*. В агрометеорологии к этим явлениям относят такие, которые, не достигая критериев ОЯ, оказывают угнетающее

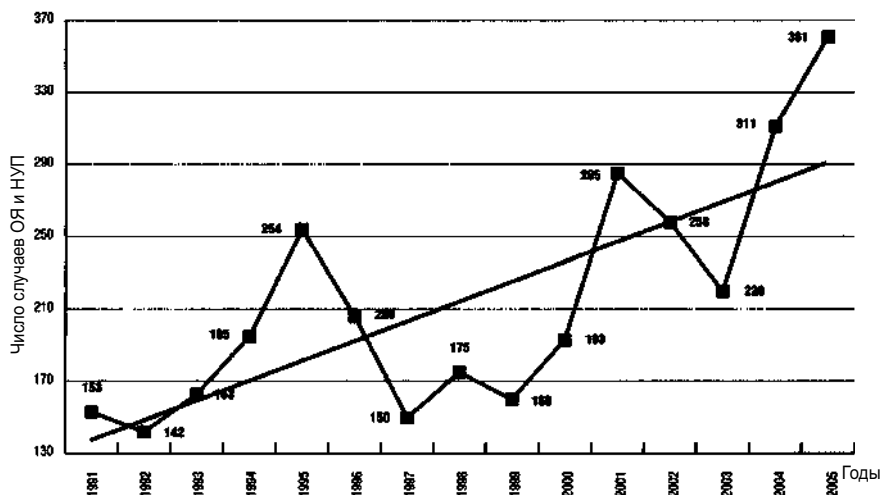


Рис. 1. Распределение суммарного числа случаев ОЯ и НУП, нанесших социальный и экономический ущерб в России за 1991–2005 годы

воздействие на состояние сельскохозяйственных культур или на сельскохозяйственных животных, находящихся на выпасе и затрудняют деятельность сельскохозяйственной отрасли или конкретных предприятий.

В последние годы появилось еще одно понятие – *комплексные неблагоприятные явления (КНЯ)*. К их числу относятся сочетания двух и более неблагоприятных явлений, например, засухой, характеризующийся тремя параметрами: температурой, влажностью воздуха и ветром. Критерии этого метеорологического комплекса описаны ниже при характеристике засухи. Еще пример: гроза, характеризующаяся сильным, иногда шквалистым ветром, осадками различной интенсивности, электрическими разрядами, являющимися известным источником возникновения пожаров и др.

Производственная и техногенная сферы экономики любой страны, в том числе и России, исторически формируются в конкретных природных условиях. Поэтому одним из важных аспектов влияния ОЯ на различные отрасли экономики является изучение и анализ *гидрометеорологической уязвимости (ГМУ)* отдельных территорий и производственных хозяйственных объектов. Это комплексное понятие (ГМУ) включает опасные и неблагоприятные гидрометеорологические характеристики (интенсивность и частота их проявления, территория охвата), а также экономические показатели (погодозависимость отрасли, масштабы хозяйственного объекта, степень его защищенности и уровень причиненного ущерба). Гидрометеорологическая уязвимость, выражаемая в

масштабах экономических потерь от воздействия ОЯ и НУП, обусловлена уровнем чувствительности производственного и хозяйственного объектов к неустойчивости и изменчивости погодных условий.

Анализ повторяемости крупных (по масштабу ущерба) опасных гидрометеорологических явлений в России показывает, что наиболее часто повторяются засухи – 50 % от общего числа лет с наблюдениями, наводнения и продолжительные дожди (25 %), сильные холода (17 %) и др., наносящие практически ежегодно значительный экономический ущерб отраслям экономики страны (Бедрицкий А.И., 1997).

К числу наиболее уязвимых отраслей экономики относятся сельское хозяйство, транспорт и жилищно-коммунальное хозяйство. Так, например, ежегодные экономические потери от воздействия ОЯ и НУП на сельскохозяйственное производство в России в 1991...2003 гг. имеют тенденцию к росту и выражаются миллионами рублей (рис. 2).

Критерии, содержание и форма подачи сообщения об ОЯ и НУП устанавливаются территориальными и республиканскими управлениями по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС Росгидромета) по согласованию с потребителями информации с учетом требований действующих нормативных документов (РД 52.04.563–96). На основании этого документа в УГМС Росгидромета разрабатывают (или уточняют) перечень ОЯ с учетом местных природных особенностей и функционирующих отраслей экономики.

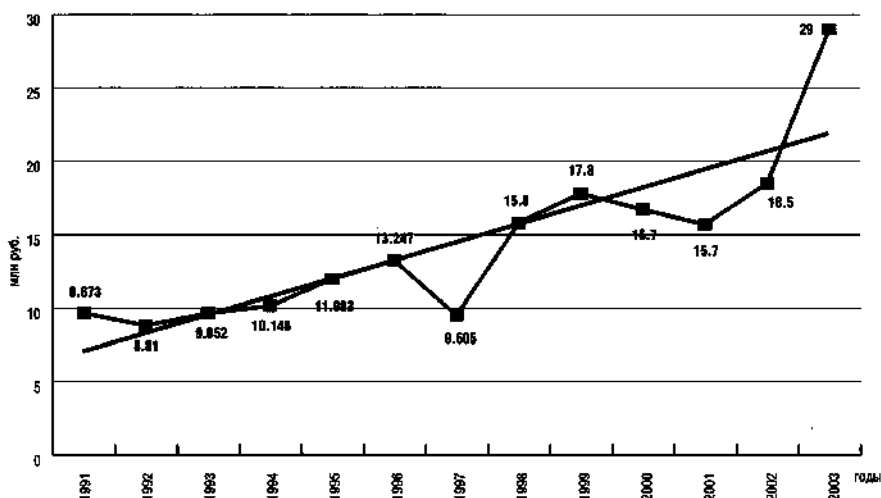


Рис. 2. Экономические потери в сельском хозяйстве от воздействия ОЯ и НУП

В системе Росгидромета составлен *типовой перечень* опасных явлений для различных отраслей экономики, приведенный в нормативном документе «Порядок действий организаций и учреждений Росгидромета при возникновении опасных природных (гидрометеорологических и гелиогеофизических) явлений», (СПб., Гидрометеиздат, 2000). В этом документе регламентирована система доведения оперативной гидрометеорологической информации о возникновении опасных гидрометеорологических и гелиогеофизических явлений до руководящих органов в стране, регионе, области, крае, а до населения – по широкоэвещательным каналам радио и телевидения.

Опасные гидрометеорологические явления фиксируются на сети гидрометеорологических станций и в установленном режиме передаются в гидрометеорологические центры, откуда такая информация поступает в базы данных (БД), формирующиеся в Государственном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) Росгидромета, в г. Обнинске (Калужская область).

Все опасные гидрометеорологические явления подразделяются на группы: *метеорологические, агрометеорологические, гидрологические и морские* (Порядок действий..., 2000). Основную группу ОЯ (по разнообразию явлений) составляют метеорологические явления (75 %), около 15 % – гидрологические и около 10 % – агрометеорологические явления. Естественно, что и гидрологические, и агрометеорологические ОЯ обусловлены характером метеорологических условий. Анализ распределения ОЯ по территории Российской Федерации за 1991...2000 гг. показал, что более половины (52 %) всех опасных гидрометеорологических явлений отмечалось на европейской части страны, 48 % – на Азиатской территории (Бедрицкий А.И. и др., 2001). За этот период общее количество опасных явлений по годам варьировало от 142 (1992 г.) до 254 (1995 г.), причем годовой ход среднемесячного числа ОЯ характеризуется минимумом явлений в марте и октябре, и максимумом – в мае и декабре.

На рис. 3 в качестве примера приведено распределение количества ОЯ и КНЯ на территории Российской Федерации по месяцам в 2007 г. (верхняя кривая – общее число ОЯ и КНЯ, равное 435, а нижняя кривая – число не предсказанных явлений, составившее 61 или 14 %). В 2007 г. было отмечено 436 опасных явлений, их предупрежденность составила 86 %.

Несмотря на ограниченность сведений о потерях в экономике по гидрометеорологическим причинам, по оценкам, полученным за 1986–1991 гг., распределение ущерба по основным отраслям экономики представлено в табл.

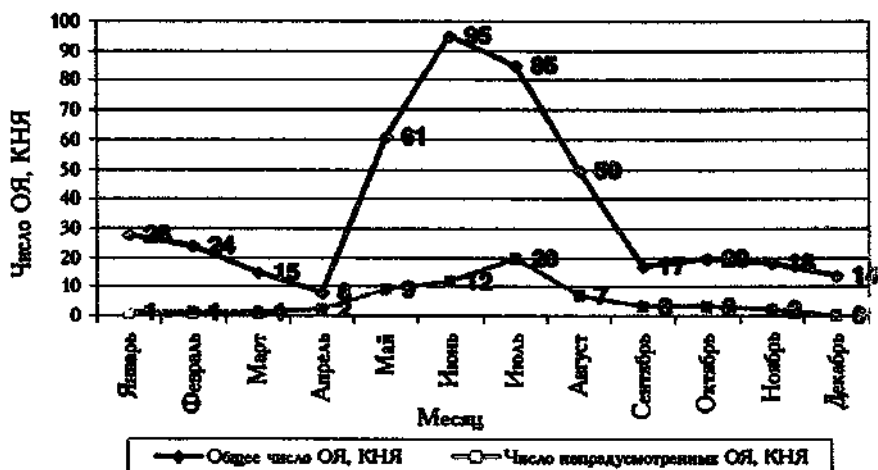


Рис. 3. Распределение ОЯ, КНЯ по месяцам в 2007 году

Таблица

Суммарный экономический ущерб от опасных гидрометеорологических явлений в 1986–1991 гг. в разных областях экономики (Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Шаймарданов М.З., 1991)

Отрасли экономики	Общее число случаев ОЯ (1986–1991 гг.)	Ущерб (млрд руб)	Ранг
Сельское хозяйство	494	82,08	1
Топливо-энергетический комплекс	505	13,68	3
Жилищно-коммунальное хозяйство	304	12,24	4
Авто- и железнодорожный транспорт	606	11,52	2
Строительство	77	9,36	5
Лесное хозяйство	113	4,32	6

Согласно данным, приведенным в этой таблице, общие потери за 6 лет только по основным отраслям экономики составили 133 млрд руб. (в ценах 1991 г.) или 22,2 млрд руб. в среднем за каждый год. Наибольшие потери от всех видов ОЯ несет сельскохозяйственное производство.

В целом на территории Российской Федерации последнее десятилетие XX века характеризовалось чрезвычайно неустойчивой погодой. Наибольший ущерб отраслям экономики нанесли такие явления, как сильное наводнение, сильный ветер, ранние осенние и поздние весенние заморозки, засухи, обильные осадки.

Ранжировка отраслей экономики по размерам ущерба от ОЯ показывает, что наиболее «открытым» к условиям погоды, а следовательно, и наиболее подверженным влиянию неблагоприятных гидрометеорологических

факторов является сельскохозяйственное производство. Это объясняется тем, что сельскохозяйственный производственный цикл невозможно остановить при возникновении неблагоприятных условий погоды. В результате эта отрасль экономики несет наибольшие потери. В России агросфера более подвержена гидрометеорологическим воздействиям по сравнению с аграрно-развитыми странами, где высокая технологическая оснащенность обеспечивает устойчивость этой отрасли экономики в 3...4 раза больше российской.

Важнейшим путем снижения социально-экономических потерь в стране является усиление роли оперативной информационной деятельности системы Росгидромета, регулярного анализа зависимости развития экономики от условий погоды и создания новых, современных методов среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды.

Благодаря развитию системы специализированного гидрометеорологического обеспечения отраслей экономики, осуществляемого оперативными подразделениями Росгидромета, средний коэффициент предотвращенных потерь составляет в последние годы около 40 % от максимально возможных потерь или 23...24 млрд руб. Поэтому создаваемая информационно-прогностическая система, направленная на снижение уровня гидрометеорологической уязвимости (ГМУ) и обеспечение гидрометеорологической безопасности отраслей экономики в России, становится частью национальной безопасности России (Бедрицкий А.И. и др., 2007).

Тем не менее очевидна необходимость дальнейшего развития и совершенствования системы специализированного гидрометеорологического обеспечения наиболее погодозависимых отраслей экономики.

ГЛАВА 18

ХАРАКТЕРИСТИКА НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ И ОПАСНЫХ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТЕПЛОГО ПЕРИОДА ГОДА, ИХ ВЛИЯНИЕ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ КУЛЬТУРЫ И МЕРЫ ЗАЩИТЫ

Общеизвестно, что величина и качество продуктивности сельскохозяйственных культур широко варьирует от года к году под влиянием складывающихся агрометеорологических условий, от степени их благоприятности для возделываемых культур, особенно в критические периоды жизни растений. В годы неурожайные такие явления называют неблагоприятными для сельского хозяйства. Но нередко в такие годы они наносят серьезный ущерб растениеводству и животноводству и их относят к опасным метеорологическим явлениям. Опасные для сельскохозяйственного производства явления погоды (а в более широком понимании и климата) – понятия биоклиматические, поскольку они рассматриваются по реакции растений на погоду и характеризуются сопряженными агрометеорологическими (агроклиматическими) и биологическими показателями.

В агрометеорологии *особо опасными явлениями* считаются такие, которые по своей интенсивности, продолжительности воздействия, площади распространения или времени возникновения (например, в критический период жизни растений) могут нанести или наносят значительный ущерб сельскохозяйственным посевам. К агрометеорологическим явлениям, опасным для сельскохозяйственного производства в теплый период года относят: *заморозки, засухи, суховеи, пыльные бури, сильные ливни и град.*

18.1. Заморозки

Исследованиями природы заморозков и их влиянием на состояние и продуктивность сельскохозяйственных культур, включая плодово-ягодные, занимались многие ученые различных специальностей – метеорологи, агрометеорологи, агроклиматологи, биологи и др. (Сапожникова С.А., 1937–1954; Давитая Ф.Ф., 1948; Чудновский А.Ф., 1949; Гольцберг И.А., 1949, 1957, 1961; Ярославцев И.М., 1949; Берлянд М.Е., 1963; Коровин А.И., Мамаев Е.В., Мокиевский В.М., 1977; Коровин А.И., 1984; Зоидзе Е.К. и Овчаренко Л.И., 2000 и многие другие).

Заморозком называется кратковременное понижение температуры воздуха или поверхности почвы (травостоя) до 0 °С и ниже, наблюдаемое

ночью (вечером, утром) в вегетационный период на фоне положительных средних суточных температур воздуха. При заморозках на почве в метеорологических будках (стандартная высота размещения приборов 2 м) в это время может быть температура несколько выше 0 °С (до +2...+ 3 °С).

Заморозки обычно наблюдаются весной и осенью (в северных регионах и в высокогорьях даже летом) при антициклональной погоде, на гребнях повышенного атмосферного давления, при высоком эффективном излучении подстилающей поверхности и при слабом ветре.

Различные по интенсивности заморозки наблюдаются во всех районах сельскохозяйственной зоны страны. В зависимости от времени появления и степени интенсивности заморозки могут частично или существенно повредить сельскохозяйственные культуры, снизить или полностью уничтожить их урожай. Особенно опасны поздние весенние и ранние осенние заморозки, совпадающие с периодом активной вегетации растений, ограничивающие использование агроклиматических ресурсов вегетационного периода конкретной территории. Поэтому информация об интенсивности заморозков, о сроках их прекращения весной и возникновения осенью чрезвычайно важна. Эта информация также используется для оценки заморозкоопасности территории для принятия решений о размещении теплолюбивых культур, выбора сроков сева и уборки сельскохозяйственных культур, способов их защиты с целью снижения возможного ущерба от этого опасного явления природы. Заморозкам подвержены и субтропические районы, где зимние понижения температур носят характер заморозок умеренного пояса (Гольцберг И.А., 1961).

По *интенсивности* выделяют заморозки слабые, средние и сильные. *Слабыми заморозками* считаются понижения температуры деятельной поверхности не ниже -2 °С, когда температура воздуха при этом ≥ 0 °С. При *средних заморозках* температура поверхности земли опускается до -3...-4 °С и заморозок охватывает самые нижние, прилегающие к поверхности слои воздуха. При *сильных заморозках* температура снижается до -5 °С и охватывает приземный слой воздуха до высоты 1,5... 2 м; именно в этом слое находится большинство возделываемых полевых культур. Применительно к плодовым культурам под заморозком понимают аналогичное снижение температуры в слое воздуха на уровне крон.

По *длительности действия* различают заморозки: *продолжительные* (>12 ч), *средней продолжительности* (5...12 ч), *кратковременные* (<5 ч). Кратковременные заморозки растения переносят с меньшими повреждениями, чем продолжительные. В сомкнутых посевах повреждаются преимущественно верхние ярусы листьев и побегов.

По *характеру процессов*, вызывающих заморозки, и сопровождающих их погодных условий выделено три типа заморозков.

Адвективные заморозки возникают вследствие затора, вторжения (адвекции) холодных арктических масс воздуха обычно в результате перестройки сезонной циркуляции атмосферы. Название произошло от латинского слова адвекции (*advection* – доставка) – горизонтальный перенос воздуха и его свойств, например холода, тепла, водяного пара, запыленности и т.п.

При адвекции холода температуры ниже 0 °С отмечаются не только в приземном слое воздуха, но и могут распространяться до больших высот. Такие заморозки наблюдаются в начальный период весны или поздней осенью при общем низком уровне температуры, при плотной облачности и ветре. Они могут охватывать большие территории с продолжительностью несколько суток, в течение которых за счет дневных температур происходит постепенное прогревание холодных масс воздуха, обычно это 3...4 суток. Причем в начале наступления холодной волны температура ниже 0 °С может продержаться в течение суток и более. К концу периода вторжения холодного воздуха отрицательные температуры наблюдаются только в ночное время, повышаясь за счет постепенного дневного прогрева от ночи к ночи. Поэтому амплитуда суточного хода в такие дни, как правило, невелика, а разница между температурой воздуха на уровне метеорологической будки и у поверхности почвы незначительна.

Этот тип заморозков наименее опасен, поскольку озимые культуры еще не потеряли свою закалку холодного периода года или уже приобрели ее. Однако в отдельные годы осенью адвективные заморозки могут нанести непоправимый урон плодовым деревьям, у которых еще не завершилось сокодвижение в их проводящих сосудах. Разрыв последних вследствие образования ледяных кристаллов замерзшего клеточного сока приводит к гибели части или всей кроны дерева. Плодовые сады любого возраста и не укрытые на зиму виноградники в таких случаях не подлежат восстановлению, их выкорчевывают и закладывают новые плантации.

При адвективных заморозках влияние рельефа местности, состояние почвы, наличие растительности, близость водоемов проявляется слабее, чем при других типах заморозков, поскольку происходит заток больших холодных воздушных масс, проникающих повсеместно. Однако более заморозкоопасными становятся наветренные склоны и участки, открытые холодным ветрам. Наименее заморозкоопасными являются вершины и верхние части склонов, с которых охлажденный (и, следовательно, более тяжелый) воздух стекает вниз и заменяется более теплым. Средние части склонов в холмистой местности занимают по степени заморозкоопасности промежуточное положение, поскольку приток холодного воздуха уравнивается его стоком. Такие же условия заморозкоопасности создаются на равнинах или на обширных выровненных плато, или на широкой ровной долине.

В вогнутых формах рельефа (низины, котловины), а также на крупных лесных полянах продолжительность беззаморозкового периода заметно сокращается, а интенсивность заморозков увеличивается. На берегах крупных водоемов продолжительность беззаморозкового периода увеличивается на 25...35 суток, по сравнению с континентальными территориями.

Радиационные заморозки возникают в тихие ясные ночи при относительно низких среднесуточных температурах воздуха вследствие интенсивного излучения земной поверхности, охлаждения ее и прилегающего слоя воздуха до отрицательных температур. Этот тип заморозков называют в народе утренниками, поскольку они длятся в течение ночи, усиливаясь ко времени восхода Солнца.

Природа радиационных заморозков связана с охлаждением подстилающей поверхности – почвы и растительного покрова. Заморозки этого типа проявляются при ясном безоблачном небе, безветренной погоде и в первую очередь в местах, расположенных в понижениях рельефа, где создаются условия для застоя холодного воздуха. Поверхность почвы и прилегающий к ней нижний слой атмосферы в ночной период отдают тепло путем излучения. Величина отдачи энергии излучением зависит в основном от температуры поверхности почвы и в меньшей степени – от свойств самой почвы (Чудновский А.Ф., 1949). Это излучение несколько уменьшается от обратного излучения атмосферы, которое зависит от температуры воздуха, количества твердых и жидких примесей, водяного пара, углекислоты и поглощается земной поверхностью, снижая потери тепла почвой. Конечная отдача энергии почвой составляет, таким образом, разность между потерей тепла почвой излучением и приобретенным ею теплом, обратно излучаемым атмосферой. Эта разность называется *эффективным излучением*. Если разность температур между поверхностью почвы и более высокими слоями воздуха велика, что наблюдается, когда на высоте имеется холодный воздух, то и величина эффективного излучения значительна. Эффективное излучение также велико, когда обратное излучение атмосферы мало, а воздух свободен от различных примесей. При малой разнице температур между поверхностью почвы и прилегающим к ней воздухом эффективное излучение также мало.

Согласно А.Ф. Чудновскому (1949), земная поверхность (излучатель) и атмосфера (противоизлучатель) излучают по законам абсолютно черных тел, тогда

$$B = 8,26 \cdot 10^{-11} (T_z^4 - T_A^4), \quad (18.1)$$

где T_z и T_A – абсолютные температуры земли и атмосферы.

Данные эффективного излучения получают с помощью измерений специальными метеорологическими приборами *пиргеометрами* (от греч. *pyr* – огонь, *gē* – земля) системы К. Онгстрема, С.И. Савинова, Ю.Д. Янишевского и др. Тепловой режим земной поверхности в ночной период

складывается под влиянием нескольких факторов: теплопроводности воздуха, соприкасающегося с поверхностью почвы путем вертикального перемешивания (турбулентного обмена) (K); поступления тепла (Π) из внутренних, более нагретых слоев почвы, благодаря ее теплопроводности⁸; конденсации влаги (процесс обратный испарению), сопровождаемой выделением тепла на поверхности почвы (T). Таким образом, тепловое состояние земной поверхности, которое определяет ее температуру в случае равновесия (приход и расход тепла уравновешены) выражают уравнением баланса тепла:

$$B = K + \Pi + T. \quad (18.2)$$

Знания теплового баланса почвы используются при разработке различных методов борьбы с радиационными заморозками.

Следствием сильного ночного охлаждения воздуха у земной поверхности является формирование приземной *инверсии* температуры (от лат. – *inversion* – переворачивание; перестановка). При инверсии с высотой температура повышается в некотором слое воздуха, в то время как на поверхности почвы или сомкнутого травостоя холоднее, чем на высоте 2 м, в среднем на 2,5...3 °С; в условиях резко континентального климата (Сибирь, Казахстан, Средняя Азия) эта разница может достигать 4,0...4,5 °С. Наиболее низкая температура воздуха в безветренные и ясные ночи в большинстве случаев отмечается на высоте 2...5 см над поверхностью почвы. В сомкнутом травостое минимальные температуры наблюдаются на уровне верхнего яруса листьев, которые повреждаются заморозками в первую очередь. Сухие и разрыхленные почвы, и особенно осушенные торфяники, обладающие пониженной теплоемкостью и теплопроводностью, быстро охлаждаются, что создает благоприятные условия для возникновения заморозков на поверхности почвы. Ориентация склонов возвышенностей оказывает косвенное влияние на заморозкоопасность: на восточных и юго-восточных склонах растения сильнее повреждаются заморозками. Это объясняется быстрой сменой температуры замерзших тканей: после восхода солнца они быстро нагреваются солнечными лучами, из клеток, поврежденных кристаллами льда, влага попадает в межклеточное пространство, быстро испаряется; из-за дефицита влаги ткани растения сморщиваются, высыхают, что усиливает степень повреждения всего растения.

Интенсивность и продолжительность радиационных заморозков зависят от рельефа и характера подстилающей поверхности, влажности почвы и воздуха и других местных условий. Продолжительность их обычно ограничивается продолжительностью темного времени суток или немного больше, иногда до 8...12 часов. При ясной, безоблачной погоде

⁸ Теплопроводность почвы зависит от ряда ее физических свойств: механического состава, плотности, влажности, разрыхленности верхнего слоя и т.п.

заморозки могут наблюдаться каждую ночь в течение длительного периода. Появление облачности среднего и даже верхнего яруса снижает излучение земной поверхности, а следовательно, и процесс выхолаживания приземного слоя воздуха, благодаря чему заморозка может не быть. Холодный, более тяжелый воздух застаивается в понижениях рельефа и, если там размещены посевы сельскохозяйственных культур, плодовые насаждения, виноградники, заморозок поражает их, нанося ущерб не только состоянию растений, но и конечному урожаю. Размеры последнего зависят от интенсивности и продолжительности заморозка. В то же время на возвышениях и их склонах снижение температуры до уровня заморозка обычно не наблюдается. Радиационные заморозки чрезвычайно опасны для сельскохозяйственных культур.

Происхождение поздних весенних и ранних осенних заморозков связано с адвекцией холода, с последующим радиационным «выстыванием» занесенной холодной воздушной массы (Гольцберг И.А., 1961).

Адвективно-радиационные (смешанные) заморозки возникают в результате вторжения холодных масс воздуха на конкретную территорию и последующего ночного выхолаживания приземного слоя воздуха до отрицательных температур вследствие излучения подстилающей поверхности. Таким образом, адвекция холода и радиационное выхолаживание проявляются в этом типе заморозков в комплексе. Заморозки подобного типа наблюдаются обычно в конце весны и даже в начале лета, а также ранней осенью в результате холодных вторжений арктического воздуха. Эти сроки совпадают с вегетационным периодом сельскохозяйственных культур, поэтому опасность нанесения ущерба посевам велика, хотя почва и растительный покров еще достаточно прогреты.

Заморозок обычно возникает в ночные часы, главным образом перед восходом солнца, его продолжительность чаще всего не превышает 3...4 ч, а интенсивность, как правило, около $-2...-3$ °C. Отмечаются они обычно на поверхности почвы или травостоя, но могут наблюдаться только в приземном слое воздуха. В таких случаях температура на поверхности почвы и в метеорологической будке положительна, а теплолюбивые растения повреждаются заморозком. Это, так называемые, «скрытые» заморозки, когда приборы, установленные в метеорологической будке и на поверхности почвы, не регистрируют отрицательных температур, а теплолюбивые культуры повреждаются заморозком. Такое явление объясняется тем, что лежащий на поверхности почвы резервуар минимального термометра, наполовину присыпанный почвой, получает «дополнительное тепло» из ее нижележащих слоев; поэтому температура поверхности почвы фиксируется термометром более высокой, чем фактическая, и оказывается выше 0 °C.

Заморозки на поверхности почвы заканчиваются весной позже, осенью начинаются раньше, чем в воздухе на уровне метеорологической

будки, вследствие чего беззаморозковый период на почве оказывается короче на 20...30 суток, чем в воздухе на высоте 2 м.

При радиационных и адвективно-радиационных заморозках микроклиматические различия выявляются весьма четко. На выровненных территориях они определяются различными условиями излучения, образующимися вследствие разнообразия свойств подстилающей поверхности (различия в плотности и влажности почвы, ее окраске, характере и степени покрытия почвы растительностью и т.п.). Это приводит к большому разнообразию в интенсивности излучения отдельных участков поверхности и к пестроте в распределении заморозков по территории.

Заметное «средообразующее» влияние на интенсивность и продолжительность заморозков оказывает рельеф местности, а также степень ее облесенности, наличие крупных водных поверхностей или других физико-географических особенностей территории. В условиях пересеченного рельефа – холмистого или горного – к этим особенностям ночного излучения различной подстилающей поверхности прибавляются условия стока или подтока холодного воздуха на склонах, зависящие от площади «воздухосбора». Чем больше площадь склонов, с которых стекает в долину охлажденный воздух, тем интенсивнее и чаще заморозки в такой долине.

Средние условия заморозкоопасности создаются при отсутствии выраженного притока и стока охлажденного воздуха со стороны больших, выровненных площадей (порядка 1...2 км² и более), которые могут располагаться на равнине, на плато, обширной плоской вершине или в широкой выровненной долине. До средней части дна сток холодного воздуха со склонов уже не доходит. Все эти местоположения по своим количественным показателям обычно определяются по материалам наблюдений и микроклиматических съемок, выполняемых сотрудниками ближайшей метеорологической станции.

Например, на возвышающихся формах рельефа (вершины холмов, верхние и средние части склонов) продолжительность беззаморозкового периода возрастает (на 5...25 суток), а на вогнутых формах рельефа (котловины, замкнутые, широкие и плоские долины и т.п.) – значительно сокращается (на 15...30 суток) по сравнению с открытой ровной местностью (табл. 18.1).

Приведенные в таблице 18.1 изменения средней продолжительности беззаморозкового периода показывают величину поправок, которые следует вносить в данные, снятые с карт, составленных для равнинных территорий И.А. Гольцберг (1961).

Таблица 18.1

**Заморозкоопасность отдельных форм рельефа в тихие ясные ночи
(Гольцберг И.А, 1961).**

Формы рельефа	Холодный воздух		Изменения по сравнению с равниной	
	Приток	Сток	$T_{\min}$ °С за ночь весной и осенью	Число суток без заморозков
Вершины, верхние и средние части склонов ($\geq 10^{\circ}\text{C}$)	нет	хороший	3...5	15...25
То же, но менее 10°C	нет	есть	1...3	5...15
Равнины, плоские вершины, дно широких и открытых долин	нет	нет	0	0
Долины больших рек, берега водоемов	есть	есть	2...4	10...20
Дно и нижние части склонов не широких, извилистых долин	есть	почти нет	-3...-5	-15...-25
Котловины	есть	нет	-4...-6 и более	-20...-30 и более
Замкнутые широкие и плоские долины	есть	почти нет	-4...-6 и более	-20...-30 и более
Сырые низины	нет	нет	-3...-6	-15...-30

Примечание. Положительная поправка означает увеличение продолжительности беззаморозкового периода, а отрицательная – его сокращение по сравнению с продолжительностью на средней части склона или на выровненной территории.

18.1.1. Географическое распространение заморозков и их вероятность

На территории России и сопредельных стран СНГ время прекращения заморозков весной и наступления их осенью от года к году весьма изменчиво. Отметим, что *беззаморозковым периодом* называется время (в сутках), ограниченное средними многолетними датами последнего весеннего и первого осеннего заморозков. По времени наступления заморозков территорию России и сопредельных государств условно подразделяют на три зоны: 1) холодную, 2) умеренную, 3) теплую (с теплой зимой). На севере России нет четко выделенного беззаморозкового периода, разделяющего весение и осенние заморозки, поскольку последние возможны здесь даже в летние месяцы. Эта *холодная зона* простирается от северных границ государства до условной линии, отделяющей территорию со средней продолжительностью беззаморозкового периода более 85...90 суток.

Умеренная зона, где размещаются основные площади земледелия, характеризуется разграничением весенних и осенних заморозков. Средняя продолжительность беззаморозкового периода изменяется от 85...90 суток на севере до 270...280 суток на юге. В северных и восточных районах этой зоны (Нечерноземная зона России, Северный и Восточный Казахстан) опасные заморозки вероятны как в начале, так и в конце

сравнительно короткого вегетационного периода. В южных районах второй зоны опасные заморозки возможны лишь в начале вегетационного периода.

В *третьей зоне* с теплой зимой (субтропические районы) в условиях относительно теплых зимних месяцев заморозки развиваются только на фоне отдельных волн адвекции холода. В зимний период там отсутствует четкое разграничение между весенними и осенними заморозками. Продолжительность беззаморозкового периода составляет в среднем 270...300 суток (Чирков Ю.И., 1986).

Знание продолжительности беззаморозкового периода необходимо при определении возможности выращивания теплолюбивых культур на определенной территории. В пределах конкретного календарного года продолжительность беззаморозкового периода может отличаться от его средней многолетней продолжительности.

Заморозки различаются по длительности, интенсивности, повторяемости, по степени опасности для различных сельскохозяйственных культур. Наиболее детальные исследования явления заморозков на территории бывшего СССР были выполнены проф. И.А. Гольцберг.

Географическое распределение средних дат окончания весенних заморозков (или начала беззаморозкового периода) на территории России и сопредельных стран представлены на рис.18.1; распределение средних дат начала осенних заморозков (или окончания беззаморозкового периода) – на рис.18.2. Средняя продолжительность беззаморозкового периода (минимальная температура выше 0 °С в метеорологической будке, на ровном, открытом месте) представлена на рис. 18.3.

Изохроны – линии, соединяющие на карте точки с датами одновременного наступления явления (в данном случае – заморозка), характеризуют средние условия в основном равнинных территорий. На Европейской части страны средняя дата прекращения заморозков весной почти равномерно перемещается с юга на север от начала апреля до середины июня. Раньше всего заканчиваются заморозки на Черноморском побережье Кавказа – в конце февраля, беззаморозковый период превышает здесь 300 суток. В северных областях Казахстана, в Восточной Сибири, в средней полосе России и в Северо-Западном ее регионе весенние заморозки прекращаются во второй половине мая – в начале июня, а беззаморозковый период составляет 90...120 суток.

Осенние заморозки на юге страны начинаются в начале ноября (на Черноморском побережье Кавказа – в начале декабря), в северных земледельческих районах Европейской территории страны и в Восточной Сибири – в конце августа. Почти широтное направление изохрон средних дат прекращения и начала заморозков «нарушается» на западе Европейской части страны и в районах, прилегающих к Балтийскому морю, где заморозки весной прекращаются раньше, а осенью начинаются позже под влиянием

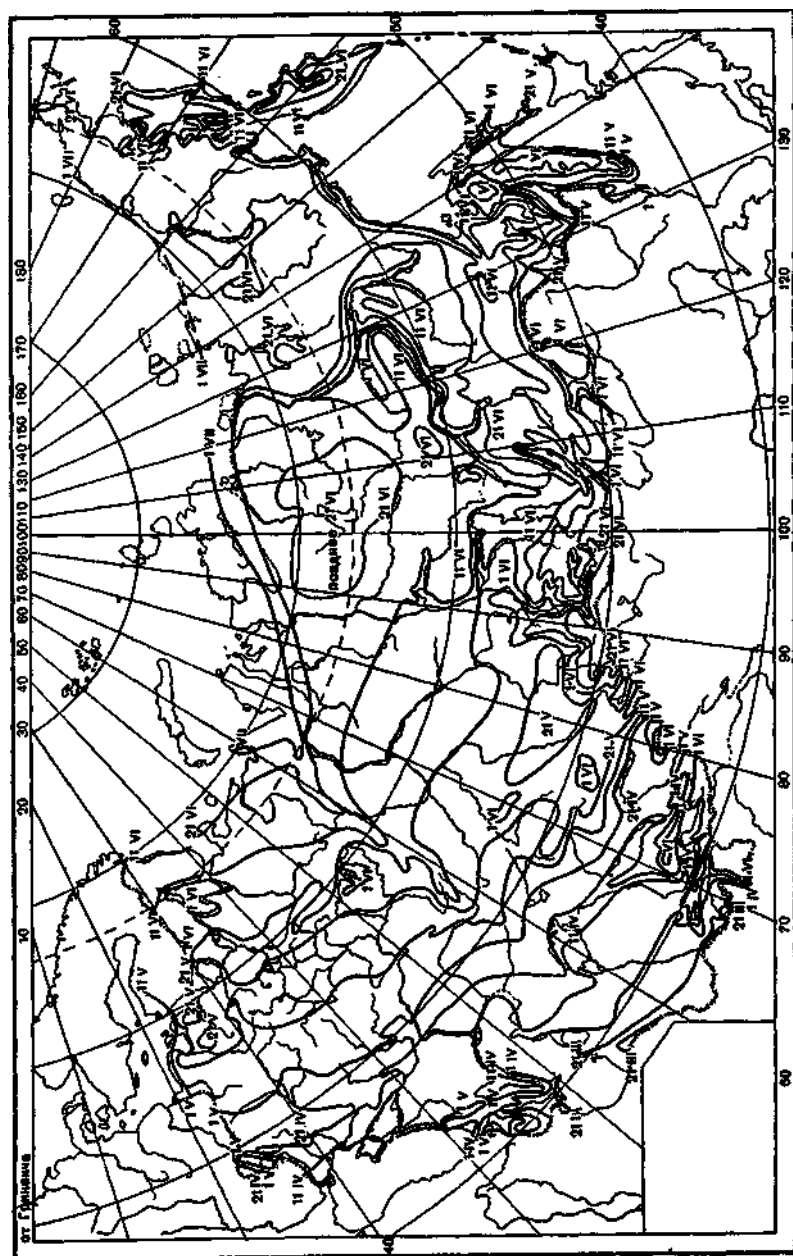


Рис. 18.1. Средняя дата начала безморозкового периода (минимальная температура 0°C и ниже в метеорологической будке на ровном открытом месте)

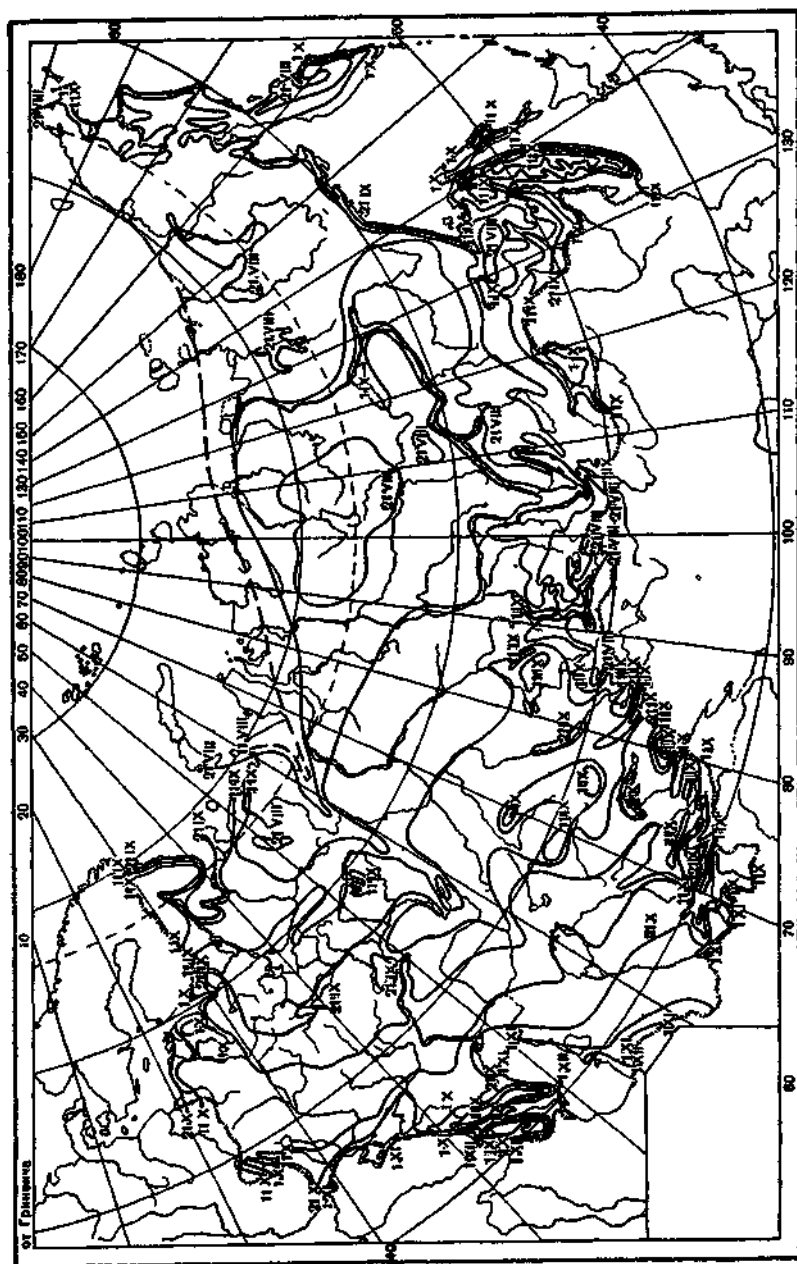


Рис. 18.2. Средняя дата конца безморозкового периода (минимальная температура 0°C и ниже в метеорологической будке на ровном открытом месте)

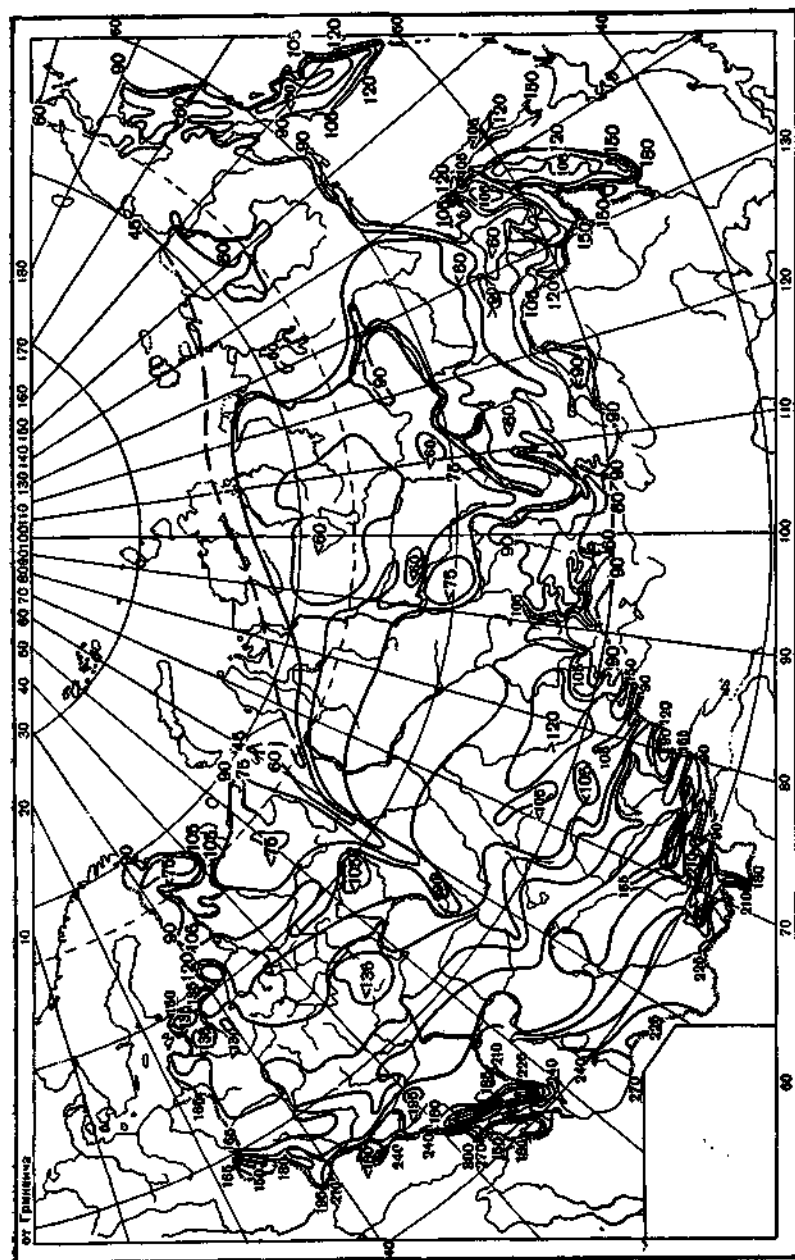


Рис. 18.3. Средняя продолжительность безморозного периода в сутках (минимальная температура выше 0 °С в метеорологической будке на ровном открытом месте)

более теплых воздушных масс, поступающих с запада и юго-запада. Нарушение принципа «широтности» изолиний наблюдается также на Северном Кавказе, Урале, в Республиках Средней Азии и в Восточной Сибири за счет влияния на даты начала и окончания заморозков горных систем (сложность рельефа, высота над уровнем моря, различные экспозиции склонов и т.п.).

В горных районах конфигурация изохрон дат заморозков в значительной мере повторяет конфигурацию *изогилс* – линий, соединяющих на карте точки с одинаковой абсолютной высотой над уровнем моря и в совокупности отражающих рельеф местности. В горах весенние заморозки оканчиваются в среднем на 2...4 суток позднее, а осенние наступают на 2...3 суток раньше на каждые 100 м относительной высоты подъема.

Заморозки заканчиваются и начинаются в различных районах земледельческой зоны при разных уровнях средней суточной температуры воздуха. Весной в западных районах России заморозки обычно прекращаются до устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 10 °С, поэтому их опасность для плодовых и теплолюбивых культур незначительна. В континентальных районах заморозки отмечаются после установления средней суточной температуры воздуха выше 10 °С, т. е. в период активной вегетации растений, потери их зимней закалки, в связи с чем заморозки там чрезвычайно опасны для плодовых культур и сельскохозяйственных посевов. Особенно заморозкоопасны земледельческие районы Северного Кавказа и Восточной Сибири, где в отдельные годы могут повреждаться поздние посевы зерновых культур в период их молочной спелости.

В различные годы заморозки прекращаются или начинаются раньше или позже их средней многолетней даты. Для оценки степени заморозкоопасности территории пользуются специальными таблицами, с помощью которых рассчитываются вероятности их прекращения и начала (табл. 18.2).

Таблица 18.2

Примеры различной вероятности дат последнего заморозка весной в Московской области (Чирков Ю.И., 1979)

Средняя дата	Вероятность (%) окончания заморозка в указанные даты и более поздние сроки							Самая поздняя дата
	95	90	75	50	25	10	5	
В воздухе (2 м)								
01.05	08.04	12.04	21.04	01.05	10.05	19.05	23.05	12.06
06.05	13.04	17.04	26.04	06.05	15.05	24.05	28.05	15.06
11.05	18.04	22.04	01.05	11.05	20.05	29.05	02.06	15.06
На почве								
17.05	25.04	30.04	07.05	17.05	24.05	28.05	01.06	18.06
20.05	28.04	03.05	10.05	20.05	27.05	01.06	03.06	20.06
26.05	04.05	09.05	16.05	26.05	02.06	07.06	09.06	22.06

Для осени рассчитывают аналогичные таблицы вероятности начала заморозков. Даты о вероятности прекращения весенних или начала осенних заморозков различной интенсивности рассчитывают также по специальным графикам (рис. 18.4).

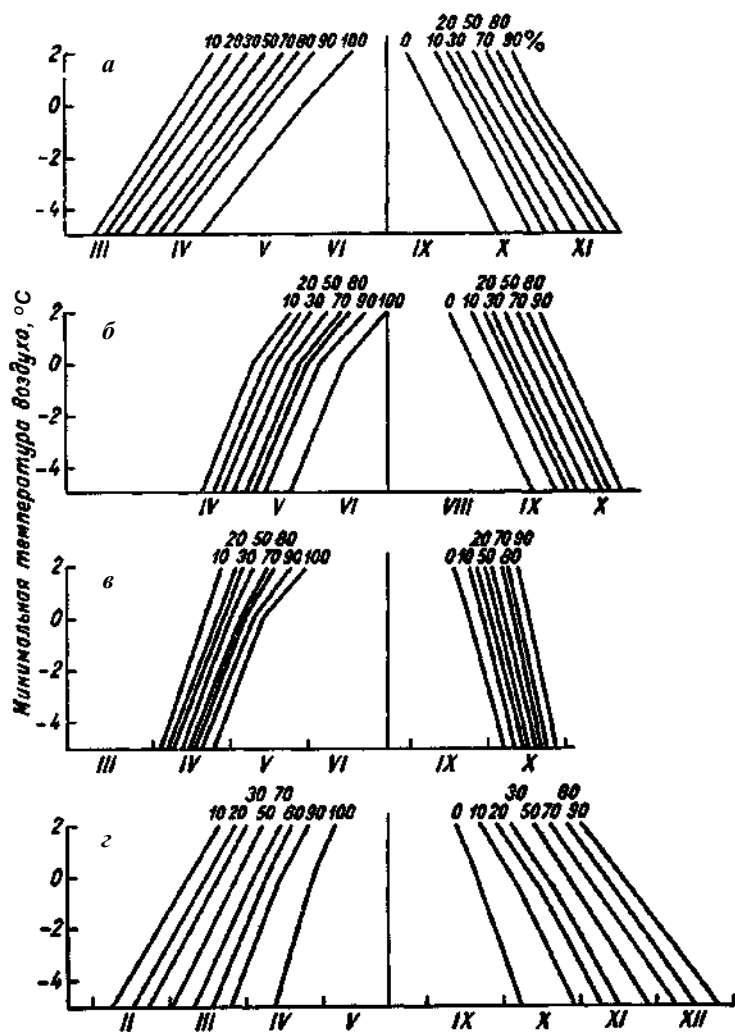


Рис. 18.4. Вероятность заморозков разной интенсивности в разных частях России и сопредельных странах:

a – Полесье, *б* – Западная Сибирь (район г. Павлодара), *в* – Дальний Восток (район г. Уссурийска), *г* – Средняя Азия (район г. Мары)

Для характеристики заморозкоопасности территории используют следующие показатели: дату последнего весеннего и первого осеннего заморозка в воздухе и на поверхности почвы различной интенсивности; продолжительность заморозкоопасного периода различной интенсивности весной и осенью в воздухе и на поверхности почвы; вероятность лет (%) с заморозками различной интенсивности в воздухе и на поверхности почвы, число дней с заморозками различной интенсивности в воздухе и на поверхности почвы весной и осенью. Даты последнего весеннего и первого осеннего заморозков различной интенсивности выражены в виде средних, самых ранних и самых поздних дат, зафиксированных на сети станций за период с 1936 по 1985 год.

Исследованиями агроклиматологов (Зоидзе Е.К., Овчаренко Л.И., 2000) было выявлено, что наибольшей информативностью о заморозкоопасности территории Российской Федерации обладает показатель «вероятность лет (%) с заморозками в воздухе за апрель...октябрь с интенсивностью от -2 до -5 °С». Этот показатель представляют не только в табличном, но и в картографическом виде. В качестве примера приведем рис. 18.5, на котором показана вероятность (%) лет с заморозками -3 °С и ниже на поверхности почвы в мае по территории всех субъектов РФ.

Как видно на этом рисунке, это явление возможно по всей территории России, но с различной степенью вероятности. На значительной территории страны вероятность таких заморозков весьма высока и превышает

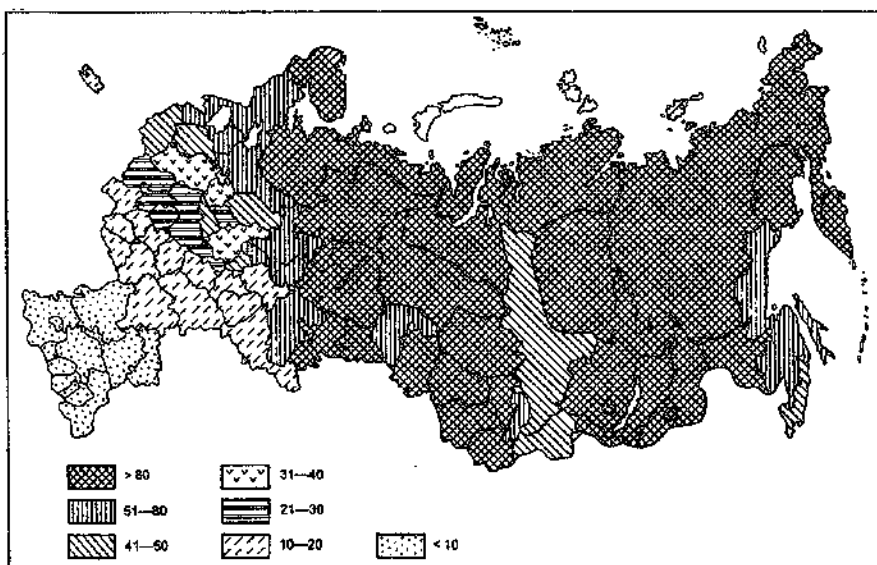


Рис. 18.5. Вероятность (%) лет с заморозками на поверхности почвы интенсивностью -3 °С и ниже в мае по субъектам РФ

30...40 %, что создает определенную угрозу сельскохозяйственному производству. Это связано с тем, что в мае вегетационный период уже наступил на большей части территории: на полях с посевами сельскохозяйственных культур наблюдаются всходы, а в садах – набухание почек и цветение различных видов и сортов плодовых культур. Используя эти данные, в каждом конкретном районе можно определить оптимальные сроки сева теплолюбивых культур, высадки рассады овощных культур в открытый грунт, выполнить подготовительные работы к защите от заморозков садов, а также рассчитать сроки уборки сельскохозяйственных культур. Расчеты проводятся по специальным эмпирическим графикам вероятности прекращения или начала заморозков различной интенсивности (см. рис. 18.4).

В различных источниках популярной литературы о сезонных (природных) явлениях обычно приводится широко распространенная в народе примета, по которой сроки наступления заморозка связывают с датой зацветания черемухи весной в южных и средних широтах России. Однако научное сопоставление средних многолетних дат зацветания черемухи по материалам фенологических наблюдений на сети станций и Фенологической комиссии Географического общества России со средними датами весенних заморозков показало, что это соотношение не остается постоянным на Европейской территории страны, изменяясь от положительной разности в 6...7 суток до отрицательной разности того же порядка в некоторых районах Сибири (Гольцберг И.А., 1961).

18.1.2. Влияние заморозков на сельскохозяйственные и плодовые культуры

Хорошо известно, что в зимнее время сельскохозяйственные культуры, своевременно прошедшие все стадии предзимней «закалки», выдерживают влияние весьма низких отрицательных температур (подробнее об этом рассказано в главе 19). С началом вегетации все зимующие растения по мере нарастания температуры воздуха и прогрева почвы теряют закалку и становятся особенно чувствительными к резкому понижению температуры окружающей среды. Их свойства морозоустойчивости и заморозкоустойчивости нивелируются, исчезают.

Большая работа по определению низких температур, повреждающих сельскохозяйственные культуры в полевых условиях во время заморозков, была выполнена в бывшем Агрогидрометеорологическом институте под руководством профессора Г.Т. Селянинова на агрометеорологических станциях в различных почвенно-климатических зонах СССР, а также на полевой станции Академии сельскохозяйственных наук им. К.А. Тимирязева в 30–40-е годы XX столетия (Степанов В.Н., 1948). Им составлена сводка по устойчивости 49 сельскохозяйственных культур к заморозкам в разные фазы их развития. При этом автор учитывал общее состояние растений,

режим питания, уровень «закалки», условия предшествующей погоды, влажность почвы и т.п. На основании многолетних наблюдений В.Н. Степанов выделил пять основных экологических групп полевых культур по степени устойчивости к заморозкам их вегетативных и генеративных органов.

Уровень критической температуры различен для разных культур. Все биологическое разнообразие сельскохозяйственных культур условно разделено на 5 групп по степени их естественной устойчивости к заморозкам в различные фазы развития при средней продолжительности заморозков 5...6 ч и в зависимости от микроклиматических условий окружающей среды (табл. 18.3). В таблице приведены некоторые данные о критических температурах в разные фазы развития основных сельскохозяйственных культур.

Таблица 18.3

Критические температуры воздуха (°C) для сельскохозяйственных культур в различные фазы их развития (Степанов В.Н., 1948 и др.)

Культура (различные сорта)	Критические температуры воздуха в различные фазы развития		
	Всходы	Цветение	Созревание
Наиболее устойчивые к заморозкам культуры			
Яровая пшеница	-9...-10	-1...-2	-2...-4
Овес	-8...-9	То же	То же
Ячмень, горох, чечевица, чина	-7...-8	-1...-3	-2...-4
Кориандр, мак, кок-сагыз	-7...-10	-2...-4	-2...-4
Устойчивые к заморозкам			
Люпин, вика яровая	-6...-7 (-8)	-3	-2...-4
Бобы, подсолнечник	-5...-6	-2...-3	-2...-3
Сафлор, горчица белая	-4...-6	То же	-3...-4
Лен, конопля	-5...-7	-//-	-2...-4
Свекла сахарная, свекла кормовая	-6...-7	-//-	—
Морковь, брюква, турнепс	То же	—	—
Капуста	-9...-10	—	—
Среднеустойчивые к заморозкам			
Люпин желтый	-4...-5	-2...-3	—
Соя, мого, канатник	-3...-4	-1...-2	-2...-3
Малоустойчивые к заморозкам			
Кукуруза, просо, суданская трава	-2...-3	-1...-2	-2...-3
Сорго	То же	То же	-3
Картофель, махорка	-//-	-//-	-1...-3
Неустойчивые к заморозкам			
Гречиха, фасоль	-1...-1,5 (-2)	-0,5... (-1)	-1,5...-2
Клещевина	-1...-2	-1	-2...-3
Хлопчатник, бахчевые, рис, кунжут, кенаф, арахис	-0,5...-1	-0,5...-1	-0,5...-1
Огурцы, томаты, табак	0,0...-1	0,0...-1	0,0...1

Как видно из данных этой таблицы, генеративные органы значительно чувствительнее к заморозкам и повреждаются слабыми, кратковременными понижениями температуры воздуха от 0 до -2°C. По этой причине автор не считал возможным выделять группы растений по их устойчивости к заморозкам в фазу цветения.

Для плодовых и ягодных культур заморозки особенно опасны в период цветения и образования завязей (табл. 18.4).

Таблица 18.4

Критические температуры повреждения заморозками некоторых плодовых и ягодных культур (по данным различных источников)

Культура	Части и органы растений, повреждаемые заморозком	Критическая температура, °C
Лимон	Дерево полностью	-9...-10
	Крона	-7...-8
	Листья	-6
Апельсин	Дерево полностью	-10...-11
	Крона	-8...-9
	Листья	-7
Мандарин	Дерево полностью	-12
	Крона	-10
	Листья	-8
Виноград (разные сорта)	Распустившиеся почки	-1
Яблоня, груша, вишня, слива (разные сорта)	Закрытые бутоны	-4
	Цветки	-2
	Плодовые завязи	-1
Черешня, абрикос, персик (разные сорта)	Бутоны и цветки	-2 (-3)
	Плодовые завязи	-1
Ягодники (малина, клубника)	Цветки и завязи	-2

Устойчивость растений к заморозкам и степень их повреждения зависят от многих факторов. Это время наступления, интенсивность и продолжительность заморозка, вид, сорт и фаза развития растений, условия выращивания, скорость оттаивания тканей растений, поврежденных заморозком и т. п.

Заморозкоустойчивостью называется устойчивость растений к отрицательным температурам, наблюдаемым в теплый период года. Именно в поздний весенний, летний или ранний осенний периоды вегетации растения в процессе роста и развития утрачивают приобретенную в холодные месяцы устойчивость к низким температурам.

В начальный период роста растения наиболее устойчивы к заморозкам, поскольку еще сохраняется их «закалка» к низким температурам. Напомним, что *закаливанием растений* называется процесс повышения их морозоустойчивости (холодоустойчивости) в условиях постепенного снижения температуры окружающей среды, сокращения продолжительности светового дня, когда останавливаются ростовые процессы в тканях

растений. Слабые заморозки в этот период мало сказываются на будущем урожае. Поздние весенние заморозки, когда заморозкоустойчивость растений снижена или полностью потеряна, вызывают их замедленное развитие, что снижает конечный урожай на 10...15 %. Наиболее опасны заморозки в период цветения и созревания, поскольку генеративные органы растений наименее устойчивы к заморозкам: их повреждение наступает при температурах несколько ниже 0 °С. Кратковременные заморозки растения переносят с меньшими повреждениями, чем длительные.

В агрометеорологии широко используется понятие *критическая температура растений* – это пороговое значение температуры окружающей среды, ниже которого наступает гибель растения. Впервые эта особенность реакции большинства сельскохозяйственных культур на низкие температуры была выявлена проф. П.И. Броуновым в конце XIX столетия. В более широком понимании это явление обобщено в законе критических периодов в жизни растений. В основу закона положено понятие *критический период* – временной промежуток биологического цикла (обычно вегетационного периода), в течение которого растениям присуща максимальная чувствительность к фактору, находящемуся в минимуме, например почвенная засуха в фазы кущения, выхода в трубку или молочно-восковой спелости зерна у злаков. Эти понятия опираются на экспериментально установленные количественные параметры окружающей среды, к которым растения особо чувствительны в отдельные периоды онтогенеза (солнечная радиация, продолжительность светового дня, температурный и влажностный режимы и т.п.). Например, для большинства сортов озимой пшеницы критическая температура почвы зимой на глубине узла кущения колеблется от -14 до -20 °С в зависимости от условий «закалки», для озимой ржи – от -20 до -30 °С, для клевера – от -10 до -20 °С. После интенсивных оттепелей критическая температура озимых культур повышается, а в случаях возврата холодов растения погибают при менее низких температурах, чем до утраты «закалки». Отдельные части растений имеют различную морозоустойчивость, поэтому характер повреждения растения определяется интенсивностью заморозка (см. табл. 18.3 и 18.4).

Специалистами замечено, что степень заморозкоустойчивости культур в определенной мере зависит и от условий погоды. Например, цветки растений, раскрывающиеся в прохладную погоду, становятся более стойкими в случае наступления заморозков, поскольку их критическая температура оказывается на 1...3 °С более низкой, чем у цветков, распустившихся при более высокой температуре воздуха. Этот эффект связан с закаливающим, адаптационным действием не только пониженных температур, но и влиянием амплитуды суточных колебаний температуры в период до наступления заморозка: чем больше амплитуда, тем выше

степень закаливания и тем меньше ущерб для будущего урожая. На степень повреждения растений заморозками оказывает влияние и вид минерального удобрения. Азотные удобрения снижают устойчивость к заморозкам у большинства сельскохозяйственных культур, но у бобовых – повышают. Обильное калийное питание повышает устойчивость гречихи и картофеля, но снижает ее у кукурузы и сои и т. п.

18.1.3. Методы прогноза заморозков

Известно, что заморозки наносят значительный ущерб сельскохозяйственному производству. Для обеспечения эффективной защиты сельскохозяйственных растений от заморозков необходимо надежное их предсказание или прогноз. Исследователи давно отметили определенное сходство в условиях погоды, наблюдаемых при заморозках: это незначительная облачность или ее отсутствие, слабый ветер или штиль, низкая влажность воздуха и почвы.

Возникновение заморозков определяется совокупностью ряда факторов, в том числе основных: 1) *климатогеографического*, 2) *физико-метеорологического* и 3) *биологического* (Чудновский А.Ф., 1949).

1. Это влияние на феномен заморозка географического положения местности (широта, долгота и высота над уровнем моря), а следовательно, и климата. Географические координаты и климат – это внешний фон, основная среда, в которой протекают процессы образования заморозка: интенсивность солнечной радиации, характер основных, сезонных синоптических процессов, макрорельеф местности, зональный тип почв и т.п.

2. Категория влияний малого масштаба, местных условий – погоды, почвы, мезорельефа и др. относится к физико-метеорологическим факторам образования заморозка. Эти факторы определяются при анализе местных аэродинамических и термодинамических условий приземного слоя воздуха над конкретной подстилающей поверхностью, облачности, скорости ветра, температуры и влажности воздуха, высоты Солнца над горизонтом, а также учета свойств поверхности – тепловых и структурных характеристик почвы, ее влажности, степени покрытия ее растительностью и др.

3. Биологический фактор характеризуется природой растения, отражающей особенности живой ткани и биологических процессов, протекающих в надземных и подземных органах, т.е. должны учитываться степень морозоустойчивости и заморозкоустойчивости конкретных видов и сортов возделываемых культур.

Таким образом, для глубокого исследования природы заморозков и составления научно обоснованного прогноза его возникновения агрометеорологу необходимы достаточные познания в области биологии и физиологии растений, метеорологии (термодинамика, аэродинамика, синоптика), в области почвоведения, физики и математики.

Своевременное предупреждение о сроках наступления и ожидаемой интенсивности заморозков способствует снижению ущерба, а в отдельных случаях позволяет избежать их тяжелых последствий для растениеводства. Для предупреждения наступления заморозков разработаны различные методы их расчета и прогноза. Вторжение холодных масс воздуха, обуславливающих адвективные и адвективно-радиационные заморозки на больших территориях, достаточно надежно прогнозируются синоптиками с заблаговременностью 1...3 суток. Выше уже отмечалось, что в зависимости от местных условий, интенсивность заморозков может быть различной (рельеф, крупные водные объекты, лесные массивы и т.п.). Поэтому агрометеоролог, знающий местные условия, должен уточнить синоптический прогноз для своей территории.

Большое распространение в расчетах возникновения заморозков получили наиболее простые эмпирические методы, использующие данные показаний сухого и смоченного термометра, расчета точки росы, суточной амплитуды, а также графические и комбинированные методы. Авторами этих методов (правил) являются многие отечественные и зарубежные ученые: М.Е. Берлянд, В.А. Михельсон, П.И. Броунов, А.Ф. Чудновский и другие. Все эти методы определяют искомый ночной температурный минимум с помощью измеренных накануне вечером или ночью температуры и влажности воздуха. Коэффициенты, используемые в таких методах, устанавливают путем статистической обработки массовых материалов наблюдений над заморозками и сопутствующими им метеорологическими элементами, выполненных для конкретных территорий и месяцев года.

Так для вычисления минимальной температуры воздуха и почвы Михалевский предложил следующую формулу:

$$T_{\min(\phi)} = t' - (t - t')C \pm A; \quad (18.3)$$

$$T_{\min(n)} = t' - (t - t')2C \pm A, \quad (18.4)$$

где $T_{\min(\phi)}$ и $T_{\min(n)}$ – минимальная температура воздуха и почвы соответственно; t и t' – температура по сухому и смоченному термометрам в 13 ч соответственно, °C; C – коэффициент, зависящий от относительной влажности воздуха (f) в 13 ч, который находится по данным (табл. 18.5). Относительная влажность воздуха определяется по значениям t и t' из психрометрических таблиц; A – поправка на облачность, которую вводят после наблюдений в 19 или 21 ч по следующим градациям: если облачность незначительна (0...3 балла), то $A = -2^\circ\text{C}$; при средней облачности 4...7 баллов $A = 0$, т.е. поправка не вносится; при облачности 8...10 баллов $A = 2^\circ\text{C}$.

Например, $t = 7^\circ\text{C}$, $t' = 3,6^\circ\text{C}$, $f = 52\%$, в 21 ч – ясно. По табл. 18.5 при $f = 52\%$ $C = 1,2$. Тогда по формулам (18.3) и (18.4) $T_{\min(\phi)} = 3,6 - (7,0 - 3,6) \cdot 1,2 = -0,5^\circ\text{C}$.

Таблица 18.5

Зависимость коэффициента (С) от относительной влажности воздуха (f) в 13 ч

f (%)	100	95	90	85	80	75	70	65	60	50	40	30	25	15
С	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,8	1,5	1,2	0,9	0,7	0,5	0,3

Если рассчитанная минимальная температура воздуха и почвы ниже -2°C , то заморозок состоится; если расчетная температура воздуха и почвы составляет $-2...+2^{\circ}\text{C}$, заморозок вероятен; при минимальной температуре воздуха и почвы 2°C и выше заморозок не состоится.

Простой и весьма надежный графический способ расчета вероятности заморозка в ближайшую ночь предложил П.И. Броунов (рис.18.6). Для этого используют результаты наблюдений за температурой воздуха в метеорологической будке в 13 и 21 ч. На горизонтальной оси графика откладывают разность температур за эти сроки, на вертикальной оси – температуру за 21 ч. Точка пересечения наблюдаемых значений температуры воздуха в поле графика укажет вероятность заморозка.

В оперативной практике синоптиков используются методы прогноза, более полно учитывающие физические причины возникновения заморозков, подробно описанные в монографиях А.Ф. Чудновского (1949), М.Е. Берлянда

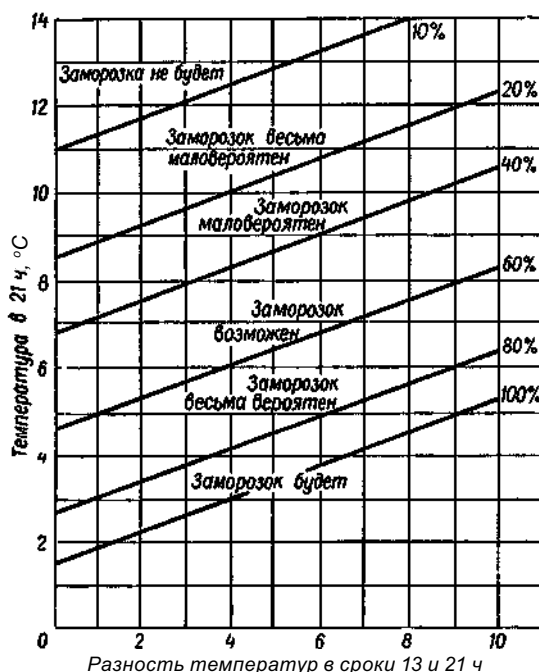


Рис. 18.6. График П.И. Броунова для определения вероятности заморозка

(1960) и др. Агрометеорологи, работающие на сети станций и в оперативных гидрометеорологических подразделениях, должны знать и грамотно использовать местные признаки погоды, особенно в заморозкоопасные периоды.

18.1.4. Методы защиты сельскохозяйственных и плодовых культур от заморозков

Многочисленными исследованиями было показано, что воздействуя на различные факторы, определяющие тепловой режим приземного слоя, можно уменьшить понижение температуры. Ночное выхолаживание уменьшится, если снизить эффективное излучение, увлажнить поверхность почвы, увеличить перемешивание приземного слоя воздуха (турбулентный обмен) и т.п.

Для защиты ценных сельскохозяйственных культур от заморозков применяют различные методы, объединяемые понятием борьба с заморозками. Это – комплекс локальных, агротехнических, технологических и технических мероприятий, проводимых среди посевов сельскохозяйственных культур, садов и виноградников с целью уменьшения потерь тепла растениями за счет собственного излучения и искусственного повышения температуры нижнего слоя приземного воздуха.

К наиболее распространенным методам защиты растений от заморозков, обеспечивающих реальную защиту посевов и садов на больших площадях, относятся: *метод создания дымовых завес* или окуривание посредством дымовых куч и *открытый обогрев* с помощью горелок или специальных технических установок.

Имеются сведения, что еще 2000 лет назад римляне размещали дымовые кучи для защиты виноградников от заморозков. Такой способ был широко распространен в странах Центральной Европы в XVIII и XIX веках. Уже тогда предполагалось, что одновременное «окуривание» дымом плантаций на больших площадях может принести значительный успех земледельцу. В России «окуривание» посредством дымовых куч является наиболее распространенным и доступным. В начале XX века известный ученый-селекционер И.В. Мичурин писал, что метод «окуривания» – это «самый лучший из всех и самый верный предохранитель цветков плодовых деревьев от утренних заморозков».

Для создания дымовых куч используется различный растительный материал, обычно малопригодный для других целей (ботва овощных культур, хвоя, сучья, мох, прелая солома, опилки, мусор и другие горючие отходы растениеводства и лесного хозяйства). Возможно использование и более ценных материалов – торфа, древесного и каменного угля, при этом их тепловая мощность может быть заметно повышена путем добавления к ним различных минеральных масел, смол, мазута и т.п. На рис. 18.7 приведена типовая схема составления дымовой кучи.

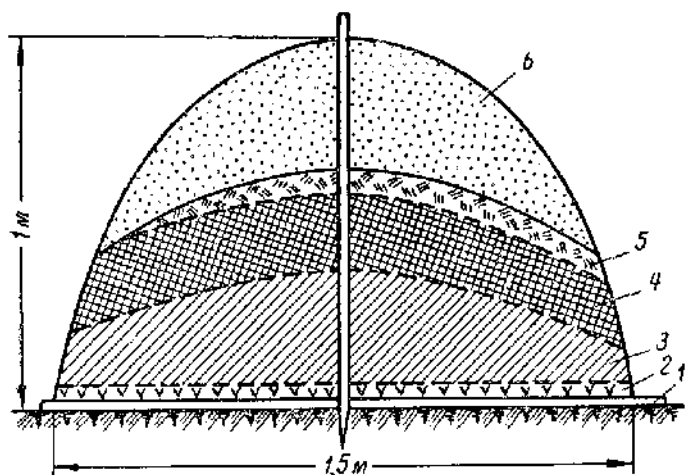


Рис. 18.7. Схема дымовой кучи: 1 – жердь, 2 – хворост, 3 – солома, 4 – торф, трава, 5 – хвоя, 6 – опилки, мусор

В ночное время дым от специально собранных и расставленных по защищаемой территории дымовых куч снижает эффективное излучение на несколько процентов. Тепловой эффект от этого способа в большей мере связан с непосредственным распространением тепла, образующегося при сгорании куч, чем с густым дымом. В целях получения большего количества дыма обычно употребляют увлажненный горючий материал (при средней влажности 30...40 %). Однако в таком количестве влаги снижается тепловой эффект при сжигании кучи. Значительное увлажнение дымовых куч полезно лишь при высокой влажности воздуха (98...100 %), поскольку в таких случаях испарившаяся влага при горении кучи вновь конденсируется в воздухе и тем самым увеличивает плотность дымового шлейфа, а следовательно, уменьшает лучистую теплоотдачу земли. Тепло, затраченное на испарение влаги, возмещится теплом, выделяющимся при конденсации водяного пара.

Этот способ является одним из видов *открытого обогрева* сравнительно небольшой интенсивности. В то же время известно, что для ослабления солнечной радиации необходимо значительно меньше дыма, чем для уменьшения эффективного излучения земли; утром после заморозков метод «окуривания» можно использовать как дымовую завесу для предохранения растений от быстрого размораживания их тканей.

Другим видом открытого обогрева являются специальные грелки с использованием твердого и жидкого топлива (каменный уголь, нефть, мазут, природный газ и др.). Известны различные типы грелок, например конструкции В.Г. Никифорова. Тепловой эффект (ΔT) грелок этого типа

определяется несколькими параметрами: количеством грелок на единице площади (1 га) и высоты их размещения над поверхностью почвы, а также скоростью ветра на высоте 2 м (u), средним расходом нефти для одной грелки Q (кг/ч); тогда ΔT_1 представляет собой тепловой эффект при указанном количестве грелок (табл. 18.6), при скорости ветра 1 м/с и расходе нефти на каждую грелку 1 кг/ч:

$$\Delta T_1 = u \Delta T / Q. \quad (18.5)$$

Таблица 18.6

Тепловой эффект грелок (Берлянд М.Е., Красиков П.Н., 1960)

Количество грелок на 1 га	Высота, м		
	1,0	1,5	2,0
	Тепловой эффект, ΔT_1		
500	2,5	2,5	2,1
400	2,1	2,1	1,8
300	1,7	1,7	1,5
200	1,3	1,3	1,1
100	0,9	0,9	0,75

Как видно из этой таблицы, наибольший тепловой эффект отмечается на высотах 1,0...1,5 м над поверхностью земли. На высоте 2 м температура уменьшается. Подсчитано, что при размещении 500 грелок В.Г. Никифорова, с расходом тепла в каждом источнике 10 000 кал/ч, при скорости ветра 1 м/с на высоте 2 м тепловой эффект составляет около 3 °С. Для получения наибольшего теплового эффекта при горении необходимого количества грелок последние должны быть размещены с наветренной стороны.

В литературе описан эксперимент, проведенный в окрестностях г. Сочи под руководством известного ученого-агрометеоролога Г.Т. Селянинова, по защите от заморозка (-11,3 °С) посадок мандаринов. На контрольном незащищенном участке гибель деревьев этой культуры достигла 90 %. Эксперимент показал, что общая стоимость открытого обогрева составила лишь небольшую часть убытка при повреждении заморозками наиболее ценных цитрусовых культур.

В результате анализа экспериментальных материалов было установлено, что тепловой эффект (ΔT) при расходе 1 т дымовых куч⁹ в час на 1 га в случае сжигания влажного материала с высокой зольностью при скорости ветра 1 м/с составляет около 0,5 °С; при скорости ветра, близкой

⁹ Рекомендуемая масса отдельной (средней) дымовой кучи около 150...200 кг. Количество дымовых куч, складываемых на 1 га, заметно разнятся в зависимости от типа защищаемой от заморозка культуры, особенностей рельефа местности и других условий: от 40...50 до 120...150 (по данным различных авторов).

к штилю, – примерно 1 °С, а в случае сжигания сухого материала с низкой зольностью при скорости ветра 1 м/с – 0,7...0,8 °С, при скорости ветра, близкой к штилю, – примерно 1,5 °С.

Считается, что при искусственном повышении температуры на 1...2 °С значительно снижается вероятность опасного заморозка, а повышение на 3...4 °С почти полностью обеспечивает сохранность урожая. Однако создание необходимого теплового эффекта – повышения температуры на каждые 0,5...1 °С – на больших производственных площадях в условиях постоянного переноса масс воздуха и вертикального их перемешивания связано с большими материальными затратами. Коротко рассмотрим основные методы активной борьбы с заморозками.

Дымление – или создание дымовой (аэрозольной) завесы. Дымовые и туманные завесы представляют собой взвешенные в приземном слое воздуха мелкораздробленные твердые и жидкие частицы. Физический смысл теплового эффекта от дымления исследован, в частности, М.Е. Берляндом, П.Н. Красиковым, (1960). В приземном слое воздуха тепло, выделяющееся при образовании дыма ($\Delta T_{\text{менл}}$), распространяется от источника подобно взвешенной примеси. Если известна концентрация дыма, то повышение температуры воздуха ($\Delta T_{\text{менл}}$) вычисляется по формуле М.Е. Берлянда, П.Н. Красикова (1960):

$$c_p \rho \Delta T_{\text{менл}} / q = Q / D, \quad (18.6)$$

$$\text{откуда} \quad \Delta T_{\text{менл}} = qQ / c_p \rho D, \quad (18.7)$$

где c_p – теплоемкость; ρ – плотность воздуха ($c_p = 0,24$ ккал/кг на 1 °С; $\rho = 1,3$ кг/м³); q – весовая концентрация дыма, которая рассчитывается или измеряется с помощью специальной аппаратуры; Q – количество тепла, выделяемое источником в единицу времени (определяется путем умножения теплотворной способности дымовой смеси на ее количество, расходуемое в единицу времени; D – масса частиц дыма, образующаяся при сгорании дымовой смеси в единицу времени. Величина $c_p \rho \Delta T_{\text{менл}}$ представляет собой количество тепла, расходуемое на нагревание единицы воздуха на величину $\Delta T_{\text{менл}}$.

Приведенные формулы показывают, что отношение этого количества тепла к концентрации дыма, т.е. к весу дыма в единице объема, равно отношению количества тепла, выделенного источником, к массе образующихся дымовых частиц. Например, если принять, что на 1 м линейного источника дыма сжигается 20 кг шашек в 1 час, то на некотором расстоянии от источника $q = 0,15$ г/м³. Известно, что в состав дыма переходит 50 % массы вещества сжигаемых шашек, теплотворная способность которых 500 ккал/кг. Отсюда $D = 10$ кг/ч, $Q = 10\,000$ ккал/ч. Подставляя эти значения в формулу (18.7), получим $\Delta T \approx 0,5$ °С.

Эффективное излучение Земли зависит главным образом от поглощения тепловой радиации водяным паром атмосферы. Весь спектр теплового излучения Земли заключается практически в пределах 1...50 мк (1 мк = 0,001 мм). Прозрачные интервалы сосредоточены на участке 8...12 мк, что соответствует максимуму земного излучения. Ослабление радиации в дымовой завесе обусловлено избирательным поглощением и рассеянием на частицах дыма в сторону, противоположную распространению радиации. Величина уменьшения эффективного излучения зависит от концентрации дыма, толщины его слоя, а также от самого эффективного излучения. Концентрация дыма и высота дымовой завесы обуславливаются расходом дымовых веществ в единицу времени на единицу длины линейного источника и скоростью ветра.

Снижение эффективного излучения в дыму приводит к уменьшению потери тепла почвой и падению температуры подстилающей поверхности в ночные часы. Выигрыш тепла на задымленном участке вследствие уменьшения эффективного излучения распределяется между приземным слоем воздуха и поверхностным слоем почвы. Чем большее количество тепла пойдет на нагревание воздуха, тем меньше будут потоки тепла в почву. Отсюда повышение температуры $\Delta T_{изл}$ в дымовой завесе зависит не только от снижения эффективного излучения, но и от турбулентного обмена, скорости ветра в приземном слое воздуха и теплопроводности почвы.

Значительно увеличивается эффективность дымовой завесы при наличии лесных полос в связи с уменьшением скорости ветра. Действие лесной полосы сказывается в первую очередь на большем снижении эффективного излучения при одних и тех же расходах дымовых средств на межполосных и открытых участках.

Широко применение получили дымы, создаваемые путем сжигания и возгонки¹⁰ специальных смесей и нагревания, в состав которых частично входят гигроскопические (поглощающие влагу) вещества. Например, различные по составу дымы от шашек, применяемых в различных целях в отраслях экономики, в том числе при дымлении на посевах и в садах. *Дымообразующими веществами* или *дымообразователями* называют такие химические вещества, которые при введении в атмосферу в мелко-распыленном состоянии дают устойчивый дым или туман.

Для борьбы с заморозками более удобно получение дымов посредством конденсационного метода. Сущность его заключается в том, что вещества, вначале переведенные в парообразное состояние (или находящиеся в виде газов), уплотняются, образуя твердые или жидкие взвешенные в воздухе мелкие частицы. На практике используют различные дымообразователи, подробно описанные в работе М.Е. Берлянда, П.Н. Красикова

¹⁰ Переход твердого вещества при нагревании в газообразное состояние, минуя стадию жидкости.

(1960). Например, при сжигании дымовых шашек с красным фосфором тепловой эффект ($\Delta T = 0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$) проявлялся на расстоянии до 100 м от источника: при сгорании 0,5 кг этого вещества на 1 м линии «фронта» в 1 час. А при расходе 1 кг вещества на 1 м в 1 час тепловой эффект составил 1,4 $^{\circ}\text{C}$. Снижение эффективного излучения на расстоянии 35 м от рубежа дымления варьировало от 20 до 60 %. Использование красного фосфора в качестве дымообразователя считается выгодным благодаря его экологической безопасности для растений и животных, высокой гигроскопичности продуктов горения, значительного тепла, выделяемого при горении (1 кг фосфора выделяет 6840 ккал или 286,6 мДж). Так опыты на плантациях лимонов показали, что воздействие дымом, полученным при сжигании 1 кг красного фосфора на 1 м³ в течение 16 суток, не оказало вредного действия на саженцы лимона различного возраста. Более того, урожай семян фасоли на опытном задымленном участке этим дымом оказался на 78 % выше, чем на контрольном участке, т.е. произошла подкормка посевов фасоли фосфорным дымом.

Температура в дымовой завесе оказывается выше, чем вне зоны задымления, благодаря трем причинам.

- При сгорании дымовой смеси выделяется некоторое количество тепла. При сжигании одной дымовой шашки белого дыма массой 1,8 кг в течение 10 мин выделяется около 700 ккал ($29,3 \cdot 10^5$ Дж или 2,93 мДж) тепла.

- Дымовые частицы обладают способностью ослаблять тепловое излучение Земли, поэтому эффективное излучение подстилающей поверхности под дымовой завесой оказывается меньше, чем на незадымленных участках. Поскольку в состав дыма входят гигроскопические частицы, то на них осаждается (конденсируется) влага из воздуха.

- Образование капель жидкой воды из воздуха сопровождается выделением теплоты конденсации. Так как дымовая завеса состоит из огромного числа дымовых частиц, то выделение теплоты конденсации приводит также к заметному повышению температуры в дыму. Таким образом, тепловой эффект определяется названными тремя причинами.

Под тепловым эффектом при дымлении понимается разность температур на защищаемых и незащищаемых участках, если до начала дымления температура обоих участков была одинакова. Для определения теплового эффекта дымовой завесы (ΔT), а также при выборе эффективных дымов рассчитывают влияние всех трех названных причин:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{изл}} + \Delta T_{\text{тепл}} + \Delta T_{\text{конд}}, \quad (18.8)$$

где $\Delta T_{\text{изл}}$ определяется снижением эффективного излучения; $\Delta T_{\text{тепл}}$ – теплотой, выделяющейся при образовании дыма; $\Delta T_{\text{конд}}$ – теплотой, выделяемой при конденсации влаги.

Дымовая завеса образуется вследствие температурной инверсии в приземном слое воздуха. Дым, охлаждаясь в нижнем слое воздуха, быстро теряет подъемную силу и внутри слоя инверсии растекается горизонтально на некоторой высоте над поверхностью посевов.

Повышение температуры подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха под дымовой завесой обусловлено комплексом факторов: обогревом воздуха теплым дымом при вялом горении дымообразующих куч (или специальных дымовых шашек, нефтяных горелок), конденсацией водяного пара в воздухе с выделением тепла, уменьшением эффективного излучения Земли и растений. В утренние часы дымовая завеса, закрывая растения от прямых солнечных лучей, способствует более медленному и равномерному оттаиванию тканей растений, если они подмерзли, а следовательно, уменьшению степени повреждения. При штиле или слабом ветре на ровных участках, когда нет подтока холодного воздуха, т.е. при радиационных заморозках, с помощью дымления можно повысить температуру воздуха на 1...2 °С. При ветре, т.е. при адвективных заморозках, а также в условиях холмистой местности, эффект дымления резко снижается из-за быстрого рассеивания тепловых потоков дыма и разрушения слоя инверсии над защищаемыми растениями.

Для защиты растений от заморозков широко применяются также *методы поливов и дождевания посевов* (посадок). Метод полива может использоваться в таких засушливых районах, где функционирует оросительная система. Орошение, как известно, неприменимо на почвах с повышенной влажностью, а также для сельскохозяйственных культур, не переносящих сильного увлажнения. В южных регионах бывшего СССР температура поливной воды в осеннее время обычно на несколько градусов выше (на 6...10 °С и более), чем температура поверхности почвы во время заморозка. Таким образом, при поливе плантаций (хлопчатника, виноградников и других теплолюбивых культур) более теплой водой перед заморозком в почву вносится значительное количество тепла при средних нормах орошения 700...1000 м³ на 1 га. В результате температура с глубиной возрастает и происходит передача тепла от нижних, более теплых слоев почвы, к верхним, более холодным. При этом теплопроводность почвы возрастает, и температура охлажденных верхних горизонтов может повыситься в холодные ночи на 2...3 °С.

Другой важной причиной повышения температуры воздуха при поливе является выделение теплоты конденсации водяного пара вследствие увеличения влажности воздуха над орошаемым участком поля и повышения температуры точки росы. Некоторое повышение температуры почвы может произойти и за счет выделения теплоты ее смачивания. Продолжительность защитного действия орошения составляет несколько суток. Считается, что метод полива смягчает интенсивный заморозок и полностью защищает от слабых заморозков.

Дождевание – это агротехнический способ подачи воды на поверхность почвы и растений в виде искусственного дождя с помощью специальных дождевальных машин или установок различных конструкций. Дождевание имеет ряд преимуществ перед методом поливов: возможность проводить более частые поливы как до наступления заморозков (за несколько часов), так и непосредственно в часы с отрицательными температурами. Кроме того, расход нормы воды на единицу площади значительно меньше по сравнению с поливом, меньше и глубина промачивания почвы, что весьма важно в условиях близкого залегания грунтовых вод. Предзаморозковое дождевание весьма эффективно при заморозках до -2°C и ветре 1,5...2 м/с, а при штиле – до -4°C . Эффективность этого способа так же, как и при орошении, обусловлена повышением относительной влажности воздуха, увеличением теплопроводности увлажненной почвы, обогревающим действием поливной воды, повышением температуры точки росы и теплотой, выделяющейся при замерзании воды. Установлено, что при дождевании возможно повышение температуры воздуха на 4°C (Берлянд М.Е., Красиков П.Н., 1960).

Защита от заморозков методом дождевания успешно применяется в различных странах Европы и в США на плантациях с разными культурами, в том числе и с теплолюбивыми, такими как ягодные, плодовые, виноград, табак, овощные и ранние сорта картофеля. Однако в случаях, когда относительная влажность воздуха при заходе Солнца оказывается ниже 60 %, а скорость ветра ≥ 5 м/с, противозаморозковое дождевание не целесообразно.

К числу *агротехнических приемов борьбы с заморозками* относится, в частности, размещение посевов сельскохозяйственных культур (в том числе садов и виноградников) в наименее «морозобойных» площадях, в том числе на возвышенностях и склонах, наименее подверженных заморозкам. Для этого в пределах конкретного хозяйства заблаговременно составляются микроклиматические карты распределения минимальных температур в период радиационных заморозков. Они дают представление о заморозкоопасности различных участков землепользования, позволяют заранее готовить средства защиты от заморозков и определять расположение плантаций для посадок наиболее теплолюбивых культур.

Известными агротехническими приемами борьбы с заморозками являются также: изменение времени посева на более поздние сроки, когда вероятность возврата холодов становится незначительной; применение повышенных доз калийных удобрений; укрытие растений с целью их утепления. Для этого применяют разнообразные светопрозрачные материалы – пленку, стеклянные «колпаки» (теплицы, парники, оранжереи и т.п.), а также тканые и подручные материалы. Эффективной считается присыпка появившихся над землей молодых побегов картофеля, которые

отрастают в дальнейшем с положительным эффектом для формирования дополнительного урожая клубней. Большая роль в снижении ущерба от заморозков принадлежит селекции по выведению заморозкоустойчивых культур, скороспелых сортов и др.

Для принятия оперативно-хозяйственных решений каждому землепользователю независимо от форм собственности необходимы знания о повторяемости и различной интенсивности заморозков на почве и в воздухе. Такие знания применительно к конкретным местным условиям используются для определения сроков посевов сельскохозяйственных культур, при разработке схем грамотного размещения посадок плодовых культур и виноградников на площадях, наименее подверженных радиационным и адвективно-радиационным заморозкам, для определения сроков уборки культур с целью снижения возможностей нанесения ущерба будущим урожаям.

Перечисленные методы защиты ценных сельскохозяйственных культур от заморозков (открытый обогрев, дымление, различного рода укрытия, поливы, искусственная задержка цветения и т.п.) все-таки недостаточно эффективны из-за дороговизны, а также по причине относительно небольших защищаемых площадей.

Статистика повторяемости и интенсивности заморозков на территории бывшего Союза показывает, что наиболее опасными для сельскохозяйственных культур (включая плодовые) являются адвективно-радиационные и радиационные заморозки. При инверсионном распределении температуры у поверхности почвы разность температур у поверхности почвы и на высоте 12...15 м составляет 5...7 °С и даже до 10...12 °С. На использовании этого фактора основан *динамический способ борьбы с заморозками*. Его сущность заключается в использовании вертолетов и «ветродуйных» агрегатов для перемешивания воздуха в слое заморозка с более теплым воздухом вышележащих слоев, в результате которого температура в зоне произрастания защищаемых растений повышается. Такие эксперименты были успешно проведены в США, во Франции, в Новой Зеландии.

В конце 70-х годов XX века во ВНИИСХМ Росгидромета (Вольвач В.В., 1985; Вольвач В.В. и др., 1987) были развернуты экспериментальные работы по исследованию возможностей применения малого вертолета типа К-26 для защиты от заморозков. Полученные данные показали, что максимальное повышение температуры благодаря воздействию пролетающего вертолета на небольшой высоте составляет в среднем 0,5 – 0,6 °С от разности температуры воздуха на высоте полета и у поверхности земли. Средняя продолжительность сохранения приращений температуры воздуха изменялась от 14...18 мин на уровне 8 м и до 20...25 мин на уровне 0,2 м. Время сохранения приращений температуры (в рамках эксперимента) в среднем в 2,0...2,5 раза больше продолжительности активного динамического воздействия.

В середине 80-х годов прошлого столетия под руководством специалистов ВНИИСХМ (Вольвач В.В. и др.) аналогичные эксперименты с использованием тяжелого вертолета типа Ми-8 проводились в Араратской долине (Армения) с участием ученых из Гидрометеорологической службы Армении (Мкртчян Р.С., Акопян А.С. и др., 1977). Результаты экспериментов показали, что ширина распространения воздушного потока (так называемого «спутного» потока) от винтов вертолета зависит от скорости и высоты полета, а также от термодинамического состояния приземного слоя воздуха.

Наибольшую ширину спутный поток имеет при скорости полета около 20 км/ч и высоте полета 25 м. Исследования динамики нагрева и охлаждения подстилающей поверхности проводились при многократном перемешивании приземного слоя воздуха с различными интервалами воздействия в режиме зависания вертолета – от 40 с до 3 мин с интервалом воздействия 7...10 мин. Измерения показали, что уже через 30...40 с после начала воздействия температура кроны абрикосовых деревьев повышалась на 2...3 °С, в дальнейшем наблюдалось уменьшение скорости нагрева кроны ($\Delta T / \Delta t = 0,4$ °С/мин), связанной с нагревом и повышением температуры окружающего воздуха и нижнего яруса кроны дерева. В результате трехкратного воздействия в течение 40 с, 1,5 мин и 3 мин долговременная температура повышалась на 3...4 °С, что составляло 0,5...0,6 величины разности температур на высоте полета и на уровне 0,25 м. После воздействия температура листовой поверхности снижалась по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau \approx 60$ с. Падение температуры связано с радиационным выхолаживанием листовой поверхности при более медленном изменении температуры воздуха и почвы. Временной ход охлаждения листовой поверхности после воздействия (T_i) описывается уравнением:

$$T_i = T_0 + \Delta T_{max} a e^{\tau / \tau_1}, \quad (18.9)$$

где T_0 – температура листа до воздействия; a – эффективный коэффициент теплообмена «лист – воздух»; τ – время сохранения термического эффекта воздействия; τ_1 – постоянная времени охлаждения листа. В качестве примера результатов воздействия приведен фрагмент регистрограммы с радиационного термометра РТ-2 (рис. 18.8). Как видно на рисунке, в результате трехкратного воздействия в режиме зависания вертолета общей продолжительностью 5 мин 40 с температура поверхности почвы удерживалась в течение 25...27 мин выше этого уровня на 1 °С. Изменения температуры воздуха в слое 0...15 см в результате воздействия низко пролетающим вертолетом (20...30 м) со скоростью 20...25 км/ч показаны на рис. 18.9. Как видно, температура воздуха во время воздействия повышается на 3...4 °С.

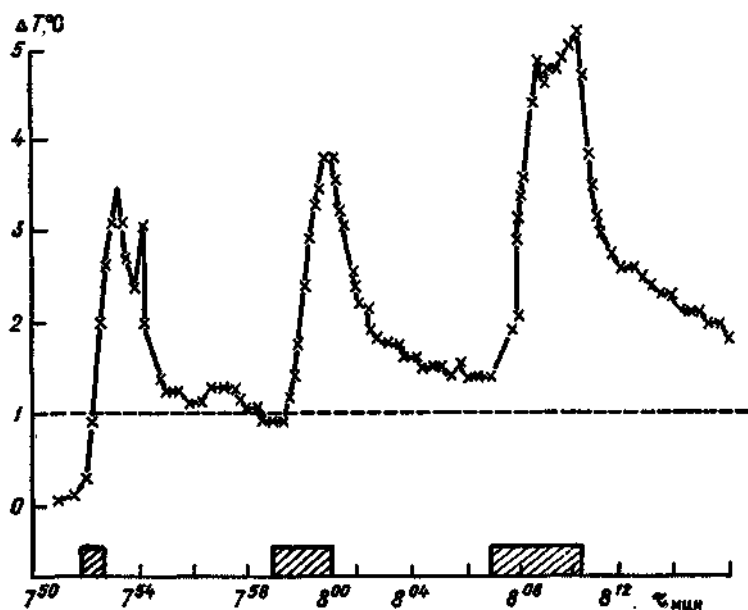


Рис. 18.8. Динамика приращения радиационной температуры поверхности почвы при воздействии вертолетом Ми-8 в режиме зависания (экспериментальная база ЕрОЗакНИИ, 13 апреля 1984 г., высота 100 м). Штриховкой показано время воздействия.

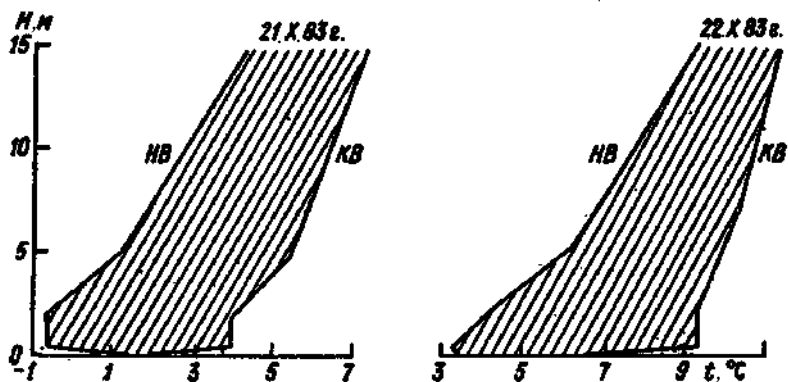


Рис. 18.9. Повышение температуры воздуха в слое 0...15 м при воздействии вертолетом (показано штриховкой): НВ – начало воздействия, КВ – конец воздействия

При таких параметрах динамическое влияние вертолета охватывает полосу в среднем до 100...120 м, что означает, что за 1 час вертолет может обрабатывать (защищать от заморозка) единый массив посадок до 200...300 га. В горных условиях из-за изрезанности рельефа и при разрозненных полях защищаемая площадь уменьшится.

На рис. 18.10 показаны результаты воздействия вертолетом на плантации сельскохозяйственных культур в октябре 1985 г.

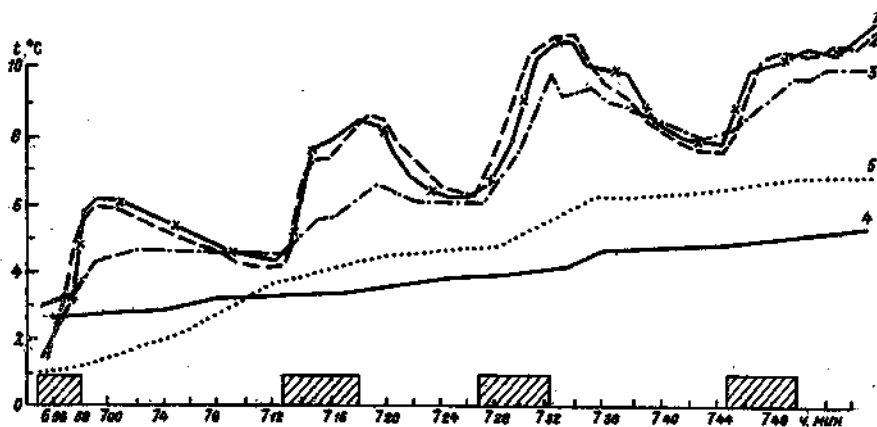


Рис. 18.10. Временной ход температуры при воздействии вертолетом Ми-8 (20 октября 1985 г.): 1 – на высоте 2 м, 2 – на высоте 0,25 м, 3 – на поверхности почвы, 4 – на поверхности почвы (контроль), 5 – на высоте 2 м (контроль). Штриховкой показано время воздействия.

Однако широкомасштабное внедрение динамического способа активного воздействия на приземный слой воздуха в период заморозка сдерживается двумя вескими причинами.

– Для успешной борьбы с заморозками необходимо выполнять полеты на вертолетах в ночной или в предрассветное время на малых (бреющих) высотах, что запрещается соответствующими инструкциями Гражданской авиации России в целях безопасности полетов в темноте. Особенно опасны такие полеты в условиях холмистой и горной местности.

– Высокая стоимость оплаты летных часов, превышающая экономический эффект от защиты даже ценных сельскохозяйственных культур.

К способам защиты от заморозков при помощи перемешивания нижних и верхних слоев приземного воздуха относится применение мощных вентиляторов или авиационных (лопастных и реактивных) двигателей, израсходовавших свой летный ресурс. Известно применение этого способа в производственных масштабах в США (штат Калифорния), Австрии,

Венгрии. Вентиляторы (двигатели) устанавливаются на высоте 10...12 м на специальных опорах, допускающих медленное вращение двигателя вокруг своей оси. Поскольку при радиационных заморозках температура воздуха на этой высоте на 4,0...5,5 °С выше, чем на уровне 1,0...1,5 м над поверхностью земли, то в результате перемешивания более верхних и нижних слоев позволяет снизить интенсивность заморозка на 2,0...2,5 °С. При использовании реактивных двигателей тепловой эффект значительно повышается благодаря мощным потокам нагретого воздуха.

К числу активных методов воздействия на заморозки относится и метод *нанесения тепловыделяющих веществ* (экологически безопасных) на поверхность почвы. Эти вещества – соли гидрида кальция – при их взаимодействии с водяным паром воздуха и почвы выделяют тепло в течение нескольких часов. Скорость гидролиза небольшая, а время выделения тепла соизмеримо с продолжительностью радиационных и адвективно-радиационных заморозков. Опыты и расчеты, проведенные В.В. Вольвачем, Н.К. Диденко и др. (ВНИИСХМ и НПО «Тайфун» Росгидромета) показали, что при расходе 200 г/м² температура у поверхности земли повышалась на 2,5...3 °С, а ее сохранение наблюдалось в течение нескольких часов; этого оказалось достаточным для предотвращения губительного действия заморозка.

На рис. 18.11 приведена схематическая карта комплекса мероприятий по борьбе с заморозками на территории России и сопредельных стран (Синицына Н.И., Гольцберг И.А., Струнников Э.А., 1973).

Таким образом, для эффективной защиты сельскохозяйственных растений от заморозков необходимо использовать весь комплекс мероприятий, направленных на повышение продуктивности возделываемых культур, более полное использование агроклиматических ресурсов территории и снижение ущербов от этого опасного природного явления.

18.2. Засухи, суховеи и засушливые явления

К стихийным явлениям природы, наносящим значительный экономический, экологический и социальный ущерб сельскохозяйственному производству, относятся засухи и суховеи. Общая площадь, охватывающая территорию с засушливым климатом, составляет около 42 % всей суши Земли. Но эпизодические засухи наблюдаются на большей части суши. По мнению П.И. Броунова (1913): «Одним из наиболее важных метеорологических явлений, определяющих урожаи хлебов в России, следует признать засуху. При большей интенсивности засуха проявляет свое действие почти во всех климатических районах России, в юго-восточной же половине последней она представляет обычное явление, к которому необходимо, по возможности, приспособляться, так как активная борьба с нею возможна лишь с помощью орошения, далеко не во всех местах доступного».

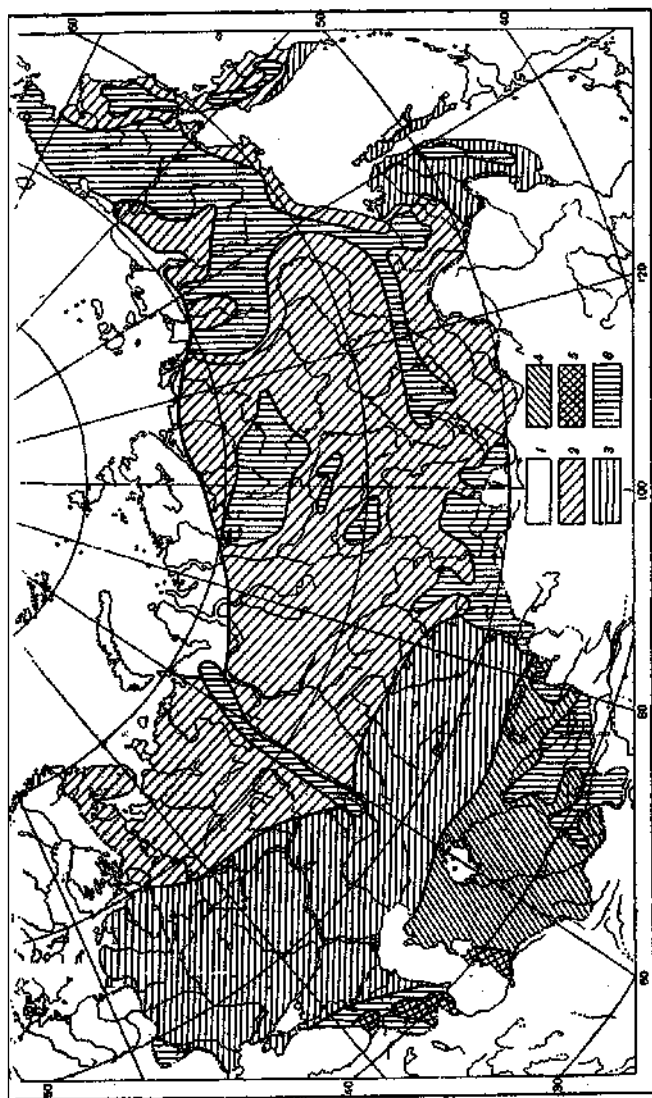


Рис. 18.11. Схематическая карта комплекса мероприятий по борьбе с заморозками в разных климатических областях России и сопредельных странах:
 1 – открытый и теплый грунт; 2 – строгий учет микроклимата, защита от холодных ветров, сев местных морозостойчивых сортов и сортов разной скорости созревания, уборка зерновых до 1–5/IX, при летних заморозках интенсивное дымление; 3 – учет микроклимата, укрытие всходов, дымление; 4 – орошение, интенсивное дымление; 5 – для субтропических культур строгий учет микроклимата, специальная агротехника, укрытие, открытый обогрев; 6 – горные районы (характеристика не приводится).

Как метеорологическое явление засуха присуща тем областям России, которые характеризуются превышением испарения над естественным увлажнением. На территории России и других стран СНГ более 70 % пахотных земель расположено в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения, на которых засухи различной интенсивности и продолжительности наблюдаются едва ли не ежегодно. В России засухи и суховеи, охватывая большие площади производства зерновых культур, порождали в отдельные годы страшные бедствия: голод, нищету и гибель людей. В XVIII в. на территории России было 34 сильных засухи, в XIX в. – 40, в XX в. – более 35. Еще в 1931 г. выдающийся русский ученый Н.И. Вавилов писал, что «...особенностью земледелия в России является широкая распространенность и частая повторяемость такого неблагоприятного явления, как засуха».

От сильных засух страдает не только сельскохозяйственное производство. В маловодные и засушливые годы мелеют реки, запасы воды в водохранилищах постепенно срабатываются, от чего серьезные убытки несут гидроэнергетика, судоходство и рыболовство. Значительный ущерб длительные засухи наносят состоянию лесов, водоснабжению населения, состоянию здоровья людей и т. п.

Изучению сущности явления засухи, суховеев, засушливых явлений и мерам борьбы с их последствиями посвящено множество научных исследований. Систематическое исследование природы засух начато было в России еще во второй половине XIX столетия и продолжается в настоящее время. Выдающиеся русские ученые А.И. Воейков, В.В. Докучаев, Г.Н. Высоцкий, А.А. Каминский, П.И. Колосков, Г.Т. Селянинов, Н.Н. Иванов, М.И. Будыко, А.И. Будаговский, Д.И. Шашко, Л.Н. Бабушкин и многие другие внесли значительный вклад в изучение феномена засухи и создали различные методы оценки этого явления. Широко известны исследования явления засухи, выполненные в различные годы зарубежными учеными (Koppen W., 1922; Meyer A., 1926; Reichel E., 1928; Thornthwaite C.W., 1948; Palmer W.C., 1965 и др.).

Ряд исследователей изучали причины возникновения засух, разрабатывали количественные критерии их оценки, составляли каталоги засух и разрабатывали систему мониторинга засух (А.М. Алпатов, Н.В. Бова, О.А. Дроздов, В.М. Обухов, Д.А. Педь, Ю.Л. Раунер, А.И. Руденко, И.Е. Бучинский, Е.С. Уланова, А.И. Неушкин, В.А. Жуков, А.Д. Клещенко, Е.К. Зоидзе, А.И. Страшная и др.). Только российскими учеными опубликовано более одной тысячи работ по изучению широкого комплекса засушливых явлений, предложено множество показателей и критериев для качественной и количественной оценки феномена засухи.

Засуха – это сложное природное явление. Поэтому в разное время различными учеными были предложены десятки определений понятия

засуха, большинство из них связано с профессиональными знаниями специалистов синоптиков, метеорологов, агроклиматологов, агрометеорологов, агрономов, физиологов растений и др. Например, метеоролог Б.П. Мультановский, придавая большое значение атмосферной циркуляции в формировании засухи, писал (1915): «По внутренней же сущности явление засухи нужно понимать как процесс, непрерывно поддерживаемый атмосферическими воздействиями, словом, засуха не есть явление стационарное, и в этом отношении она близко напоминает многие явления, находящиеся в связи с определенными процессами в атмосфере...».

Известный русский климатолог А.А. Каминский (1934) писал: «Под засухами мы подразумеваем такие бездождные периоды за время и после схода снежного покрова весной, до начала морозов осенью, в течение которых максимальная суточная температура воздуха (или температура в 13 часов) после значительного потепления равномерно повышается, относительная влажность в 13 часов после значительного падения оказывается низкой (не выше 40 %) и продолжает падать, абсолютная влажность колеблется в узких пределах и облачность бывает мала».

Р.Э. Давид (1936) рассматривал засуху как определенное конкретное сочетание метеорологических факторов, приводящее к обеднению почвы влагой. Он типизировал засуху по синоптическим условиям формирования и по направлению переноса. Применительно к оценке условий вегетации и урожайности хлебов по Нижнему Поволжью засуха фиксировалась по времени ее появления относительно фаз развития яровой пшеницы с учетом влагообеспеченности растений. Придавая большое значение определению урожайных и неурожайных лет, термическим факторам и влагообеспеченности культур за два решающих месяца – май и июнь – он оценивал эти и другие месяцы по соотношению количества влажных суток. Оценивались поверхностные слои почвы, насыщенные влагой за счет недавно выпавших осадков, и число дней с положительными и отрицательными отклонениями от нормы температуры в 5 °С и более.

«Недостаток влаги в почве и в воздухе, или только в воздухе характеризует собою явление засухи. В зависимости от первого или второго случая будет иметь место либо почвенная, либо атмосферная засуха» (Федоров А.В., 1938). Как видно из этих высказываний, в первой трети XX столетия количественные критерии засух были еще не выявлены учеными. В последующие годы были установлены такие критерии и предложено большое разнообразие методов оценки феномена засухи и суховеев как по отдельным метеорологическим и агрометеорологическим элементам, так и по их комплексам. По этой же причине различаются и каталоги засух, при составлении которых использовались различные методы и критерии засух. Наиболее полные сведения о годах с засухами, времени их появления и циркуляционных условиях их возникновения

приведены в ряде исследований (Утешев А.С., 1972; Логинов В.Ф., Неушкин А.И., Рочева Э.В., 1976; Неушкин А.И., Рочева Э.В., 1977; Дроздов О.А., 1980; Раунер Ю.К., 1981; Уланова Е.С., 1988; Неушкин А.И., Санина А.Т., 2002; Клещенко А.Д., Зоидзе Е.К., Бокен В.К., 2005; Уланова Е.С., Страшная А.И., 2010 и др.).

Что же такое засуха? Это естественное явление природы, обусловленное циркуляционными процессами в атмосфере, с длительным отсутствием осадков (или значительным их сокращением по сравнению со средними многолетними нормами) в сочетании с повышенными температурами воздуха, почвы и ветрами (Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии, 2002). Такие условия приводят к резкому снижению относительной влажности воздуха, истощению запасов почвенной влаги, нарушению водного баланса растений, к недобору сельскохозяйственной продукции, а в экстремальных условиях – к гибели всего урожая сельскохозяйственных культур и даже людей. Длительные и интенсивные засухи в экстремальных условиях становятся суровым испытанием для большинства видов диких млекопитающих, лишаящихся открытых водных источников воды. Продолжительные засухи создают благоприятные условия для возникновения пожаров в степных и лесных районах. Особую опасность засухи представляют при их сочетании с неблагоприятными условиями предшествующих периодов осени и зимы (сухая осень, малоснежная зима, глубокое промерзание почвы и т.п.). Тем не менее до настоящего времени нет единого, общепризнанного определения феномена засухи.

В более узком понимании засуха – это агрометеорологическое явление, вызывающее резкое несоответствие между нормальной потребностью растений во влаге и ее поступлением из почвы в результате недостаточного количества осадков и повышенного испарения, нарушающих водоснабжение растений. Следствием такого несоответствия становится снижение урожайности сельскохозяйственных культур, и чем резче несоответствие, тем больше недобор урожая. При длительных и интенсивных по напряженности засухах урожайность культур оказывается минимальной, а в экстремальных условиях гибель растений может наступить еще до периода формирования урожая.

Суховей – это ветер при высокой температуре и большом недостатке насыщения воздуха влагой, вызывающий угнетение или гибель растений (ГОСТ 17713–89). В отличие от засух суховеи, как правило, непродолжительны (от нескольких часов до нескольких суток): это высокая температура ($>25^{\circ}\text{C}$), низкая влажность воздуха ($<30\%$), дефицит влажности воздуха (20...22 гПа) и скорость ветра не менее 5 м/с. Суховеи являются результатом локального прогрева воздушных масс, чаще всего арктического происхождения, над сильно прогретой земной поверхностью и нисходящего движения воздуха при антициклонах. Под воздействием суховеев

происходит интенсивное испарение с поверхности почвы, обезвоживание тканей растений в результате усиленной транспирации, вследствие чего нарушается водный баланс растений и весь комплекс физиологических процессов: фотосинтез, дыхание, углеводный и белковый обмен. Снижение фотосинтетической деятельности подавляет ростовые функции, нарушает процессы органогенеза. Напомним, что *органогенез* – это биологический процесс возникновения, формирования и развития органов (корня, побегов, листьев, цветков) в течение индивидуальной жизни растения из участков недифференцированной ткани – меристемы. Например, у зерновых культур в период формирования репродуктивных органов под воздействием суховея увеличивается число бесплодных цветков, уменьшается число колосков и зерен в колосе. В конечном итоге неблагоприятное воздействие суховея приводит к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур.

От засух и суховея необходимо отличать *засушливые явления*. Это значения отдельных гидрометеорологических (агрометеорологических) величин или их сочетаний, характеризующих различную степень временного угнетения от недостатка влаги у растений. Например, отсутствие осадков при жаркой, ветреной погоде, но при достаточных запасах влаги в почве приводит к временной потере *тургора* (гидростатическое давление внутри растительной клетки) в тканях растений в дневные часы. В ночные часы за счет запасов влаги в почве тургор восстанавливается. На сильно засоленных почвах (мокрые солончаки) в пустынной зоне в летнее время растения испытывают физиологическую засуху из-за высокой концентрации солей в водных растворах, влага которых оказывается недоступной даже для солеустойчивых растений.

Иногда термин *засушливые явления* используется для характеристики климата той или иной территории, где они наблюдаются в течение какого-либо периода, являясь особенностью такой территории.

18.2.1. Происхождение засух и суховея

Многочисленные исследования происхождения засух и суховея показали, что их образование и развитие на территории России связано с циркуляцией атмосферы, приводящей к установлению длительного периода антициклональной погоды. Примерно в 70 % всех случаев обширный антициклон, приходящий из Арктики, формируется над Европейской частью России и Западной Сибирью. В антициклонах движение воздушных масс происходит по часовой стрелке, вследствие этого на южной периферии арктического антициклона ветры имеют восточное и юго-восточное направление. Поэтому на юге и юго-востоке Европейской части России суховеи имеют преимущественно юго-восточное, восточное и северо-восточное направления, в Западной Сибири – юго-западное, а в республиках Центральной Азии – северное.

Существовавшее длительное время мнение о распространении суховеев из центрально-азиатских пустынь оказалось ошибочным. Арктические антициклоны, характеризующиеся низкой влажностью, малоподвижностью и высокой прозрачностью воздуха, формируют длительную, ясную или малооблачную погоду над обширной территорией. Холодный арктический воздух, проходя над континентом, быстро прогревается от более теплой земной поверхности и по мере повышения его температуры становится еще более сухим. Продвигаясь к югу, воздух до некоторой степени обогащается влагой за счет испарения почвенной влаги и транспирации растений. Однако прогревание проходит настолько интенсивно, что относительная влажность воздуха снижается, иссушение почвы усиливается и наступает воздушная, а затем и почвенная засуха. Этот процесс усиливается при поступлении «свежих» воздушных масс воздуха из тех же арктических регионов. При ослаблении атмосферной циркуляции, происходящих в мощных антициклонах, усиливаются процессы образования засух.

В условиях безоблачной погоды происходит сильное прогревание поверхности почвы солнечными лучами и усиливается иссушение поверхности почвы и растительного покрова. В начале формирования засухи ночи еще прохладные, но в результате продолжающихся жарких и сухих дней, ночи становятся теплее. В дневные часы, благодаря неравномерному нагреву земной поверхности, усиливается ветер, создающий вихревые потоки (смерчи) на равнинах; возникают суховежные явления или суховеи.

Таким образом, развитие засухи сопровождается обычно суховеями, ускоряющими иссушение почвенных горизонтов и увеличивающими транспирацию растений. При этом ночное выхолаживание уменьшается. В результате всех этих процессов создается резкое несоответствие между возрастающей потребностью растений во влаге и ее сокращающимся поступлением из почвенных горизонтов. Общая схема образования феномена засухи представлена на рис. 18.12.

Различают три типа засух: *атмосферную, почвенную и атмосферно-почвенную*.

Атмосферная засуха – длительная (многодневная, многомесячная, многолетняя) аномально сухая погода, обычно при повышенных (иногда очень высоких) температурах воздуха, с отсутствием или незначительным количеством атмосферных осадков, приводящая к истощению запасов влаги в почве и резкому снижению относительной влажности воздуха; обычно она предшествует почвенной засухе. В районах поливного земледелия обычным следствием атмосферной засухи является низкий приток воды с водосборной площади к водохранилищам, истощение их запасов, маловодье в оросительных системах и нарушение водно-солевого баланса сельскохозяйственных полей.

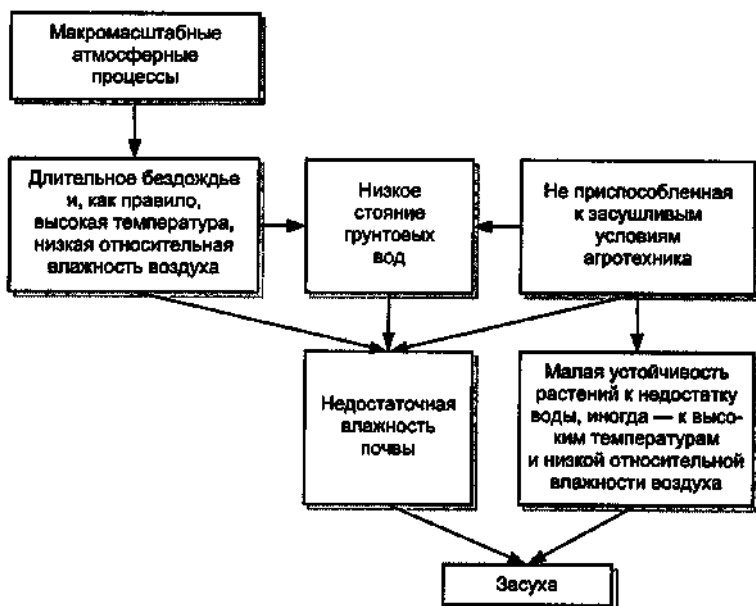


Рис. 18.12. Общая схема образования засухи (Давитая Ф.Ф., 1966)

Почвенная засуха – это иссушение почвы (в первую очередь ее корнеобитаемых горизонтов), снижающее влагообеспеченность растений, вызывающее их угнетение, задержку роста, снижение продуктивности и даже гибель посевов. В экстремальных условиях сильное, длительное иссушение почвы в сочетании с высокими температурами воздуха и почвы приводит к полной потере физиологически доступной растениям влаги (ниже влажности устойчивого завядания) и гибели растений. Почвенная засуха является следствием атмосферной засухи, суховея при отсутствии орошения сельскохозяйственных угодий.

Атмосферно-почвенная засуха – сочетание условий, характеризующих атмосферную и почвенную засуху. Это наиболее опасный для сельскохозяйственных культур тип засухи. В случаях высокой интенсивности и продолжительности такой тип засухи считается опасным природным явлением.

По интенсивности различают засухи: *слабые, средние, сильные и очень сильные*. Их количественные характеристики отражают в основном локальные условия, поэтому могут использоваться в практической работе только в тех районах, для территории которых они получены.

По территориальному признаку засухи делят (И.Е. Бучинский) на: *локальные* с охватом территории $\leq 10\%$ от посевной площади, *обширные* (11...20 %), *весьма обширные* (21...30 %), *чрезвычайные* (31...50 %),

катастрофические (>50 %), называемые также в зарубежной научной литературе *континентальными*.

По времени наступления засухи различают по сезонам года.

Весенняя засуха характеризуется невысокими температурами и низкой влажностью воздуха, малыми запасами продуктивной влаги в почве, сухими ветрами, выносящими влагу с поверхности почвы, незначительно покрытой растениями. Продолжительная засуха весной существенно снижает конечный урожай даже в условиях благоприятного по степени увлажнения лета.

Летняя засуха обычно отличается высокими температурами, горячими сухими ветрами (суховеи), вызывающими повышенное испарение влаги из почвенных горизонтов и интенсивную транспирацию растений. Засушливость летних месяцев, когда происходит закладка и формирование генеративных органов растения, значительно снижает урожайность сельскохозяйственных культур, образуется щуплость зерна, иногда наблюдаются явления «запала растений» и «захвата зерна».

Осенняя засуха характеризуется невысокими температурами воздуха и низкими запасами продуктивной влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы. Такая засуха задерживает прорастание семян озимых посевов, замедляет осенний цикл вегетации таких культур, снижает их морозостойчивость. Наиболее опасен этот вид засухи в тех случаях, когда их всходы не успевают укорениться и пройти фазу кущения; такие посевы обычно погибают в зимний период (см. главу 19). В отдельные засушливые осени, когда пахотный горизонт не имеет необходимых запасов продуктивной влаги, посев озимых культур вообще нецелесообразен.

Зимняя засуха наступает в условиях отсутствия снежного покрова, при недостатке влаги в корнеобитаемых горизонтах замерзшей почвы, при повышенной температуре воздуха (> 0 °C), когда возобновляется транспирация озимых культур, усиливающаяся при солнечной и ветреной погоде. В таких условиях происходит обезвоживание и увядание надземных органов, и даже их гибель от недостатка почвенной влаги.

18.2.2. Методы оценки засух

В условиях естественного атмосферного увлажнения территории влажность почвы не определяется только количеством выпавших осадков. Хорошо известно, что примерно одинаковые суммы осадков, выпадающие в полупустыне и в тундре, создают различные условия для развития типов растительного покрова. В полупустыне – это засухоустойчивые ксерофиты, а в тундре – влаголюбивые мезофиты и гигрофиты, растущие на заболоченных и переувлажненных почвах. Ясно, что для оценки увлажнения необходимо учитывать не только количество выпадающих осадков, но и возможность их испарения. Испаряемость конкретной

местности (при неограниченном запасе влаги) в первую очередь зависит от температуры воздуха, ветра и других факторов.

Еще в 1900 г. выдающийся ученый-почвовед В.В. Докучаев предложил оценивать степень увлаженности территории путем сопоставления средних многолетних величин годовых сумм осадков и средних годовых величин испарения с водной поверхности (испаряемости). Таким образом, он впервые использовал понятие испаряемости для характеристики засушливости различных природных зон. Этим было положено начало многочисленным исследованиям географического распределения почв и растительности по соотношению сумм осадков и испаряемости.

Ученые различных специальностей предложили множество методов оценки засух, суховеев, засушливых явлений, исходя из своей профессиональной ориентации. Из большого разнообразия методов, предложенных почвоведом, синоптиками, климатологами, метеорологами, агрометеорологами, физиологами растений и другими, приведем лишь несколько примеров, отражающих различные подходы и использующие разные критерии.

К.А. Тимирязев (1884) считал, что при неограниченном доступе воды к листьям растений «испарение воды растением вполне подчиняется физическим законам и что главнейшими факторами должно признать влажность атмосферы, ветер и нагревание солнцем».

Н.А. Максимов (1941) отмечал, что «... транспирация в основе своей представляет процесс физического испарения». П.И. Броунов (1904) установил, что сумма осадков менее 5 мм за декаду в период с апреля по декабрь является признаком засушливости для сельскохозяйственных культур.

Г.Н. Высоцкий (1905) был впервые предложен количественный индекс засушливости (I), равный отношению годовой суммы осадков (P) к годовой сумме испаряемости (E_0):

$$I = P / E_0 . \quad (18.10)$$

На территории Европейской части России этот индекс изменяется следующим образом: во влажной лесной зоне 1,3, в лесостепной зоне 1,0 в умеренно сухой степи 0,66, в южной сухой степи 0,3.

П.И. Колосков (1910) выполнил расчет суточных величин испарения со свободной водной поверхности в тени по формуле:

$$E_0 = \alpha(e_0 - e), \quad (18.11)$$

где E_0 – испаряемость за сутки, e_0 – упругость насыщенного парами воздуха при температуре сухого термометра, e – абсолютная влажность воздуха, α – коэффициент суточного испарения, равный 0,804. В дальнейшем П.И. Колосков (1925, 1947) предложил использовать для оценки степени засушливости территории показатель засушливости (V) как

отношение количества осадков (P) к разности давления насыщения (E) при данной температуре и фактического давления водяного пара (e):

$$V = kP / E - e, \quad (18.12)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

В 1913 г. П.И. Броунов впервые разработал представление о вероятности наступления засушливых декад на Европейской части России. Сумма осадков ≤ 5 мм за декаду была принята им в качестве границы минимального увлажнения, которое не может использоваться растениями. Им совместно с сотрудниками впервые был создан «Атлас» (1913) вероятности засушливых декад, построенный по данным 300 метеорологических станций за имеющийся период наблюдений от 10 до 17 лет.

Р.Э. Давид (1934) обосновал возможность использования дефицита давления водяного пара в качестве показателя транспирации сельскохозяйственных культур:

$$f = (E - e) / 2, \quad (18.13)$$

где f – испаряемость, мм; E – давление насыщения при данной температуре воздуха; e – парциальное давление водяного пара.

Для определения степени засушливости года этот же автор исследовал (1936) баланс увлажнения, т.е. величины превышения испаряемости над осадками за теплый период года, в пределах дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 5°C . Он рассматривал явление засухи с агрономической точки зрения «как период несоответствия, вернее, превышения испаряемости данного ландшафта над выпадающими осадками».

Г.Т. Селянинов (1937) предложил использовать гидротермический коэффициент ($ГТК$), нашедший широкое применение в многочисленных агроклиматических и агрометеорологических исследованиях. Автор исходил из того, что сумма температур воздуха теплых месяцев, уменьшенная в 10 раз, близка к испарению с оптимально увлажненного поля и поэтому может быть принята за величину максимально возможного испарения, т.е. за испаряемость. $ГТК$ представляет собой отношение суммы месячных осадков в мм ($\sum P$) к сумме температур за период со средними суточными температурами выше 10°C того же месяца $\sum t$, уменьшенной в 10 раз:

$$ГТК = \sum P / 0,1 \sum t. \quad (18.14)$$

Тогда по Г.Т. Селянину, северная граница степной зоны на Европейской части России хорошо совпадает с изолинией $ГТК = 1$ (за июль–август), а северная граница зоны пустынь – с изолинией $ГТК = 0,5$. Например, для г. Москвы $ГТК = 1,4$, для г. Одессы – $0,7$, для г. Ташкента – $0,1$. Засушливым считается период при $ГТК < 1,0$, а сухим при $ГТК < 0,5$. Показателем очень сильных засух может служить $ГТК = 0,3$ и менее, сильных засух – от $0,31$ до $0,6$, средних засух – от $0,61$ до $0,8$, слабых – от $0,81$ до $1,0$.

Использование *ГТК* в качестве показателя условий увлажнения территории более удобно, чем количество осадков, поскольку помимо приходной части водного баланса (осадков) учитывается и непродуктивная часть расхода влаги для растений (испарение с поверхности почвы), зависящая от температуры воздуха. Тем не менее к недостаткам этого коэффициента относится недоучет весенних запасов влаги, накопленных за зимний период, который существенно различается от года к году. Другим недостатком *ГТК* является использование в качестве показателя испаряемости только температуры воздуха. Хотя температура воздуха тесно коррелирует с величиной дефицита влажности воздуха (d) в теплое время года; d полнее характеризует испаряемость, чем температура.

Н.В. Бова (1941) для установления начала засухи предложил показатель засушливости (K):

$$K = 10(H + Q) / \sum t, \quad (18.15)$$

где H – запасы продуктивной влаги (мм) в слое почвы 100 см весной; Q – количество осадков, выпавших с весны до наступления засухи, мм; $\sum t$ – сумма температур воздуха от даты устойчивого перехода через 0°C до даты расчета. Началом засухи по этим расчетам считается $K = 1,5$, т. к. при этом его значении начинается повреждение засухой яровой пшеницы на юго-востоке Европейской части России. Таким образом, показатель засухи (K) сочетает три основных условия для роста сельскохозяйственных культур. Его значения возрастают при улучшении условий увлажнения и уменьшаются с ростом температуры воздуха. Однако недостатком этого показателя считается отсутствие учета уровня агротехники и увлажнения пахотного горизонта в течение вегетационного периода. По интенсивности автор разделил засухи на две категории – очень сильные и сильные.

Н.Н. Иванов (1948) предложил эмпирическую формулу для определения испаряемости, а следовательно, и засушливости:

$$E_0 = 0,0018(25 + t)^2(100 - a), \quad (18.16)$$

где E_0 – испаряемость за месяц (мм), рассчитанная для открытой водной поверхности; t – средняя месячная температура воздуха ($^\circ\text{C}$); a – средняя относительная влажность воздуха за месяц. С помощью этой зависимости автор выявил коэффициент увлажнения (k), выражающий отношение годового количества осадков (P , мм) к годовой испаряемости (f , мм):

$$k = P / f. \quad (18.17)$$

В.П. Попов (1948) для общей оценки сухости (или влажности) предложил формулу

$$P = \sum q / 2,4(t - t')n, \quad (18.18)$$

где P – показатель сухости климата; $\sum q$ – годовое количество эффективных осадков; при этом автор поясняет, что эффективной является та

часть осадков, которая может быть использована растениями, т.е. из общего годового количества атмосферных осадков исключены испарение с поверхности почвы и поверхностный сток воды, не используемые растениями; $t - t'$ – психрометрическая разность; n – коэффициент, зависящий от продолжительности дня в период колошения зерновых культур.

М.И. Будыко (1952) для характеристики засушливости предложил использовать радиационный индекс сухости (K), представляющий собой отношение годового радиационного баланса подстилающей поверхности к сумме тепла (L_r), необходимой для испарения годового количества осадков (r) на той же площади:

$$K = R / L_r. \quad (18.19)$$

Радиационный индекс сухости показывает, какая доля радиационного баланса тратится на испарение осадков. При $K < 0,45$ климат, по М.И. Будыко, называется *избыточно влажным*, при этом приход тепла к почве за счет радиационного баланса намного меньше, чем это нужно для испарения выпавших осадков. При значениях K от 0,45 до 1,00 климат называется *влажным*, при K от 1,00 до 3,00 – *недостаточно влажным*, при $K > 3,00$ – *сухим*. Позднее М.И. Будыко пришел к выводу, что при условии достаточного увлажнения подстилающей поверхности затраты тепла на испарение близки к радиационному балансу.

М.С. Кулик (1952, 1953) на большом фактическом материале установил, что в фазу колошения зерновых культур декады с запасами влаги в слое почвы 0...20 см 19 мм можно считать *засушливыми*, а меньше 10 мм – *сухими*. Три сухие декады в период кущение – молочная спелость зерновых культур – признак *засухи*, а 4–5 декад – признак *сильной засухи*. Если три сухие декады начались при запасах продуктивной влаги < 60 мм в слое почвы 20...100 см, то это следует считать показателем *сильной засухи*, 4–5 сухих декад, начавшихся при таких же запасах влаги в этом слое, – показатель *очень сильной засухи*. Величина иссушения пахотного слоя почвы в период выход в трубку – цветение особенно важно для судьбы будущего урожая. Количество сухих декад в этот период является главным критерием при оценке засухи применительно к яровым культурам.

С.И. Костин (1954) предложил показатель увлажнения в виде:

$$K = P / E, \quad (18.20)$$

где P – количество осадков за тот или иной период, E – условный показатель испаряемости за тот же период:

$$E = dn(1 + 0,004t)^2, \quad (18.21)$$

где d – средний дефицит влажности воздуха за период, n – число дней в периоде, t – средняя температура воздуха за данный период. Согласно автору показатель увлажнения K , равный 0,7...0,9 характеризует недостаточное увлажнение, 0,7...0,5 – засушливое, $\leq 0,5$ – сильно засушливое.

А.И. Будаговский (1956, 1957) использовал для характеристики засухи дефицит испарения, находящийся в тесной связи с состоянием растения и урожаем. Дефицит испарения ΔE равен разности между испаряемостью (E_0) и фактическим испарением (E):

$$\Delta E = E_0 - E = (1 - W / W_k) E_0, \quad (18.22)$$

где W_k – критическая влажность почвы, начиная с которой дальнейшее повышение влажности не приводит к росту затрат воды на испарение и транспирацию. Напряженность засухи, которая характеризуется величиной ΔE , пропорциональна произведению испаряемости на недостаток почвенной влаги $(1 - W / W_k)$. Дефицит испарения равен нулю при $E_0 = 0$ или при достаточном увлажнении, когда $W \geq W_k$. При иссушении почвы, когда $W \rightarrow 0$, дефицит почвенной влаги $\Delta E \rightarrow E_0$. Таким образом, ключевыми физическими величинами, произведение которых определяет степень засушливости того или иного периода (декады, месяца, года), являются испаряемость и недостаток почвенной влаги, характеризующей состояние почвы. Ценность ΔE , как интегрального показателя напряженности засух состоит в том, что этот показатель, характеризуя явления, приводящие к нарушению водного режима растений, тесно связан с их углекислотным режимом, фотосинтезом, дыханием и в конечном итоге с урожаем. Дефицит испарения в отличие от многих других аналогичных показателей позволяет учесть степень увлажнения почвы непосредственно через величину запасов почвенной влаги деятельного слоя почвы. Вместе с тем использование данных о запасах почвенной влаги W при расчете ΔE приводит к значительным ошибкам, связанным с ненадежностью определения ее термостатно-весовым методом.

Определение величины ΔE как разности между испаряемостью и фактическим испарением ($\Delta E = E_0 - E$) исключает необходимость использовать значения запасов почвенной влаги (W).

В естественных условиях фактическое испарение растительного покрова представляет собой совместный процесс транспирации растений и испарения с поверхности почвы, в том числе и под растениями. Такое испарение называется суммарным, а в зарубежной литературе используется термин «эвапотранспирация», означающий количество влаги, переходящей в атмосферу в виде пара в результате физического испарения подстилающей поверхности и транспирации растений (биологического испарения).

С.А. Сапожникова (1958) предложила свой коэффициент увлажнения (KY), положив в его основу ГТК Селянинова:

$$KY = W + P_{\Sigma} / \gamma \sum_{t > 10^{\circ}\text{C}} t, \quad (18.23)$$

где W – влагозапасы в почве, рассчитанные по зимне-весенним осадкам; P_{Σ} – сумма осадков за период со средней суточной температурой

воздуха выше 10 °С; γ – коэффициент, переводящий $\sum t_{>10^{\circ}\text{C}}$ в испаряемость, по соотношению $\sum t_{>10^{\circ}\text{C}}$ и $\sum (E - e)$.

В агроклиматологии для оценки засушливых явлений используется также показатель влагообеспеченности (V) в процентах, предложенный А.В. Процеровым (1957):

$$V = [W_{0-100(i-1)} - W_{0-100(i)}] + R / k \sum d, \quad (18.24)$$

где $W_{0-100(i-1)}$ – запасы влаги в метровом горизонте почвы за предшествующую декаду; $W_{0-100(i)}$ – то же за рассматриваемый период; R – сумма осадков за рассматриваемый период; $\sum d$ – сумма дефицитов влажности воздуха за этот же период; k – коэффициент, зависящий от периода вегетации.

По определению А.И. Руденко (1958) на Европейской территории России *очень сильная засуха* возникает в условиях, когда за вегетационный период количество выпавших осадков составляет менее 40...50 % нормы, количество засушливых декад 4,5 – 5,4, а средняя температура воздуха превышает норму на 1,8...3,8 °С.

При осадках за вегетационный период 62...70 % нормы, при 3,5...4,2 засушливых декадах и превышении температуры воздуха на 2,1...2,3 °С возникает *сильная засуха*.

При осадках за вегетацию 69...93 % нормы, при 2,8...3,2 засушливых декадах и положительной аномалии средней температуры на 1,1...2,2 °С формируется *средняя засуха*.

Весьма обобщенным критерием этих видов засухи считается уровень снижения урожайности. Так *слабые засухи* характеризуются снижением урожайности на 10...15 %, *средние* – на 25 %, *сильные засухи* – на 50 %, *очень сильные* – более чем на 50 % от средней многолетней величины.

Ряд исследователей (В.А. Обухов, О.А. Дроздов, А.В. Мещерская) оценивают атмосферные засухи по сумме осадков в процентах средней многолетней (климатической) нормы. Так осенью *сильная засуха* наблюдается при сумме осадков менее 50 % нормы, *сильная* – при 50...70 %; *средняя* – при 71...80 % нормы.

Д.И. Шашко (1961) в качестве показателя атмосферного увлажнения (Md) использовал отношение суммы осадков ($\sum P$) к сумме средних суточных значений дефицита давления водяного пара $\sum (E - e)$, являющегося показателем испаряемости:

$$Md = \sum P / \sum (E - e). \quad (18.25)$$

Величина $Md = 0,45$ указывает на соответствие в пределах года осадков и испаряемости; при $Md > 0,45$ осадки превышают испаряемость; $Md \geq 0,60$ указывает на формирование избыточного увлажнения.

Величины $Md < 0,45$ являются показателями недостаточного увлажнения; $Md < 0,15$ указывает на крайне засушливые условия.

Вероятность засух (%) на территории России и сопредельных стран представлена на рис. 18.13. Вероятность почвенной засухи в слое почвы 0...20 см на территории субъектов РФ, рассчитанная Е.К. Зоидзе и Л.И. Овчаренко (2000), представлена на рис. 18.14.

Применительно к условиям резко засушливого климата республик Среднеазиатского региона Л.Н. Бабушкин (1964) классифицирует интенсивность воздушной засухи по величине недостатка насыщения днем (13 ч): *слабая засуха* 50...60 мб, *средняя засуха* 61...70 мб, *сильная засуха* 71...80 мб, *очень сильная засуха* – более 80 мб.

Д.А. Педь (1974) предложил показатель засушливости ($S_{i(\tau)}$), учитывающий аномалии (отклонения от нормы) осадков (ΔR), температуры воздуха (Δt) и аномалию влагозапасов в почве (ΔW):

$$S_{i(\tau)} = \Delta t / \sigma t - \Delta R / \sigma R - \Delta W / \sigma W, \quad (18.26)$$

где Δt , ΔR , ΔW – средние квадратические величины; τ – время.

Эта зависимость отражает атмосферно-почвенную засуху, наиболее опасную для сельскохозяйственных растений. Если вести расчеты по первым двум членам формулы (18.26), то оценивается атмосферная засуха, если – только по третьему члену, то возможна оценка почвенной засухи. Анализ применения этой формулы показал, что целесообразнее использовать ее для оценки небольших по площади районов (в пределах административных областей).

Е.С. Уланова (1975, 1988) для оценки атмосферно-почвенных засух вводит, наряду с осадками и температурой воздуха, данные о запасах продуктивной влаги и предлагает коэффициент увлажнения (K_1), с помощью которого можно проводить оценку влияния этого типа засух на урожайность зерновых культур:

$$K_1 = W_g + \sum P_{V-VI} / 0,01 \sum t_{V-VI}, \quad (18.27)$$

где W_g – запасы продуктивной влаги в метровом горизонте почвы во время устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С весной (мм); $\sum P_{V-VI}$ – сумма осадков за май–июнь (мм); $\sum t_{V-VI}$ – сумма средних суточных температур воздуха за май–июнь (°С). Значения коэффициентов увлажнения соответствуют: $K_1 < 15$ – очень сильная засуха; $15 \leq K_1 < 20$ – сильная засуха; $20 \leq K_1 < 25$ – средняя засуха. Зависимость средней областной (краевой) урожайности озимой пшеницы (ц /га) от коэффициента K_1 на Северном Кавказе, юго-востоке Украины и в Поволжье, по данным Е.С. Улановой (1988), и представлена на рис. 18.15 и в табл. 18.7.

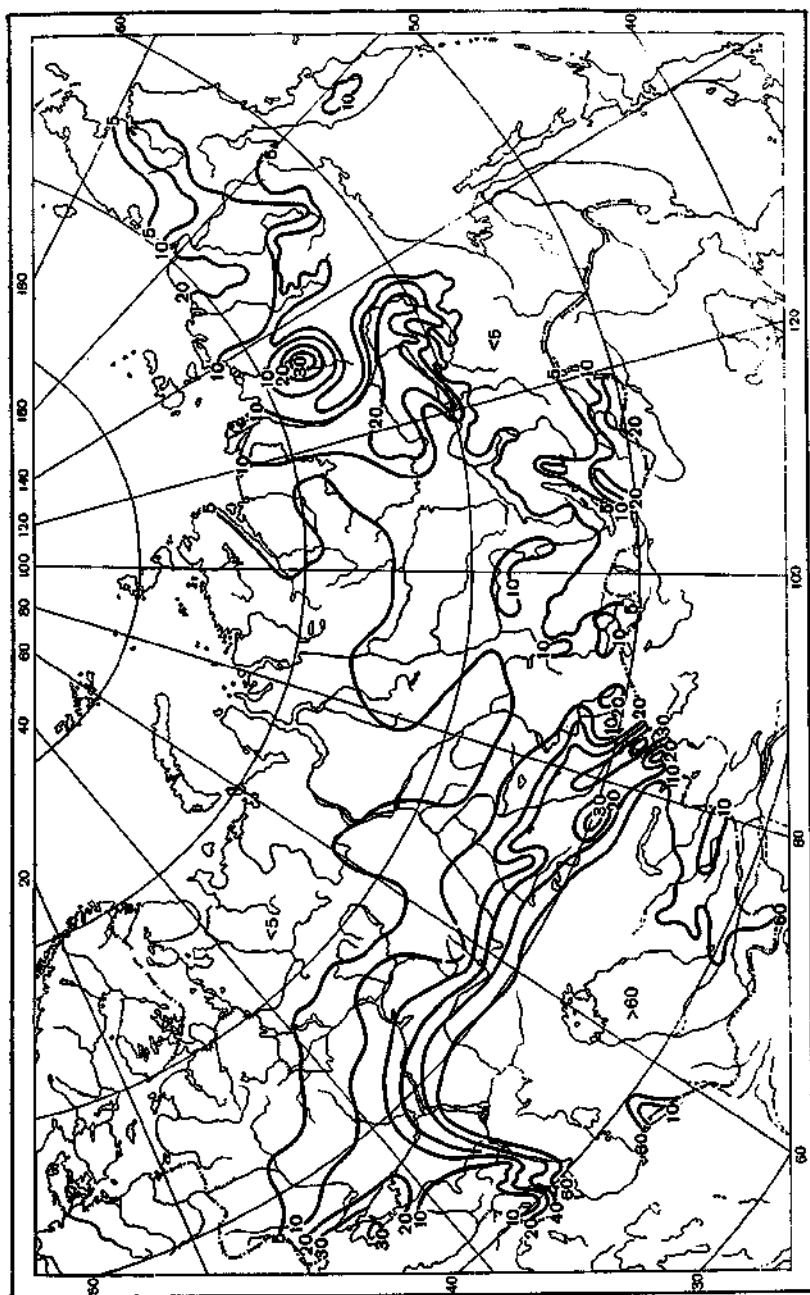


Рис. 18.13. Многолетняя средняя вероятность засух (%)

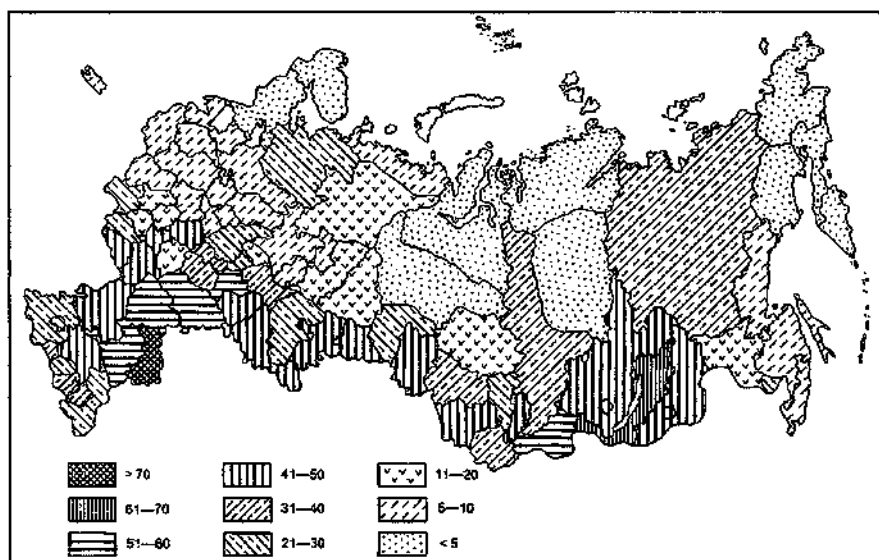


Рис. 18.14. Осредненная вероятность (%) почвенной засухи в слое почвы 0–20 см (запасы продуктивной влаги < 20 мм) на дату выхода в трубку основных сельскохозяйственных культур (озимых, ранних яровых и поздних яровых зерновых культур) по субъектам РФ

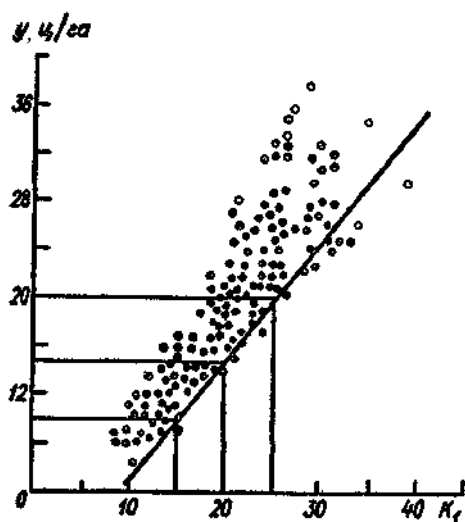


Рис. 18.15. Зависимость средней областной (краевой) урожайности озимой пшеницы y (ц/га) от коэффициента увлажнения K_1 на Северном Кавказе, юго-востоке Украины и в Поволжье

Таблица 18.7

Значения коэффициента увлажнения (K_1) и соответствующая урожайность озимой пшеницы (Уланова Е.С., 1988)

K_1	Интенсивность засухи	Урожайность, ц/га
<15	Очень сильная	8...10
$15 \leq K_1 < 20$	Сильная	10...15
$20 \leq K_1 < 25$	Средняя	15...20

Приведем несколько примеров, предложенных в разные годы зарубежными учеными для оценки условий увлажнения и засухи. Весьма полные обзоры исследований природы засух и засушливых явлений выполнены в рамках деятельности рабочих групп Комиссии по сельскохозяйственной метеорологии Всемирной метеорологической организации (КСХМ ВМО). Например, в 1971 г. рабочая группа КСХМ под председательством К.И. Хаунама (Австралия) представила доклад «Оценка засухи», в котором, в частности, был приведен обзор методов оценки засух, применяемых в различных засушливых регионах и странах мира, в том числе в России и СССР. В докладе Х.И. Ландсберга, опубликованном в Швейцарии (1975), «Засуха – повторяющийся элемент климата» также содержится обзор применяемых методик для оценки засух.

В США, Индии и во многих европейских странах широко применяется «индекс суровости (интенсивности) засух» (Drought Severity index), предложенный У.К. Пальмером (США) и опубликованный в его работе «Метеорологическая засуха» (1965). В основу своего «метода оценки степени суровости засухи» У.К. Пальмер положил уравнение водного баланса, учитывающего такие величины, как сумма осадков за год, суммарное испарение (эвапотранспирация) за год, сток почвенной влаги и др. Индекс Пальмера (IDS) изменяется в пределах от +4 до -4. IDS минус 4 означает суровую (интенсивную) засуху, IDS плюс 4 характеризует избыточное увлажнение. Карты районирования территории США по степени засушливости (распределение величины этого индекса) ежегодно публикуются Национальным управлением по океану и атмосфере США (NOAA).

За рубежом используются также три характеристики испаряемости: дефицит влажности воздуха, температура воздуха и радиационный баланс. Так В. Кеппен (1922) предложил показатель увлажнения: $P/2(t+7)$, Е. Мартонн (1926) выступил со своим показателем засушливости: $P/(t+10)$, где P – годовая сумма осадков (см), t – средняя годовая температура воздуха (°C). Эту формулу можно применять и для оценки отдельных месяцев, для этого годовые значения следует изменить на месячные.

А. Мейер (1926) ввел в свой показатель недостаток насыщения (дефицит влажности): P/d . Е. Рейхель (1928) дополнил показатель числом

дней с осадками (N): $(NP/t + 10) \cdot N$. Большую известность за рубежом получил индекс влажности (I_m) С.В. Торнтвейта (1947, 1948):

$$I_m = (100s - 60d) / n, \quad (18.28)$$

где s – сумма месячных разностей между осадками и суммарной испаряемостью для тех месяцев, когда норма осадков превосходит суммарную испаряемость, т.е. излишки влаги в почве во влажном сезоне; d – недостаток влаги, выраженный суммой месячных разностей между осадками и суммарной испаряемостью для тех месяцев, когда норма осадков меньше, чем норма суммарной испаряемости, т.е. недостаток влаги в сухом сезоне; n – сумма месячных значений суммарной испаряемости за указанные месяцы, т.е. необходимое количество влаги для растений.

Как видно из приведенных примеров, а также подавляющего большинства других известных нам критериев, засуху выражают через соотношения прихода и расхода влаги за определенные отрезки времени. Обычно это отношения поступившего количества влаги (осадки, запасы влаги в почве и др.) к их расходу (испаряемость, дефицит влажности воздуха и др.) с различными эмпирическими коэффициентами.

В климатологической и агроклиматической литературе известны каталоги засух, наблюдаемых на территории России (и других стран) за различные по продолжительности периоды.

18.2.3. Методы оценки суховеев

Одно из самых ранних упоминаний о суховеях в России принадлежит известному русскому естествоиспытателю, члену Петербургской Академии наук Палласу П.С. (1773 г.). По его описанию, «в поле бывают столь горячие ветры, что они кажутся как бы выходящими из печи и столь сильные, что они наполняют воздух воздымаемою со степей пылью. Обыкновенно они поднимаются около 2 часов пополудни и длятся до полуночи, но за полночь никогда не переходят» (здесь сохранена орфография цитируемого автора).

Изучению феномена суховеев, их распространению, установлению критериев интенсивности этого явления посвящена обширная агрономическая, агроклиматическая и агрометеорологическая литература. Исследованием природы суховеев занимались несколько поколений ученых, назовем только некоторых из них. К.С. Веселовский (1857) пришел к выводу, «что явление жгучего ветра свойственно вообще степной полосе южной России». А. Шишкин (1873) отмечал, что весной, когда ветры жгучи и сухи, они убивают растения, а в середине лета сухие ветры всегда ускоряют созревание хлебов, причем зерно получается легковесное. К.А. Тимирязев (1892) считал иссушающие ветры – суховеи, вызывающие усиленное испарение воды растениями (интенсивная транспирация), – главной причиной засухи. А.И. Воейков (1903) считал, что «все жаркие и сухие ветры»,

наблюдающиеся на юге и юго-востоке России, относятся к суховеям; он сравнивал степные суховеи с феном, при котором суточные колебания температуры и относительной влажности воздуха также малы. Н.П. Адамов. (1904) писал, что сильные юго-восточные ветры являются зачастую благодаря своей сухости бичом для многих культур, что в период, когда зерно еще не отвердело «суховеем нередко уничтожается труд целого года». П.А. Сафонов (1908) одним из первых привел количественные критерии суховеев: относительная влажность воздуха 34...31 % при температуре воздуха более 25 °С. Автор также отметил, что при суховее «растение испаряет больше, чем получает; расход влаги превышает ее приход». В.О. Аскинази (1928) полагал, что для суховеев характерен суточный ход ветра, рост температуры воздуха в дневные часы, низкая влажность воздуха и резкое ее падение к 13 часам.

М.С. Кулик (1952–1957) на основании экспериментальных работ предложил считать началом суховея сочетание трех основных показателей состояния приземного слоя воздуха, а именно: относительная влажность воздуха ≤ 30 %, температура воздуха ≥ 25 °С и скорость ветра ≥ 5 м/с. Для удобства оценки начала суховея он предложил также использовать вместо относительной влажности воздуха недостаток насыщения, равный 23 мб (17 мм) и более при скорости ветра ≥ 5 м/с на высоте флюгера 10 м.

В Китайской Народной Республике Чэн Дэ-ю и Дэнь Цянь-хуа (1964) оценивали суховеи по коэффициенту (K), который рассчитывали по соотношению между температурой воздуха в 13 ч, превышающей 30 °С ($T \geq 30$), относительной влажности воздуха менее 30 % ($R \leq 30$) и наблюдаемой скоростью ветра (V_{13}), отнесенной к начальной скорости ветра (V_0), равной 3 м/с:

$$K = V_{13} T \geq 30 / V_0 R \leq 30. \quad (18.29)$$

Установлено, что при $K < 1$ суховея отсутствует, при $K = 1...2$ суховея слабый, при $K = 2...5$ суховея умеренный, при $K > 5$ интенсивный суховея. С этим критерием сопоставляются значения запасов влаги для оценки степени повреждения растений.

С более полной обзорной сводкой исследований природы суховеев можно познакомиться в работах И.Е. Бучинского (1976) и С.И. Смирновой (1976).

Из этого фрагментарного обзора ранних работ видно, что в основу определения суховея положено сочетание различных погодных условий в 13 часов: высокая температура воздуха, низкая относительная влажность воздуха и скорость ветра.

Наиболее полно агрометеорологическую сущность суховеев и степень повреждения ими сельскохозяйственных культур выявила Е.А. Цубербиллер. По ее мнению, надежным показателем суховеев является дефицит влажности воздуха, а скорость ветра усиливает его воздействие

на растения, поскольку непрерывное «продувание» в травостое повышает воздухообмен в среде растений и увеличивает их транспирацию и испарение с поверхности почвы. Как показывают наблюдения, скорость ветра при суховеях в большинстве случаев меньше 10 м/с, обычно в пределах 3...5 м/с. Высокая испаряемость при очень интенсивных суховеях обуславливает испарение более 8 мм в сутки (или 80 т воды с 1 га). Степень повреждения посевов суховеями в значительной мере зависит от интенсивности и продолжительности этого явления (обычно 1...2 недели), от величины запасов продуктивной влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы. При достаточных запасах почвенной влаги растения, поврежденные дневным суховеем, успевают восстанавливать свой водный баланс за ночные часы.

Причиной повреждения растений суховеями является несоответствие между фактическим расходом влаги и физиологической потребностью в ней растений, т.е. та же, что и при засухах. Еще в 1921 г. физиолог растений В.Р. Заленский отмечал, что под воздействием суховея листья зерновых культур быстро желтеют или, оставаясь зелеными, высыхают в течение нескольких часов. Повреждения от суховея проявляются то в полном или частичном высыхании листьев и преждевременном их опадении, то в побелении в течение одного-двух дней колосовых и цветковых чешуй, то в высыхании еще не вполне налившегося зерна. Этот автор установил, что при температуре 35...37 °С у многих растений устьичный аппарат перестает регулировать испарение, что значительно ускоряет процесс высыхания растений во время суховея.

С 1931 г. физиологи растений стали различать два типа повреждения растений: захват и запал.

Захват – это одна из форм повреждения зерна под влиянием суховея, при котором происходит нарушение водного баланса растений, быстрое иссушение его надземных органов (листья засыхают, сохраняя зачастую зеленый цвет). Из-за сухости воздуха нарушаются процессы опыления (происходит образование череззерницы у злаков), а завязавшееся зерно обезвоживается, сморщивается, теряя при этом свою массу и качество. Обычно захват зерна происходит в тех случаях, когда запасы продуктивной влаги в пахотном горизонте составляют ≤ 10 мм, а в метровом слое почвы $\leq 50...60$ мм.

Запал – другая форма повреждения растений чрезмерно высокими температурами воздуха, почвы, особенно в условиях засухи или суховея, в результате которых происходит сильный перегрев растений, сопровождающийся нарушением водного баланса, частичным разрушением хлорофилла. Внешними признаками ожогов надземных органов растений является их пожелтение, побеление, покраснение или появление бесцветных пятен на листьях. У хлебных злаков в таких условиях прекращается

опыление (оплодотворение), а начиная с фазы молочной спелости, нарушается налив зерна, приводящий к образованию щуплости и морщинистости зерновки. Вследствие этого образуется череззерница и/или пустоколо-сье, снижается величина урожая зерна и резко ухудшается его качество.

Зачастую эти два понятия употребляются как синонимы, поскольку в природных условиях обе формы повреждения проявляются одновременно. Известный физиолог растений Н.А. Максимов причиной захвата зерна считал высокую температуру и сухость воздуха.

П.А. Генкель (1946) в отличие от мнения других физиологов считал, что решающим моментом повреждения посевов от суховея является не столько высокая температура и сухость воздуха, сколько «быстрота и скачкообразность» изменения этих факторов. Вследствие этого растения не успевают приспособиться к быстрым изменениям состояния среды, т.е. растения не проходят «закаливание» к недостатку влаги, поэтому гибнут в сравнительно короткий срок.

По экспериментальным данным И.А. Стефановский (1950) установил, что температура воздуха 30 °С безболезненно переносится растениями в течение 10...15 часов при влажности почвы 70 % полной влагоемкости. В период суховея при недостатке почвенной влаги (30 % полной влагоемкости) в фазу колошения происходит снижение урожайности на 20...25 %, а при суховея в фазу начала налива зерна урожайность снижается на 13...18 %.

Известно, что температура растения значительно повышается при уменьшении интенсивности транспирации. Поэтому температура тканей растения обычно не совпадает с температурой окружающего воздуха. Несмотря на поглощение листьями солнечной энергии, их температура в жаркие часы дня обычно оказывается ниже температуры воздуха, т.к. большая часть энергии потребляется на испарение воды. Беспрепятственная транспирация представляет собой важное условие для защиты листьев от чрезмерного перегрева. Завядающие растения с закрытыми устьицами быстрее погибают от перегрева, чем достаточно снабженные водой. Транспирация увядших листьев сокращается в 5...10 раз, а температура поверхности листьев в этой связи может повышаться на 4...6 °С (Максимов Н.А., 1952). Эти данные разъясняют условия возникновения запала у зерновых культур.

Исследования А.А. Скворцова показали, что при нормальной жизнедеятельности растений на транспирацию затрачивается 60...100 % радиационного баланса, т.е. тепла, поглощенного полем. Однако при большом недостатке влаги в почве и высоком дефиците влажности воздуха увеличение интенсивности транспирации оказывается невозможным, растение начинает завядать и запал зерна становится вполне реальной угрозой при температурах воздуха 38...40 °С (Цубербиллер Е.А., 1959). Следовательно, в зависимости от уровня водоснабжения растения проявляют

неодинаковую устойчивость к атмосферной засухе. Достаточная влагообеспеченность растения обуславливает более интенсивную транспирацию и, соответственно, меньшее повреждение от атмосферной засухи. В полной мере это относится и к влиянию на растения суховея.

С.И. Смирнова (1976) выполнила сравнение суточных изменений метеорологических элементов в суховейные и не суховейные дни табл. 18.8.

Таблица 18.8

Типизация интенсивности суховеев по дефициту парциального давления водяного пара (гПа) и скорости ветра

Метеорологические элементы	Дни	
	суховейные	не суховейные
Температура воздуха, °С	15,4	13,1
Относительная влажность воздуха, %	35,0	30,0
Скорость ветра, м/с	3,0	2,5
Рост недостатка насыщения от 7 к 13 ч, мб	21,1	12,4

Примечание. 1 мб = 1 гПа в Международной системе СИ.

Как видно, суточные изменения метеорологических элементов при суховее по своим абсолютным величинам превышают амплитуду их изменения в обычные, не суховейные дни.

Д.Л. Лайхтман и Н.П. Русин (1957) установили, что во время суховеев подача воды в листья через корневую систему не компенсирует расходы влаги через транспирацию. При суховее создается дефицит транспирации, который оказывается тем больше, чем сильнее иссушающее действие суховея. По данным этих авторов количественный критерий транспирации составляет 3 мм в сутки.

В качестве показателя интенсивности суховеев и степени повреждения растений Е.А. Цубербиллер (1966) использовала *эвапорометрический коэффициент* (K_s). Этот коэффициент, выражающий отношение фактического испарения с естественной поверхности поля E_ϕ (мм) к испарению с водной поверхности E_0 (испаряемости, мм), был предложен ранее А.А. Скворцовым (1950):

$$K_s = E_\phi / E_0. \quad (18.30)$$

Е.А. Цубербиллер и Г.В. Белухиной установлено, что при нормальном развитии зерновых культур значение K_s в дневные часы сохраняется в пределах 0,8...1,5. При $K_s < 0,5$ наступают небольшие изменения водного баланса растений, которые они могут переносить в течение пяти суток без существенных повреждений. Такое значение коэффициента соответствует характеристике *слабого суховея* и применимо к растениям, не прошедшим «закалки» к засухе. Растения, прошедшие такую «закалку», выдерживают воздействие суховея при K_s , равном 0,4...0,3. Начало снижения тургора листьев у растений умеренного климата отмечают при

дефиците насыщения водяного пара около 20 гПа. В табл. 18.9 представлена характеристика различных по интенсивности суховеев и степени повреждения ими растений.

Детальные полевые и лабораторные исследования, выполненные Е.А. Цубербиллер, позволили выявить критические условия, вызывающие повреждения зерновых культур в период засух и суховеев (табл. 18.10).

Таблица 18.9

Агрометеорологические показатели суховеев и степень повреждения зерновых культур (Цубербиллер Е.А., 1966)

Суховеи	E_0 , мм/ сут	Дефицит насыщения водяного пара (гПа) в 13 ч при скорости ветра, м/с		Запасы продуктивной влаги (мм) в различных слоях почвы			K_s	Характеристика степени повреждения растений
		<10	≥10	0...20	0...50	0...100		
Слабые	3...5	20...32	13...27	≤20	≤50	≤80	0,5...0,4	Легкое снижение тургора
Средней интенсивности	5...6	33...39	28...32	≤10	≤30	≤50	0,3	Значительное снижение тургора листьев, их скручивание, пожелтение, подсыхание. Захват зерна через 3...5 суток
Интенсивные	6...8	40...52	33...45	≤10	—	≤30	0,2...0,1	Сильное увядание и усыхание вегетативной массы, захват зерна через 2...3 суток
Очень интенсивные	>8	≥53	≥46	0	—	≤30	0,2...0,1	Быстрое и сильное повреждение вегетативной массы, захват зерна через 1...2 суток

Примечание. E_0 – испаряемость, мм/сут; K_s – эвапориметрический коэффициент

Таблица 18.10

Критические для зерновых культур значения дефицита насыщения водяного пара, вызывающие повреждение растений при различных запасах влаги в почве (Цубербиллер Е.А., 1966)

Характер повреждений	Критические значения дефицита насыщения, гПа	Запасы продуктивной влаги (мм) в слоях почвы	
		0...20 см	0...100 см
Легкое снижение тургора	20	<20	<100
Скручивание листьев	26	<10	80...90
Значительное снижение тургора	33	10...15	70...80
Пожелтение листьев	33	<10	<50
Подсыхание листьев	40	0...5	<50
Очень сильное снижение тургора	40	0...5	<35
Побеление колосковых чешуй и захват зерна	40	<10	<35

Детальное исследование природы суховеев в степной зоне Нижнего Дона и Северного Кавказа, выполненное С.И. Смирновой (1976) по материалам многолетних наблюдений сети метеорологических станций региона, позволило ей выделить комплекс агрометеорологических элементов, характеризующий суховеи в этом регионе (табл. 18.11).

Таблица 18.11

Комплекс агрометеорологических элементов, характеризующий начало повреждений зерновых культур в разные фазы развития зерновых культур в Северо-Кавказском регионе

Фазы развития зерновой культуры	Недостаток насыщения в 13 ч, мб	Запасы продуктивной влаги (мм) в слоях почвы, см			Скорость ветра, м/с
		0 – 20	0 – 50	0 – 100	
До выхода в трубку и колошения	≥22	≤10	≤20	≤50	≥3...5
Колошение – молочная спелость	≥27	≤10	≤20	≤50	≥3...5
Молочная спелость – восковая спелость	≥30	≤10	≤20	≤50	≥3...5

18.2.4. Условия возникновения суховеев

Весь комплекс гидрометеорологических условий, называемый суховеем, является следствием развития определенных атмосферных процессов. А.И. Воейков (1903) один из первых высказал предположение, что суховеи представляют собой нисходящее движение воздуха в передней части антициклона. Не останавливаясь на динамике научных взглядов о происхождении суховеев, отметим, что основным процессом образования суховейных явлений является трансформация воздушных масс, поступающих из северных районов идвигающихся над теплой (разогретой) подстилающей поверхностью. По данным П.К. Евсеева (1957),

использовавшего аэрологические наблюдения, образование суховея связано с синоптическими процессами большого масштаба, при которых слой воздуха с низкой влажностью достигает мощности в 2...3 км и больше. Возникновение суховея связано с нарушением зональной циркуляции атмосферы и обусловлено наличием теплого высокого антициклона над центральными и юго-восточными районами Европейской части России при мощной адвекции тепла с юга или юго-запада и адвекции холода в восточные районы. Если этот процесс устойчивый, то в системе антициклона происходит трансформация воздушных масс.

По аэрологическим материалам наблюдений в период развития интенсивных суховея были построены траектории движения воздушных масс на различных барических уровнях, схемы которых представлены на рис. 18.16 (а, б, в). Как видно на этих рисунках, у поверхности земли все воздушные массы, поступающие на юго-восток Европейской части страны, проходят через Прикаспийскую низменность, куда они

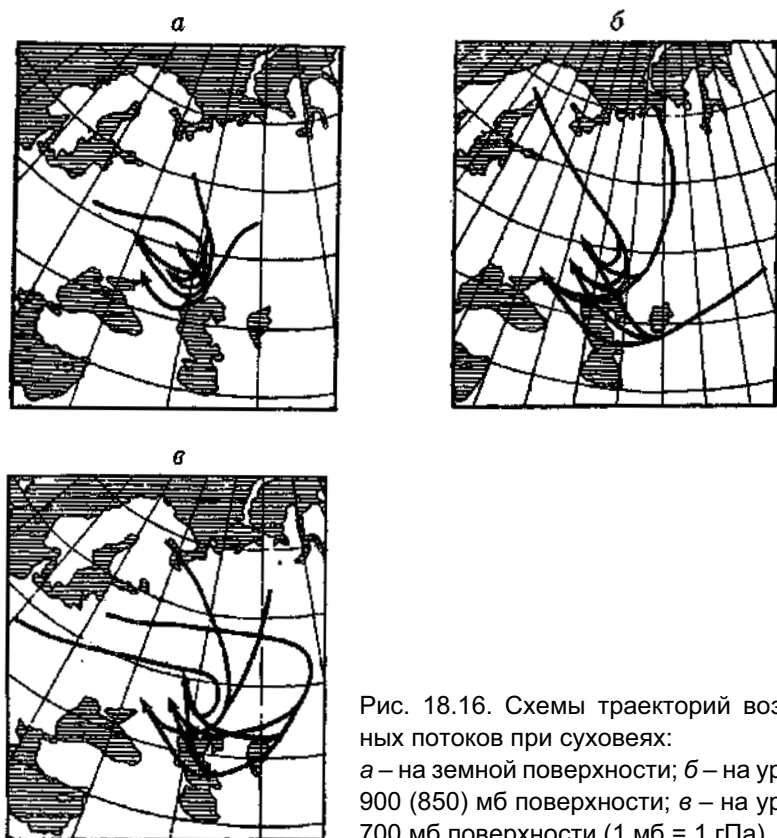


Рис. 18.16. Схемы траекторий воздушных потоков при суховеях:

а – на земной поверхности; б – на уровне 900 (850) мб поверхности; в – на уровне 700 мб поверхности (1 мб = 1 гПа)

поступают от ветров северных румбов. Ни одна приземная траектория не затрагивает воздушных масс территории бывшей Средней Азии. В Прикаспии в суховейные дни преобладают северные вторжения воздушных масс. На уровне поверхностей 900 (850), 700 мб сохраняется та же картина. В некоторых случаях траектории проходят через Западный Казахстан, но они идут из Западной Сибири и не затрагивают территорию Средней Азии.

Особенности циркуляции воздушных масс, их трансформация в период развития суховея над Европейской частью страны подробно описаны в специальной литературе (Суховей, их происхождение и борьба с ними, 1957 и др.); на страницах этого пособия они не рассматриваются.

Е.А. Цубербиллер (1959) показала, что суховей чаще всего наблюдается на юго-западной, южной и юго-восточной перифериях антициклонов или в размытых областях высокого давления, расположенных над северной или центральной частью Европейской территории России и за Уральским хребтом. Северные вторжения антициклонов вызывают суховей сначала в восточных районах Русской равнины, затем – в Центрально-Черноземных областях и на востоке Украины. Северо-западные вторжения антициклонов формируют суховей в северо-западных регионах, затем в центральных районах ЕТС и в Украине.

Таким образом, исследования многих авторов доказали, что суховей возникает только при определенных аэросиноптических условиях, обеспечивающих передвижения воздушных масс из северных районов, в процессе которого создаются благоприятные условия для трансформации воздушных масс.

18.2.5. Повторяемость и вероятность засух и суховея в России и сопредельных странах СНГ

При составлении каталога засух на территории России критерием года с засухой А.И. Неушкин и А.Т. Санина (2002) в качестве критериев приняли: дефицит осадков ($< 50\%$ нормы) в течение вегетационного периода при положительной аномалии температуры воздуха ($T > \sigma$) более чем на 50% рассматриваемой территории и снижение урожая зерновых на 25% и более. Авторы выполнили анализ погодичных наблюдений с 1871 по 1975 год и представили перечень лет с засухами по десятилетиям (табл. 18.12).

Как видно из этой таблицы, за 105-летний период наблюдался 41 год с засухами. Эти засухи были распространены в центральных областях Европейской части России, в Центрально-Черноземных областях, в Волго-Вятском регионе, в Поволжье и в южных районах Урала. В различных районах наблюдались засухи по два и более года подряд, но в 70% случаев отмечались засухи в течение одного года.

Таблица 18.12

Годы и число лет с засухами на Европейской части России

Номер десятилетий начиная с 1871 г.	Годы с засухами	Число засух
1	1871, 1877	2
2	1885, 1889, 1890	3
3	1891, 1892, 1895, 1897, 1898	5
4	1901, 1905, 1906, 1907, 1908	5
5	1911, 1914, 1917, 1920	4
6	1921, 124, 1927, 1930	4
7	1931, 1934, 1936, 1938, 1939	5
8	1943, 1946, 1948, 1950	4
9	1951, 1954, 1957, 1959	4
10	1961, 1963, 1964	3
11	1972, 1975	2

В своей работе 1980 г. профессор О.А. Дроздов отмечал: «Строгой периодичности засух в смысле регулярного повторения их через определенное число лет с сохранением фазы колебания в течение очень большого временного интервала в рядах по засухам, разумеется, нет, но вероятности засух существенно различаются в зависимости от того, когда наблюдалась засуха в прошлом. Это уже дает некоторую информацию потребителю, климатологу и прогнозисту, насколько в том или ином году велика вероятность засухи».

При проведении анализа засух на территории бывшего СССР за 95 лет (1891...1985 гг.) Е.С. Уланова (1988) выделила *сильные засухи*, охватывающие одновременно по 7...10 основных зерносеющих районов и *средние засухи*, наблюдаемые одновременно в 5-6 зерновых районах. За эти годы наиболее неблагоприятными периодами по условиям формирования урожая зерновых культур были пятилетия: 1951...1955 и 1981...1985 гг., когда наблюдалось по две сильные засухи и одной средней. Четко выраженной периодичности засух обнаружить не удалось, но зачастую сильные засухи приходились на первые годы нового десятилетия: 1891, 1901, 1911, 1921, 1931, 1951, 1981. В первые годы некоторых других десятилетий отмечались средние и локальные засухи, охватывающие 5-6 и менее зерновых районов страны (1941, 1961, 1971, 1991). Однако это не закономерность, т.к. в 2001 г. был собран очень высокий урожай зерновых культур в России. Е.С. Улановой была рассчитана вероятность сильных и средних засух на территории основных зерновых регионов (табл. 18.13).

Таблица 18.13

Вероятность сильных и средних атмосферных засух за период с 1891 по 1985 г.

Территория	Число засух			Вероятность засух, %		
	сильных	средних	всего	сильных	средних	Всего
Степь Украины	14	8	22	15	8	23
Лесостепь Украины	12	10	22	13	10	23
Северный Кавказ	14	14	28	15	15	30
Нижнее Поволжье	22	16	38	23	17	40
Среднее Поволжье	16	18	34	17	19	36
Центрально-Черноземные обл.	11	11	22	12	12	24
Южный Урал	22	18	40	23	19	42
Средний Урал	8	11	19	8	12	20
Волго-Вятский и Центральный районы (южная половина)	7	10	17	7	10	17
Западная Сибирь (степные районы)	9	16	25	9	17	26
Северный Казахстан	17	24	41	18	25	43

Из этой таблицы следует, что чаще всего сильные засухи наблюдаются в Нижнем Поволжье, на юге Урала и в северных областях Казахстана, где вероятность их составляет 18...23 %, вместе со средними засухами 40...43 %. В степных и лесостепных районах Украины, на Северном Кавказе и в Среднем Поволжье вероятность сильных засух снижается до 13...17 %, в Центрально-Черноземных областях, на Среднем Урале и в Западной Сибири – до 8...12 %. В большинстве этих районов высокая вероятность средних засух, поэтому общая вероятность (сильных и средних засух) достигает 20...40 %. Повторяемость засух увеличивается с северо-запада на юго-восток в Европейской части России и с севера на юг – в Азиатской части страны.

Известно, что суховейная погода формируется в подавляющем большинстве случаев в период резко выраженной и длительной засухи. Справедливо замечание Е.Е. Федорова (1934), что суховеи представляют «явление погоды засухи в наиболее крайней степени».

Чаще всего суховеи наблюдаются на юге Русской равнины, в центральных районах Прикаспия, являющиеся очагами трансформации воздушных масс, что подтверждается розами суховейных ветров (Бучинский И.Е., 1976). В Западной Сибири наибольшая повторяемость суховеев наблюдается в мае и июне: в Кулундинской степи Алтайского края, в лесостепных и степных районах Новосибирской и Омской областей. На Европейской части России – в июле, в Украине – в августе. На рис. 18.17 представлено районирование территории Русской равнины по среднему многолетнему числу дней с суховеями.

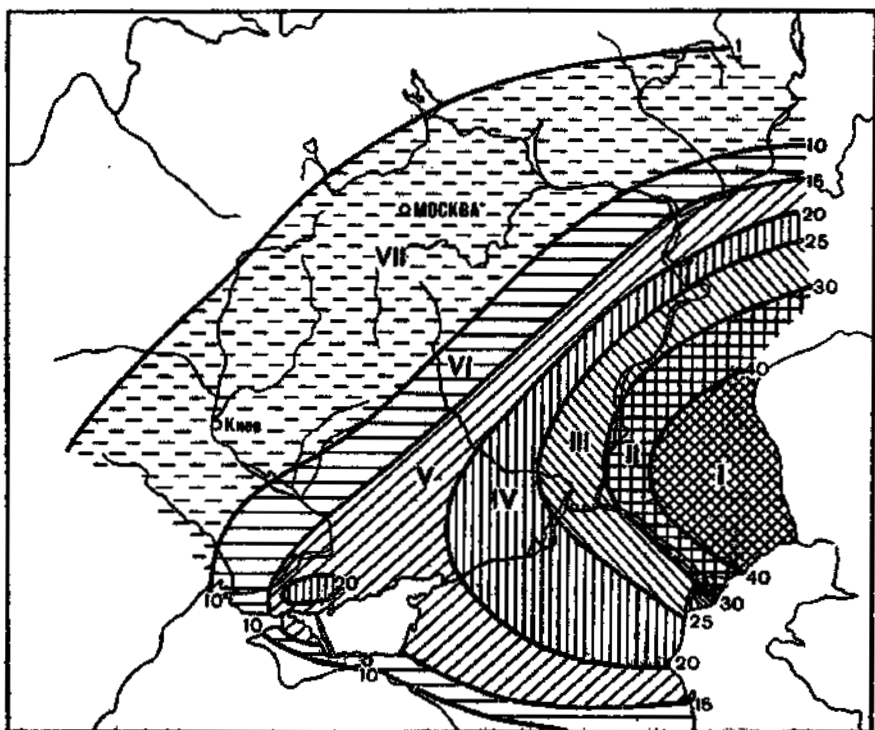


Рис. 18.17. Районирование Русской равнины по степени подверженности ее засухам: I – Прикаспийский, II – Заволжский, III – Приволжский, IV – Кубанский, V – Придонский, VI – Приднепровский, VII – Западный

В жарких и засушливых условиях равнинной части республик Средней (Центральной) Азии и Южного Казахстана повторяемость засух и засуховеев наиболее высокая. Возникновение этих явлений охватывает период с апреля по сентябрь. Среднее число дней с засухой и засуховеем за период май – сентябрь варьирует от 63 до 72 в различных районах этой территории; в зоне орошения – значительно меньше – 16. Наибольшее число таких дней (до 25) отмечается в июле. Повторяемость этих явлений в республиках Средней Азии наблюдается в 90...100 % лет и только в предгорных районах и в орошаемой зоне лишь в 55...10 % лет. Направления ветров при засуховеев в этом регионе почти совпадают с преобладающими здесь северным и северо-восточным румбами.

Для этой территории проф. Л.Н. Бабушкин (1957) предложил следующие градации оценки степени засуховейности летнего периода в Средней Азии по дефициту насыщения в 13 ч (табл. 18.14).

Таблица 18.14

Градация степени суховейности по величине дефицита насыщения

Степень суховейности	Дефицит насыщения, гПа	Степень суховейности	Дефицит насыщения, гПа
Слабая	50...60	Сильная	70...80
Средняя	60...70	Очень сильная	> 80

Высокая повторяемость засушливых явлений в условиях равнин и предгорий в Среднеазиатском регионе связана в первую очередь с режимом выпадения осадков. Основная часть осадков выпадает в холодные месяцы года (октябрь–март), когда формируются основные запасы почвенной влаги, а в горах происходит накопление снега. В теплые месяцы года (апрель–сентябрь) в равнинной и предгорной зонах выпадение осадков наблюдается редко. В летний сухой и знойный период происходит интенсивное расходование почвенной влаги за счет процессов испарения и транспирации растительного покрова. В результате таяния снега в горах в ирригационную сеть поступает вода, обеспечивающая поливное возделывание основных сельскохозяйственных культур в регионе.

Развитие естественной растительности определяется количеством влаги, накопленной в почве в холодный период. Чем раньше истощается почвенная влага из корнеобитаемых горизонтов почвы, тем раньше наступает почвенная засуха и тем менее благоприятными оказываются условия для богарного (не поливного) земледелия и естественной растительности. В этом регионе уровень естественного увлажнения характеризуется соотношением между количеством выпавших осадков и количеством испарившейся из почвы влаги за определенный период.

Один из методов оценки естественного увлажнения территории и времени наступления почвенной засухи заключается в подекадном расчете испаряемости по формуле (Бабушкин Л.Н., 1957)

$$q = 0,5d, \quad (18.31)$$

где q – средняя испаряемость за сутки, мм; d – средний суточный дефицит влажности воздуха, мм. За каждую декаду начиная с первых осенних дождей из суммы осадков вычитается испаряемость; получившиеся разности (осадки минус испаряемость) суммируются. Сопоставление сумм этих разностей на любое число конца зимы, весны или начала лета с абсолютными значениями запасов влаги в метровом слое почвы, определенными инструментально на сети гидрометеорологических станций, показало весьма тесную корреляционную связь:

$$W = -0,00198X^2 - 0,95X + 120, \quad (18.32)$$

где W – абсолютные запасы влаги в метровом слое почвы (мм) на определенную дату; X – сумма разностей (осадки минус испаряемость), мм, на то же число.

Расчеты по этой зависимости показали, что к моменту, когда вычисляемая последовательно с осени сумма разностей (осадки минус испаряемость) в конце весны или в начале лета подходит к нулю, в пахотном горизонте на глубине 30...40 см остается только неусвояемая растениями влага. Эта дата и принимается за время начала почвенной засухи.

Расчеты по этой зависимости многолетних данных позволили Е.Г. Бродскому построить карту времени наступления почвенной засухи в Среднеазиатском регионе (рис. 18.18). Как видно на этом рисунке, на огромной равнинной территории региона примерно до высоты 200...250 м. н. у. м. почвенная засуха начинается в первой декаде апреля. Изохрона наступления почвенной засухи в низких предгорьях на высотах 300...450 м соответствует дате 1 мая. По мере увеличения абсолютных высот над уровнем моря в горных частях региона средние многолетние даты наступления почвенной засухи сдвигаются на середину летних месяцев, а на высотах более 1500...2000 м почвенная засуха фактически не обнаруживается или она наступает в августе–сентябре. Это связано с режимом выпадения осадков в горных районах летом.

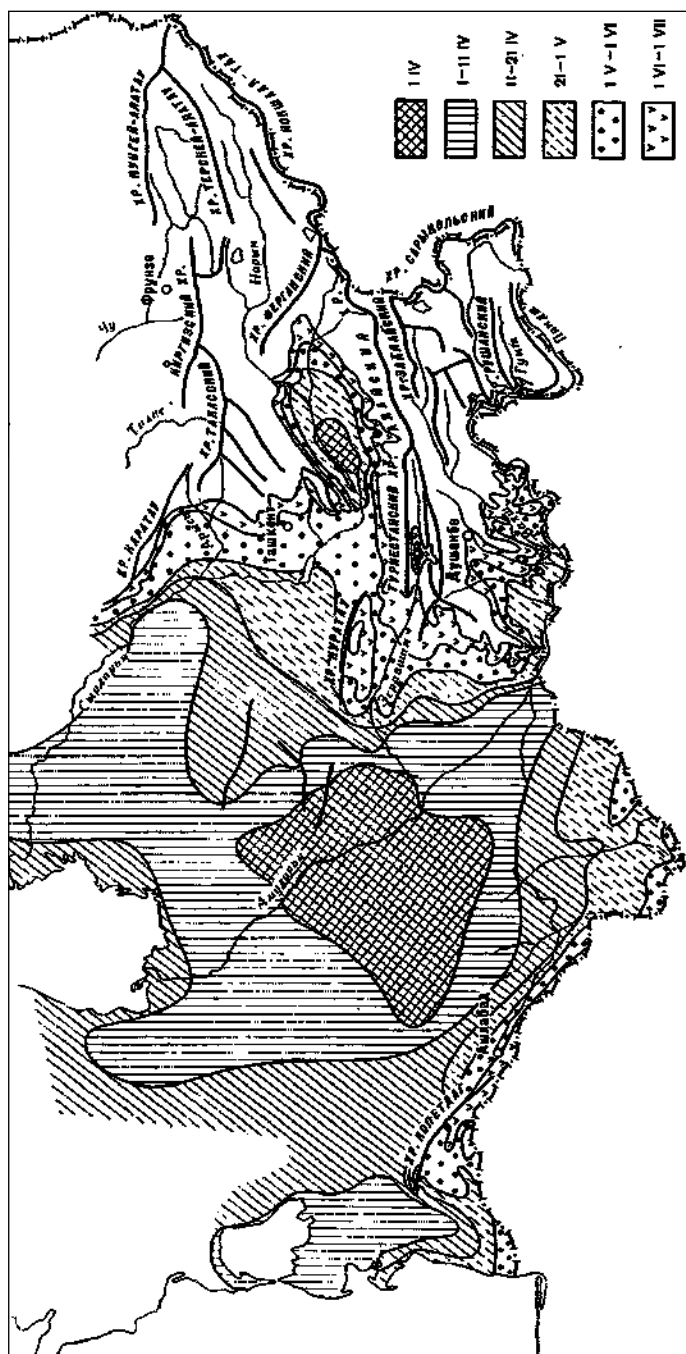
Продолжительность суховеев в среднем по Европейской части России составляет обычно 3...4 дня (максимум 6...8 дней). В годовом ходе максимум явления приходится на вторую половину июля, август – первую половину сентября, а в суточном ходе – на вторую половину дня.

На Европейской части России интенсивные суховеи наблюдаются с апреля по сентябрь. Их повторяемость особенно высока в Поволжье и на территории Прикаспийской низменности: в эти месяцы до 40...80 дней с суховеями. В степной зоне интенсивные суховеи наблюдаются в 15...40 % лет, причем число суховейных дней в году варьирует от 1...3 до 15...25 в отдельные годы. В лесной зоне такие суховейные дни отмечаются весьма редко: 1...2 в 10 лет. Слабые суховеи в этой зоне (на северо-западе России) отмечаются чаще: 2...3 дня в году и до 10...15 дней – на юге сибирской тайги.

На рис. 18.19 представлено среднее многолетнее число дней с суховеями за апрель–октябрь в северо-восточной части Казахстана и в южных районах Западной Сибири (Сенников В.А., Сляднев А.П., 1972).

В лесостепной зоне среднее многолетнее число дней со слабыми суховеями колеблется от 14 на западе до 30 на востоке; в степной зоне – соответственно от 30 до 60.

Зная среднее многолетнее число дней с суховеем, вероятность возможного числа дней с суховеем в текущем году можно определить по номограмме (рис. 18.20). Продолжительные суховеи усиливают степень повреждения растений. Вероятность многодневных суховеев (более 5 дней) возрастает в летние месяцы. Например, в Украине вероятность таких суховейных периодов в мае составляет около 20 %, в июне – 25...28 %, в июле – 30 %.



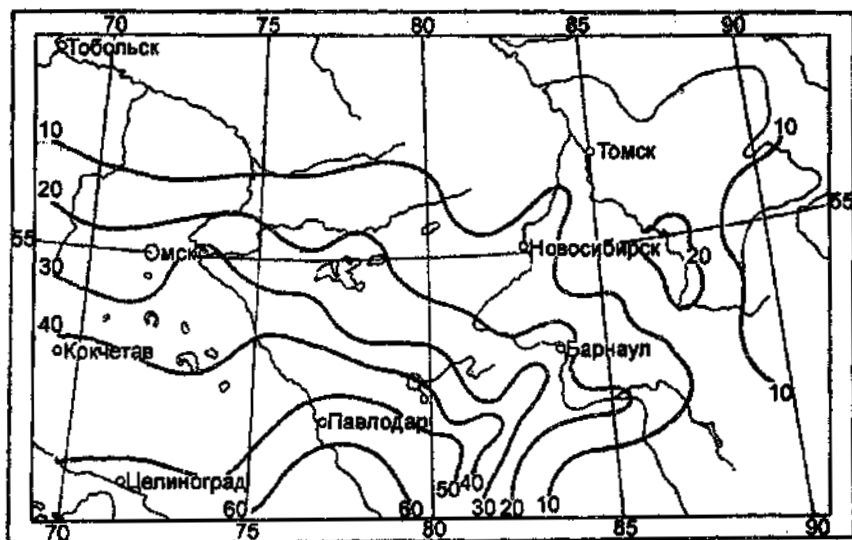


Рис. 18.19. Среднее многолетнее число дней с суховеями за апрель–октябрь в Северном Казахстане (Сенников В.А., Сляднев А.П., 1972)

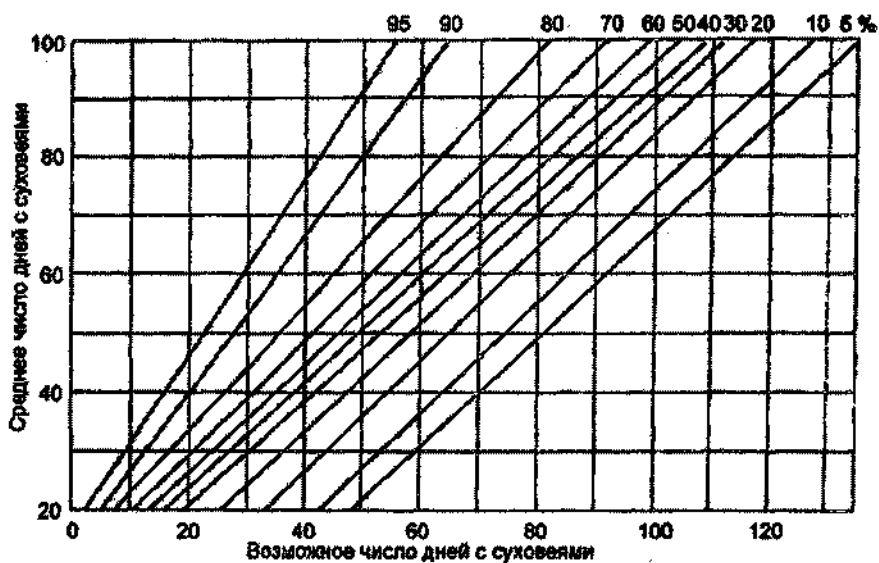


Рис. 18.20. Номограмма для расчета суммарной вероятности (%) числа дней с суховеями в зависимости от средних многолетних значений за период апрель–октябрь (Пасечнюк Л.Е., Сенников В.А., 1983)

Е.А. Цубербиллер (1959) выполнила агроклиматический анализ повторяемости суховеев различной интенсивности за репродуктивный период растений на территории основных почвенно-климатических зон (табл. 18.15).

Таблица 18.15

Повторяемость числа дней с суховеями, запасы почвенной влаги и вероятность повреждения зерна (Цубербиллер Е.А., 1959)

Почвенно-климатические зоны	Среднее число дней с суховеями за репродуктивный период		Средние запасы продуктивной влаги (мм) в слое почвы 0–100 см	Вероятность повреждения зерна (% лет)
	интенсивными	средней интенсивности	за репродуктивный период	
Лесная	0,1...0,3	0...1,0	60...100	0...10
Лесостепная	0,3...0,6	1,0...2,0	50...60	10...20
Степная	0,6...1,5	2,0...4,0	30...50	20...30
Засушливая степная	1,5...3,0	4,0...6,0	20...30	30...50
Полупустынная	3,0...5,0	6,0...10,0	10...20	50...70
Переходная к пустыне	Более 5,0	Более 10,0	Менее 10	Более 70

18.2.6. Влияние засух и суховеев на урожайность зерновых и плодовых культур

Из всех неблагоприятных гидрометеорологических явлений наибольший урон сельскохозяйственному производству наносят интенсивные и длительные засухи, охватывающие значительную часть зернового клина страны. Это преобладающие территории Поволжского, Северо-Кавказского, Центральнo-Черноземного и южной половины Уральского экономических районов с плодородными черноземными почвами. Эти районы дают до 2/3 валового сбора зерна в России. Снижение урожайности и валовых сборов зерна в этих районах в годы с сильными засухами достигает 40...60 % и более по сравнению с годами, благоприятными по условиям увлажнения (Уланова Е.С., Страшная А.И., 2000).

В истории страны хорошо известны годы, когда из-за обширных засух урожайность зерновых культур составляла в среднем 4,6 ц /га (1946 г.), 9,3 ц/га (1937 г.) и др.

В жестокую засуху 1975 г. урожайность составила 10,9 ц/га, а валовой сбор – всего 140 млн т. В следующий благоприятный по увлажнению год был собран самый высокий урожай за всю историю земледелия в СССР – 223,7 млн т. Разность валовых сборов между соседними годами составила 83,7 млн т. Поэтому оценка интенсивности засух, и особенно ее возможных последствий, может определять продовольственную безопасность как отдельных регионов, так и страны в целом, учитывая возможность выбора с большой заблаговременностью стратегии закупки зерна.

Н.А. Максимов (1952) считает, что поскольку горячий ветер при суховеях является одновременно и сухим, то практически очень сложно «точно разграничить непосредственное влияние высокой температуры на протоплазму растений от ее косвенного влияния как иссушающего агента». В то же время многолетние сопряженные наблюдения за состоянием посевов зерновых культур и агрометеорологическими условиями показали, что в период «всходы – колошение» суховеи хотя и оказывают непосредственное влияние на состояние растений, но их отрицательный эффект выражается, прежде всего, в ускорении иссушения верхних горизонтов почвы. Именно потеря влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы является наиболее частой причиной значительных снижений урожайности сельскохозяйственных культур.

Сопоставление количества сухих и засушливых декад с урожайностью дает высокий коэффициент корреляции (более 0,80). Если запасы продуктивной влаги в слое почвы 0...20 см во все декады от посева до цветения превышают 20 мм, а в слое 20...100 см ≥ 60 мм, то в степных и лесостепных зонах урожайность яровых хлебов составляет около 20 ц/га. Если же наблюдались сухие и засушливые декады, то они вызывали снижение урожайности в размерах, приведенных в табл. 18.16.

Величина недостатка насыщения воздуха порядка 17...25 мм в течение 3...5 суток в межфазный период «выход в трубку – колошение» снижает высоту злаков и приводит к понижению урожайности, однако такие условия повышают устойчивость растений против суховеев в дальнейшем. При недостатке насыщения воздуха, равном 36...45 мм, повреждения растений от суховеев наблюдаются даже при достаточном увлажнении почвы. Наибольший ущерб суховеи наносят зерновым культурам в период «колошение – начало восковой спелости» (Кулик М.С., 1957).

Таблица 18.16

Снижение урожайности (%) в сухие и засушливые декады (Кулик М.С., 1957)

Декада от даты начала вегетации	Снижение урожайности (ц/га)	
	Сухие декады (в пахотном слое влаги <10 мм)	Сухие декады (в пахотном слое влаги <20 мм)
Вторая	5	0
Третья	10	5
Четвертая (накануне фазы выхода в трубку)	30	
Пятая	20	15
Шестая	10	5
Седьмая	5	5
Восьмая	5	0
Девятая	0	0

В исследованиях В.А. Жукова, С.А. Даниелова, О.А. Святкиной (ВНИИСХМ) было показано, что яровые зерновые культуры, высеваемые на территории Поволжья, Северного Кавказа, Центрально-Черноземных областей могут подвергнуться засухе в любой период своего развития. Один раз в десятилетие на этой территории возможна жестокая, продолжительная засуха, следствием которой может быть гибель урожая на 50...85 %.

С вероятностью 25 % (4 раза в десятилетие) сильная засуха, охватывающая время развития двух межфазных периодов (около двух месяцев), возможна в Поволжье, что приводит к потерям от 40 до 75 % урожая (табл. 18.17).

Рассчитанные статистические модели зависимости урожайности зерновых культур (в ц/га и процентах тренда) от $ГТК_{V-IV}$ позволили определить величины снижения урожайности зерновых культур при очень сильных и сильных засухах в мае и июне (Уланова Е.С., Страшная А.И., 2000). В качестве примера в табл. 18.18 приведено несколько уравнений названных корреляционных зависимостей по некоторым экономическим районам и областям.

Таблица 18.17

Характеристика вероятности и величины средних потерь урожайности зерновых яровых культур от засухи в некоторых регионах России (Жуков В.А. и Святкина О.А, 2000)

Характеристика	Засушливые условия в период					
	Посев – кущение	Куще- ние – коло- шение	Колоше- ние – восковая спелость	Посев – колоше- ние	Куще- ние – вос- ковая спелость	Посев – восковая спелость
Поволжье						
Вероятность	0,09	0,07	0,12	0,11	0,07	0,11
Средние потери (% мак- симальной урожайности)	30	40	25	70	60	85
Центрально-Черноземный район						
Вероятность	0,11	0,12	0,13	0,09	0,07	0,08
Средние потери (% мак- симальной урожайности)	35	35	20	60	50	50
Северный Кавказ						
Вероятность	0,10	0,12	0,06	0,15	0,08	0,10
Средние потери (% мак- симальной урожайности)	20	35	30	40	50	60

Таблица 18.18

Уравнения зависимости урожайности зерновых культур в ц/га (Y_1)
и в процентах тренда (Y_2) от величины ГТК Селянинова за май–июнь
(Уланова Е.С., Страшная А.И., 2000)

Территория	Уравнения	R	S_y	σ_y
Ростовская область	$Y_1 = 9,43 + 11,38 \text{ ГТК}_{V-VI}$	0,77	3,5	5,4
	$Y_2 = 50,29 + 56,16 \text{ ГТК}_{V-VI}$	0,78	16,7	26,2
Северо-Кавказский экономический район	$Y_1 = 12,36 + 9,74 \text{ ГТК}_{V-VI}$	0,73	3,3	4,7
	$Y_2 = 70,41 + 25,23 \text{ ГТК}_{V-VI}$	0,52	15,1	17,3
Поволжский экономический район	$Y_1 = 5,22 + 8,82 \text{ ГТК}_{V-VI}$	0,83	2,1	3,6
	$Y_2 = 42,73 + 70,10 \text{ ГТК}_{V-VI}$	0,79	18,9	29,9
Оренбургская область	$Y_1 = 4,13 + 9,48 \text{ ГТК}_{V-VI}$	0,70	2,7	3,5
	$Y_2 = 39,63 + 91,97 \text{ ГТК}_{V-VI}$	0,63	28,7	36,2

Анализ представленных в этой таблице связей показывает, что $\text{ГТК}_{V-VI} \leq 0,3$ соответствует урожайности зерновых культур менее 10 ц/га, а значениям ГТК от 0,31 до 0,60 – урожайность 11...14 ц/га. При оценке урожайности в процентах при $\text{ГТК}_{V-VI} \leq 0,3$ урожайность составляет менее 50 % тренда, при ГТК_{V-VI} , равном 0,31...0,60, урожайность составляет 51...75 % тренда. Для наглядности приводится график (рис. 18.21).

Авторы провели ранжирование засух по величине наиболее значительных отрицательных отклонений средней по России урожайности от тренда за 24 года, когда уровень урожайности был относительно однородным и сравнимым. Оказалось, что в большинстве случаев такие отклонения соответствуют годам с очень сильной засухой – 1975, 1979, 1981 гг. (табл. 18.19). Величины отклонений средней по России урожайности в эти годы составляют -2,1...-3,7 ц/га. Необходимо заметить, что самые большие за все эти годы отклонения приходятся на 1995 г., но авторы объяснили значительный недобор зерна причинами сокращения посевных площадей, резкого ухудшения агротехники возделывания, в частности снижения количества вносимых удобрений, недостатка техники в период уборки урожая, и другими причинами, связанными в значительной мере с распадом СССР.

Наблюдения С.И. Смирновой (1976) в Северо-Кавказском регионе показали, что суховеи, появившиеся в период налива зерна, не только сдерживают темпы его налива, но и вызывают преждевременное созревание: из колосьев вымолачивается мелкое, щуплое зерно с невысокой массой 1000 зерен. Большая роль в формировании конечной урожайности принадлежит запасам продуктивной влаги. Так при уменьшении запасов влаги в метровом слое почвы до 50 мм и при увеличении числа

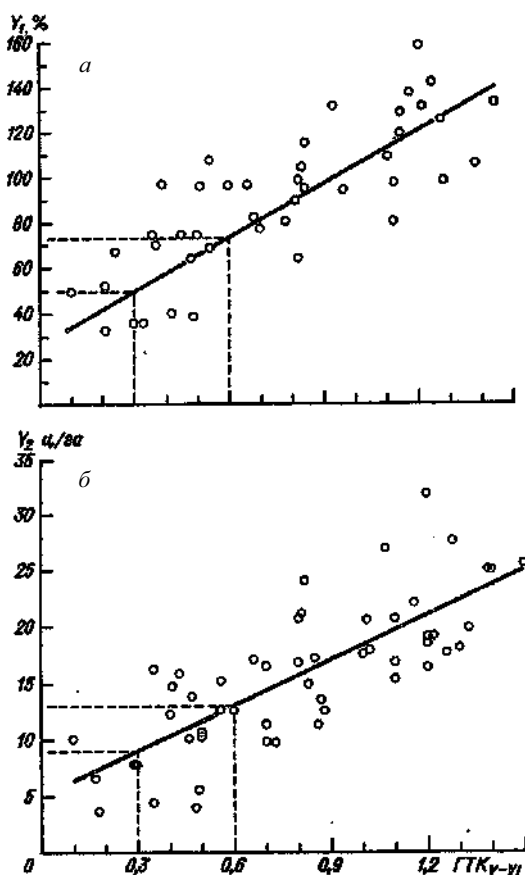


Рис. 18.21. Зависимости урожайности зерновых культур от гидротермического коэффициента за май–июнь ($ГТК_{v-vi}$) для Ростовской и Волгоградской областей: а – Y_1 (в процентах тренда), б – Y_2 (в ц/га)

суховеяных дней до 8...12 абсолютная масса зерна снижается на 60...70 % максимально возможного.

Пример снижения урожайности яровой пшеницы под воздействием суховея, различной продолжительности (в днях), установленного Л.Е. Пасечнюк и В.А. Сенниковым (1983), приведен на рис. 18.22.

Суховеи оказывают большое влияние на продуктивность зерновых и других не пропашных культур. Установлено влияние числа дней с суховеями на высоту растений яровой пшеницы (в фазы третий лист – цветение); высота измерялась в фазу цветения (рис. 18.23). Ими же получены статистические зависимости величины урожайности яровой

Таблица 18.19

Урожайность яровой пшеницы (числитель) и ее отклонение от тренда (знаменатель) в годы сильных засух, ц/га (Уланова Е.С., Страшная А.И., 2000)

Территория	Фактическая урожайность / отклонение от тренда					
Российская Федерация	1995 г.	1981 г.	1975 г.	1979 г.	1984 г.	1972 г.
	<u>11.6</u> -4,9	<u>10.0</u> -3,7	<u>9.4</u> -3,0	<u>11.2</u> -2,1	<u>12.2</u> -2,1	<u>11.8</u> -0,03
Центрально - Черноземный район	1995 г.	1981 г.	1979 г.	1984 г.	1975 г.	1972 г.
	<u>12.0</u> -10,9	<u>9.7</u> -8,6	<u>9.4</u> -8,3	<u>10.7</u> -8,2	<u>13.8</u> -2,6	<u>14.2</u> -1,2
Поволжский район	1995 г.	1975 г.	1984 г.	1981 г.	1972 г.	1979 г.
	<u>8.0</u> -6,3	<u>5.5</u> -5,9	<u>7.4</u> -5,3	<u>7.3</u> -5,0	<u>7.2</u> -3,8	<u>8.3</u> -3,7
Северо-Кавказский район	1995 г.	1979 г.	1975 г.	1972 г.	1984 г.	1981 г.
	<u>22.0</u> -7,3	<u>16.6</u> -6,0	<u>16.1</u> -4,8	<u>15.4</u> -4,2	<u>23.7</u> -1,0	<u>22.8</u> -0,6
Уральский район	1975 г.	1987 г.	1995 г.	1981 г.	1984 г.	1972 г.
	<u>5.2</u> -5,7	<u>7.8</u> -3,2	<u>8.4</u> -2,6	<u>9.0</u> -1,9	<u>9.5</u> -1,4	<u>11.3</u> 0,4

Рис. 18.22. Снижение урожайности яровой пшеницы в Западной Сибири от засуховеев за период третий лист-цветение

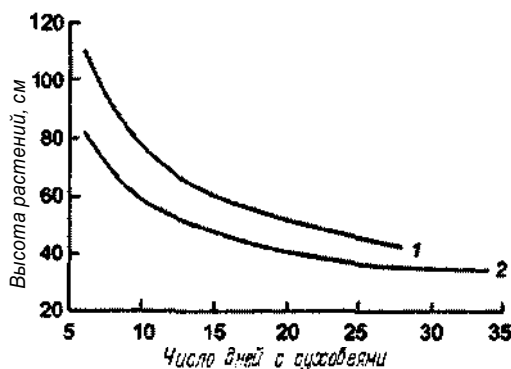
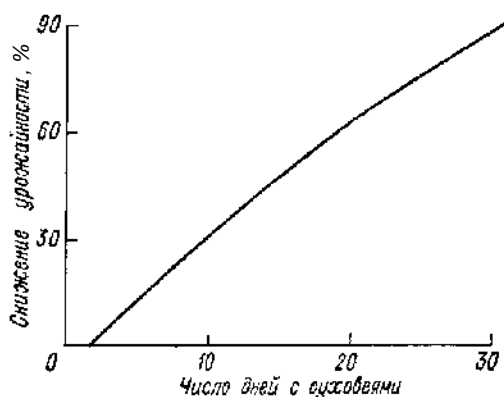


Рис. 18.23. Зависимость высоты яровой пшеницы от числа дней с засухами на территории степных районов Поволжья (1) и Кулундинской степи (2) (Пасечнюк Л.Е., Сеников В.А., 1983)

пшеницы (U) от числа дней с засухами ($N_{\text{зсх}}$) за период третий лист – цветение для отдельных районов Западной Сибири. Например, для Кулундинской степи эта связь имеет вид:

$$U = -1,87N_{\text{зсх}} + 2,97, \quad (18.33)$$
$$r = -0,899, \quad S_u = \pm 0,18 \text{ т/га.}$$

Понятно, что урожайность яровых зерновых культур зависит не только от числа дней с засухами, но и от их интенсивности. С увеличением интенсивности засух возрастает и степень повреждения растений, а следовательно, снижается их урожайность.

Оценка последствий засух осуществляется специалистами Росгидромета и других национальных гидрометеорологических служб стран Содружества Независимых Государств обычно совместно с представителями агропромышленного комплекса.

Стандартная метеорологическая, агрометеорологическая (включая спутниковые данные), гидрологическая и климатологическая информация, получаемая в подразделениях гидрометеорологических служб, является основой для мониторинга засушливых явлений и засух. Анализ такого комплекса информации обычно позволяет заблаговременно оценить вероятность развития этих опасных природных явлений. Информация о вероятности засухи регулярно передается специалистам сельского и водного хозяйства для принятия управленческих решений и хозяйственных мер по сокращению возможного ущерба от засухи.

Однако надежный долгосрочный прогноз засухи остается пока нерешенной проблемой. Известны различные подходы к прогнозированию засух: синоптические, синоптико-климатологические, физико-статистические и др. Оправдываемость этих подходов к прогнозу варьирует в среднем от 60 до 66 %. Климатологический подход к прогнозу засухи (Дроздов О.А., 1980) показал, что в вековом ходе метеорологических условий возрастание вероятности и интенсивности засух обнаруживается в эпохи потепления климата. Это связано с развитием меридиональных форм атмосферной циркуляции, с ослаблением контрастов температуры в циклонах, с уменьшением переноса влаги с океанов на материки.

18.2.7. Меры борьбы с засухами и засуховыми

Наука и практика растениеводства в засушливых регионах, а также в зонах, подверженных периодическим засухам, выработали широкий спектр биологических, агротехнических и агрометеорологических методов, направленных на повышение жаро- и засухоустойчивости растений. Перечислим некоторые из них:

- селекция засухоустойчивости сортов и гибридов;
- предпосевное закаливание против засухи и повышенного содержания солей в почве;

- комплекс агротехнических влагоберегающих приемов;
- изменение сроков посева и др.

Система борьбы с засухами и суховеями проводится по трем основным направлениям: селекционно-генетическому, агротехническому и мелиоративному.

Селекционно-генетическое направление связано с выведением новых засухоустойчивых сортов растений. При этом учитываются биологические особенности растительного организма, направленные на экономное расходование влаги. К ним относятся: способность регулировать интенсивность транспирации, сокращать площадь испарения за счет временного скручивания пластинки листа, развивать глубокую корневую систему, опушенность верхних покровов листьев (кутикула) и др. Селекционеры добиваются закрепления нужных качеств в наследственных свойствах растений путем опыления разнородных (родительских) форм, с помощью искусственного изменения свойств коллоидно-химического состояния клеток.

Достаточно эффективным оказывается способ *закаливания растений* от засухи. Сущность его заключается в том, что наклюнувшиеся семена или зерновки злаков (после незначительного их смачивания) подсушиваются до высева их в почву, т.е. искусственно создаются условия засухи перед посевом. Семена адаптируются в процессе подсушивания к недостатку влаги путем глубокой физиолого-биохимической перестройки растений, что приводит к повышению их засухоустойчивости, которая генетически закрепляется в нескольких последующих поколениях. Однако физиологами установлено (Генкель П.А., 1982 и др.), что не все сельскохозяйственные культуры способны к закаливанию от засухи. Наиболее восприимчивыми оказываются культуры, эволюция развития которых проходила в направлении развития способности переносить обезвоживание и перегрев. К этим культурам относятся: просо, ячмень, пшеница, овес, а также фасоль, томаты, подсолнечник и некоторые другие.

Метод *солевого закаливания* заключается в предпосевной обработке семян растворами хлористого натрия, сернокислого магния, карбоната натрия, в результате чего происходит снижение проницаемости мембран цитоплазмы и значительно возрастает порог токсичного действия солей, т.е. повышается хлоридо-, сульфато- и карбонатоустойчивость растений.

Предпосевное прогревание (до 35...38 °С) клубней картофеля способствует повышению засухоустойчивости этой культуры. Все физиолого-биохимические перестройки в растениях направлены на выживание организма и воспроизводство «потомства» в неблагоприятных (в том числе и экстремальных) условиях.

Агротехническое направление работ нацелено на устранение или снижение несоответствия между потребностью растений во влаге и фактической влагообеспеченностью посевов в тот или иной период их

развития. Это широкий комплекс работ, включающий различные приемы накопления влаги в почве, например снегозадержание на полях, сбор талых вод, кулисное травосеяние, полезационное лесоразведение, внесение повышенных доз органических (и минеральных) удобрений, мульчирование поверхности почвы, введение в севообороты чистых паров, влагосберегающие технологии обработки почвы, выбор оптимальных сроков сева, размещение посевов с учетом микроклиматических особенностей местности и другие.

Установлено, что перенесение сроков сева ранних яровых на одну декаду назад, т.е. на более ранний период, дает прибавку урожая от 15 до 50 % среднего многолетнего значения урожайности культуры. При запаздывании с посевом ранних яровых на две декады урожай снижается на 20...60 % достигнутого максимума исключительно из-за того, что критический период растений в такие годы совпадает с неблагоприятными условиями. Влияние на конечный урожай различных агротехнических приемов, направленных на повышение запасов почвенной влаги, в качестве примера приведено в табл. 18.20.

Таблица 18.20

**Урожайность зерна овса в зависимости от различного типа
влагонакопительных мероприятий (Кулик М.С., 1966)**

Влагонакопительное агротехническое мероприятие	Урожай зерна, т/га
Зяблевая вспашка поперек склона	1,65
Зяблевая вспашка плюс снегозадержание	1,98
Зяблевая вспашка плюс снегозадержание, плюс задержание талых вод	2,45
Зяблевая вспашка плюс снегозадержание, плюс задержание талых вод, плюс минеральные удобрения	2,67

Мелиоративное направление борьбы с засухами и суховеями является, пожалуй, основным, наиболее эффективным, но и самым дорогостоящим. *Мелиорация* (от лат. *melioratio* – улучшение) – это совокупность организационно-хозяйственных и технических мероприятий, направленных на коренное улучшение земель, с расчетом на длительный период. Как правило, мелиоративные мероприятия связаны с капитальным строительством ирригационных сооружений (плотины, водохранилища, каналы, водораспределительные и дренажные сооружения, гидрометрические посты и т. п.). Мелиоративные мероприятия дают возможность изменять комплекс почвенных, гидрологических, тепловых условий на территории обширных регионов и создавать благоприятные для сельскохозяйственных культур водный, воздушный, тепловой и питательный режимы. Под термином *мелиорация* подразумевают и многие другие мероприятия, перечисленные в агротехническом направлении борьбы с засухами: снегозадержание, сбор талых вод и т.п.

Однако нарушение научно обоснованных режимов орошения приводит и к отрицательным последствиям, таким как вторичное засоление почвы, подъем грунтовых вод и заболачивание понижений, заиливание водохранилищ, зарастание каналов, масштабное изменение экологических условий на больших площадях.

Наконец, метод *изменения сроков посева* позволяет «уйти от засухи», т.е. обеспечить нормальное формирование глубокой и разветвленной корневой системы высеваемых растений до наступления (или после завершения) неблагоприятных засушливых условий. Естественно, что сроки посева должны быть различными в разных регионах страны. Например, в Западной Сибири сеять следует позже, чем в Центральной части страны, поскольку критический период зерновых культур (фазы колошения и цветения) совпадает с наиболее влажным месяцем – июлем.

Меры борьбы с суховеями аналогичны таковым при борьбе с засухами:

- введение в культуру сортов сельскохозяйственных растений наименее повреждаемых суховеями. Например, сорта озимой пшеницы, районированные на Северном Кавказе, Безостая-1 и Безостая-4 имеют преимущество, заключающееся в более раннем вступлении в фазу колошения и в более интенсивном физиологическом процессе налива зерна;

- комплекс агротехнических мероприятий (введение в пахотный клин черного пара, задержание талых вод и снегозадержание);

- мелиорация микроклимата сельскохозяйственных полей с помощью создания долговременных полезащитных лесных полос и развития системы орошения.

Показано, что суммарный положительный эффект системы полос значительно превышает таковой от отдельной полосы, а эффект орошения значительно превышает эффективность всех перечисленных мероприятий по борьбе с суховеями.

Таким образом, основной задачей борьбы с суховеями является устранение возможности возникновения несоответствий между фактическим испарением и испаряемостью, определяемых значениями эвапорометрического коэффициента 0,3 и ниже.

18.3. Лесные и степные пожары

В лесах пожары возникают под воздействием двух факторов: антропогенного (в результате производственной деятельности людей и неосторожного обращения с огнем) и природного (в результате ударов молнии, извержений вулканов). Специалисты считают, что в заселенных районах России до 98 % возгораний в степных и лесных экосистемах происходит по вине людей, а в малонаселенных районах до 50 % случаев возгорания лесов связано с грозами и молниями. По официальным данным, с 1995 по 2003 г. в России ежегодно погибают от

пожаров от 57 до 710 тыс. га лесных насаждений. В целом по стране за 20 лет (1985–2004 гг.) количество лесных пожаров неуклонно возрастает. В России в среднем ежегодно отмечается более 20 тысяч лесных пожаров на площади около 1,5 млн га.

Горимость лесов – комплексное, обобщающее понятие, показывающее, как часто в конкретном районе бывают лесные пожары и какую площадь лесов они охватывают. Под *пожарной опасностью* понимается возможность возникновения и (или) развития пожара (ГОСТ 12.1.033–81).

Классификация территории субъектов РФ по пожарной опасности лесных участков проводится по интегральному показателю – среднегодовой площади одного лесного пожара на территории субъекта (табл. 18.21).

Таблица 18.21

Шкала пожарной опасности лесного фонда по интегральному показателю

Класс пожарной опасности лесного фонда	Степень пожарной опасности лесного фонда	Интегральный показатель пожарной опасности лесного фонда, га
6	Чрезвычайная	≥90
5	Высокая	50...90
4	Выше средней	20...50
3	Средняя	10...20
2	Ниже средней	2...10
1	Низкая	≤2

Хорошо известно, что растения с нарушенным водным балансом, имеющие более склероморфную структуру (более плотные, жесткие, затвердевшие, суховатые или высохшие побеги, ветви), представляют большую опасность для возникновения и распространения пожаров, охватывающих в засушливые периоды года значительные пространства лесов, степей и саванн.

Из всего многообразия метеорологических факторов, влияющих на распространение пожаров в лесных и степных экосистемах, выделяют следующие: высокая интенсивность солнечной радиации, низкая относительная влажность воздуха и повышенный температурный фон.

Многие исследователи считают основным метеорологическим фактором пожароопасности в лесу относительную влажность воздуха. Согласно Л.И. Сверловой, Т.В. Костыриной (1985) при относительной влажности воздуха 25 % и менее пожарная опасность в лесу очень высокая, когда низовые пожары переходят в верховые; при 30 % относительной влажности воздуха велика опасность низовых пожаров; при 40–45 % еще существует опасность низовых пожаров, а при 60 % относительной влажности воздуха пожары в лесу не распространяются.

Основной метеорологической предпосылкой возникновения пожароопасности в лесах является развитие процессов атмосферной засухи, как

следствие тепловой трансформации воздушных масс в областях повышенного атмосферного давления. Арктические антициклоны обычно перемещаются медленно, что создает условия для дальнейшего усиления атмосферной засухи. В период такой засухи происходит значительное испарение влаги с поверхности почвы и лесной подстилки, усиливается транспирация растительного покрова. Постепенно развивается почвенная засуха, при которой засыхают надземные органы травянистых растений, а также повреждаются молодые побеги кустарниковых и древесных пород. Таким образом, возникают условия, когда сухой травянистый покров и подсушенный древостой достигают пожарной «зрелости». При скорости ветра ≥ 5 м/с создаются условия чрезвычайной пожарной опасности.

Особую опасность несут длительные засухи в лесных зонах, включая ксерофитные, эфиромасличные (растения засушливых местообитаний, содержащие в своих органах эфирные масла) редколесья Средиземноморья, горные леса и таежные массивы Восточного и Западного полушарий.

Лесные пожары нарушают экологический баланс, до основания разрушая исторически сложившиеся экосистемы, включая массовую гибель животных, приносят неисчислимые экономические убытки. Естественное восстановление лесных экосистем происходит через смену растительных сообществ в течение нескольких десятилетий.

18.4. Сильные ветры, пыльные бури и ветровая эрозия

Ветер – это движение воздуха относительно земной поверхности, возникающее из-за неравномерного горизонтального распределения атмосферного давления. Ветер характеризуется вектором скорости, т.е. скоростью в том или ином направлении (м/с или км/ч). Преобладание того или иного румба зависит от особенностей сезонной атмосферной циркуляции над конкретной территорией и от макро- и мезомасштабных особенностей строения рельефа местности.

В условиях пересеченной и гористой местности направление ветра у земли зависит от ориентации долин и горных хребтов. Ветровой режим горных районов отличается крайней сложностью и разнообразием. *Орография* (от греч. *oros* – гора + *grapho* – пишу), т.е. описание строения горного ландшафта, конфигурация, размеры и направления хребтов, значительно деформируют ветровые потоки, с чем связано формирование многочисленных местных ветров. Климатологическая характеристика особенностей ветрового режима на территории России весьма подробно описана в монографии «Климат России» (2001 г.).

Сильные ветры являются проявлением различного рода атмосферных вихрей, к которым относятся в порядке уменьшения их размеров циклоны, шквалы, смерчи. Циклоны, при которых скорость ветра больше 35 м/с, в Европе и США называют *ураганами*, в Китае и Японии –

тайфунами. На территории России повышение скорости ветра, вызванные выходом глубоких циклонов, отмечается на арктическом побережье, в европейской части страны, а тайфунов – на Дальнем Востоке, Сахалине, Курильских островах.

Распространенность сильных ветров в России определяется главными путями циклонов. Наибольшая повторяемость сильных ветров наблюдается в прибрежных районах Севера и Дальнего Востока, а в континентальной части страны – в степной зоне. На Севере скорость ветра в пределах 28...35 м/с (наблюдается в среднем 1 раз в 5 лет), на Дальнем Востоке 31...38 м/с, в степях Северного Кавказа 28...31 м/с. Скорость ветра в порывах в этих районах достигает 40 м/с, на о. Сахалин – более 50 м/с.

Опасность сильных ветров связана с их разрушительной способностью. Ветер со скоростью более 23 м/с способен вызвать разрушение легких построек и таким образом создать чрезвычайную ситуацию. В Росгидромете принято относить к опасным ветрам те, которые имеют скорости более 15 м/с, а к особо опасным – более 20 м/с (табл. 18.2).

Таблица 18.22

Классификация опасности ветров (баллы) по величине максимальной скорости (м/с) (Атлас природных и техногенных опасностей в Российской Федерации, 2005)

Степень опасности сильных ветров, балл	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Макс. скорость ветра, м/с	< 20	20–26	26–30	30–35	35–42	42–49	49–58	58–70	> 70

Наибольшая повторяемость чрезвычайных ситуаций, вызванных сильными ветрами, отмечается на Северном Кавказе, в центре Европейской части России, на юге Приморского края, Камчатке, Сахалине и Курильских островах. Высока повторяемость сильных ветров на открытых степных пространствах Оренбургской, Курганской, Омской и Новосибирской областей. Во внутриконтинентальных районах максимальные скорости ветра колеблются в пределах 20...25 м/с.

В результате выхода тайфунов на юге Приморского края, на Сахалине отмечается значительный ущерб, наносимый сельскому и лесному хозяйствам, жилью и промышленным объектам (Шныпарков А.Л., 2005).

Сильные ветры наносят ущерб растениям, посевам и лесопосадкам. Они вызывают полегание посевов, опадение зрелых семян, зерен и плодов, усиливают транспирацию растений и испарение с поверхности почвы, что в условиях недостатка влаги приводит к увяданию и даже усыханию растений. Кроме этого, сильные ветры осложняют проведение многих видов сельскохозяйственных работ: сев, внесение удобрений и ядохимикатов, уборку урожая и т.п. Ураганный ветер производит большие опустошения на полях и в садах: сносит верхний незащищенный растениями почвенный

слой, ломает ветви и стволы, особенно перегруженные плодами, а в лесах – лесоповал и бурелом. В зимнее время при сильных ветрах, метелях происходит сдувание снега с открытых участков полей, обнажение почвы и корней озимых культур и т.п.

Для оценки силы (скорости) ветра пользуются обычно следующими критериями, значения которых несколько варьируют в зависимости от конкретных природных условий: *слабый* – <4 м/с; *умеренный* – 5...8 м/с; *средний* – 9...13 м/с; *сильный* – 14...20 м/с; *очень сильный* – 21...25 м/с; *буря, ураган* – ≥ 26...30 м/с.

Для характеристики распространения максимальных скоростей ветра приведена карта (рис. 18.24). Как видно на этой карте, максимальные скорости ветра наблюдаются на побережьях Азовского и Черного морей, на Дальнем Востоке, на побережьях Арктики и Тихого океана, а также на всей территории степной зоны России (зоны VI и VII). С середины 60-х годов XX столетия было введено понятие «опасные явления погоды».

Для сельскохозяйственного производства большое значение имеет не только скорость ветра, а также их повторяемость и продолжительность. Значения этих характеристик варьируют по территории страны в широких пределах, поэтому в практических целях необходимо пользоваться территориальными и областными климатическими справочниками.

Пыльные бури – это перенос взвешенных в воздухе большого количества мелких частиц почвы и грунта умеренным или сильным ветром (10...20 м/с и более) на большие расстояния. Пыльные бури считаются опасным природным метеорологическим явлением, наносящим сельскохозяйственному производству значительный ущерб, особенно пахотным землям, свободным от сельскохозяйственных культур и не защищенным лесными полозащитными посадками (полосами).

Высокая повторяемость пыльных бурь наблюдается в зоне пустынь и полупустынь, в степной зоне: на территории США, Китая, африканских государств, в Объединенных Арабских Эмиратах и др. Воздействию пыльных бурь подвержены многие районы степной, полупустынной и пустынной зон России и сопредельных стран СНГ, где расположено около 100 млн га пашни. Северная граница распространения пыльных бурь в основном совпадает с границей степной зоны.

Наиболее часто и интенсивно воздействию пыльных бурь в России подвержена территория Северного Кавказа (Ростовская, Волгоградская и Астраханская области, Ставропольский и Краснодарский края, Республики Калмыкия, Кабардино-Балкарская, Северная Осетия – Алания, Чеченская).

Наибольшая повторяемость пыльных бурь отмечается весной, летом, значительно реже – зимой. В качестве примера приведем весьма красочное описание пыльной бури, наблюдавшейся в степных районах России

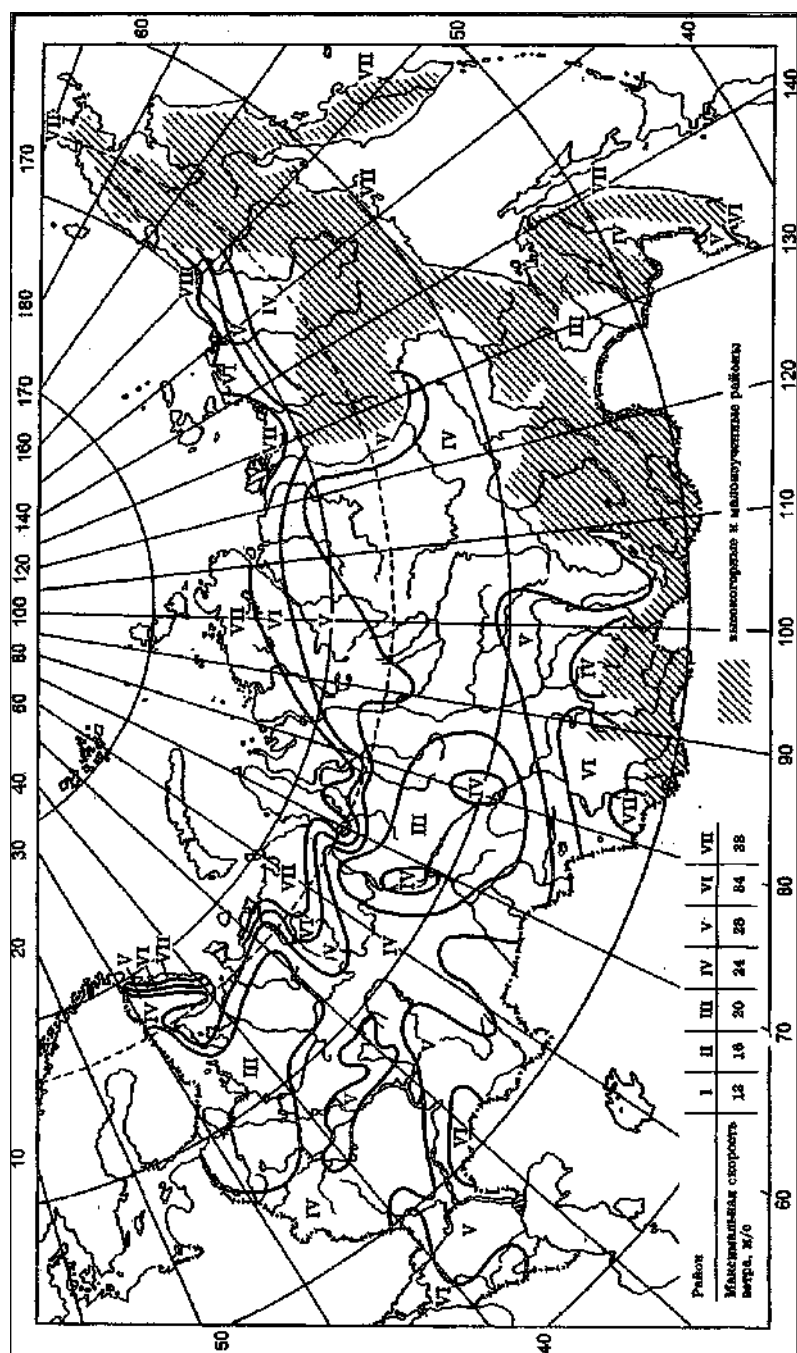


Рис. 18.24. Районирование по максимальной скорости ветра, год

в начале 90-х годов XIX столетия: «Сухой сильный восточный ветер в продолжение нескольких дней рвал землю и гнал массы песка, земли и пыли. Тучей за тучей поднимались клубы земли и, то догоняя, то перегоняя одна другую, сливались в непроницаемую для глаза массу пыли, засекавшей глаза. Ветер выл, грохотал с неимоверной силой, срывал на пути все, что могло служить ему препятствием. Посевы, желтевшие от сухого воздуха, подрезались под корень, как серпом; но и корни не могли уцелеть, ветер выносил землю с корнем; не щадились и старая сухая трава – и та выкорчевывалась. Земля выносилась до 18 см глубины и обнажалась подпочва; более всего страдали мягкие удобренные поля. Это была, по словам некоторых наблюдателей, какая-то пустыня; недавно еще зеленевшие нивы превратились в черную избитую равнину, как после пожара» (Попруженко С.Г., 1893 г.).

Значительно реже пыльные бури наблюдаются зимой. В 1893 г. выдающийся российский почвовед В.В. Докучаев писал о такой пыльной буре: «Не только был совершенно сорван и снесен с полей тонкий снеговой покров, но и рыхлая почва, обнаженная от снега и сухая, как пепел, взметалась вихрями при 18 °С мороза. Тучи темной земляной пыли наполняли морозный воздух, застилая дороги, затрудняя сообщение между деревнями, заносили сады – местами деревья были занесены на высоту 1,5 м, ложились валами и буграми на улицах деревень и сильно затрудняли движение по железным дорогам: приходилось даже отрывать железнодорожные полустанки от сугробов черной пыли, смешанной со снегом». Заметим, что в черноземной зоне такие бури называют *черными бурями*, а в полупустынной и пустынной зонах – *песчаными бурями*.

Весьма памятными были пыльные бури на территории Северного Кавказа, Нижнего Дона, на востоке Украины и Нижнего Поволжья весной 1928, 1960 гг. и зимой 1969 г. Катастрофической оказалась пыльная буря, разразившаяся весной 1960 г. и охватившая территорию Краснодарского, Ставропольского краев и Ростовской области на площади 4 млн га, из которых около 50 % было занято озимыми посевами. Посевы озимой пшеницы, слабо развившиеся с осени (всходы – 3-й лист), в одних районах были уничтожены, в других занесены частицами переноса почвы и грунта на больших площадях. В результате этого стихийного бедствия более 50 % озимых погибло и подлежало пересеву. Особенно пострадали посевы на возвышенностях водоразделов и наветренных склонах долин, а также на легких супесчаных почвах и карбонатных черноземах. Скорость ветра в различных районах Северного Кавказа достигала 20...40 м/с, при этом нижние слои атмосферы настолько наполнились пылью, что видимость уменьшилась до 100...200 м. Нередко ветер полностью сметал пахотный слой, обнажая щебеночные слои выщелоченных известняков. Большие массы частиц грунта аккумулировались в оврагах,

балках, выемках железных и автомобильных дорог, в лесных полосах, часть которых погибла под наносами. Высота барханов достигала 4 м и более, а объем наносов достигал 40...60 м³ на 1 погонный м бархана (Звонков В.В., 1963).

В Ростовской области после описываемой пыльной бури было обнаружено, что лесные полосы задержали от 5 до 30 м³ мелкозема на 1 погонный метр полосы. Высота этих отложений варьировала от 0,5 до 3,0 м в зависимости от степени плотности насаждений и продуваемости полос. По подсчетам И.В. Свисюка (1986) с каждого сантиметра слоя почвы в пересчете на 1 га ветром было унесено (вместе с почвой) около 30 кг азота, 20 кг фосфора, 300 кг калия и 2...3 т гумуса.

Высота подъема частиц грунта доходила до 1,5 км, а дальность выноса пылевидных частиц грунта определялась тысячами километров и простиралась до Румынии, Болгарии, Чехословакии и Югославии, при этом видимость заметно ухудшилась в Белоруссии, на Востоке Польши и в Прибалтике.

Пыльные бури наносят трудно поправимый ущерб, поскольку на восстановление 1 см почвы в естественных условиях требуется 250...300 лет.

Повторяемость пыльных бурь в различных регионах различна. На большей части степной зоны Украины и Северного Кавказа в среднем наблюдается 1...5 дней в году с пыльными бурями, на юге Украины и в Ростовской области – 6...10 дней, а в отдельных районах Ставропольского края – до 15...20 дней. В Казахстане повторяемость пыльных бурь варьирует от 10 дней в северных областях Республики до 40 дней и более в прикаспийских районах. В южных районах Омской области, на юго-западе Новосибирской области и на западе Алтайского края число дней в году с пыльными бурями достигает 15...20, а местами 25.

В Среднеазиатских пустынях число дней с пыльными бурями в году возрастает до 30...50 и более. На рис. 18.25 и 18.26 показано среднее многолетнее число дней с пыльными бурями в России и сопредельных странах, в частности на территории Центрально-Азиатского региона. Число пыльных бурь увеличивается в направлении с северо-запада на юго-восток, но эта закономерность нарушается комплексом местных условий.

Возникновение и развитие пыльных бурь связано с длительными периодами без осадков и обусловлено комплексом метеорологических факторов, к которым относятся: сильный ветер (>10 м/с по флюгеру), иссушенность и распыленность верхнего слоя почвы, отсутствие или слабое развитие растительного покрова на полях, наличие обширных открытых пространств. Обычно пыльные бури наблюдаются при относительной влажности воздуха менее 50 %. В зимний период пыльные бури возникают при отсутствии снежного покрова и ледяных корок, при слабой цементации почвы и ее неглубоком промерзании.

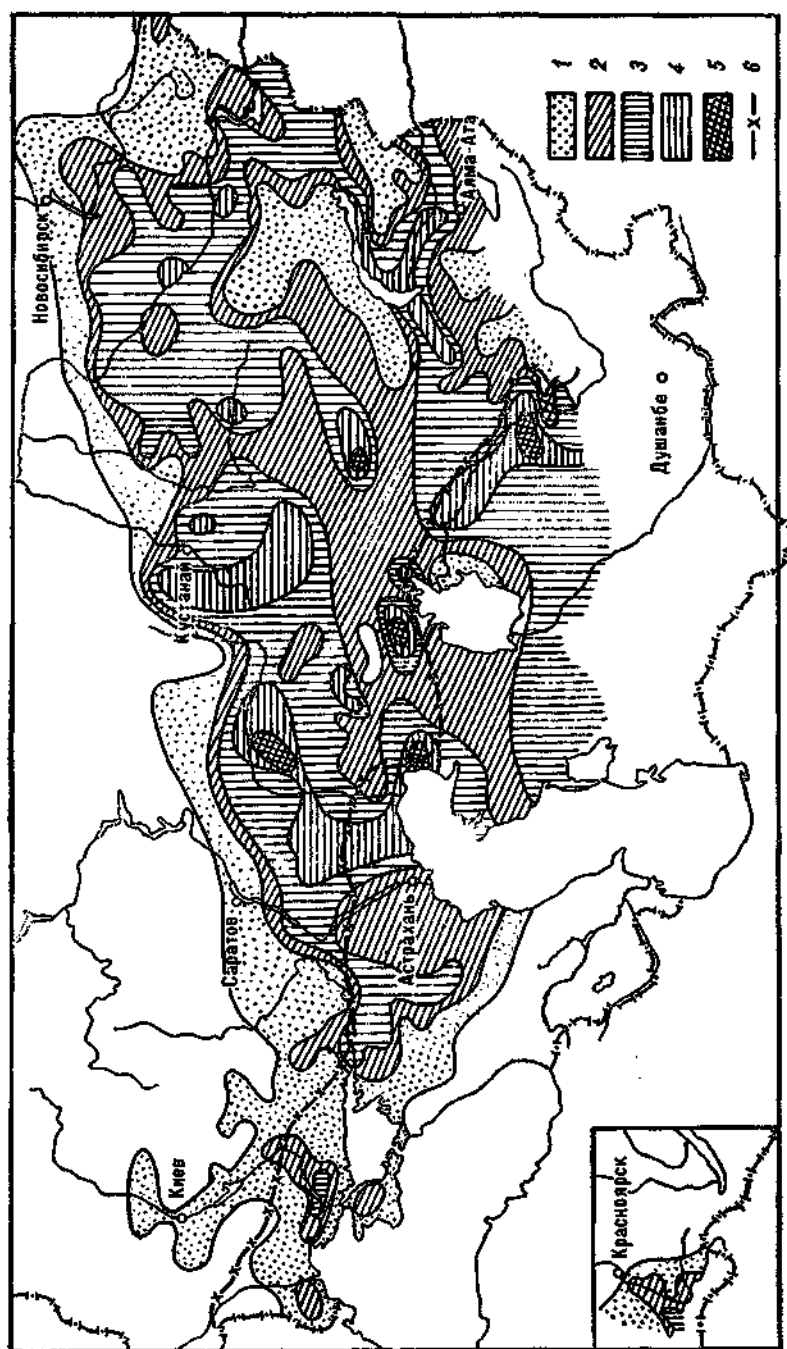


Рис. 18.25. Число дней с пыльными бурями на территории бывшего СССР (Чирков Ю.И., 1986). 1 – 1...5, 2 – 6...10, 3 – 11...20, 4 – 20...40, 5 – >40, 6 – граница устойчивого снежного покрова

При порывистом ветре в соответствии с законом швейцарского ученого Д. Бернулли у верхней поверхности почвенной частицы образуется частичный вакуум, а снизу – повышенное давление. Обтекание воздушным потоком (со скоростью 5...10 м/с) поверхности частицы с выступами шероховатости 4,5 мм вызывает падение давления воздуха между выступами соответственно от 2,1 до 7 кг/м². Относительно почвенной частицы оба изменения давления (т.е. подъемная сила P) направлены вверх:

$$P = C_y(\rho U^2 / 2)S, \quad (18.34)$$

где C_y – коэффициент подъемной силы; ρ – плотность среды, U – скорость движения; S – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения. Когда ρ превысит массу частицы, она поднимается вверх под углом 75...90° и приобретает вращательное движение (Полевой А.Н., 1992).

Объем почвы, сдуваемый ветром, зависит от двух факторов – скорости ветра и шероховатости поверхности почвы. Дж. Швабом была предложена формула:

$$S_v = (V - V_0)^3 d^{0,5}, \quad (18.35)$$

где S_v – количество перемещенной почвы; V – скорость ветра; V_0 – минимальная скорость ветра, при которой происходит перемещение частиц данного размера; d – диаметр частиц.

В зависимости от размеров почвенных частиц различают три типа перемещения частиц: передвижение во взвешенном состоянии, волочение и сальтация.

Передвижение частиц во взвешенном состоянии – это перемещение частиц диаметром менее 0,1 мм. Скорость падения таких частиц настолько мала, что они могут находиться во взвешенном состоянии длительное время при турбулентном (вихревом) движении воздуха. *Волочение* – это передвижение крупных частиц по поверхности под действием силы ветра. При этом большинство перекатываемых частиц имеет диаметр от 0,5...до 1–2 мм.

Сальтация – это вид скачкообразного движения частиц. Путем сальтации перемещаются частицы средних размеров (от 0,05 до 0,5 мм), которые достаточно легки, чтобы подняться в воздух, но слишком тяжелы, чтобы перейти во взвешенное состояние. Наиболее интенсивно передвигаются частицы диаметром 0,1...0,15 мм.

Эрозионная опасность почвы определяется в первую очередь ее механическим составом: чем меньше в почве глинистых частиц, тем ветроопаснее почва. Особенно большую роль играет наличие прочных структурных почвенных агрегатов. Структурность верхнего (0...5 см) слоя почвы может служить диагностическим показателем ее ветроустойчивости.

Чем выше содержание в почве гумуса, тем более связанной и ветроустойчивой является почва. Мелкозернистые легкие почвы всегда ветроопасны.

На степень развития эрозионных процессов оказывают влияние особенности рельефа и микрорельефа местности. Выдуванию больше подвержены верхние и наветренные части склонов. Чем круче ветроударный склон, тем больше скорость ветра и сильнее разрушение почвенного покрова. Определенную роль в развитии ветровой эрозии выполняет и микрорельеф местности. На выровненной поверхности поля скорость ветра на 40 % выше, чем на не выровненной, т.к. шероховатость поверхности почвы оказывает сопротивление силе ветра, т.е. влияет на его градиент. Ветровой эрозии особенно подвержены поля с выровненной зябью. На грубо взрыхленных полях выдувание почвы уменьшается.

Осадки, повышая связность почвенных частиц, защищают почву от ветровой эрозии, влажность переносимой почвы составляет 5...7 %.

Почвы в различной мере подвержены разрушительному воздействию ветра. Существенное влияние на развитие ветровой эрозии оказывает механический состав почвы. Ветровая эрозия различных по механическому составу почв начинается при прочих равных условиях, при следующих скоростях ветра на уровне 15 см от поверхности земли (табл. 18.23).

Почвы, обладающие структурностью, менее поддаются ветровой эрозии, особенно если в почве преобладают агрегаты диаметром > 0,5мм. При величине агрегатов и комочков тяжелосуглинистых черноземов более 2,0 мм ветроустойчивость почвы возрастает. По данным Киселева А.Н. (1958), под воздействием ветра скоростью 10 м/с перенос почвенных агрегатов размером 1,0...0,5 мм их перемещение составляет 165 см; при диаметре агрегатов > 3 мм перемещение за 3 мин достигает 100 см, а при их размерах 10 мм – всего 30 см. Следовательно, чем крупнее агрегаты и комки почвы, тем меньше такая почва подвергается ветровой эрозии.

Таблица 18.23

Скорости ветра, при которых начинается ветровая эрозия различных по механическому составу почв (Смирнов Л.Ф.)

Почва	Скорость ветра (м/с) на высоте 15 см от поверхности земли
Песчаная	2...3
Супесчаная	3...4
Легкосуглинистая	4...6
Тяжелосуглинистая	5...7
Глинистая	7...9

Существенное сдерживающее влияние на процессы ветровой эрозии оказывает органическое вещество в почве. Однако органические вещества в различных стадиях разложения влияют на образование почвенных агрегатов не одинаково. На первых стадиях разложения образуются более крупные ветроустойчивые агрегаты. При разрушении начальных продуктов разложения микроорганизмами органического вещества грубые

агрегаты распадаются на более мелкие, которые легче подвергаются воздействию ветра. Увлажненные почвы обладают повышенной вязкостью, что подавляет, сдерживает ветровое воздействие. Например, для перемещения мелкого (0,25 мм) влажного песка (4 % по объему) необходима скорость ветра 12 м/с, т.е. в 3 раза более высокая, чем для воздушно-сухого песка (Захаров П.С., 1965).

Пыльные бури возникают под влиянием природных и антропогенных факторов, нередко из-за таких форм земледелия, которые не соответствуют климатическим условиям региона. По существу, пыльные бури представляют собой одну из форм эрозии почв. Что же такое ветровая эрозия?

Ветровая эрозия (или *дефляция*, от лат. *deflatio* – выдувание) – это процесс разрушения верхних, наиболее плодородных слоев почвы и подстилающих, коренных пород ветром, перемещения продуктов разрушения и их переотложения на других территориях.

Следствием стремительного сельскохозяйственного освоения земель является рост объемов механической обработки земли, достигающий в мире более 3 тысяч км³/год (Звонков В.В., 1963). Истощительное сельскохозяйственное землепользование в последние десятилетия выходит в число ведущих факторов деградации почвенного покрова и представляет реальную угрозу для национальной безопасности многих стран мира, в том числе и России. По данным Роскомзема в Республике Мордовия, в Чувашской Республике и Ханты-Мансийском автономном округе эродировано более 90 % сельскохозяйственных угодий. В 21 субъекте Российской Федерации в Центральном, Северо-Кавказском и Приволжском округах сельскохозяйственные угодья эродированы на площади от 30 до 88 % (Государственный доклад..., 1995).

Основными факторами, определяющими развитие дефляции, являются физико-географические и социально-экономические. К первой группе факторов относятся климат, почвенный покров, рельеф, растительный покров. Ведущее место принадлежит ветровому режиму (направление и скорость), определяемому барическим градиентом и рельефом местности. Ко второй группе факторов относится хозяйственная деятельность людей, соответствующая уровню их социально-политического развития.

Обычно ветроэрозионная погода характеризуется засушливостью – бездождем или осадками менее 5 мм в сутки, – скоростью ветра ≥ 6 м/с на высоте флюгера для почв с легким механическим составом и ≥ 10 м/с для почв с тяжелым механическим составом, а также для сухой или слабоувлажненной, но быстроподсыхающей почвы в день или накануне ветроэрозионной погоды (Кальянов К.С., 1976).

Физические явления, связанные с ветровой эрозией, в значительной мере аналогичны водной эрозии. Факторы, влияющие на интенсивность ветровой эрозии, по существу, остаются теми же, что и для водной эрозии:

- скорость ветровых потоков в условиях их турбулентности, температуры и плотности воздуха на различных высотах от земной поверхности;
- структура почв, форм, плотность и размеры частиц грунта, подверженных ветровой эрозии;
- абсолютные значения коэффициентов обтекаемости, трения и сцепления частиц грунта на суше и в воздухе.

Этим объясняется сходность основных теоретических обоснований формул, описывающих водную и ветровую эрозию. Однако численные значения их коэффициентов различны, поскольку плотность воды ρ_1 значительно больше плотности воздуха ρ_2 :

$$\rho_1 / \rho_2 = 0,99913 / 0,00122 = 819 \text{ раз.} \quad (18.36)$$

В зависимости от количества пыли в воздухе различают *слабые* пыльные бури с видимостью от 2 до 10 тыс. м, *средние* – с видимостью от 1 до 2 тыс. м, *сильные* – с видимостью менее 1 тыс. м.

Высота подъема пыли зависит от складывающихся синоптических условий, скорости ветра, типа и состояния поверхности почвы, степени ее покрытия растениями и варьирует от десятков метров до 1,5...2 км. Многочисленные наблюдения показывают, что основная масса твердых частиц (85...97 %) переносится ветром в самых нижних слоях воздушного потока на высоте до 10 см над поверхностью почвы. По мере переноса пыли происходит ее сортировка: тяжелые частицы отлагаются ближе к месту их подъема, а легкие переносятся иногда на значительные расстояния (табл. 18.24).

Таблица 18.24

Дальность переноса частиц почвы различного размера при умеренно сильном ветре (Якубов Т.Ф., 1946)

Диаметр частиц, мм	Расстояние переноса
1...8	Поднимается или передвигается на несколько метров
1...0,1	1...1,5 км
0,06...0,1	Несколько км
0,03...0,06	Несколько более 300 км
0,01...0,03	Несколько более 1500 км
0,01	Вокруг земного шара

Площадь, покрываемая пылью, поднятой бурей, зависит от мощности процесса, его продолжительности и состояния подстилающей поверхности, достигая в экстремальных случаях десятков тысяч квадратных километров. Перенесенные ветром иногда за тысячи километров от источника частицы почвы, песка, пыль обычно оседают, выпадая из воздуха, вдали от источника пылеобразования на больших площадях сельскохозяйственных посевов в объемах, исчисляемых миллионами тонн. Выпадение пыли происходит под действием силы тяжести пылеватых частиц в условиях отсутствия конденсации и осадков.

Наиболее сильному выдуванию подвержены легкие по механическому составу, менее связанные почвы: песчаные, супесчаные и легкосуглинистые. Обладая значительной рыхлостью, эти почвы свободно пропускают влагу в более глубокие горизонты, благодаря чему их поверхность быстро иссушается, подвергаясь воздействию даже не очень сильного ветра. Крупные, более тяжелые частицы почвы, при перемещении под воздействием ветра откладываются в понижениях рельефа или у различных препятствий – строений, лесопосадок и др. Почвы, обладающие структурностью, слабее подвержены ветровой эрозии. Поэтому отрыв частиц различной по механическому составу почвы начинается при разных скоростях ветра (см. табл. 18.23).

В период пыльных бурь происходит не только выдувание почвы, но и механические повреждения листьев, стеблей (побегов) растений песчинками, быстронесущимися с воздушными потоками. Это явление получило название «засекание» растений.

Основными социально-экономическими причинами развития ветровой эрозии являются:

- нерациональная вырубка лесов, которая является мощным фактором защиты почвы и сохранения почвенной влаги;
- уничтожение травяного покрова и дерна в процессе нерегулируемого выпаса скота;
- распашка целинных территорий, подверженных эрозии, без учета климатических условий и своевременного проведения комплекса защитных мероприятий;
- освоение предгорно-горных склонов (террасирование) под сельскохозяйственные посевы без учета почвенно-климатических условий и биологических особенностей растений.

Противоэрозийная устойчивость почвы достигается рациональными приемами обработки, внесением органических, минеральных удобрений, травосеянием, опрыскиванием поверхности почвы различными химическими составами, скрепляющими почвенные частицы. Уменьшение «пылесборной» площади, особенно на массивах, являющихся очагами эрозии, достигается посадками кустарников и трав, закрепляющих подвижный субстрат.

Одной из важнейших задач защиты почвы от ветровой эрозии считается создание к периоду наступления пыльных бурь возможно более мощного растительного покрова на полях, который обусловит снижение скорости ветра в приземном слое воздуха за счет, так называемой, *шероховатости* – характеристики неровностей подстилающей поверхности, влияющей на движение воздуха в приземном слое. Шероховатость зависит от высоты неровностей поверхности, имеет размерность длины. Например, коэффициент шероховатости гладкой поверхности снега равен 0,001 см, плотной обнаженной почвы – 1,0 см, для посевов зерновых

составляет 3,0...7,0 см, причем величина этого коэффициента зависит от способа сева, густоты стояния растений на единице площади, фазы развития и биологических особенностей растений. Даже стерня (жнивье), оставленная на поле после скашивания зерновых культур, снижает скорость приземного ветра. На этом эффекте основана система безотвальной обработки почвы (без оборота пласта), позволяющая сократить потери плодородного слоя от ветровой эрозии.

В районах интенсивной и часто повторяющейся ветровой эрозии, особенно на склонах, обращенных к преобладающим ветрам, или на легких по механическому составу почвах, посев культур размещают полосами. На паровых полях полосы чистого пара шириной 50...100 м чередуются с такими же полосами зерновых культур или многолетних трав. Направление полос прокладывается перпендикулярно преобладающим эрозионно опасным ветрам. Широкое применение получили кулисные пары, где посев высокостебельных растений (кукуруза, просо, подсолнечник и др.) располагают также перпендикулярно преобладающим ветрам. Посев озимых культур, проведенный в оптимальные сроки, обеспечивает хорошее развитие и укоренение растений к моменту возможного возникновения осенних пыльных бурь, что способствует большему их сохранению и предохранению почвы от ветровой эрозии. Применяется также бороздковый посев, при котором мелковолнистая поверхность почвы обуславливает накопление влаги в бороздах и повышает шероховатость почвы.

Для защиты почвы от ветровой эрозии широко используется посадка древесно-кустарниковой растительности в виде полезащитных полос, расположение которых должно быть поперек господствующих ветров. Такие посадки по мере их роста становятся надежной защитой посевов от сильных ветров, пыльных бурь, суховеев: они уменьшают скорость ветра, способствуют накоплению снега в зимний период, постепенному сттаиванию снега с наступлением весны, улучшают условия влагообеспеченности посевов (рис. 18.27).

Ветрозащитная эффективность лесных полос зависит от ряда факторов: возраста (высоты, строения и степени облиственности крон), уровня продуваемости лесных насаждений (в процентах), расположения (конструкции) полос по отношению к преобладающим ветровым потокам, плотности размещения полос среди сельскохозяйственных полей (процент облесения общей площади посевов) и др.

Экспериментально показано, что наибольшей ветрозащитной эффективностью обладают лесные полосы, продуваемость которых составляет 20...40 %. Влияние таких полос распространяется на расстояние, равное 40...50-кратной высоте насаждения. По мере увеличения процента облесенности уменьшается площадь поврежденных посевов. Например, при облесении 1 % пострадавшие от пыльной бури посевы составляют до

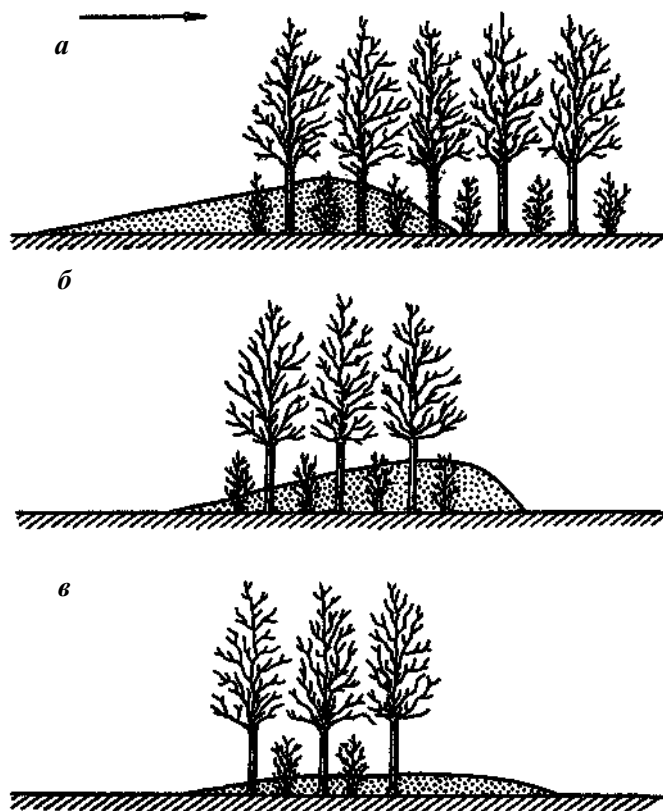


Рис. 18.27. Профили отложения почвы в полезащитных лесных полосах: а – широкая и плотная полоса, б – слабопродуваемая, в – с повышенной ветропроницаемостью (ажурная)

60 % площади, при увеличении облесенности до 2 % площадь поврежденных посевов уменьшается до 33 %, а при облесенности свыше 4,5 % повреждение посевов не отмечено.

Однако следует учитывать, что лесные полосы, занимающие по площади более 3...4 % полей, исключают возможность использования этой земли под продуктивные посевы. При этом прибавка в урожае за счет положительного влияния на гидротермический режим полей, окруженных лесными полосами, оказывается ниже, чем урожайность, полученная с площадей, занятых лесными полосами.

В среднем скорость ветра на расстоянии 200 м от полосы становится равной скорости ветра в открытой степи. Лесные полезащитные полосы

изменяют турбулентную структуру ветра. Они размельчают воздушные вихри, усиливают неустойчивость *стратификации атмосферы* (распределение температуры воздуха в атмосфере с высотой, от которого зависит возможность и степень вертикальных перемещений) в дневное время и увеличивают глубину инверсий в ночное (Константинов А.Р., Струзер Л.Р., 1965).

Лесные полосы существенно снижают испаряемость. Например, на полях среднего размера (50...100 га), защищаемых лесными полосами, испаряемость снижается на 10...20 %. При уменьшении размеров площади полей в 2–3 раза, образуемых лесными полосами, снижение испаряемости только за счет более интенсивного затенения увеличивается на 10 %. По расчетам это дает возможность сэкономить на испарении 40...100 мм почвенной влаги (при осадках 300...400 мм в год), что существенным образом улучшает влагообеспеченность посевов.

Многочисленные исследования показали, что лесные полезащитные полосы являются мощным и постоянно действующим фактором получения стабильных и высоких урожаев сельскохозяйственных культур. По данным ряда исследователей лесные полосы в зоне своего гидрометеорологического влияния повышают урожайность зерновых культур на 20...30 %, сахарной свеклы – на 24...35 %, бахчевых и огородных культур – на 50...70 %, хлопчатника – на 30 % (Александров Н.П., 1955; Константинов А.Р и Струзер Л.Р., 1965 и др.). Отмечено, что эффективность влияния лесных полос особенно высока в годы низких урожаев, когда урожайность повышается в 2 и более раз. В годы, благоприятные по урожайности, прирост в относительных величинах невелик (27...43 %), но абсолютная прибавка урожая под защитой лесных полос имеет тенденцию к увеличению (Захаров П.С., 1965).

Эффективность системы лесных полос заметно повышается при внесении удобрений под посевы: их влияние на защищенных полях оказывается более заметным из-за повышенной влажности и лучшей структуры почвы, чем в условиях открытой степи (табл. 18.25).

Таблица 18.25

**Эффективность урожайности озимой пшеницы (ц/га) на полях
в Каменной степи**

Характеристика поля	Урожайность с полей		Прибавка за счет удобрений
	без удобрений	с удобрением под зябью	
Открытая степь	8,9	9,4	0,5
Под защитой лесных полос	14,4	16,7	2,3
Прибавка за счет лесных полос	5,5	7,3	–

Для каждой почвенно-климатической зоны страны разрабатываются зональные системы земледелия, включающие почвозащитные мероприятия,

с учетом особенностей климата и микроклимата, рельефа местности и типа почв, подбора возделываемых сельскохозяйственных культур и видов почвообрабатывающей техники. Применение всех этих мер способствует сохранению ценнейшего национального богатства – земельного фонда страны, его плодородия, – предупреждает возможность развития процессов почвенной эрозии, снижает разрушительный эффект уже протекающей эрозии.

18.5. Сильные ливневые дожди, переувлажнение почвы и водная эрозия

Ливневые дожди выпадают из кучево-дождевых облаков и охватывают, как правило, небольшие площади. Сумма осадков и число дней с осадками за декаду, месяц, сезон, год являются климатическими показателями. Суточный максимум ливневых осадков в годовом ходе повсеместно приходится на теплый период года, поэтому они могут нанести значительный урон состоянию сельскохозяйственных культур.

Для роста, развития и формирования урожайности естественной растительности и неорошаемых сельскохозяйственных культур большое значение имеет не только количество осадков, но и распределение их по сезонам года, по месяцам, по интенсивности выпадения.

Интенсивность осадков – это количество осадков, выпадающих за единицу времени; расчеты обычно проводятся за 1 минуту. Средняя суточная интенсивность осадков за какой-либо выбранный промежуток времени вычисляется как среднее количество осадков, выпавшее в день с осадками. Как правило, наибольшую интенсивность имеют короткие ливневые дожди.

Согласно данным С.П. Хромова и М.А. Петросянца (1994) на Европейском континенте при продолжительности дождя 1...5 мин наибольшая интенсивность составляет 3...4 мм/мин; при 2...3-х часовом дожде – только 0,5 мм/мин. Рекордным в мировом масштабе считается ливень, прошедший в июле 1955 г. в штате Айова (США), когда за 1 мин 24 с интенсивность достигла 17,5 мм/мин. Суточные максимумы осадков могут достигать: в Европе 350 мм, в Армении и Черноморском побережье Кавказа 245...260 мм, на юго-западе Украины 210 мм, в центре России 120 мм; для сравнения – наибольшие суточные максимумы в тропических регионах (Индия, Филиппины) превышают 1000 мм. Напомним, что 1 мм осадков равен 10 т воды на 1 га.

В отличие от южных регионов России в Нечерноземной зоне европейской части страны сельскохозяйственное производство нередко страдает от переувлажнения почвы. Это связано не только с преобладанием количества осадков над величиной испарения, но и с особенностями почвенного покрова, строением рельефа и других причин.

Для равнинных районов Нечерноземной зоны характерно неглубокое залегание грунтовых вод, т.е. первого от поверхности земли постоянного безнапорного водоносного горизонта, залегающего обычно не ниже 2...3 м от поверхности. Верхние слои (30...40 см) преобладающих в этой зоне дерново-подзолистых почв, как правило, хорошо водопроницаемы. Ниже залегают более плотные суглинистые и глинистые слои, через которые вода просачивается медленно. Таким образом, вода обильных весенних дождей задерживается плотными слоями почвы и формирует временный водоносный горизонт, а влажность верхних слоев почвы достигает полной влагоемкости. Это явление называется *почвенной верховодкой*. В подзолистых почвах супесчаного состава верховодка обычно не образуется.

В отличие от других типов почв (черноземы, серые лесные и др.), дерново-подзолистые и подзолистые почвы могут быть переувлажнены в течение длительных периодов, особенно на ровных и пониженных местах. Со склонов возвышенностей верховодка быстро стекает, образуя, так называемый, внутрипочвенный сток. При этом происходит частичное вымывание питательных веществ, в том числе и вносимых на поля удобрений, а также ядохимикатов, попадающих в почву при подавлении вредителей сельскохозяйственных культур и сорняков. Для уменьшения вредного влияния верховодки на пашне проводят специальные агротехнические мероприятия: гребневание и щелевание почвы.

Опасным агрометеорологическим явлением для сельскохозяйственных культур является длительное *переувлажнение почвы*, наблюдаемое при среднем содержании влаги более 60–80 % полной влагоемкости в слое почвы 30–50 см в период вегетации посевов. В качестве критерия переувлажнения, приводящего к вымоканию посевов, ограничению или невозможности проведения полевых работ, считаются условия, когда в вегетационный период возделываемой культуры и в период ее уборки почва на глубине 10...12 см при визуальной оценке увлажненности характеризуется липким и текучим состояниями не менее 20 дней подряд. В отдельные дни (не более 25 % продолжительности периода) допускается переход в мягкопластичное состояние.

На тяжелосуглинистых почвах потери урожая в результате переувлажнения почвы могут достигать для картофеля 56...84 %, зерновых культур 32...48 %, многолетних трав 24...36 %. Особенно отрицательное влияние переувлажнения почвы сказывается на урожае сельскохозяйственных культур в период их уборки. При затяжных дождях (4...5 суток подряд) потери урожая зерновых культур достигают 40...65 %. Значительные потери урожая и ухудшение качества зерна отмечаются при прорастании неубранного зерна (в валках и на корню).

Зерно начинает прорасти после истечения периода покоя семян при влажности 30...32 % и температуре воздуха 5...14 °С. При прорастании

в течение 7...8 суток зерно полностью теряет семенные качества, а потери массы зерна достигают 25...30 %. Если дожди продолжаются более четырех суток подряд или с небольшими перерывами, не дающими просохнуть валкам, то зерно прорастает не только внутри валка, но и снаружи. При дефиците влажности воздуха ниже 4 мб и накоплении суммы температур выше 5 °С, равной 14 °С, зерно наклевывается; при накоплении суммы температур выше 5 °С, равной 25...30 °С, начинается интенсивное прорастание зерна в валках. В условиях более теплой и влажной погоды, при накоплении суммы температур выше 5 °С, равной 45...50 °С, проростки зерна достигают 5...7 см. В обычных стандартных валках зерно начинает прорастать, если в течение 4...5 суток выпадает 20 мм осадков; в тонкослойных валках – 30...40 мм (Клещенко А.Д., Устинова О.К., Устинов П.В., 2006).

Интенсивные ливневые дожди и сильные ветры на Европейской части страны нередко вызывают полегание зерновых культур на 20...30 % посевных площадей, а в отдельные годы – на 80 %.

Полегание – это потеря растениями нормального прямостоячего положения. Полегание зерновых культур, вызванное влиянием неблагоприятных условий погоды, приводит к значительным потерям урожайности и урожая (до 20...30 %), связанным с неполноценным наливом зерна и потерями зерна при уборке. Работа уборочных агрегатов на полеглых посевах чрезвычайно затрудняется, их производительность снижается на 25...50 %, что приводит к затягиванию уборочного процесса. В зависимости от сроков полегания биологические потери изменяются в среднем от 5...10 до 40 %.

По данным Государственной сети по сортоиспытанию в Нечерноземной зоне полегание зерновых культур под влиянием непогоды наблюдается весьма часто: озимая пшеница в 3...4 из 10, ячмень в 4...5 и рожь в 5...7 годах за десятилетие.

В посевах зерновых культур различают стеблевое и корневое полегание. *Стеблевое полегание* наблюдается при сильно загущенных посевах, при чрезмерном азотном питании, при обильном орошении, при грибковых заболеваниях и развитии выходящих сорняков. *Корневое полегание* происходит при избытке влаги в почве, вследствие разжижения почвы и потери растением опоры. Оба эти вида полегания связаны с воздействием интенсивных, ливневых осадков, проходящих обычно с сильными порывами ветра, иногда с градом. Под динамическим воздействием ветрового напора и капель дождя стеблестой в той или иной мере наклоняется к поверхности почвы и не возвращается в вертикальное положение после прекращения таких воздействий. По существу, полегание посевов – это результат разового воздействия неблагоприятных гидрометеорологических условий. Однако потенциальное полегание посевов зависит от комплекса предшествующих агрометеорологических условий и биологического состояния самих растений.

Наиболее сильное (после осадков) влияние на полегание зерновых культур оказывает ветер со скоростью не менее 3...4 м/с. Однако в условиях сухой погоды или при морозящих осадках, не сопровождаемых ветрами, полегания посевов не наблюдается.

Из показателей состояния стеблестоя наибольшее влияние на устойчивость растений оказывают высота и густота стеблестоя на единице площади.

Механизм стеблевого полегания злаковых культур изучался многими исследователями. Согласно Т.И. Русаковой (1985) растение представлено в виде трубчатого стержня определенной механической прочности, закрепленного корнями на одном конце (в почве). К силам, вызывающим полегание, относятся: сила, создаваемая ветровым напором (направленная горизонтально); сила, создаваемая динамическим воздействием дождевых капель (направленная вертикально вниз); сила, создаваемая массой растения и действующая вертикально (рис. 18.28). В первом приближении принято, что сила ветрового напора приходится на верхнюю часть растения, поскольку в посевах нормальной плотности наблюдается определенное затухание скорости ветра. Тогда условие, необходимое для наступления полегания, может быть выражено:

$$F \geq F_y, \quad (18.37)$$

где F – сила, создаваемая ветровым напором, H (ньютон)¹⁰; F_y – сила, стремящаяся вернуть растение в вертикальное положение, Сила, создаваемая ветровым напором, рассчитывается по формуле:

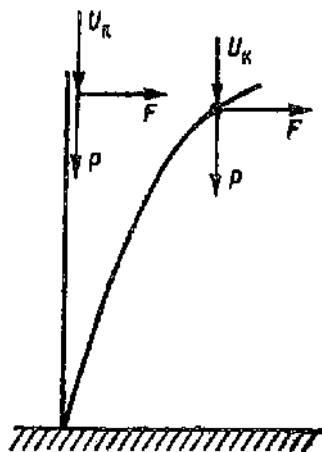


Рис. 18.28. Силы, действующие на растение при полегании (Русакова Т.И., 1985): U_k – кинетическая энергия капель дождя; F – сила ветрового напора; P – сила, вызванная массой растения

¹⁰ $H(N)$ – ньютон, единица силы в СИ. Один H – сила, сообщаящая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с² в направлении действия силы. Один $H = 10^5$ дин = 0,120 кг/с

$$F = a_v(\rho V^2 / 2)L', \quad (18.38)$$

где ρ – плотность воздуха, равная $1,293 \text{ кг/м}^3$; V – скорость ветра на уровне растения, м/с; L' – поверхность растения, на которую действует ветер, м^2 ; a_v – коэффициент затухания ветра, зависящий от фазы развития и густоты стояния растений на единице площади.

Сила, стремящаяся вернуть растение в вертикальное положение, в соответствии с теорией гибких стержней (Андреева Л.Е., 1981) рассчитывается по формуле:

$$F_y = (k_y EI_x) / l^2, \quad (18.39)$$

где E – модуль упругости растения, Па; I_x – момент инерции поперечного критического сечения, м^4 ; l – высота растения, м; k_y – коэффициент пропорциональности, изменяющийся в зависимости от степени отклонения растения при ветре от исходного положения. Момент инерции поперечного критического сечения растения рассчитывается по формуле сопротивления материалов:

$$I_x = 0,4d^3\sigma, \quad (18.40)$$

где d – диаметр стебля растения в критическом сечении, м; σ – толщина стенки соломины растения в критическом сечении, м.

Достаточное условие полегания записывается неравенством:

$$P \geq F_y, \quad (18.41)$$

где P – сила, создаваемая массой растения (H), представляет собой произведение массы растения от точки изгиба до верхушки растений на ускорение свободного падения.

Для случая, когда происходит излом растения (соломины злака) достаточным условием полегания становится:

$$\sigma \leq M_{изг} / W_x, \quad (18.42)$$

где σ – предельное допускаемое напряжение в стебле растения, Па; W_x – момент сопротивления в критическом сечении, в котором происходит излом, м^3 ; $M_{изг}$ – максимальный изгибающий момент в поперечном сечении, $H \cdot \text{м}$.

Величина W_x рассчитывается по формуле:

$$W_x = 0,8d^2\sigma \quad (18.43)$$

$$M_{изг} = Pl', \quad (18.44)$$

где l' – длина растения от точки изгиба до точки приложения силы массы растения, м.

При *интенсивном* дожде полегание зерновых культур вызывается кинетической энергией капель воды и потому возможно даже при незначительном ветре. По Т.И. Ру사ковой (1985) необходимым условием для полегания является неравенство:

$$U_k \geq A, \quad (18.45)$$

$$A = (k_y E l_x) / l, \quad (18.46)$$

где U_k – кинетическая энергия капель, вызывающая изгиб соломины растений, $H \cdot м$; A представляет собой работу, которую необходимо совершить капле дождя, чтобы вызвать максимальное отклонение растения от вертикального положения, $H \cdot м$.

В этом случае кинетическую энергию капель можно выразить следующим образом:

$$U_k = (m_k V_k^2) / 2, \quad (18.47)$$

где m_k – масса капли, кг; V_k – скорость падения капли, м/с.

Массу капли определяют по формуле:

$$m_k = V_k \rho_k, \quad (18.48)$$

где V_k – объем капли, $м^3$; ρ_k – плотность капли, $кг/м^3$.

Установившаяся скорость дождевых капель зависит от их радиуса. При диаметре капель (D) 1...4 мм эта скорость V_k (м/с) аппроксимируется выражением:

$$V_k = 200,8(D/2)^{0,5}. \quad (18.49)$$

При дожде происходит увеличение массы растения от длительного намочения. Изменение массы растений во время дождя определяется по формуле:

$$P_n = P k_n, \quad (18.50)$$

где k_n – безразмерный коэффициент изменения массы растения от длительного намочения. Этот коэффициент в первые четыре часа определяется по эмпирической формуле А.С. Ванштока (1974):

$$k_n = 1 + 0,4t, \quad (18.51)$$

где t – время увлажнения, ч.

В этом случае достаточное условие для полегания может быть представлено в виде:

$$P \cdot k_n \geq F_y, \quad (18.52)$$

где F_y – сила, стремящаяся вернуть растение в вертикальное положение.

Таким образом, автор описала два типа воздействия погодных условий на полегание посевов: сильного ветра и интенсивного дождя при незначительном ветре. В первом случае полегание растений вызывается силой ветрового напора, во втором случае изгиб растений происходит под влиянием кинетической энергии капель дождя.

Согласно многолетним исследованиям А.Д. Пасечнюка, обобщенным в его монографии (1990), в полегших посевах максимум биомассы смещается к поверхности почвы, а колосья располагаются на всех уровнях посева. В результате объемная плотность зеленой биомассы полегших

посевов в несколько раз превышает плотность нормальных, что снижает турбулентный воздухообмен в посевах, ухудшает равномерность распределения солнечной радиации в травостое. Проникающая в нижние слои полегших посевов солнечная радиация в 2...4 раза меньше, чем в неполегших посевах зерновых культур. Температура воздуха в средней части колосоносного слоя полегших посевов в дневные часы на 1...2 °С ниже, а относительная влажность на 10...15 % выше, чем в неполегшем стеблестое. Кроме того, на полегших посевах дольше сохраняется утренняя роса. В совокупности эти факторы уменьшают продуктивность фотосинтеза и конечную урожайность посева.

Наименьшая устойчивость стеблестоя отмечается в годы с пониженным температурным режимом вегетационного периода и высокой влагообеспеченностью растений. когда растения находятся в фазе колошения.

В репродуктивный период (колошение – восковая спелость) развития растений показателем устойчивости стеблестоя считается максимальная высота стеблей. Например, при высоте стеблей ячменя (сорт Винер) менее 70 см полегание не наблюдается. При большей высоте растений степень полегания ячменя определяется складывающимися погодными условиями: при интенсивных и продолжительных дождях полегание значительно, при осадках менее 20 мм – полегание мало.

Согласно А.Д. Пасечнику (1974), при запасах влаги в слое почвы 0...50 см менее 60 мм через декаду после наступления фазы выход в трубку, вероятность полегания очень мала (рис. 18.29). При запасах влаги больше 100...110 мм создается очень высокая опасность полегания. Наименьшая устойчивость стеблестоя отмечается в годы с пониженным температурным режимом вегетационного периода и высокой влагообеспеченностью растений на больших площадях.

Степень полегания зерновых культур зависит не только от количества осадков, выпавших за один дождь, но и от их интенсивности. При слабой интенсивности дождя (0,05...0,15 мм/мин) и большом количестве осадков (30...35 мм) полегание отсутствует и оценивается в 5 баллов; при интенсивности осадков (0,20...0,30 и более мм/мин) и незначительном количестве осадков (10...20 мм) наблюдается среднее и сильное полегание, оцениваемое 4...3 балла. Наконец, интенсивные и значительные осадки вызывают очень сильное и сильное полегание (от 3 до 1 балла).

У полегших зерновых культур налив зерна протекает с нарушением физиологических процессов, в результате чего зерно содержит меньше крахмала, имеет повышенную влажность и обладает низкой всхожестью. Ливневые дожди или длительные осадки могут вызвать *истекание зерна* – патологические процессы у растений, происходящие под действием избытка воды в эндосперме колосовых, в результате чего замедляется или совсем прекращается отложение крахмала; а ранее образовавшиеся продукты

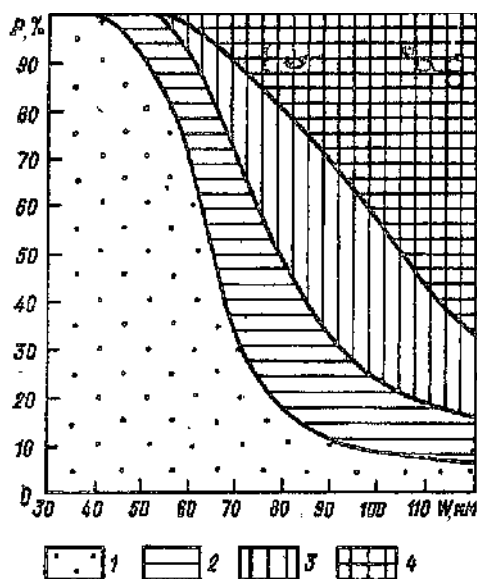


Рис. 18.29. Вероятность полегания посевов ячменя (P) при различных запасах продуктивной влаги (W) в слое почвы 0–50 см, измеренных через декаду после наступления фазы выхода в трубку (Пасечнюк А.Д., 1974): 1 – полегание отсутствует, 2 – слабое полегание, 3 – среднее, 4 – сильное

фотосинтеза частично или полностью гидролизуются и через трещины истекают на поверхность в виде, так называемой, *медвяной росы*. На медвяной росе поселяются плесневые грибки, вызывающие потемнение зерен, колосковых пленок и значительное ухудшение пищевых качеств зерна.

Переувлажненная почва и полегшие растения значительно усложняют механизированную уборку зерновых (и технических) культур. При агрометеорологических наблюдениях визуальная оценка интенсивности полегания производится в баллах, а степень полегания растений, определяемая также визуально, записывается в процентах площади полегших посевов от площади всего поля.

Сроки начала полегания зерновых посевов оказывают значительное влияние на конечную урожайность и размеры биологических потерь. Продуктивная кустистость и количество зерен в колосе уменьшаются при раннем полегании посевов. В случае позднего полегания размеры потерь определяются в основном снижением абсолютной массы зерна. Абсолютная масса зерна при полегании растений в фазу колошения уменьшается в среднем на 20...25 %, в фазу молочной спелости – на 11...16 %, а в фазу восковой спелости – на 5...10 %.

Агротехническими мерами удается несколько снизить отрицательные последствия полегания. Эффективными являются посев сортов зерновых культур, наиболее устойчивых к полеганию, и обработка посевов специальными химическими препаратами – *ретардантами* (от лат. *retardation* – замедление, задержка), синтетическими веществами различного химического состава, тормозящими рост (удлинение) стебля и придающими растениям устойчивость к полеганию. Наиболее широко применяется *хлорхлинхлорид* (или *тур*), *алар* и другие вещества. Применение этих препаратов сдерживает также вытягивание рассады овощей, декоративных культур, а при обработке крон плодовых культур делает их более компактными и предотвращает предуборочное опадение плодов.

Сильные ливни вымывают питательные вещества из верхних горизонтов почвы в нижележащие слои. Например, вымывание калия приводит к ослаблению процесса крахмалообразования в клубнях картофеля. В результате происходит снижение продолжительности «лежкости» картофеля в холодное полугодие. При этом клубни картофеля в процессе хранения быстро темнеют и портятся.

В равнинных условиях сильные ливни (≥ 30 мм/сут) могут вызвать формирование дождевых паводков, следствием которых становятся наводнения и развитие оврагов; в предгорных и горных районах при длительных и обильных осадках образуются селевые потоки, оползни и активная водная эрозия почв.

Водной эрозией называется процесс разрушения верхних, наиболее плодородных слоев почвы и подстилающих пород дождевыми и тальными водами, перемещение продуктов разрушения и их переотложение. Различают плоскостную и линейную водную эрозию. К *плоскостной эрозии* относится смыв частиц почвы и рыхлых пород, происходящий более или менее равномерно на больших площадях. *Линейной эрозией* называется размыв поверхности, приводящий к образованию ложбин, оврагов и т.п. Эти виды водной эрозии являются естественным процессом, происходящим повсюду, где наблюдается поверхностный сток воды (Роде А.А., 1955).

Интенсивность процессов водной эрозии зависит от комплекса внешних и внутренних факторов. К *внешним факторам* относятся: количество (Q) и интенсивность дождевых осадков (I), распределение снежного покрова и интенсивность снеготаяния; наклон поверхности, экспозиция склона и его протяженность перпендикулярно высотным горизонталям (J); состав и плотность растительного покрова (S), характер землепользования (Z). *Внутренними факторами* являются особенности почвенного и подпочвенного горизонтов: механический состав, водно-физические и химические свойства (P). В самом общем виде функцией эрозии почвы (E) является

$$E = f(Q, I, J, S, Z, P). \quad (18.53)$$

Из всех перечисленных факторов только состав растительного покрова и система землепользования могут полностью регулироваться человеком; некоторые факторы регулируются опосредованно, например террасирование склонов, снегозадержание, внесение органических удобрений и т.п.

Важнейшим фактором является состав и плотность растительного покрова. При плотном, многоярусном, хорошо развитом покрове эрозия почвы выражена слабо или вообще не развивается. Это объясняется тем, что корневые системы скрепляют, связывают почвенные частицы, надземные органы растений задерживают часть осадков, при этом происходит их испарение с поверхности растений. Кроме того, растения смягчают (частично погашают кинетическую энергию) удар дождевых капель о землю. Например, для растительности высотой 20 см, занимающей до 80 % площади, капельная эрозия не проявляется. Особенно это заметно в лесных экосистемах, где древесно-кустарниковые кроны и лесная подстилка выполняют большую буферную (защитную) роль почвенного покрова. Капельная эрозия проявляется только на почве, не покрытой растительностью.

Нарушение естественной растительности в результате вырубки, умеренного выпаса скота, распашки, и особенно низовых и верховых пожаров, приводит к интенсивному развитию эрозионных процессов.

Специалисты различают несколько форм эрозии почвы: *эрозия разбрызгивания, поверхностный смыл, струйная, овражная и подземная эрозии*.

Источником энергии для всех видов эрозии почв является кинетическая и потенциальная энергия атмосферных осадков. В начальной стадии выпадения осадков, т.е. до покрытия поверхности почвы пленкой и слоем воды, наиболее подвержены разрушению песчаные почвы. Наибольший выброс происходит при ударе дождевых капель о сухую поверхность песка. С ростом его влажности такой выброс уменьшается, достигая минимума при влажности песка 5,5 %. Количество выброшенного песка линейно связано с кинетической энергией дождевых капель. Тяжелосуглинистые черноземы, имеющие неровную поверхность неоднородностей различных размеров почвенных агрегатов, постепенно гасят энергию падающих капель воды, что снижает потенциальную возможность развития водной эрозии почвы.

Подсчитано, что *эрозия разбрызгивания* при ударе капель о почву, вызывает подъем большого количества почвенных частиц. Так при небольшом ливневом дожде ($Q = 9,2$ мм, $I_{max} = 2$ мм/мин) с поверхности суглинистого чернозема с площади 1 га на высоту 10 см поднимаются 770 кг почвенных частиц, на высоту 20 см – 310 кг, на высоту 60 см – 5 кг. При сильных ливнях в воздух поднимаются сотни тонн почвы с 1 га. Однако следует помнить, что такой «подъем» лишь подчеркивает эффект эрозионности, т.к. поднятые в воздух частицы выпадают на землю на расстоянии до 1,5 м от места выброса (Полевой А.Н., 1992).

Поверхностный смыв, т.е. перемещение почвы (P , т/га) связан с максимальной интенсивностью дождя за 1 час (I , мм/ч) соотношением:

$$P = 0,33I - 1,8. \quad (18.54)$$

Эрозия смыва наблюдается в случаях, когда интенсивность осадков у поверхности почвы превышает инфильтрационную способность почвы; при этом начинается склоновый сток, и поверхность земли покрывается слоем воды (H), называемым поверхностным смачиванием (Бондаренко Н.Ф., 1975). Среднее значение H за тот или иной период определяется из выражения:

$$H = \rho - S_l - F, \quad (18.55)$$

где ρ – средняя высота слоя осадков, выпавших в течение рассматриваемого периода (одного дождя, сезона, года) на определенной площади; S_l – поверхностное задержание; F – общая инфильтрация за тот же период.

Средняя скорость равномерного плоского потока V_{cp} высотой H ($H \approx r$), где r – гидравлический радиус¹¹, определяется по формуле:

$$V_{cp} = C\sqrt{Hi}, \quad (18.56)$$

где C – коэффициент Шези, ($\text{м}^{0,5}/\text{с}$), равный корню квадратному из величины уклона (крутизны склона); i – гидравлический уклон (т.е. уменьшение полной удельной энергии на единицу длины, происходящее вследствие затраты энергии на преодоление гидравлических сопротивлений).

Как только средняя скорость потока достигнет некоторого критического значения и перейдет его, водный поток начнет систематически отрывать почвенные частицы от поверхности, поднимать их и транспортировать по течению. Экспериментально установлено, что скорость потока (V_c), поднимающая и передвигающая частицы грунта (почвы), приблизительно в 1,4 раза превышает наибольшую скорость водного потока (V_n), при которой не происходит перемещения и сдвига частиц грунта на дне потока.

Значительна роль и геоморфологического фактора – крутизны и экспозиции склонов (табл. 18.26). Подсчитано, что при увеличении крутизны склона в 4 раза, скорость потока воды увеличивается в 2 раза, а эрозионная сила потока возрастает в 64 раза.

Например, в Ростовской области при паропропашной системе земледелия за 17 лет наблюдений на склонах 2...5° среднегодовой смыв почвы составил 250 т/га (Заславский М.П., 1983). В ЦЧО среднегодовой смыв при крутизне склона 1...4° составил 2 т/га, при 4...7° – 5,7 т/га, при склоне более 7° – более 11 т/га. Подсчитано, что в ЦЧО при смыве 1 см слоя типичного чернозема с площади 1 га теряется более 600 кг азота, 400 кг

¹¹ Гидравлический радиус есть частное от деления площади поперечного сечения на смоченный периметр русла (Чеботарев А.И., 1978).

Таблица 18.26

**Степень смытости почв (%) в зависимости от крутизны склонов –
суммарные данные для склонов всех экспозиций (Алексеев Н.А., 1988)**

Крутизна склонов, в градусах	Степень смытости почв, %			
	Слабая	Средняя	Сильная	Несмытые
Менее 1	0	0	0	100
1...2	58	3	0	39
2...5	66	29	1	4
5...10	41	30	26	3
Более 10	18	18	64	0

фосфора, 300 кг калия; при смыве 1 см слоя южного чернозема теряется соответственно 760, 240 и 800 кг. При этом в ЦЧО для выращивания 1 т зерна требуется в среднем 33 кг азота, 10 кг фосфора и 26 кг калия. Известно также, что на слабо эродированных землях урожайность зерновых культур снижается в среднем на 10...20 %, на среднеэродированных – на 30...50 %, на сильноэродированных – на 50...70 %.

Вполне понятно, что различные типы почв имеют неодинаковый характер развития эрозии. Менее устойчивы к эрозии легкие почвы засушливых регионов (особенно солонцеватые и карбонатные), наиболее устойчивы почвы влажных областей (например, структурные черноземы). Между физическими свойствами почв и степенью их подверженности водной эрозии существует прямая зависимость. Если водопроницаемость почвы превышает интенсивность выпадения осадков, то поверхностный сток и развитие процессов водной эрозии не происходят. С увеличением влажности почв водопроницаемость уменьшается, а поверхностный сток увеличивается по сравнению с сухими почвами. Водная эрозия сильнее проявляется на уплотненных лессовидных отложениях и менее – на моренных суглинках и других водопроницаемых породах. При уничтожении верхних, более стойких против эрозии горизонтов, интенсивность смыва других, нижележащих слоев почвы и грунтов резко возрастает.

Развитию процессов водной эрозии способствуют нерациональные приемы обработки почвы. Еще в 1909 г. проф. А.И. Воейков писал: «Людская бестолковость и беспечность очень способствуют росту оврагов». К таким приемам относятся: вспашка и рядовой посев сельскохозяйственных культур вдоль даже слабо выраженных склонов; распашка склонов и ложбин с уклоном более 10...15°; бессистемный выпас скота, вырубка лесных и кустарниковых насаждений; освоение целинных и залежных земель без применения известных противоэрозионных, землеустроительных и агротехнических мероприятий.

Сильные ливневые осадки не успевают впитаться в почву, поэтому большая их часть стекает в понижения рельефа, размывает верхние слои почвы, обнажает корневые системы растений, выносит питательные

вещества, а иногда вырывает растения целиком. Водная эрозия формирует, так называемый, овражный рельеф, практически не пригодный для сельскохозяйственного использования. Причиной турбулентности в течении воды и ветра являются главным образом вязкость среды и неровности поверхности земли, влияющие на распределение поля скоростей, давлений, силы трения и сцепления.

Наиболее ярко водная эрозия проявляется в условиях сложного горного рельефа. Склоны южных гор, не защищенные древесно-кустарниковой растительностью, особенно подвержены эрозионным процессам. Вертикальная расчлененность рельефа характеризуется глубиной базиса эрозии¹² (H):

$$H = tg\varphi L, \quad (18.57)$$

где φ – угол наклона поверхности к горизонту; L – длина линии стока, м.

Крутизна склона является одним из основных факторов смыва (эрозии). Экспериментально было выявлено влияние крутизны и длины склона на смыв почвы (Корнев Я.В., 1937):

$$M = AI^{0,75} L^{1,5} x^{1,5}, \quad (18.58)$$

$$W = AI^{0,75} L^{0,5} x^{0,5}, \quad (18.59)$$

где M – расход смытого материала (кг/с); W – смыв почвы на единицу площади (кг); I – уклон поверхности склона (тангенс угла наклона); L – расстояние от водораздела (длина склона), м; x – интенсивность осадков или водоотдачи из снега (мм/мин); A – коэффициент, учитывающий другие факторы эрозии.

Из этих уравнений следует, что смыв почвы пропорционален уклону в степени 0,75. По данным других авторов смыв почвы (различных типов) пропорционален уклону в степени от 0,5 до 0,86. В ряде зарубежных источников указывается, что при удвоении крутизны склона смыв увеличивается в 2,5 раза (Сурмач Г.П., 1976).

При интенсивных осадках или таянии снега вода скатывается с водосборов в понижения рельефа (овраги, котловины, ущелья). С огромной скоростью быстро увеличивающиеся массы воды, превращаясь в грязекаменные потоки, устремляются вниз, производя огромные разрушения по пути своего движения. Это явление называется *сель*. Селевые потоки не только смывают горные участки с посевами сельскохозяйственных культур, вырывают с корнями взрослые деревья, но и разрушают селения, производственные объекты, мосты, унося зачастую пасущийся на склонах скот. Нередко в селевых потоках гибнут люди.

На интенсивность эрозионных процессов влияют степень выравнивания полей, интенсивность и продолжительность осадков или таяния

¹² Базис эрозии – это высотная отметка, которая определяет нижний предел врезания русла водного потока. Понятие б.э. определяет энергетические возможности потока.

снега, рельеф местности, включая крутизну горных склонов, степень их облесенности или распахки, чрезмерное использование горных пастбищ выпасающимися животными (перевыпас) и т. п.

На Европейской части России водной эрозии подвержены территории Среднерусской и Ставропольской возвышенностей, Центрально-Черноземного района в Воронежской, Белгородской и Липецкой областях и в других регионах.

Для борьбы с водной эрозией проводят профилактические агротехнические и дорогостоящие инженерные работы. На эрозионно опасных полях высевают многолетние травы, разветвленная корневая система которых скрепляет верхние горизонты почвы, пожнивные, плодовые культуры; обработка почвы проводится не вдоль, а поперек склонов, т. е. перпендикулярно к стоку воды; высаживаются кустарники и деревья на склонах оврагов и холмов, ограничивается выпас сельскохозяйственных животных с целью закрепления склонов.

В горных районах проводится, так называемое, террасирование склонов – искусственное превращение склонов в «лестницу» горизонтальных ступеней, на которых высаживаются древесно-кустарниковые формы плодовых культур, виноградники или сельскохозяйственные культуры, например рис в Индонезии, во Вьетнаме и других странах. В горах центрально-азиатских стран СНГ и в Казахстане строятся капитальные, сложные гидротехнические сооружения – селеулавливающие плотины, например плотина в урочище Медео, построенная в начале 60-х годов прошлого столетия для защиты г. Алматы от катастрофических селей.

Через несколько лет после завершения строительства плотины, высоко в горах Заилийского Алатау в жаркие летние дни сформировался мощный селевой поток, образовавшийся в результате ливневых осадков и интенсивного таяния снега и ледников. Селевой грязекаменный поток, объемом в несколько десятков миллионов кубических метров воды и скальных пород, устремившийся вниз по руслу р. Малая Алмаатинка, был остановлен в урочище Медео недавно построенной плотинкой (высотой около 300 м от ее основания). В результате это стихийное бедствие было предотвращено, а г. Алматы и селения, расположенные ниже плотины, были спасены от страшных разрушений и гибели людей.

Общая схема комплекса мероприятий по борьбе с ветровой и водной эрозией (Звонков В.В., 1963) приведена на рис. 18.30.

18.6. Град, градобитие и противогорадовая защита сельскохозяйственных угодий

К числу стихийных, природных гидрометеорологических явлений относится *град*, представляющий собой осадки, выпадающие в теплое время года из мощных кучево-дождевых облаков в виде частичек плотного



Рис. 18.30. Основные мероприятия по борьбе с водной и ветровой эрозией земли

льда различных размеров. Выпадение града на посевы сельскохозяйственных культур, плантации плодовых деревьев, виноградников, чайного листа и повреждение их, называемое *градобитием*, может нанести значительный и даже непоправимый урон. Известны случаи, когда градобитием были уничтожены сотни тысяч гектаров сельскохозяйственных угодий на Северном Кавказе, в Молдавии, в Украине, Грузии, Узбекистане, Таджикистане, в Крыму, Прикарпатье и в других регионах.

Обычно величина градин варьирует от нескольких миллиметров до 2...5 см, редко – крупнее. Например, в горных долинах Таджикистана и Узбекистана зафиксированы градины, достигающие в диаметре 120...130 мм. Одним из ярких примеров интенсивного градового процесса стало градобитие, произошедшее 6 мая 1966 г. в восточной части Гиссарской долины, в Таджикистане. Отдельные градины в виде бесформенных ледяных глыб, состоявшие из «сросшихся» градин различных размеров, достигали массы более 700 г. (при диаметре 110...120 мм). Значительный слой града (более 30 см), скопившийся в сухих арыках (мелких оросительных каналах) и углублениях в почве, сохранялся в течение недели при высоких дневных температурах воздуха. Выпавший град нанес колоссальный материальный ущерб: были оголены поля и сады, погибло большое количество скота, сильно пострадали местные сельские постройки (Бокова П.А., 1977).

Ущерб, наносимый сельскохозяйственным посевам и плантациям, зависит не только от размеров градин, но и от частоты их выпадения на единицу площади и продолжительности выпадения града. Особенно интенсивные и часто повторяющиеся градобития отмечаются в предгорных и горных районах. Там в летние жаркие дни возникают мощные восходящие потоки (орографическая конвекция) за счет большой неравномерности в нагревании различно экспонированных склонов, а также благодаря горно-долинной циркуляции воздуха. Другой причиной развития градовых процессов является смешение фронтальных холодных и теплых (местных) масс воздуха.

Град образуется при сильных, теплых, восходящих потоках воздуха (конвекция) в средней части облака (выше 5 км) со скоростью 15...20 м/с, при развитии мощных внутримассовых или фронтальных кучево-дождевых облаков, высота которых достигает 12–16 км, а вертикальная протяженность облака – 3 км и более. В таких облаках возникает зона повышенной влажности (20...30 г/м³). При температуре на верхней границе облака -20...-25 °С крупные капли, поднятые восходящими потоками воздуха, замерзают и образуют зародыши градин. Зародыши быстро увеличиваются при слиянии с другими переохлажденными каплями, поступающими с восходящими потоками воздуха. Та зона облака, где происходит рост градин, называется *градовым очагом*.

Рост градин продолжается до тех пор, пока скорость их падения не превысит максимальную скорость восходящего потока воздуха, после чего они падают. Процесс выпадения града развивается лавинообразно, как правило, небольшой продолжительностью – 5...10 мин., редко – более длительное время.

Скорость падения градин, определяющая их кинетическую энергию, как и для других частиц выпадающих осадков, определяется двумя составляющими: вертикальной, обусловленной гравитационными силами,

и горизонтальной, обусловленной ветром. Вертикальная составляющая скорости выпадения градин зависит от их формы, размера и плотности. Из-за большой скорости выпадения градин (>10 м/с) относительное влияние ветра на кинетическую энергию градин меньше, чем для частиц других видов осадков. Рассчитанные значения кинетической энергии (U) градин различного размера приведены ниже, в табл. 18.27 (Полевой А.Н., 1992):

Таблица 18.27

d , мм	5	10	20	30	40	50
U , Дж	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$5,11 \cdot 10^{-2}$	$8,17 \cdot 10^{-1}$	4,14	13,1	31,9

Кинетическая энергия падающих градин различна в зависимости от их величины и плотности. За критическую величину этой энергии (U) принято $3 \cdot 10^{-3}$ Дж, что соответствует размеру градин $d \approx 5$ мм. Значения кинетической энергии в Дж/м² совокупности градин определяется из выражения

$$U = 10^{-6} b \sum_{i=1}^N n_i d_i^4, \quad (18.60)$$

где b – безразмерный параметр, зависящий от плотности градин, по данным различных авторов изменяющийся от 1 до 10; n_i – число градин диаметром d_i , выпавших за время одного градобития на площади горизонтальной поверхности 1 м².

Ущерб, наносимый растениям выпадающим градом, зависит от размера, формы и массы градин. Различные виды растений, их органы и фазы развития неодинаково выдерживают падение на них градин. Например, цветы плодовых культур разрушаются даже от ударов крупных капель дождя, а крупные одревесневшие побеги (ветки) и стволы деревьев выдерживают выпадение более крупных градин. Однако катастрофические градобития, подобные описанному в Гиссарской долине Таджикистана (1966 г.), когда масса отдельных градин достигала 700 г, поражают даже многолетние деревья и виноградники: на земле оказываются ветви диаметром до 7...8 см, срезы падающими «кусками» льда. Естественно, что посевы однолетних культур, особенно в начальные фазы их развития, наиболее чувствительны к градобитиям даже невысокой интенсивности и продолжительности.

По многочисленным материалам наблюдений установлено (Махмудов К.М., 1981), что при сильном градобитии посевов хлопчатника происходит отставание в развитии восстановленных растений на 10...70 суток в зависимости от даты повреждения. При сильных механических повреждениях выпадающим градом урожайность хлопчатника снижается на 19...97 % в зависимости от даты повреждения (т.е. от фазы развития растений). Градобития, прошедшие в ранние фазы развития растений, вызывают снижение урожайности хлопка-сырца на 24...44 %. При этом значительно снижается и качество хлопка-сырца, семян и волокна от одной коробочки (на 15...42 %).

Степень повреждения растений принято определять по двум параметрам града: количеству выпавших частиц с диаметром выше критического и суммарной кинетической энергии выпадающих градин. Оба параметра рассчитываются для единицы площади горизонтальной поверхности, обычно 1 м^2 .

С. Чангноном (S.A. Changnon, 1971) установлено, что для всех случаев критический размер градин равен 6,4 мм и степень повреждения растений предложено считать функцией числа градин, имеющих размер выше критического. Степень повреждения сельскохозяйственных культур градом определяется суммарной энергией градин, видом культуры, фазой развития растений. Например, для пшеницы в фазе молочно-восковой спелости при общей энергии за время выпадения града менее 10 Дж/м^2 повреждений не наблюдается. При $U = 50 \text{ Дж/м}^2$ степень повреждения растений достигает 25 %, а при $U > 450 \text{ Дж/м}^2$ гибнет весь урожай. Максимальные значения за время одного градобития могут достигать величины $2 \cdot 10^3$ и даже $2 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^2$.

Град выпадает обычно полосами: от сотен метров до 3...5 км шириной и 15...20 км длиной, и только при мощном развитии градовых процессов зона градобития измеряется десятками километров. Продолжительность выпадения града в 80...90 % случаев не превышает 15 мин. В суточном ходе град чаще наблюдается в дневные часы: в интервале от 12 до 20 часов отмечено около 90 % всех случаев выпадений града. Однако только в 35 % случаев отмечались градобития различной интенсивности.

На территории Центральноазиатских (Среднеазиатских) республик повышение активности грозово-градовых процессов происходит за счет орографии: от пустынь к предгорным и далее горно-долинным и высокогорным районам наблюдается увеличение повторяемости градовых явлений. Так если общее число дней с градом в пустынных районах составляет от 3...4 до 7...10, то в предгорных районах оно увеличивается до 44...56, в горно-долинные – до 70...100, а в очаговых районах формирования града – до 229 дней и более (Бокова П.А., 1977).

Ежегодно градобития наносят сельскохозяйственному производству огромный ущерб, в суммарном исчислении достигающий по данным ВМО 2,0 млрд долларов (США).

Исследования по разработке методов борьбы с градом были начаты в СССР в конце 50-х годов XX века по инициативе академика Е.К. Федорова (1967).

С целью уменьшения размеров ущерба от градобития в России, в ряде стран СНГ и дальнего зарубежья разработаны и применяются различные способы воздействия на градовые процессы. Эти способы называются *активными воздействиями на градовые облака*. Группой ученых (Сулаквелидзе Г.К., Зайцевой Г.М. и др.) была разработана термодинамическая

модель градового облака, в которой наряду с макропроцессами, приводящими к развитию конвективных потоков, рассматривались и микрофизические процессы, происходящие в облаке. Идея активного воздействия основана на создании дополнительных (конкурирующих) ядер кристаллизации в облаке путем внесения в него реагентов: йодистых солей серебра (AgI), свинца (PbJ_2) или обычной кристаллической углекислоты (CO_2). Для создания конкурирующих зародышей используются реагенты с высокой льдообразующей активностью, диспергируемые¹³ пиротехническим составом или в смеси с взрывчатым веществом (ВВ). Разработанные пиротехнические составы и смеси ВВ на базе этих реагентов имеют при 1 или 2%-м содержании AgI и 60 %-м содержании PbJ_2 льдообразующую активность при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, равную $2...5 \cdot 10^{12}$ ледяных частиц на 1 г пиросоостава или смеси ВВ. Необходимые разовые концентрации льдообразующего аэрозоля для этих целей должны составлять на $10^5...10^6$ активных ядер кристаллизации на 1 м^3 объема облака.

Опытные работы дали весьма оптимистические результаты. В начале 60-х годов эти методы получили практическое применение в Грузии, а затем на Северном Кавказе, в Закавказье, Молдавии, в Украине и в республиках Средней Азии (Махмудов К.М., 1999).

Для организации систематической защиты от градобитий в республиканских и территориальных Управлениях гидрометслужб, на территории которых происходили частые и интенсивные градобития посевов и плантаций, были созданы противоградовые экспедиции, реорганизованные впоследствии в специализированные Противоградовые службы, финансируемые за счет средств республиканских министерств сельского хозяйства. Они были оснащены специальными радиолокационными станциями, ракетно-артиллерийскими комплексами, средствами связи, другим необходимым оборудованием и техникой, а также высококвалифицированными специалистами.

Методы оперативного воздействия на градовые процессы учитывают основные особенности динамики и микрофизики градовых облаков: спонтанность и локальность возникновения града в пространстве, быстротечность процесса роста градин, зависимость размеров градин от концентрации ледяных зародышей, ограниченность количества воды (льда), которое может быть удержано в облаке при определенной скорости восходящих потоков. Основным положением физики образования и роста градин, на котором базируется принцип искусственного его подавления, является способность искусственных зародышей градин конкурировать за переохлажденную воду с естественными зародышами и обуславливать в облаках критические концентрации масс воды-льда,

¹³ Диспергирование (от лат. *dispergere* – рассеивать, рассыпать) – тонкое измельчение твердых или жидких тел в какой-либо среде.

приводящих к обрушению осадков, на которых происходит сублимация водяного пара. В результате содержащийся в облаке запас переохлажденной воды рассредоточивается среди всех ледяных зародышей градин. Такие градины не могут увеличиться до опасных размеров, а мелкие при выпадении из облака успевают растаять за время их движения через более теплые слои воздуха, лежащие ниже нулевой изотермы. В итоге осадки из градового облака выпадают в виде дождя или мелкого града, как правило, не опасного для сельскохозяйственных культур и животных.

Системой противоградовой защиты предусмотрено обнаружение градоопасных облаков, выделение в них с помощью радиолокаторов зон образования и роста града. При этом засев градоопасных очагов пиротехническим составом с помощью специальных противоградовых ракет и снарядов производится с заблаговременностью, соизмеримой со временем образования и роста града, т.е. нескольких минут.

Система оперативной противоградовой защиты должна обеспечивать высокую оперативность определения наиболее ранней стадии процесса образования градовых очагов в кучево-дождевых облаках и траектории их движения. С помощью радиолокационных станций выполняется локализация зоны, подлежащая засеву. Введение реагента в кучево-дождевые облака, в которых выявлены градовые очаги и рассчитаны траектории их движения, производится с помощью ракетно-артиллерийских установок. Иногда засев реагентом градоопасных облаков производится самолетами-зондировщиками или с помощью аэрозольных генераторов. Внесение реагента должно осуществляться на уровень градоопасного облака с изотермой $-6...-18^{\circ}\text{C}$ над всей защищаемой территорией, включая зону предварительной обработки (засева облака), равной 6...8 км. При этом рассчитывается средняя скорость перемещения облака.

Многолетний опыт борьбы с градом показал, что наиболее эффективным и экономически оправданным является организация 6...8 пунктов воздействия для одного противоградового отряда, защищающего территорию с сельскохозяйственными угодьями на площади около 10 тыс. га. Один радиолокатор обеспечивает управление 4...7 зенитными орудиями или 10...12 ракетными противоградовыми установками с охватом площади защиты до 200 тыс. га.

Противоградовые работы проводятся с целью предотвращения потерь продукции сельского хозяйства от градобитий, поэтому целесообразность проведения таких дорогостоящих работ определяется стоимостью сохраненного урожая на защищаемой территории в течение градоопасного сезона.

Для расчетов экономической эффективности защиты от градобития производственных посевов ценных сельскохозяйственных культур было предложено несколько методик, которые изложены в специальной

литературе. Величина экономического эффекта от градобитий зависит от очень многих причин: состояния и фазы развития растений, общей площади посевов и площади, поврежденной градом на защищаемой территории, сроков, интенсивности и повторяемости выпадения града, величины снижения урожайности культуры на частично поврежденных градом растениях, стоимости конечного урожая и величины затрат на производство защиты и др. Понятно, что размеры чистого дохода варьируют от года к году, в зависимости от многих перечисленных выше причин и сложившихся условий.

По данным Росгидромета в 2007 г. в Российской Федерации защита сельскохозяйственных посевов проводилась по договору с Министерством сельского хозяйства страны на площади 2,310 млн га. Потери от градобитий на этой территории были уменьшены на 97 %, а экономический эффект составил 2,3 млрд рублей.

Однако ряд объективных причин не позволяет снизить ущерб от градобития в зоне защиты в среднем больше чем на 50...70 %. Главной причиной является быстротечность развития градового облака и образования градового очага – всего 30...40 мин, за которые нужно успеть определить его нахождение в облаке, подготовить орудия и внести реагент. Позднее внесение реагента не предотвращает естественного выпадения града, который может свести «до нуля» усилия земледельцев в растениеводстве и плодоводстве.

Кроме того, в целях безопасности людей запрещается производить обстрел облаков, находящихся над населенными пунктами или в момент нахождения в воздухе летательных аппаратов (самолетов, вертолетов и др.). Тем не менее четко организованная профессиональная работа противорадовых подразделений оказывается экономически целесообразной при защите ценных сельскохозяйственных культур, таких как виноград, хлопчатник, табак, кукуруза и др., а также плодово-ягодных садов.

Поскольку даже при самой отработанной технологии засева облаков льдообразующими реагентами часть их с осадками попадает в окружающую среду (воздух, почву, растения), необходимо соблюдать обоснованные нормы внесения реагента. Специальными исследованиями установлено, что атмосфера при умеренной интенсивности выпадения осадков после внесения реагентов очищается за 0,4...2,5 часа, более вероятно – за 0,8...1,2 часа. При выпадении мороси на это требуется от 2,7 до 13,5 часа. Поднятый над облаком аэрозоль может быть разнесен на очень большие расстояния. С помощью линейного горизонтального источника норма засева должна быть не более 1 г/км при засеве облака вертикальной протяженностью 0,6...1,0 км, а при засеве более мощных облаков ($\geq 3,0$ км) – 5 г/км.

Было установлено, что за сезон противорадовой защиты на полигоне в Ферганской долине (Узбекистан) в почве были обнаружены следы серебра в количестве от $3 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ г/м² (Курбаткин В.П., Ушинцева В.Ф., 2003), что не представляет никакой экологической опасности загрязнения среды.

ГЛАВА 19

ХАРАКТЕРИСТИКА НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ И ОПАСНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ХОЛОДНОГО ПЕРИОДА ГОДА, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗИМУЮЩИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ КУЛЬТУРЫ И МЕРЫ ЗАЩИТЫ

*Погибель растений от низких температур
обыкновенно зависит от замерзания.*

Воейков А.И. (Избр. соч., т. 1, 1948.

Климаты земного шара, в особенности России, гл. 19, с. 383)

Посевы озимых культур (пшеница, рожь, ячмень, сеяные кормовые травы) ежегодно занимают в Российской Федерации и странах СНГ значительные площади. Только в России удельный вес озимой пшеницы составляет в валовом сборе зерна около 22...37 % (по данным за 2001–2007 гг.). Своевременная оценка состояния зимующих культур, научно обоснованный прогноз ожидаемого состояния культур к началу весенней вегетации чрезвычайно важны для принятия плановых и оперативно-хозяйственных решений по «ремонту» посевов, поврежденных неблагоприятными условиями перезимовки, или пересева площадей яровыми культурами. Знания причин и интенсивности повреждения или гибели озимых посевов необходимы для выполнения рационального районирования сортов, наиболее приспособленных к условиям конкретных территорий.

В холодный период зимующие культуры подвергаются различным неблагоприятным условиям, которые вызывают частичную или полную гибель посевов, садов и виноградников. Степень повреждения зимующих культур бывает различной в разные годы и в разные периоды текущей зимы. Это объясняется биологическими особенностями сорта, состоянием растений в период прекращения осенней вегетации, условиями периода закалывания, интенсивностью и продолжительностью опасных явлений зимнего времени.

Продолжительность периода относительного зимнего покоя у озимых зерновых культур на территории Нечерноземной зоны Европейской части страны варьирует от 120 до 190 суток. Например, в северо-западных областях (Ленинградская, Новгородская, Псковская) этот период составляет 120...150 суток, в северных областях (Архангельская, Вологодская и Республика Коми) и на востоке этой зоны (Кировская, Пермская, Свердловская

области и Удмуртская Республика) – 165...190 суток, а на остальной территории – 140...160 суток (Справочник агронома..., 1986). В течение всего этого периода зимующие культуры находятся под воздействием комплекса метеорологических факторов, динамично меняющихся по времени наступления, интенсивности, продолжительности, контрастности смены их комплексного воздействия (морозы – оттепели, бесснежье – обильные снега и т.п.). В комплекс неблагоприятных условий перезимовки полевых культур входят различные факторы: низкие температуры воздуха и почвы (т.е. вымерзание), образование ледяной корки, выпревание, вымокание, а также различные болезни растений, вызванные сочетанием этих неблагоприятных факторов.

Устойчивость различных культур и сортов к сложной взаимосвязи между биологическими особенностями и динамичным сочетанием условий среды и метеорологических факторов является сущностью зимостойкости растений.

19.1. Зимостойкость и морозостойкость растений

Зимостойкость растений – это биологическое свойство зимующих растений переносить воздействие комплекса неблагоприятных условий зимнего периода без существенных повреждений. Это свойство зависит от особенностей физиологических и биохимических процессов, происходящих в тканях растений зимой, определяемых видом растений, его наследственными свойствами (селекцией), климатическими условиями среды и агрометеорологическими условиями конкретного года. Зимостойкость растений определяется не только термическим режимом, но и высотой снежного покрова, толщиной и продолжительностью залегания ледяной корки, глубиной промерзания почвы, режимом снеготаяния весной и другими факторами и условиями.

Для количественной оценки зимостойкости растений пользуются *коэффициентом перезимовки растений* – отношением числа растений (побегов), сохранивших жизнеспособность и возобновивших вегетацию на единице площади к числу растений (побегов), вошедших в зиму, на такой же площади.

Морозостойкостью растений называется свойство зимующих растений выдерживать воздействие отрицательных температур с сохранением способности к вегетации и репродукции при наступлении благоприятных агрометеорологических условий. Морозостойкость растений, так же как и общая их зимостойкость, зависит от степени закалывания (закалки) и условий зимовки посевов. Морозостойкость озимых обычно характеризуют критической температурой вымерзания, при которой погибает ≥ 50 % растений.

Морозостойкость зависит от вида (сорта) растения, фазы его развития в момент «ухода» в зиму, уровня питания и степени предзимнего

закаливания. *Закаливанием растений* называется процесс повышения их холодостойкости (морозостойчивости) в условиях постепенного снижения температуры окружающей среды, сокращения продолжительности светового дня, когда останавливаются ростовые процессы в тканях растений. Благодаря процессу постепенного закаливания растения приобретают к концу осени качества зимостойкости и морозостойкости.

Исследования механизма действия низких температур на растения и агрометеорологических особенностей перезимовки различных сельскохозяйственных, плодовых культур проводились многими учеными: Максимов Н.А., 1913, 1914 и др.; Туманов И.И., 1940; Давитая Ф.Ф., 1948; Окушко А.А., 1958; Личикаки В.Н., 1974; Моисейчик В.А., 1975; Минина И.П., 1972; Яшкина И.И., Рысцова Т.В., 1979; Побетова Т.А., 1981; Белобородова Г.Г., 1982; Вольвач В.В., 1985; Моисейчик В.А., Шавкунова В.А., 1986; Страшная А.И., 1988 и многие другие.

Фундаментальные физиологические исследования, объясняющие механизм воздействия низких температур на зимующие растения были выполнены в начале XX века выдающимся русским физиологом растений Н.А. Максимовым. Теория Н.А. Максимова утверждает, что гибель растительных клеток происходит в результате механической коагуляции (от лат. *coagulation* – свертывание, сгущение) протопласта клетки от давления льда, образующегося при низких температурах внутри тканей (клеток) растений. Наиболее полное развитие эта теория получила в трудах И.И. Туманова. Им установлено, что характер образования льда зависит от скорости охлаждения и физиологического состояния растений и что закаливание защищает растения от образования льда внутри клеток. В процессе закаливания происходит постепенное обезвоживание клеток путем перестройки анатомического строения протопласта, изменения коллоидно-химического строения протоплазмы, что обеспечивает условия для оттока воды из протопласта в межклетники.

Согласно теории И.И. Туманова подготовка растений к зимовке начинается еще осенью. Растение проходит две фазы закаливания под воздействием погодных условий. Хорошие условия для прохождения первой фазы создаются при солнечной погоде, средней суточной температуре воздуха от 6 до 0 °С и большой суточной амплитуде температуры (днем 10...15 °С, ночью -1...-2 °С), т.е. при слабоположительных средних суточных температурах. В таких условиях в тканях растений (у зерновых культур в листьях, и особенно в узлах кущения) идет накопление защитных веществ (сахаров) днем и замедленный расход их ночью. Биохимические анализы подтвердили, что при температурах немного выше 0 °С на свету происходит значительное обогащение клеток сахарами. В среднем перед уходом в зиму у озимых культур накапливается около 20...25 % сахаров (на единицу сухой массы). В таких температурных и световых условиях, продолжающихся

до 12...15 (20) суток, морозостойкость растений возрастает от -5 °С до -10...-12 °С. При большей продолжительности первой фазы закаливания (30...40 суток) происходит снижение морозостойкости растений.

Физиологический механизм этого явления связан с тем, что в осенние солнечные дни в растениях сравнительно интенсивно продолжается процесс фотосинтеза. В вечерние, ночные и утренние часы при понижении температуры замедляются процессы дыхания и роста растений, что способствует накоплению сахаров. Теплые пасмурные дни с небольшой суточной амплитудой температуры воздуха менее благоприятны для прохождения первой фазы закаливания, т.к. растения продолжают расти и расходовать накопленные запасы сахаров.

По мнению ряда физиологов, морозостойкость растений в значительной мере обусловлена активностью и направленностью ферментативных процессов, регулирующих не только углеводный, но и азотный обмен.

Чем продолжительнее переход от высоких температур воздуха осенью к пониженным температурам зимнего периода и чем эти температуры благоприятнее для закаливания растений, тем интенсивнее происходит процесс накопления сахаров в узлах кущения злаков. Недоразвитые или переросшие озимые растения за осенний период плохо переносят зиму. Установлено, что морозостойкие сорта озимой пшеницы осенью растут медленнее, формируют короткие, узкие листья, расположенные у поверхности почвы; они накапливают больше сахаров по сравнению с менее устойчивыми сортами.

Вторая фаза закаливания проходит в замерзших растениях только после завершения первой фазы при средней суточной температуре воздуха -3...-5 °С, т.е. при слабо отрицательных среднесуточных температурах. У более морозостойких сортов растений озимой ржи увеличение морозостойкости происходит при более низких температурах, -6...-8 °С. Повышение зимостойкости растений в этот период происходит за счет обезвоживания тканей и увеличения концентрации клеточного сока.

Крахмал в клетках растений частично превращается в сахара, запасы которых увеличиваются: зимостойкость и морозостойкость растений в этот, более короткий временной период значительно возрастают. После прохождения двух фаз закаливания у большинства сортов озимой пшеницы критическая температура вымерзания понижается до -18 °С, а у высоко зимостойких сортов – до -20 °С. Установлено, что в условиях переувлажнения верхнего слоя почвы морозостойкость озимых, прошедших две фазы закаливания, несколько снижается.

Напомним, что *критическая температура вымерзания* – это пороговое значение температуры окружающей растению среды, ниже которого наступает гибель растения. Критические температуры вымерзания озимой ржи составляют -22...-24 °С и ниже, у люцерны -17...-19 °С, у озимого

ячменя и двуукосного клевера -13...-16 °С. Кроны многих плодовых культур могут переносить морозы до -25...-30 °С, лесные деревья до -45...-50 °С.

Исследованиями В.А. Моисейчик (1975) установлено, что динамика морозостойкости озимых культур количественно выражается через критическую температуру вымерзания растений; она связана с изменением физиологического состояния, углеводного обмена и «глубины» вынужденного покоя у растений под воздействием агрометеорологических условий зимовки. В связи со складывающимися условиями морозостойкость растений может изменяться в течение холодного зимнего периода. Устойчивость растений к холодам изменяется от года к году при сохранении общей закономерности: в начале зимы морозостойкость сравнительно невысокая, к середине зимы она возрастает до уровня максимальной, а к весне постепенно снижается. Зимостойкость растений зависит также от влажности почвы в осенний период: при влажности 50...70 % полной влагоемкости озимые получают наибольшую зимостойкость, при избыточном осеннем увлажнении (более 80 % полной влагоемкости) закаливание проходит слабее. Условия осени, обычно меняющиеся от года к году, существенно влияют на зимостойкость одних и тех же сортов озимых культур (табл. 19.1).

Таблица 19.1

Температура почвы (на глубине 3 см), повреждающая озимую пшеницу при различных условиях закаливания, °С

Территория	Условия закаливания		
	Хорошие	Средние	Плохие
Северный Кавказ, Северо-Запад Европейской части России	-18...-20	-16...-18	-14...-16
Центрально-Черноземная зона, центральные и северные области Нечерноземной зоны	-20...-22	-18...-20	-16...-18
Поволжье, юг Урала, Западная Сибирь	-22...-25	-20...-23	-18...-21

Все озимые культуры проходят стадию яровизации, без завершения которой растения не могут перейти к образованию и развитию генеративных органов и к плодоношению. Эта стадия протекает в осенний период вегетации и завершается, как правило, к началу, середине зимы. Быстрее всего яровизация вегетирующих растений проходит при пониженной температуре и непрерывном освещении, несколько медленнее при «коротком» дне и не проходит (или не завершается) в темноте.

Установлено (Куперман Ф.М., 1950...1956; Куперман Ф.М., Дворянkin Ф.А., 1955 и др.), что в процессе формирования органов плодоношения у различных злаковых культур проходят 12 основных этапов органогенеза (см. Часть II). У озимых культур первые три этапа органогенеза проходят в осенний, зимний и ранневесенний периоды. Зимуют озимые культуры обычно на II этапе органогенеза в фазе кущения и переходят к III этапу

ранней весной в течение 2...4 суток после схода снежного покрова. Озимая рожь к III этапу переходит в период снеготаяния или несколько раньше.

При поздних сроках посева или в условиях недостатка влаги в почве для нормального роста и развития растений осенью озимые прекращают вегетацию на I этапе органогенеза в фазах прорастания семян, всходов или третьего листа. Наиболее длителен у озимых III этап, а I и II этапы обычно завершаются в течение нескольких суток. В зародыше семени заложена почка, у основания которой расположен первичный конус нарастания, формирующийся на I этапе органогенеза. Продолжительность I этапа составляет 7...10 суток, в течение которых происходит дифференциация на ткани, дающая начало зачаточному стеблю и листьям.

На II этапе органогенеза происходит усиленная дифференциация конуса нарастания на зачаточные узлы и междоузлия стебля, образуются зачаточные стеблевые листья. В пазухах листовых зачатков формируются конусы нарастания второго порядка, из которых в дальнейшем образуются побеги кущения и наступает фаза кущения.

На III этапе органогенеза происходит значительное увеличение и вытягивание в длину конуса нарастания с одновременной дифференциацией главной оси колоса и зачатков кроющих листьев будущего колоса. Этот этап озимая пшеница проходит в фазах кущения и начала выхода в трубку; у озимой ржи III этап продолжается 20...40 суток. При пониженных температурах воздуха и почвы ранней весной этот этап у озимой пшеницы несколько растягивается: происходит сегментация конуса нарастания, рост зачаточного конуса. Поэтому в этот период целесообразна азотная подкормка посевов для формирования крупного колоса и максимально возможного количества колосков в колосе.

Последующие этапы органогенеза у озимых культур проходят в теплый период года.

19.2. Основные причины гибели озимых культур и меры защиты посевов

В холодный период года повреждения и гибель зимующих культур, находящихся в состоянии вынужденного покоя, обычно вызываются комплексом неблагоприятных условий. К числу основных многофакторных комплексов относятся: выдувание, вымерзание, вымокание, выпирание, выпревание, зимняя засуха, ледяная корка, гололед. Рассмотрим каждый из этих комплексов в отдельности.

Выдувание посевов (почвы) – это снос сильным ветром ($\geq 10...12$ м/с) верхнего слоя почвы на сельскохозяйственных полях зачастую вместе с посеянными семенами, всходами и слабоукоренившимися растениями. Наблюдается обычно при зимних пыльных бурях, когда снежный покров невысокий или отсутствует, почва сухая, не скрепленная корнями озимых

культур. Перемещение ветром продуктов выветривания начинается при скорости ветра 4...5 м/с у поверхности земли. При больших скоростях ветра (15...25 м/с) частицы почвы оказывают механическое повреждение растениям озимых культур. Слабо раскустившиеся растения в фазах всходы и третий лист отрываются от корневой системы, быстро засыхают или уносятся ветром. Во время сильных и продолжительных ветров (пыльных бурь) в первую очередь погибают боковые, периферийные побеги раскустившихся растений. Главный побег, защищенный боковыми побегами, сохраняется дольше и погибает в последнюю очередь. В экстремальных условиях происходит полный снос верхнего слоя почвы вместе с растениями и засыпание посевов в местах отложения продуктов ветрового переноса.

Выдувание зимующих посевов чаще наблюдается на юге степной зоны, где снежный покров невысок и неустойчив. Зимой 1968–1969 гг. в результате сильных пыльных бурь произошло выдувание и гибель озимых посевов на огромных площадях в Ростовской и Волгоградской областях, на Северном Кавказе и на востоке Украины. После сильного зимнего выдувания изреженность озимых посевов достигает 50...100 % (Моисейчик В.А., 1975). При хорошем и избыточном увлажнении верхнего слоя почвы (липком и мягкопластичном состоянии) и высоком снежном покрове выдувания озимых посевов не наблюдается.

В качестве основных агротехнических приемов в борьбе с выдуванием посевов проводятся работы, направленные на увеличение запасов почвенной влаги и снижение отрицательного влияния сильных ветров. К ним относятся: безотвальная вспашка, глубокая заделка семян в почву, прикатывание почвы после посева, создание кулисных посевов, посадка лесных полезащитных полос, снегозадержание и т. п.

Вымерзание посевов – это повреждение или гибель зимующих растений в результате нарушения обмена веществ и образования кристаллов льда в протоплазме клеток при низких температурах воздуха и почвы (на глубине залегания узла кущения), при отсутствии или незначительном снежном покрове во время морозов. Возможна также гибель растений в связи с промерзанием почвы и образованием морозобойных трещин, разрывающих корневые системы. Температурный режим поверхностного слоя почвы оказывает решающее значение на жизнедеятельность зимующих растений. В этом слое почвы расположены важнейшие органы растений: узел кущения у злаков, который обычно закладывается в слое от 0,5 до 5,0 см, корневая шейка у многолетних бобовых культур.

Следствием понижения температуры почвы на глубине залегания узла кущения (около 3 см) ниже критической для конкретного вида (сорта) в течение 2...3 суток является вымерзание растений. Критическая температура, как известно, зависит от вида (сорта) растений, от условий

предзимнего закаливания. Сильные морозы в первую очередь повреждают конус нарастания главного побега, который наиболее развит с осени и находится при нормальном состоянии озимых на II этапе органогенеза. Вторичные побеги, более молодые, имеющие конус нарастания лишь на I этапе органогенеза, менее подвержены вымерзанию.

Вымерзание растений внешне характеризуется изменением тургора клеток, побурением и отмиранием клеток и тканей растений. Степень повреждения зависит от интенсивности и длительности опасных морозов и состояния самих растений. Полная гибель растения наступает только при значительном повреждении узла кущения злаковых культур или корневой шейки – зимующих бобовых культур.

Температура, при которой наступает гибель узла кущения, различна не только для разных озимых культур и их сортов, но и для одних и тех же сортов в зависимости от состояния растений осенью (фазы развития, степени закалки, состояния конуса нарастания в момент прекращения вегетации и т.п.), а также от изменения их морозостойкости под влиянием агрометеорологических условий зимнего периода.

Интенсивные и длительные, равно как и частые непродолжительные, оттепели в период зимовки растений нарушают состояние зимнего покоя и сильно снижают морозостойкость растений. При этом резкие понижения температуры на глубине залегания узла кущения после оттепелей вызывают гибель растений при более высоком уровне минимальной температуры почвы, чем постепенное похолодание. Хорошо раскустившиеся, закаленные растения, узел кущения которых расположен на глубине 3 см и ниже, выдерживают более сильные морозы, чем слаборазвитые растения в фазах всходы – третий лист с небольшой глубиной (1...2 см) расположения узла кущения (Моисейчик В.А., 1975).

Наиболее устойчивы к морозам узлы кущения озимой ржи, выдерживающие понижения температуры на глубине 3 см до -18...-20 (-24) °С, а некоторые сибирские сорта этой культуры – до -28 °С. Более чувствительны к низким температурам даже высокозимостойкие сорта озимой пшеницы, полностью погибающие при температуре -22 °С на глубине узла кущения. Растения слабозимостойких сортов пшеницы погибают при температуре -16...-18 °С; сорта озимого ячменя погибают при температурах -13...-16 °С на глубине 3 см.

Важнейшим интегральным агрометеорологическим показателем, характеризующим условия перезимовки, является величина минимальной температуры почвы на глубине залегания узла кущения у злаков и корневой шейки у бобовых растений 3 см (t_3). Этот показатель отображает комплексное воздействие температуры воздуха и снежного покрова на почву и служит объективной характеристикой состояния верхнего слоя почвы и зимующих растений. Изучение температурного режима почвы на

глубине залегания узла кущения было начато по предложению Украинского НИИ зернового хозяйства в 1932 г. (Куперман Ф.М., Шульгин А.М.). Систематические наблюдения за температурой почвы на этой глубине, на полях с озимыми посевами ведутся в течение многих десятилетий на сети метеорологических станций России и других стран СНГ.

Больше всего подвержены вымерзанию посевы, расположенные на возвышенных участках, на западных и южных склонах, где высота снежного покрова обычно меньше, а промерзание почвы больше. Очень сухие, плотные или переувлажненные почвы отрицательно влияют на состояние растений и их перезимовку.

Вымерзание растений является основным и наиболее распространенным видом повреждения и гибели озимых. В отдельные годы посевы озимых культур повреждаются (или гибнут) от вымерзания на больших площадях, особенно часто – в степной и лесостепной зонах.

Агрометеорологические условия, при которых происходит вымерзание посевов, чаще наблюдаются в первой половине зимы, когда на полях еще не сложился устойчивый снежный покров. Во второй половине зимы вымерзание возможно лишь в районах с неустойчивым снежным покровом.

Ученые-агрометеорологи А.М. Шульгин, В.А. Моисейчик, В.М. Личикаки и многие другие предложили методы оценки условий перезимовки зерновых культур. Так А.М. Шульгин на массовых материалах наблюдений в условиях Алтайского края разработал эмпирический график, позволяющий определять минимальную температуру почвы на глубине залегания узла кущения (3 см) по минимальной температуре воздуха (в метеорологической будке) и высоте снежного покрова (рис. 19.1).

В.А. Моисейчик (1975) для условий Поволжья установила корреляционные связи между минимальными температурами воздуха и в почве на глубине 3 см при различной глубине промерзания почвы, а также ряд графических связей с учетом высоты снежного покрова 5 и 10 см (рис. 19.2). В оперативной работе агрометеорологов используются и другие методы.

В.М. Личикаки (1971) предложил определять критическую температуру озимой ржи (t_k) и динамику морозостойкости по средней температуре почвы на глубине 3 см ($\bar{t}_3$). Зависимость между этими величинами для хорошо раскустившихся осенью растений имеет нелинейный характер и выражается уравнением:

$$t_k = -14,00 + 2,65\bar{t}_3 + \bar{t}_3^2, \quad \eta = 0,80 \pm 0,05, \quad (19.1)$$

где $\bar{t}_3$ – средняя из минимальных температур почвы на глубине 3 см, °С.

Например, наибольшее значение критической температуры вымерзания озимой ржи, равное -25,3 °С, наблюдается при средней из минимальных температур почвы на глубине узла кущения -6,5 °С.

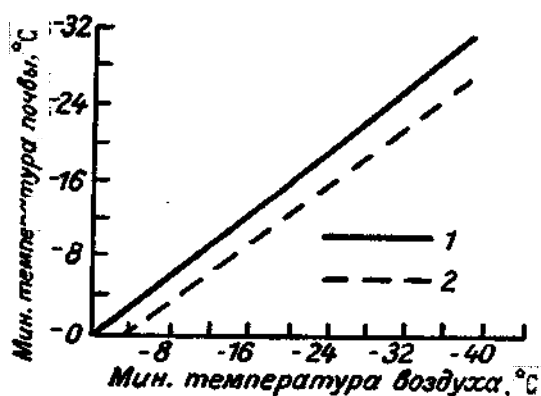


Рис. 19.1. Зависимость минимальной температуры почвы на глубине 3 см от минимальной температуры воздуха при отсутствии снежного покрова (Моисейчик В.А.): 1 – при промерзании почвы более 30 см, 2 – при промерзании почвы менее 30 см

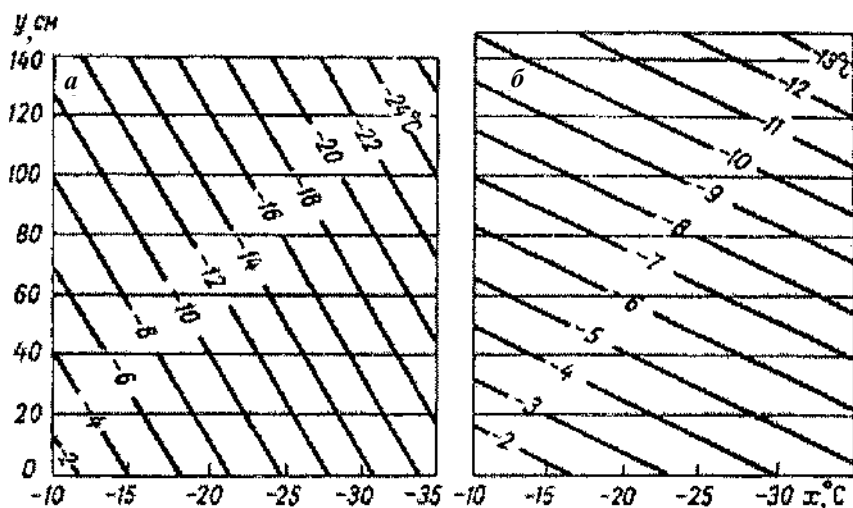


Рис. 19.2. Зависимость минимальной температуры на глубине 3 см от минимальной температуры воздуха (x) и глубины промерзания почвы (y) при высоте снежного покрова 5 см (а) и 10 см (б) (Моисейчик В.А., 1975)

Анализ всего комплекса неблагоприятных условий зимнего периода позволил выделить наиболее значимые факторы, определяющие условия перезимовки при вымерзании (Моисейчик В.А., Шавкунова В.А., 1986):

- Абсолютный минимум температуры почвы на глубине залегания узла кущения ($r = -0,82$);
- Минимальная температура воздуха при высоте снежного покрова 10 см ($r = -0,56$);
- Степень развития озимой ржи осенью, выраженная через коэффициент кустистости ($r = -0,77$).

Наиболее высокий коэффициент корреляции получен между степенью изреженности озимой ржи при вымерзании и абсолютным минимумом температуры почвы на глубине узла кущения за зимний период. Понижение температуры почвы приводит к увеличению изреженности посевов озимой ржи (рис. 19.3).

В качестве примера приведем зависимость между степенью изреженности озимой ржи (U , %) и минимальной температурой почвы на глубине залегания узла кущения (t_3) и коэффициентом кустистости (K_0)¹⁴ посевов озимой ржи осенью перед уходом растений в зиму (Шавкунова В.А., 1980):

$$U = 9,001t_3 + 0,365t_3^2 - 5,563K_0 + 0,693K_0^2 + 66,411, \quad (19.2)$$

$$R = 0,845 \pm 0,033, \quad \text{ошибка уравнения } E_u = \pm 7,4\%.$$

Изреженность озимых сортов ржи Харьковская 55 и Харьковская 60 определяют также по минимальной температуре воздуха ($t_{\min}$) за период, когда высота снежного покрова на полях составляет не более 10 см:

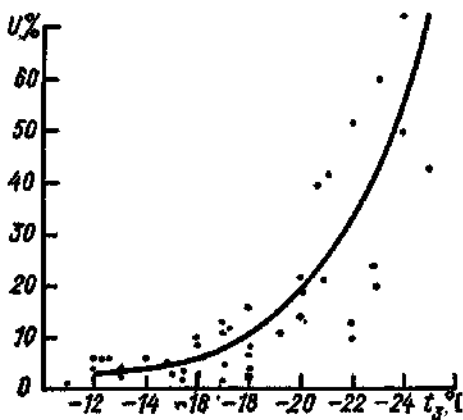


Рис. 19.3. Зависимость степени изреженности (U) озимой ржи от минимальной температуры почвы на глубине узла кущения озимых (t_3)

¹⁴ Коэффициент кустистости – отношение среднего числа плодonoсящих стеблей к среднему числу растений на 1 м².

$$U = 5,383t_{min} + 0,138t_{min}^2 + 55,193, \quad (19.3)$$

$$R = 0,912 \pm 0,031, \quad E_u = \pm 4,0 \, \%.$$

Это уравнение действительно при минимальной температуре воздуха ниже -18°C и при нормальном развитии растений осенью.

Степень изреженности озимой ржи названных харьковских сортов можно оценивать, согласно В.А. Моисейчик и В.А. Шавкуновой (1986), по минимальной температуре воздуха при высоте снежного покрова 10 см (табл.19.2).

Таблица 19.2

Зависимость степени изреженности посевов озимой ржи от минимальной температуры воздуха

Минимальная t $^\circ\text{C}$ воздуха	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30	-32	-34	-36	-38	-40
Изреженность, %	3	3	4	5	8	13	18	24	32	40	50	63

Процент сохранившихся стеблей озимой ржи тем больше, чем меньше продолжительность периода (n — число декад) залегания снежного покрова высотой ≥ 30 см, установившегося на слабо промерзшую почву (рис. 19.4).

Основным методом защиты зимующих посевов от вымерзания считается снегозадержание, способствующее увеличению высоты снежного покрова и более равномерному его распределению по площади. Из агротехнических мероприятий часто применяют посев по чистым парам с подбором полей с лучшими предшественниками, с более глубокой заделкой

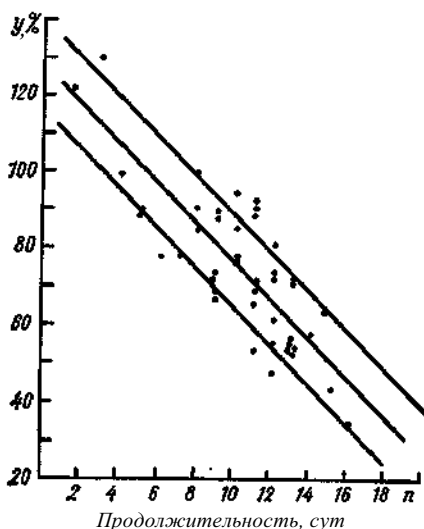


Рис. 19.4. Зависимость количества стеблей (y) озимой ржи весной (в процентах) от количества их осенью) от продолжительности залегания на полях снежного покрова (n) высотой 30 см и более

семян, корректировку сроков сева озимых культур и последнего укоса трав. Известно, что озимые зерновые, ушедшие в зиму в фазе кущения с 4-5 побегами, обладают более высокой зимостойкостью, чем растения в фазе всходов или 3-го листа, или сильно переросшие.

Профессор А.М. Шульгин (1970 и др.), много лет занимавшийся исследованиями климата почв, на материалах наблюдений 600 метеорологических станций за 10 лет (1949–1958) впервые составил схематическую карту распределения среднего из абсолютных минимумов температуры почвы. На этих данных он разработал районирование территории СССР по агроклиматическим условиям перезимовки озимых культур. Им было выделено 7 агроклиматических районов, различающихся между собой по степени благоприятности условий перезимовки культур (табл. 19.3).

Таблица 19.3

**Температурный режим почвы на глубине залегания узла кущения
в агроклиматических районах СССР (Шульгин А.М., 1970)**

№ района	Климат почвы зимой	Оценка условий перезимовки	T_3 (абсолют. минимум)			Количество зим (%) с температурой			
			средний	максимальный	минимальный	выше -5°C	от -5° до -15°C	ниже -15°C	в т.ч. ниже -20°C
I	Очень мягкий	Отличные	-4...-8	-1...-3	-11...-14	10–20	80...90	–	–
II	Мягкий	Хорошие	-8...-12	-1...-8	-12...-20	5–10	70...90	5...20	5
III	Умеренно мягкий	Удовлетворительные	-12...-16	-2...-10	-22...-24	–	50...80	20...50	5...20
IV	Холодный	Ниже удовлетворит.	-16...-20	-10...-15	-20...-30	–	20...50	50...80	20...50
V	Очень холодный	Плохие	-20...-24	-12...-17	-25...-30	–	10...20	80...90	50...70
VI	Суровый	Плохие	-24...-28	-15	-30	–	–	100	100
VII	Очень суровый	Плохие	-28...-32	-15	-35	–	–	100	100

Наибольшее значение в производстве озимых культур имеют первые три района, занимающие территорию крайних северо-западных районов, южные и юго-восточные районы Средней Азии, Северный Кавказ и юг Казахстана. Эти районы характеризуются мягкими зимами и благоприятными условиями для перезимовки растений. Остальные районы, как это следует из данных таблицы, характеризуются менее благоприятными и плохими условиями для перезимовки озимых посевов.

Вымокание растений – это повреждение или гибель озимых культур в результате нарушения процессов дыхания и фотосинтеза, недостатка кислорода и избытка углекислого газа (CO_2) при затоплении растений водой. Наиболее часто вымокание происходит в годы с большим количеством осадков при высоком уровне грунтовых вод на полях с тяжело-суглинистыми почвами в результате затопления их водами (в том числе талыми) в пониженных местах рельефа, у кустарников и на опушках леса. Накопление воды в микропонижениях рельефа полей начинается в период раннего снеготаяния и тесно коррелирует с датой перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C . Конец периода затопления растений определяется датой полного оттаивания почвы.

Наибольшая степень вымокания озимых отмечается при переувлажнении почвы осенью и выпадении большого количества осадков зимой, глубоком промерзании почвы и позднем ее оттаивании весной. В таких случаях период затопления растений оказывается длительным, в результате которого озимые вымокают на больших площадях.

При длительных затоплениях почва под водой сильно размывается, теряет свою структурность и питательные вещества, верхние слои почвы заиливаются, отчего ухудшаются аэрация корневых систем и снабжение растений кислородом.

Степень повреждения посевов зависит от глубины их затопления, продолжительности периода пребывания под водой и температуры воды. Кратковременное затопление в течение 5...10 суток и зимой (при незначительных оттепелях) не обязательно вызывает гибель растений. Наиболее опасно полное затопление растений. Это явление наступает на полях, при оттепелях, в пониженных частях рельефа, на тяжелых суглинистых почвах а также ранней весной при положительных дневных температурах воздуха, когда начинается снеготаяние. В таких условиях верхние горизонты почвы еще не оттаяли, и талая вода застаивается в низинах и микропонижениях рельефа.

Прорастающие семена зерновых культур осенью гибнут при затоплении от удушья в течение 1...2 декад. При вымокании растений сначала погибают листья, затем корни и в последнюю очередь узел кущения злаков.

Затопленные растения оказываются в условиях, при которых полностью нарушаются процессы дыхания и фотосинтеза от недостатка кислорода (Туманов И.И., 1940) и избытка углекислого газа (CO_2). На свету в затопленных растениях происходит усиление энергии обмена, связанное с увеличением потребности в CO_2 , что ускоряет гибель растений. У затопленных растений озимых процессы разрушения хлорофилла протекают медленнее. Пониженное содержание кислорода приводит к падению интенсивности дыхания и энергетического уровня клеток растений, тормозится процесс биосинтеза многих сложных биохимических

соединений. При избытке влаги в почве осенью растения имеют пониженную зимостойкость (Моисейчик В.А., Шавкунова В.А., 1986).

Негативное воздействие зимне-весеннего вымокания сказывается на растениях в течение всего летнего периода вегетации. Их развитие и рост отстает от нормальных сроков (происходит задержка перехода к III и IV этапам органогенеза), длина колоса и число зерен в колосках уменьшается, что приводит к снижению урожая.

Условия вымокания озимых культур наиболее часто складываются в западных и центральных регионах России и сопредельных стран, в среднем в 10...30 % лет.

Устойчивость различных озимых культур к затоплению в осенний, зимний и весенний периоды представлена в табл. 19.4.

Таблица 19.4

**Устойчивость некоторых видов озимых культур к затоплению
в осенне-зимне-весенний период (Остаплюк Е.Д., 1977)**

Период развития растений	Затопление (сут)	Количество живых растений, %		
		Пшеница	Рожь	Ячмень
Фаза двух листьев	6	89	67	55
Окончание осенней вегетации	8	93	74	69
После 2-й фазы закали	8	100	100	85
Возобновление весенней вегетации	4	79	42	37
Начало выхода в трубку	3	83	39	31

Как следует из этих данных, гибель озимых культур при затоплении в ранневесенний период начиналась на несколько дней раньше, чем при затоплении их в конце осени и в первой половине зимы. Особенно быстро повреждались интенсивно растущие растения. В течение трехдневного затопления в период возобновления вегетации весной погибло у пшеницы около 20 % растений, а у ржи и ячменя – около 60...65 %. Причем во все сезоны и фазы развития с начала прорастания до выхода в трубку озимые рожь и ячмень при затоплении погибали быстрее и в большем количестве, чем озимая пшеница.

Анализ многолетних данных сетевых наблюдений показал, что степень изреженности посевов при вымокании в пониженных местах полей определяется в основном продолжительностью периода затопления ($r = 0,95$), температурой воды ($r = 0,87$) и состоянием растений.

Снижению отрицательного воздействия вымокания на состояние растений способствует высокий уровень агротехники, но в основном – это своевременный отвод излишков влаги путем землеустроительных работ.

В годы, когда почва промерзает незначительно, посевы под снегом подвергаются *выпреванию* и к началу снеготаяния растения оказываются ослабленными, в результате погибают в течение даже короткого периода затопления. Это пример комплексного воздействия двух неблагоприятных факторов гибели посевов.

Выпревание растений – это повреждение или гибель озимых растений под высоким снежным покровом при длительном его залегании в условиях мягкой зимы в результате истощения растений из-за слабого фотосинтеза (или его отсутствия) и продолжающегося интенсивного расхода питательных веществ на дыхание и слабый рост. Явление выпревания, особенно на полях, занимающих понижения рельефа, наблюдается в Нечерноземной зоне довольно часто: один раз в два года, когда гибнет часть растений и один раз в 20...30 лет, когда гибель посевов отмечается на 50...100 % площадей (Моисейчик В.А., Шавкунова В.А., 1986).

При частичном повреждении растений, когда еще не нарушается связь узла кущения с корневой системой, озимые при благоприятных условиях весны полностью не погибают, однако урожайность таких посевов оказывается пониженной. У растений озимой ржи, перенесших выпревание, высота стебля, длина колоса, число колосков и кустистость, а также масса 1000 зерен оказываются наименьшими.

Выпревание – весьма сложный процесс, протекающий в растениях при температуре, близкой к 0 °С, без света, когда происходит интенсивный расход питательных веществ, ослабляющий растения. Избыток тепла под снежным покровом нарушает вынужденный период покоя, поддерживает жизненные процессы в растениях, при этом корневая система в талой воде продолжает функционировать, а надземные органы, лишенные под снегом света и других условий, погибают.

Длительное время считалось, что гибель озимых под глубоким снегом происходит от недостатка кислорода и удушья растений углекислым газом, выделяемым растениями. Однако экспериментальные исследования, выполненные И.И. Тумановым в 30-е годы XX столетия, показали, что в многоснежную зиму (высота снежного покрова 100 см) содержание кислорода за 4 месяца снизилось всего на 1,5 % и было не ниже 20...20,5 %, а содержание CO₂ не превышало 1,85 %. Температура под метровым слоем снега варьировала от 0 °С до ± 2 °С. Такое незначительное изменение в содержании кислорода показало, что даже через метровый слой снега газообмен обеспечивал жизнедеятельность растений.

При выпадении снега на талую почву растения на длительное время оказываются в темноте, в незамерзшем состоянии при температуре 0 °С. Экспериментально было показано, что от поступающей на поверхность рыхлого снега солнечной радиации на глубину 10 см проникает всего 20 %, а на глубину 50 см – около 1 %.

Толщина снежного покрова оказывает определяющее влияние на температуру на поверхности земли (под снегом). При минимальной температуре воздуха -20, -21 °С под слоем снега 10...15 см температура не опускалась ниже -8...-10 °С, под слоем снега 50 см была не ниже -4 °С. Увеличение слоя снега до 100 см сравнительно мало отражалось на

температурном режиме растений, находившихся под снегом. Под таким слоем температура больше зависит от степени промерзания почвы, наступившего еще до установления снежного покрова.

Экспериментами К.М. Пыйклика (1964), Н.Н. Яковлева (1966) было установлено большое влияние осеннего переувлажнения почвы на гибель посевов от выпревания при длительном залегании глубокого снежного покрова. Например, при залегании снега в течение 150 суток на избыточно увлажненной с осени почве гибель озимых достигала 57 %, а на слабо увлажненной почве – 24 % (в условиях одинаковой глубины промерзания почвы до 34...38 см ко времени выпадения снега).

В результате трехлетних опытов И.И. Туманова (1940) было выявлено, что интенсивность траты сахаров под глубоким снежным покровом более значительна при температуре, близкой к 0 °С, чем при температурах -5...-8 °С и ниже. При этом хорошо закаленные растения значительно экономнее тратили сахара под глубоким снежным покровом по сравнению с незакаленными. У закаленных растений содержание сахаров снижалось в узлах кушения с 25 до 7,5 %, в листьях с 16,7 до 5 %, а у незакаленных – соответственно до 2 и 2,5 %.

И.П. Петунин (1957) выполнил расчеты расхода количества сахаров растением при дыхании за сутки (мг) на 1 г сухого вещества по количеству выделяющейся в процессе дыхания углекислоты (CO₂) в зависимости от температуры (см. главу 8), приведенные в табл. 19.5.

Таблица 19.5

Расход сахаров хорошо развитыми и закаленными растениями озимых культур на дыхание под снежным покровом, за одни сутки в зависимости от температуры

Температура, °С	7	6	5	4	3	2	1	0	-1
Расход сахаров, мг	9,86	9,07	8,30	7,56	6,91	6,31	5,74	5,23	4,73
Температура, °С	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
Расход сахаров, мг	4,27	3,84	3,43	3,05	2,66	2,30	1,97	1,66	1,37

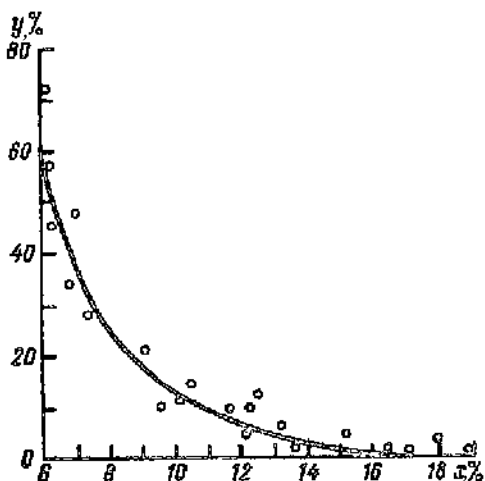
Расход сахаров у озимых культур резко возрастает в период интенсивного снеготаяния. Степень повреждения озимой ржи хорошо коррелируется с концентрацией клеточного сока в узлах кушения. Зависимость степени изреженности посевов или процент погибших растений (Y) после перезимовки от минимального значения концентрации клеточного сока за зиму в узлах кушения (x), выраженной в процентах сухих веществ по сахарозе. Эта зависимость представлена уравнением (Константинов Л.К., 1974) и на рис. 19.5.

$$\lg Y = 3,825 - 2,700 \lg x, \quad (19.4)$$

$$r = -0,864 \pm 0,055; S_y = 1,18 \%,$$

где S_y – средняя квадратическая ошибка уравнения.

Рис. 19.5. Зависимость степени гибели y (%) озимой ржи от минимальной за зиму концентрации клеточного сока в узле кущения растений x (%) (Константинов Л.К., 1974)



Гибель растений наступает не сразу после израсходования запасов сахаров, а значительно позднее, поскольку растения способны в некоторой степени пополнять их за счет превращения небольшого резерва крахмала в сахара. Однако при этом происходит голодание растений, сопровождаемое расходом белков и распадом тканей клеток растений, в результате которого наступает вторая фаза выпревания озимых.

Установлено, что начало расходования белков растениями наступает в момент, когда в них остается всего 2...4 % сахаров. Это происходит обычно в конце зимы и в период снеготаяния. Расход белков опасен для жизни растений еще и потому, что выделяющееся при этом тепло создает благоприятные условия для развития микроорганизмов и роста мицелия¹⁵ различных грибов. Последние, быстро и мощно разрастаясь на голодающих растениях, резко ускоряют расход белков, что приводит к гибели сначала листьев, касающихся почвы, затем основания побегов и узлов кущения озимых.

Наиболее распространенные заболевания связаны с грибами – снежная плесень (*Fusarium nivale*) и склеротиния (*Sclerotinia graminearum* Elenev и *Sclerotium rhizoides*). Развитие грибковых заболеваний происходит только в условиях сохранения в течение некоторого времени температуры под снегом около 0 °С и выше, влажности воздуха около 90 % при почти полном отсутствии света под толщей снежного покрова (Тупеневич С.М., 1966).

Интенсивность и степень поражения растений определяется скоростью роста патогенных грибов и бактерий, которые, в свою очередь, зависят от температуры окружающей среды. Грибковым заболеваниям в

¹⁵ Мицелий – это *грибница* – вегетативное тело грибов, состоящее из одноклеточных или многоклеточных нитей – *гиф*.

первую очередь подвергаются ослабленные растения, а затем болезни распространяются и на здоровые растения.

Установлено, что величина минимального содержания сахаров в узлах кущения ранней весной может быть рекомендована в качестве биологического показателя для диагноза состояния посевов после перезимовки.

Анализ многолетних материалов наблюдений сети станций показал, что при увеличении площади с погибшими посевами до 5...10 % урожай озимых культур заметно снижается. Особенно интенсивно снижается валовой урожай этих культур от гибели посевов на более 10 % общей площади. В Нечерноземной зоне России основной причиной гибели посевов является выпревание; размеры площади с погибшими посевами прямо пропорциональны высоте снежного покрова и обратно пропорциональны глубине промерзания почвы (Моисейчик В.А., 1975). Отношение глубины промерзания почвы (см) к высоте снежного покрова в первую декаду, когда его высота достигает ≥ 30 см, принято автором за комплексный показатель условий зимовки озимых в районах выпревания (K). Выявлена зависимость площади с погибшими посевами S_g в Нечерноземной зоне с величиной показателя (K): чем меньше его величина, тем больше площадь гибели посевов (рис. 19.6). Это объясняется тем, что в этой зоне при увеличении высоты снежного покрова и уменьшении глубины промерзания почвы создаются условия, ускоряющие процессы выпревания растений.

Исследования В.А. Шавкуновой (1980) показали, что степень развития посевов озимой ржи осенью, осредненная по областям и республикам, в комплексе с минимальной температурой почвы на глубине узла кущения позволяет надежно определять площадь с погибшими посевами озимой ржи (рис. 19.7). На рисунке видно, что оптимальные условия для перезимовки озимой ржи создаются при минимальной температуре почвы на глубине узла кущения, равной $-7...-8$ °С. При оптимальных сроках осеннего сева при такой температуре зимой гибель озимой ржи не превышает 10 % посевной площади культур.

Зависимость величины валового урожая (W) озимых культур (%) от коэффициента K_1 представлена на рис. 19.8 (Куперман Ф.М., Моисейчик В.А., 1977). Коэффициент K_1 представляет собой отношение максимального значения глубины промерзания почвы к максимальному значению высоты снежного покрова. Зависимость между этими величинами описывается уравнениями:

для лет с максимальной за зиму глубиной промерзания почвы ≤ 50 см при высоте снежного покрова ≥ 30 см (на рисунке – линия 1)

$$W = 35,50K_1 - 8,05K_1^2 + 58,56, \quad \eta = 0,87; \quad (19.5)$$

для лет с максимальной за зиму глубиной промерзания почвы 51...80 см и максимальной высотой снежного покрова ≥ 30 см (на рисунке – линия 2)

$$W = 14,80K_1 - 34,91K_1^2 + 63,46, \quad \eta = 0,83. \quad (19.6)$$

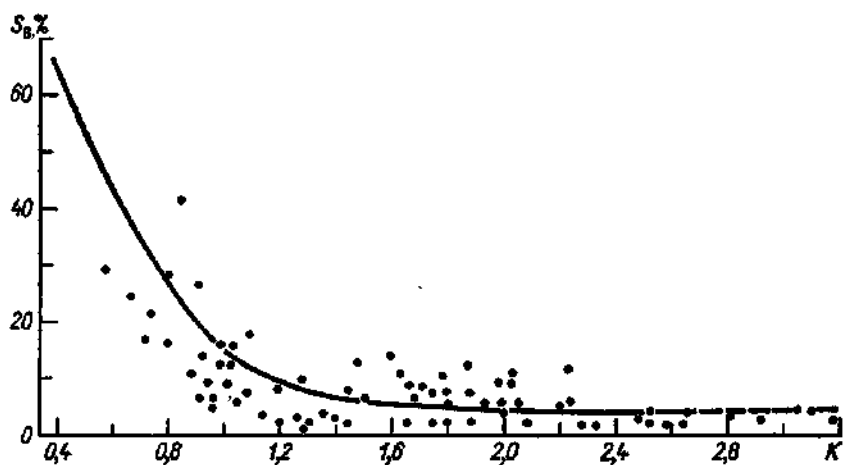


Рис. 19.6. Зависимость между площадью гибели озимых культур $S_{\text{в}}$ (%) и коэффициентом K

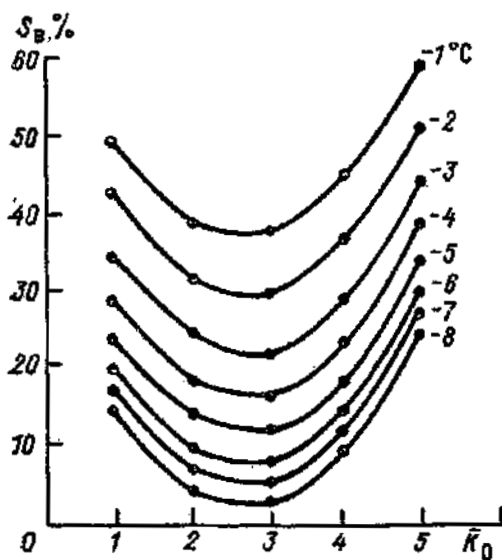


Рис. 19.7. Зависимость площади с погибшими от выпревания посевами озимой ржи $S_{\text{в}}$ от кустистости $\bar{K}_0$ и минимальной температуры почвы на глубине узла кущения $\bar{t}_3$

На рисунке 19.8 видно, что при $K_1 < 2,0$ происходит снижение валового урожая озимых по сравнению со средним его значением за 20 лет. При изменении K_1 от 2,00 до 0,30 валовой урожай озимых культур уменьшается от 100 до 70 % в годы с максимальной глубиной промерзания почвы ≤ 50 см и от 120 до 180 % в годы, когда максимальная глубина промерзания почвы ≤ 80 см. При возрастании K_1 ($>2,0$) валовой урожай тоже снижается. Это объясняется неблагоприятным воздействием на растения дополнительных факторов (вымокания растений и гибели их весной).

Сравнение кривых 1 и 2 (см. рис. 19.8) показывает, что валовой урожай в Нечерноземной зоне достаточно тесно связан с высотой снежного покрова и глубиной промерзания почвы. При увеличении максимальной глубины промерзания от 50 до 80 см он возрастает на 20 %.

Таким образом, выпревание растений происходит вследствие длительного воздействия на них неблагоприятных факторов зимнего периода: залегание на полях снежного покрова высотой ≥ 30 см и глубине промерзания почвы < 50 (80) см на протяжении > 50 суток. При таких условиях минимальная температура почвы на глубине узла кущения удерживается в пределах $0 \dots -5$ °C и способствует интенсивному расходу сахаров, истощению растений и развитию на них различных грибковых болезней. Выпреванию озимых культур часто сопутствует вымокание растений.

Сроки установления и схода снежного покрова, а следовательно, и продолжительность этого периода имеют большое значение для перезимовки озимых культур. Средняя многолетняя продолжительность (сутки) залегания снежного покрова высотой ≥ 30 см на полях с озимыми культурами представлена на рис. 19.9 (Куперман Ф.М., Моисейчик В.А., 1977).

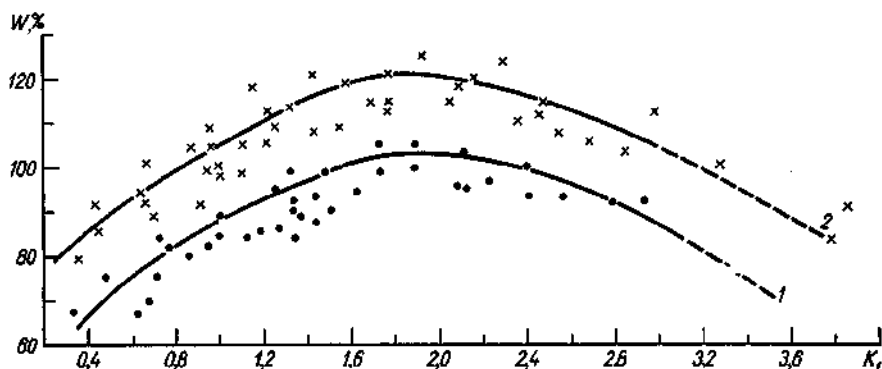


Рис. 19.8. Зависимость между валовым урожаем W (%) и коэффициентом K_1 : 1 – при максимальной глубине промерзания почвы 50 см и менее, 2 – то же при 51–80 см

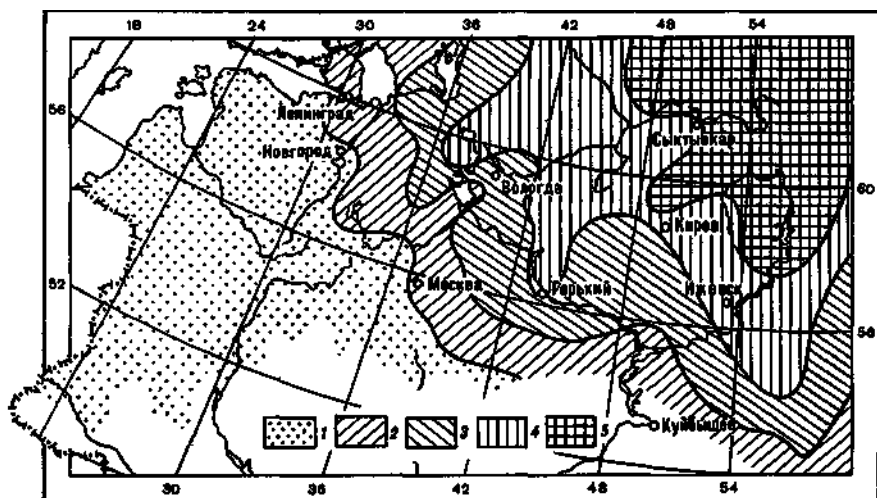


Рис. 19.9. Средняя многолетняя продолжительность залегания снежного покрова высотой 30 см и более на полях с озимыми культурами (сут): 1 – <20; 2 – 21...50; 3 – 51...80; 4 – 81...120; 5 – >120

Как было показано выше, явление выпревания растений происходит при длительном нахождении растений под мощным снежным покровом, в темноте, при слабом промерзании почвы и температуре ее выше -5°C , поэтому авторы рассчитали повторяемость лет с количеством декад за зиму, равным 8 и более, с высотой снежного покрова ≥ 30 см и максимальной глубиной промерзания почвы ≤ 50 см (рис. 19.10).

Применение высокой агротехники является наиболее эффективным способом в борьбе с гибелью озимых от выпревания и грибных заболеваний.

Выпирание растений – это повреждение озимых культур в виде выноса узла кущения или верхней части корневой системы к поверхности почвы (или на нее) при неоднократных сменах оттаивания и замерзания верхнего переувлажненного слоя почвы. Такое явление наблюдается осенью, когда увеличивается суточная амплитуда температуры воздуха и почвы: ночью – отрицательные температуры, днем – положительные. В зимнее время выпирание растений происходит при частом чередовании оттепелей и морозной погоды.

При замерзании воды в порах почвы ледяные кристаллы приподнимают (выпирают, вспучивают) верхний слой почвы вместе со слабоукоренившимися растениями, при этом корни последних разрываются. Во время оттаивания верхних горизонтов почва оседает, а узел кущения (или корневая шейка трав) вместе с частью корневых систем растений остаются на ее поверхности. В дальнейшем они подсыхают, обезвоживаются, сильнее

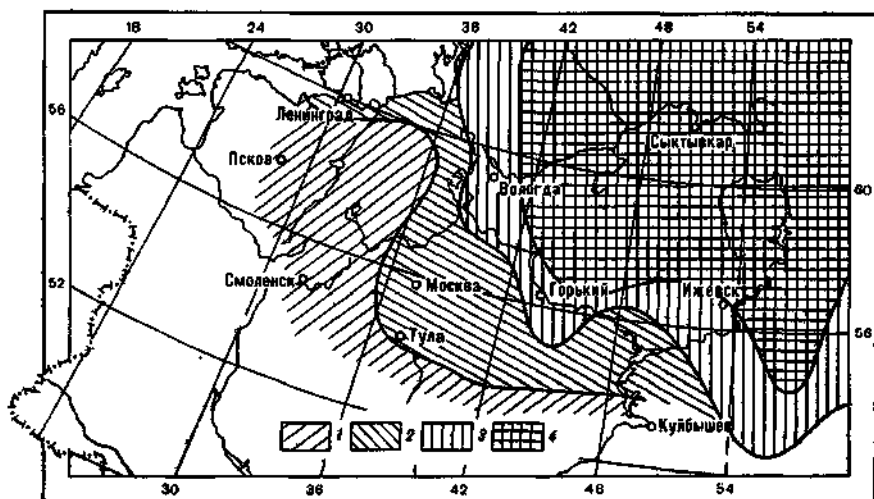


Рис. 19.10. Повторяемость лет (в процентах) с количеством декад 8 и более при высоте снежного покрова 30 см и более и максимальной глубине промерзания почвы за зиму 50 см и менее: 1 – <10; 2 – 11...20; 3 – 21...30; 4 – 31...50

повреждаются и погибают под воздействием ночных морозов, ледяной корки, механических повреждений ветром, колебаний температуры и т.п.

Растения, хорошо раскустившиеся с осени, имеющие большое количество горизонтальных корней, повреждаются от выпирания значительно реже. Корневая система таких растений поднимается и опускается вместе с верхним горизонтом почвы и не разрывается. Наиболее часто выпирание растений наблюдается в районах избыточного увлажнения, на северо-западе и западе Нечерноземной зоны. Сильно повреждаются растения, посеянные на поздно вспаханных тяжелых бесструктурных почвах, когда между временем обработки почвы и севом озимых зерновых культур проходит не более 10...20 суток, а также в годы с неустойчивой зимой, с длительными оттепелями, сменяемыми морозами.

К агротехническим мероприятиям борьбы с выпиранием растений относятся: своевременная обработка почвы под посев озимых культур; посев в уплотнившуюся почву с более глубокой заделкой семян; осушение чрезмерно увлажненных полей; иногда применяется снегозадержание на полях, большинство растений на которых имеют обнаженные узлы кущения и др.

Зимняя засуха формируется в условиях отсутствия снежного покрова, при недостатке влаги в корнеобитаемых горизонтах замерзшей почвы, при повышенной температуре воздуха ($>0^{\circ}\text{C}$), когда надземные части

растений прогреваются, происходит возобновление транспирации озимых культур, усиливающаяся солнечной погодой и ветром. Это приводит к обезвоживанию тканей, т.к. из промерзшей почвы влага не поступает. У озимых культур вначале происходит высыхание надземных органов, затем процесс иссушения достигает узла кущения злаков (корневой шейки у бобовых культур), и растение погибает. Особенно опасна зимняя засуха для слаборазвитых, плохо укоренившихся с осени посевов, корневая система которых не достигает талых слоев почвы. Наиболее часто зимние засухи отмечаются в степных районах в начале зимы, когда снежный покров еще не установился, и в конце малоснежной зимы при сильных ветрах. Надежной защитой от зимней засухи являются все способы снегозадержания на полях.

Ледяная корка – это слой льда, образующийся после оттепели от таяния снега (или выпадения жидких осадков) с последующим замерзанием на поверхности почвы. Такой вид смерзшейся с почвой ледяной корки называется *притертой*. Ледяная корка, образовавшаяся на поверхности снега, называется *настом*; при последующих снегопадах наст оказывается внутри снежного слоя, и такой вид ледяной корки получил название *подвешенной*.

Любой вид ледяной корки отрицательно влияет на зимующие растения: нарушает их газовый режим (недостаток кислорода и избыток углекислого газа, поскольку лед слабо проницаем для O_2 и CO_2), создает механические повреждения на растениях (разрыв корешков, вмержших в почву), способствует усиленному сносу снега с гладкой поверхности льда.

По данным З.Г. Ракитиной (1970) за одни сутки в тканях растений под ледяной коркой содержание углекислого газа возрастает с 1 до 20 %, а кислорода уменьшается с 20 до 8 %. При длительном залегании притертой корки (3 декады и более) и толщине ≥ 1 см, покрывающей всю надземную массу, происходит массовая гибель озимых культур. Изреженность растений озимой пшеницы не превышает обычно 20 % при толщине ледяной корки 1,1...2,0 см и достигает более 50 % при ее толщине 4,1...5,0 см (Личикаки В.М., Шелудякова Р.М., 1964).

Установлено, что основной причиной формирования притертой к почве ледяной корки на озимых посевах является комплекс факторов, встречающихся в различных сочетаниях в осенний, зимний и ранневесенний периоды. Эти факторы – температура воздуха, число дней с оттепелью и ее интенсивность, высота снежного покрова, глубина промерзания и степень увлажнения почвы, количество жидких осадков, число ясных дней за зимний период и рельеф полей.

Степень изреженности растений под притертой ледяной коркой определяется ее толщиной, продолжительностью залегания и площадью распространения на полях (Моисейчик В.А., Максименкова Т.А., Колибабчук М.Е., 1973).

Экспериментально установлено (Остаплюк Е.Д., 1977), что озимая рожь характеризуется наибольшей устойчивостью к действию ледяной корки: например, количество живых растений ржи, пшеницы и ячменя, сохранившихся под притертой ледяной коркой, залегающей в течение 20 суток, составляло соответственно 56,5; 32,4 и 15,1 процентов. При неполном вмерзании растений в лед оставшиеся над поверхностью льда листья способствуют продолжению жизнедеятельности растений.

Площадь распространения притертой к почве ледяной корки по территории областей и республик зависит от средней ее толщины за зиму и за период с 1 января по 20 февраля, коэффициент корреляции (r) составляет соответственно 0,90 и 0,97 (Моисейчик В.А., 1975).

Подвешенная ледяная корка менее опасна для растений, чем притертая, поскольку в слоях снега сохраняется определенное количество воздуха. Однако в период весеннего таяния снега на полях его покров уплотняется под воздействием ночных отрицательных температур, а подвешенные ледяные корки, смыкаясь, создают очень опасную притертую корку, толщина которой может достигать 100...150 мм. В условиях затянувшегося периода снеготаяния наступает массовая гибель посевов от удушья растений.

В Нечерноземной зоне России на посевах озимых культур образование ледяной корки наблюдается в 50...70 % лет, наиболее часто в районах с неустойчивой зимой – в Центрально-Черноземной зоне, на Северном Кавказе, в Украине. Эффективными мерами защиты посевов от ледяной корки являются снегозадержание, осушение полей, отвод талых вод. Для ускоренного таяния ледяной корки проводят зачернение ее поверхности торфом, перегноем или минеральными удобрениями, выполняющими одновременно функции подкормки посевов.

Гололед – это слой плотного льда на земной поверхности и на предметах, образующийся в результате намерзания капель переохлажденного дождя, мороси или тумана. Он возникает при температурах 0...-3 °С, реже при более низких температурах – до -15 °С. Гололед не выделяется из воздуха путем сублимации влаги на наземных предметах, а образуется при выпадении переохлажденных капель, которые, соприкасаясь с охлажденными почвой и наземными предметами, замерзают, покрывая их ледяным панцирем. При интенсивном и длительном гололедообразовании корка намерзшего льда может достигать нескольких сантиметров, особенно на предметах с наветренной стороны. Под тяжестью льда ломаются ветви плодовых деревьев и кустарников, под слоем гололеда на земле гибнут озимые и ягодные культуры.

Гололедные явления наносят также значительный урон техническим сооружениям, линиям электропередач, связи и т.п. Гололед часто наблюдается в южных регионах Европейской части России и Украины. Эффективных мер защиты от гололедных явлений в сельском хозяйстве, практически, не существует.

Оттепель – характерное явление зимнего периода на Европейской части России. Днем с оттепелью принято считать повышение температуры воздуха до 0 °С и выше зимой на фоне ранее установившихся отрицательных температур воздуха. Чаще всего это происходит в результате адвекции теплого воздуха из умеренных широт с Атлантического океана либо из южных районов Балканского региона или Малой Азии. Наступление оттепелей обычно сопровождается пасмурной погодой с туманами. Повторяемость и продолжительность оттепелей варьируют в широких пределах от года к году. В направлении с севера на юг число и продолжительность оттепелей возрастают. Наибольшее число дней с оттепелью наблюдается в Северо-Западном регионе страны, где их количество в зимние месяцы варьирует от 111 до 139 за десятилетний период (табл. 19.6).

Таблица 19.6

Число дней с оттепелями за период 1995–2004 гг. по экономическим районам (Неушкин А.И., Санина А.Т., 2002)

Регионы/ месяцы	Северо- Западный	Север- ный	Цент- ральный	Волго- Вятский	Централь- но-Черно- земный	По- волж- ский	Сумма 6 регионов
Январь	134	99	98	63	87	76	557
Февраль	139	104	129	93	137	126	728
Декабрь	111	90	94	62	109	118	584
1995–2004	384	293	321	218	333	320	1869

Распределение числа дней с оттепелями по декадам почти равновероятно для всех декад. За этот десятилетний период наибольшая максимальная температура воздуха при оттепелях наблюдалась во второй декаде февраля 2002 г. в Поволжском регионе (11,9 °С). Подобные высокие температуры в феврале 2002 г. наблюдались также в Северо-Западном и Центральном регионах. На Европейской территории РФ в зимы со средней месячной температурой -20 °С и ниже оттепели не наблюдались. Повторяемость числа дней с оттепелями, а также их продолжительность и интенсивность колеблются в довольно широких пределах. Отмечаются и годы без оттепелей. Оттепели продолжительностью 1...5 дней на большей части названных шести регионов наблюдаются в среднем 5...7 раз за зимние месяцы, а продолжительностью 6...7 дней – 1...2 раза за зиму. Суточные колебания температуры воздуха во время оттепелей невелики и составляют 5...7 °С.

Резкие смены температуры во время оттепелей с последующими похолоданиями в условиях малоснежной зимы приводят к попеременному оттаиванию и промерзанию поверхностных и пахотных горизонтов почвы. Это отрицательно сказывается на зимующих растениях, т.к. происходят выпирание и разрыв корней у озимых культур и нарушение в вяло протекающих процессах фотосинтеза, следствием которых становится ослабление растений и частичная их гибель (изреживание посевов).

В зимующих почках и побегах плодовых и ягодных культур в результате дневного прогрева тканей начинается слабое сокодвижение, которое при ночных отрицательных температурах воздуха и почвы приводит к замерзанию сока в клетках и проводящих сосудах, к их разрыву, частичной или полной гибели тканей и даже всего растения. Мер защиты озимых посевов и зимующих плодовых культур от отрицательного влияния на них оттепелей не существует.

19.3. Неблагоприятные условия перезимовки сеяных кормовых трав

Одним из важнейших источников получения ценных кормов для животноводства во многих странах мира, в том числе и в России, являются сеяные кормовые травы. Многолетние и однолетние сеяные травы выращивают в полевых и кормовых севооборотах, на сенокосах для получения сена, сенажа, травяной муки, силоса и зеленого корма. Подавляющее большинство сеяных трав относится к бобовым, злаковым, крестоцветным, зонтичным и другим семействам. Бобово-злаковые смеси улучшают структуру почвы, обогащают ее легкоусвояемым азотом, заглушают развитие сорняков. Себестоимость кормовой единицы, полученной от сеяных трав, значительно ниже, чем от других кормовых культур.

В странах с высокоразвитым животноводством (Голландия, Австралия, Новая Зеландия и др.) дешевизна и питательная полноценность сеяных кормовых трав определяет их главенствующую роль в кормовом балансе этой отрасли сельского хозяйства.

Наибольшее распространение в странах с умеренным климатом среди кормовых бобовых трав получили виды родов: клевера (*Trifolium pratense* и др.), люцерны (*Medicago sativa* и др.), эспарцета (*Onobrichis arenarius* и др.), вики (*Vicia sp. sp.*), чины (*Lathyrus sp. sp.*), донника (*Melilotus albus*, *M. officinalis*) и др.

Из злаковых кормовых трав обычно высевают: ежу сборную (*Dactylus glomerata* L.), тимopheевку луговую (*Phleum pratense*), костер безостый (*Bromus inermis* Leyss.), райграс высокий (*Arrhenatherum elatius* L.), чумиза (*Setaria italica*); виды родов житняка (*Agropyrum sp. sp.*), суданской травы, (*Sorgum sp. sp.*), и др.

Рост, развитие и формирование продуктивности сеяных трав целиком определяются складывающимися агрометеорологическими условиями теплого и холодного периодов каждого конкретного года. Этим культурам посвящена обширная биологическая, агрономическая и агрометеорологическая литература, однако здесь будут освещены только вопросы влияния неблагоприятных агрометеорологических условий зимнего периода применительно к отдельным представителям группы сеяных трав.

Наиболее полное исследование агрометеорологических условий перезимовки сеяных трав было выполнено в Гидрометеорологическом центре

России А.И. Страшной (1988). Результаты этих исследований широко используются при оценках состояния сеяных трав в зимний период и прогнозировании их урожайности после перезимовки.

Установлено, что на состояние растений в зимний период большое влияние оказывают условия осеннего периода и фаза развития сеяных трав, в которой растения «уходят» в зиму. Например, клевера хорошо переносят зимние условия, если до начала холодного периода у них успевает развиться розетка листьев, состоящая из укороченных побегов с зачаточными стеблями, с достаточными запасами питательных веществ в корневой системе. В табл. 19.7 приведены качественные характеристики морозостойкости некоторых трав в зависимости от фазы их развития.

Из этой таблицы видно, что клевера первого года жизни имеют слабую морозоустойчивость (от всходов до фазы 5-го листа), далее – среднюю устойчивость к морозам. Затем морозоустойчивость их возрастает до «очень высокой». Автор объясняет слабую морозоустойчивость незрелостью почек возобновления и недостатком запасов питательных веществ в молодом растении. Высокая морозоустойчивость люцерны на ранних фазах развития связана с биологической особенностью этой культуры, почки которой на главном стебле образуются в раннем возрасте.

Таблица 19.7

**Степень морозоустойчивости бобовых сеяных трав
в зависимости от фазы их развития (Таранец М.П., 1960)**

Фаза перед наступлением морозов	Клевер		Люцерна синяя	Эспарцет посевной
	двуукосный	одноукосный		
Всходы	Слабая	Слабая	Очень высокая	Очень высокая
1-й лист	То же	То же	То же	То же
2-й лист	–//–	–//–	–//–	–//–
3-й лист	–//–	–//–	Высокая	Высокая
4-й лист	–//–	Высокая	То же	То же
5-й лист	Средняя	Очень высокая	Средняя	Слабая
6-й лист	То же	То же	Слабая	Очень слабая
Бутонизация	–//–	Высокая	Высокая	То же
Цветение	–//–	Очень высокая	Очень высокая	Высокая

Экспериментально в ряде работ было показано (Лапин А.Г., 1973), что наибольшей морозоустойчивостью обладают молодые растения люцерны в фазе 5-6-го тройчатых листьев.

Следовательно, для повышения морозоустойчивости большое значение имеют сроки сева трав, сроки уборки покровной культуры, определяющие степень развития растений перед уходом в зиму, а в последующие годы – сроки проведения укосов трав.

По материалам многолетних тематических наблюдений сети станций было установлено, что между числом листьев, сформировавшихся у

одноукосного клевера первого года жизни к концу вегетации, и морозоустойчивостью растений имеется определенная связь ($r = 0,48$). Например, изреженность растений весной, равная 50 %, у клевера первого года жизни, сформировавшего 2...4 листа, отмечалась при температуре -12°C , а у растений с хорошо развитой розеткой (5...8 листьев) – при температуре -15°C (Страшная А.И., 1988). Показано также, что для успешной перезимовки клеверов, необходимо регулировать сроки укосов таким образом, чтобы до начала зимнего периода розетка листьев успевала сформироваться не менее чем из 3...5 укороченных стеблей. В таком состоянии клевера благополучно проходят этапы закаливания (см. 19.1).

По данным ряда авторов наилучшими средними сроками последнего укоса клеверов в центральных и северо-западных регионах России являются август, первая половина сентября. Для этого необходимо проведение своевременной уборки покровных культур, чтобы подпокровные сеяные травы успевали сформировать розетки листьев и тем самым подготовиться к зимнему периоду.

Экспериментально доказано, что на условия перезимовки влияет также и возраст посева. По мере старения посева клевера (сорт Московский 1) изменяется и количество перезимовавших растений: в среднем за три года опытов в первый год благополучно перезимовало 80 % растений, во второй – 55 %, в третий – 15 %. Морозоустойчивость люцерны, как и клевера, в первый год зимовки оказывается наиболее высокой по определениям 14.02 и 05.03 – 100...91 % живых растений при температуре -13°C , во второй – 89...80 %, в третий – 87...72 %.

Но не все заключения специалистов однозначны. Например, в семилетних опытах академика И.С. Шатилова (1956) указывается, что вследствие засухи в первый год жизни клевера зимостойкость растений снижается не только в первую зиму, но и во все последующие зимы. Растения, перенесшие засуху во второй год жизни, изреживаются после перезимовки в меньшей степени. Согласно А.И. Страшной (1988), «влияние возраста растений на их перезимовку нельзя рассматривать изолированно от агрометеорологических условий как вегетационного, так и зимнего периода».

Для сеяных многолетних трав, как и для зерновых культур, комплекс неблагоприятных осенне-зимних условий является опасным для состояния и будущей продуктивности растений. Такие качества сеяных трав, как зимостойкость и морозостойкость (см. 19.1) аналогичны таковым для озимых зерновых культур, однако количественные значения неблагоприятных условий для сеяных трав определяются не только сложившимися агрометеорологическими условиями, но и биологическими особенностями высеваемых растений и уровнем применяемой в хозяйствах агротехники.

Основными причинами повреждения или гибели растений сеяных трав являются (как и для озимых зерновых культур): вымерзание,

выпревание, вымокание, влияние ледяной корки и выпирание. Исследованиями многих физиологов установлено влияние углеводного обмена на формирование морозостойкости многих бобовых трав: высокое содержание сахаров в корневой шейке перед «уходом» растений в зиму является показателем степени устойчивости растений к перезимовке. Тем не менее различные авторы указывают на разные критические температуры вымерзания клеверов: от -6 до -18 °С на уровне залегания корневой шейки (3 см) от поверхности почвы. Совершенно очевидно, что это связано с различиями видовых и сортовых особенностей культуры, возрастом посева, с неодинаковыми условиями увлажнения и температурного режима вегетационного периода, с различным уровнем закалки растений, с характером зимних условий (наличие, продолжительность и частота оттепелей во время перезимовки), с особенностями применяемой агротехники и с другими немаловажными условиями и причинами.

Наиболее высокая морозоустойчивость (критическая температура вымерзания -14,5...-15,5 °С) растений двуукосного клевера формируется, по данным А.И. Страшной (1988), при средней амплитуде температуры воздуха 12...14 °С; при средней амплитуде менее 8 °С критическая температура вымерзания повышается до -12 °С. В опытах других исследователей также было показано, что в годы с повышенным температурным режимом предзимнего периода формируется низкая морозоустойчивость клевера (табл. 19.8).

Таблица 19.8

**Зависимость морозоустойчивости клевера в начале зимы
от метеорологических условий (Яшкина И.И., 1982)**

Морозоустойчивость	Критическая температура, °С	Сумма температур воздуха в ноябре, °С		Продолжительность периода с $t_{5...0}$ °С
		положительных	отрицательных	
Высокая	-14	17	-103	8
	-15	11	-126	2
Низкая	-9,5	64	-29	31
	-10,0	70	-20	38

Согласно А.И. Страшной (1988), морозоустойчивость клеверов в значительной степени определяется уровнем охлаждения растений. Между критической температурой вымерзания двуукосного клевера в конце декабря – начале января и суммой отрицательных средних суточных температур воздуха в период устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С до конца декабря (рис. 19.11) имеется прямая связь ($r = 0,423$).

Как известно, определение критических температур (морозостойкости) растений проводится экспериментально, в специальных морозильных камерах или расчетным путем. Количественные зависимости между критической температурой вымерзания люцерны и температурой почвы на

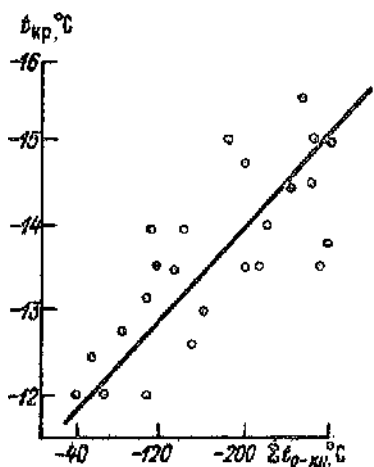


Рис. 19.11. Зависимость критической температуры вымерзания $t_{кр}$ двуукосного клевера от суммы отрицательных средних суточных температур воздуха за период от перехода температуры через 0°C до конца декабря $\sum t_{0-XII}$

глубине залегания корневой шейки (3 см) были получены В.М. Личикаки (1975) и И.Г. Грушкой (1979). Известно, что температура почвы на глубине 3 см определяется главным образом температурой воздуха, высотой и плотностью снежного покрова и глубиной промерзания почвы в зимний период. Например, по данным А.М. Могилевой (1957), при наличии снежного покрова высотой 1...5 см температура почвы на глубине залегания корневой шейки оказывалась на 1...3 $^{\circ}\text{C}$ выше температуры воздуха, а при высоте снежного покрова 6...10 см и температуре воздуха -15...-25 $^{\circ}\text{C}$ температура на глубине 3 см была на 3...5 $^{\circ}\text{C}$ выше.

При отсутствии снежного покрова теснота связи между минимальной температурой воздуха и почвы на глубине 3 см высокая ($r = 0,086...0,94$). Большую роль в формировании температуры почвы выполняет высота снежного покрова.

А.И. Страшной получены статистические зависимости температуры почвы на глубине залегания корневой шейки (t_3) от минимальной температуры воздуха (t) и высоты снежного покрова (h):

для Центрально-Нечерноземных областей

$$t_3 = 0,484t + 0,207h - 0,004h^2 - 0,008th - 0,75, \quad (19.7)$$

$$R = 0,85, \quad S_{t_3} = \pm 1,9^{\circ}\text{C};$$

для Центрально-Черноземных областей

$$t_3 = 0,701t + 0,224h - 0,005h^2 - 0,011th + 2,41, \quad (19.8)$$

$$R = 0,90, \quad S_{t_3} = \pm 1,8^{\circ}\text{C}.$$

Эти же зависимости представлены автором графически (рис. 19.12 и 19.13). Температура почвы на глубине 3 см резко повышается с увеличением высоты снежного покрова до 30 см. При дальнейшем повышении

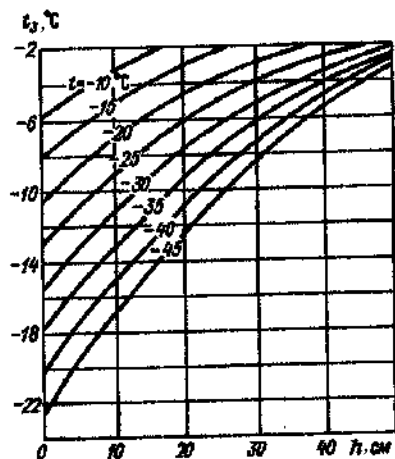


Рис. 19.12. Зависимость минимальной температуры почвы на глубине 3 см t_3 на полях с травами от минимальной температуры воздуха t и высоты снежного покрова h (почва – чернозем суглинистый)

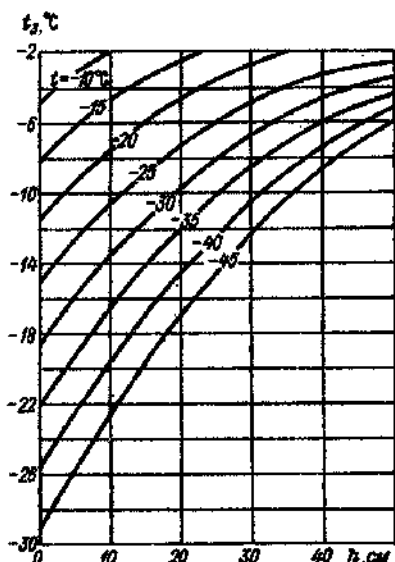


Рис. 19.13. Зависимость минимальной температуры почвы на глубине 3 см t_3 на полях с травами от минимальной температуры воздуха t и высоты снежного покрова h (почва – чернозем суглинистый)

высоты снега повышение температуры почвы замедляется. Однако при прочих равных условиях температура почвы на этой глубине в черноземной почве (см. рис. 19.13) ниже, чем в нечерноземной. Объясняется это более высоким увлажнением почвы в Нечерноземной зоне и, как следствие, большей ее теплоемкостью. Как правило, сухие почвы промерзают глубже и сильнее охлаждаются.

В качестве примера приведем еще одну количественную зависимость критической температуры ($t_{кр}$) вымерзания клевера красного от других, информативных агрометеорологических факторов (Страшная А.И., 1988):

$$t_3 = 0,078W_{IX-X} - 0,002W_{IX-X}^2 + 0,228A_{10-5} - 0,006 \sum t_{0-XII} + 9,78, \quad (19.9)$$

$$R = 0,79; \quad S_y = \pm 0,48 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где W_{IX-X} – средние запасы продуктивной влаги в пахотном горизонте почвы за сентябрь–октябрь; A_{10-5} – амплитуда температуры воздуха за период от перехода средней суточной температуры через $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ до перехода ее через $5 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\sum t_{0-XII}$ – сумма средних суточных температур воздуха за период от перехода их через $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ до конца декабря.

Как показали исследования А.И. Страшной (1988) уровень критических температур вымерзания зависит также от динамики низких температур воздуха в течение зимнего периода, от возраста клевера, от динамики сахаров (в процентах), содержащихся в растениях и от других причин. «Таким образом, динамика морозоустойчивости клевера красного, количественно выражающаяся через критическую температуру вымерзания, вызвана изменением физиологического состояния, углеводного обмена и глубины вынужденного покоя у растений под влиянием агрометеорологических условий зимовки».

Неблагоприятные условия зимовки проявляются через частичную или полную гибель посевов. Например, В.М. Личикаки (1975) для территории Украины предложил определять гибель посевов люцерны по коэффициенту морозоопасности (K), представляющему отношение минимальной температуры почвы на глубине 3 см к критической температуре вымерзания растений (рис. 19.14):

$$M = 69,72K^{4,819}, \quad \eta = 0,84, \quad (19.10)$$

где M – возможная гибель растений, процент изреженности.

По А.И. Страшной (1988) ожидаемую изреженность посевов люцерны (M) после перезимовки можно рассчитать по температуре почвы на глубине 3 см:

$$M = 0,19t_3^2 + 1,22t_3 + 6,03, \quad (19.11)$$

$$R = 0,76, \quad S_y = \pm 11 \, \%.$$

Обобщенные результаты условий перезимовки двуукосных клеверов приведены в табл. 19.9.

Аналогично оцениваются условия перезимовки и других сеяных трав при условии, что известна их критическая температура вымерзания.

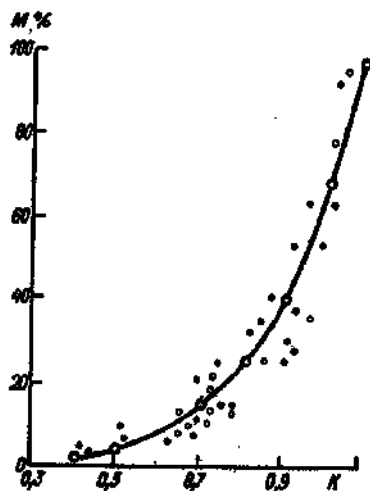


Рис. 19.14. Зависимость изреженности люцерны (M) по данным весеннего обследования от коэффициента морозоопасности (K)

Менее изучен вопрос влияния выпревания посевов сеяных многолетних трав. Согласно Н.С. Смирнову (1974), выпревание клеверов в Нечерноземной зоне является более распространенным, чем вымерзание. По данным Г.Н. Ковальчука (1981) вероятность выпревания клевера на большей части Нечерноземной зоны составляет около 40 %, что связано в первую очередь с более мягкими зимами в зоне клеверосеяния.

Таблица 19.9

Оценка условий перезимовки двуукосных клеверов (Страшная А.И., 1988)

Разность условий фактической температуры почвы на глубине 3 см и критической температуры вымерзания растений, °С	Возможная изреженность клеверов после перезимовки на поле, %	Качественная оценка перезимовки
2,1...4,0	Не более 5...10	Хорошие
1,0...2,0	От 11 до 39	Удовлетворительные
± 0,5	40...60 и более	Плохие

По многочисленным полевым наблюдениям выяснено, что выпревание по площади носит пятнистый характер и не отмечается на больших площадях. Тем не менее этот вид неблагоприятных условий перезимовки снижает урожайность сеяных трав до 20...50 %.

Исследования показали, что наибольшее негативное влияние на исход перезимовки трав в годы с преобладанием выпревания оказывает сумма минимальных за зимние декады температур почвы на глубине 3 см. При этом известно, что сумма минимальных температур почвы за зиму тесно зависит от их суммы до 20 февраля ($r = 0,92$). В теплые многоснежные зимы, когда преобладает выпревание посевов, разность в сумме минимальных температур за декаду на глубине 3 см до 20 февраля и в целом за зиму составляет 5...10 °С и лишь в отдельные годы 15...20 °С. Полученная зависимость (Страшная А.И., 1988) изреженности клеверов (M) весной от суммы минимальных (за декады) температур почвы на глубине 3 см до 20 февраля ($\sum t_3$) выражается уравнением

$$M = 0,056 \sum t_3^2 - 3,40 \sum t_3 + 58,03, \quad (19.12)$$

$$R = 0,72, \quad S_y = \pm 8 \, \%.$$

Используя эту зависимость, можно рассчитать 20 февраля ожидаемую к весне изреженность клеверов от выпревания и дать информацию хозяйствам о необходимости проведения мероприятий по уходу или пересеву трав на поврежденных перезимовкой площадях. Обобщенные оценки условий перезимовки клеверов от выпревания приведены в табл. 19.10.

И.И. Яшкиной и Т.В. Чуревой (1982) показано, что ожидаемую изреженность клеверов весной можно рассчитывать по уравнению:

$$M = 9,47t_1 + 5,22K + 84,9, \quad (19.13)$$

$$R = 0,80, \quad S_y = \pm 15 \, \%.$$

где M – изреженность посевов весной, %; t_1 – средняя за зиму температура почвы на глубине залегания корневой шейки, °С; K – коэффициент кустистости растений после прекращения вегетации осенью.

При этом известно, что хорошо раскустившихся растений (кустистость 4...6 побегов на одно растение) в зимы с выпреванием бывает на 10...20 % больше, чем слабо раскустившихся. Люцерна более устойчива к выпреванию.

Таким образом, знание особенностей неблагоприятного влияния условий перезимовки сеяных кормовых трав позволяет оперативным подразделениям Гидрометеорологической службы страны своевременно проводить количественную оценку состояния посевов и в установленные сроки составлять прогнозы перезимовки трав.

Таблица 19.10

Оценка условий перезимовки клеверов при выпревании в центральных областях Европейской территории страны (Страшная А.И., 1988)

Сумма минимальных за зимние декады температур почвы на глубине 3 см	Продолжительность залегания снежного покрова высотой ≥ 20 см, декады	Изреженность посевов, %	Оценка перезимовки
-40 и ниже	< 5	5...10	Хорошие
-30...-10	6...11	11...39	Удовлетворительные
Выше -10	12...15	40...60	Плохие

19.4. Неблагоприятные и опасные условия перезимовки плодовых культур, виноградников и меры защиты

Применительно к плодово-ягодным культурам агрометеорологических и агроклиматических исследований не много. Отметим наиболее известные исследования: Давитая Ф.Ф. (1938); Драгавцева А.П. (1956); серию работ Селянинова Г.Т. (1959, 1961 и др.); Аникеевой С.П. (1962, 1986); Рядновой И.М., Еремина Г.В. (1964); Соловьевой М.А. (1967 и др.); Турманидзе Т.И. (1981); Белобородовой Г.Г. (1977, 1988 и др.); Лосева А.П. (1979); Драгавцевой И.А. (1999 – 2007), Константинова Л.К. (1974, 1985, 2008, 2011) и других.

В садоводстве, где объектом труда земледельцев являются многолетние культуры, недооценка погодных условий и климатических ресурсов территории может привести к продолжительному снижению урожайности плодов, ухудшению качества продукции, а в случае гибели насаждений – к существенным и невозполнимым потерям и убыткам. Гибель насаждений сокращает площади под садами и виноградниками,

вызывает их изреженность, а процесс их восстановления в силу биологических особенностей культур оказывается достаточно продолжительным. После неблагоприятных, суровых зим восстановление плодовых плантаций занимает от 6 до 12 лет в зависимости от культуры и сорта.

Наиболее значительные повреждения садов на Европейской части России и в Среднеазиатских государствах наблюдались в суровые зимы: 1950/51, 1951/52, 1954/55, 1955/56, 1966/67, 1968/69, 1971/72, 1978/79 годы. В 1949/50 и в 1984/85 гг., произошло массовое повреждение и гибель citrusовых плантаций в субтропических районах России и сопредельных стран.

Хорошо известно, что растительный организм нормально функционирует только в условиях определенного соотношения между приходом и расходом вещества и энергии в процессе обмена с окружающей средой. Эти условия соблюдаются при достижении наибольшего соответствия между потребностями растений и комплексом экологических (в том числе и агрометеорологических) условий. Максимальная продуктивность культур отмечается при сбалансировании основных факторов урожая, т.е. при соблюдении биологических законов совокупного действия процессов роста и развития культуры (Белобородова Г.Г., 1982).

Разрешить объективно существующие противоречия между потребностями выращиваемых культур к среде их обитания и фактически динамично изменяющимися (по сезонам и годам) естественными условиями и ресурсами призваны технологии возделывания и применяемые агротехнические приемы ухода за посадками плодовых культур.

Благоприятные условия для плодового хозяйства в Нечерноземной зоне России складываются там, где ГТК Селянинова составляет от 1,1 до 1,4. При ГТК более 1,4 плодовые культуры «страдают» от избытка влаги, а при ГТК менее 1,0 необходим полив, т. к. естественная низкая влажность корнеобитаемых слоев почвы не обеспечивает не только формирования высоких урожаев, но и хорошей закладки плодовых почек и нормальной подготовки растений к зимнему периоду.

После завершения летнего роста побегов в длину плодовые культуры вступают в период подготовки к зимовке, к периоду покоя. В это время решающими являются условия погоды августа, сентября и первой половины октября (на территории Центральной России), когда в тканях происходит накопление крахмала, жиров и других пластических веществ.

Под *зимним покоем* листопадных растений, в том числе и плодовых культур зоны умеренного климата понимают «промежуток времени, в течение которого растение обладает минимальной чувствительностью к воздействиям внешних агрометеорологических условий» (Анци Дж., 1959). Но при этом в условиях холодного полугодия в органах растения под влиянием внешних условий происходят внутренние, не

видимые наблюдателю морфофизиологические и биохимические процессы, без которых невозможно дальнейшее развитие растений, и в частности органов плодоношения (Драгавцева И.А., 1999). Для нормального развития цветковых почек многих плодовых культур необходим устойчивый холодный период в течение 2,5...3 месяцев. Для теплолюбивых культур, например для различных сортов абрикоса, холодный период (от -7 до +7 °C) может продолжаться от 500 до 300 часов.

Период зимнего покоя плодовых культур сложился в процессе длительной эволюции и закрепился в генотипе¹⁶ как приспособление к неблагоприятным условиям зимнего периода. В процессе эволюции надземная часть многолетних растений подвергалась суровым испытаниям – морозам, иссушающим ветрам, холодным ливням и т.п., в то же время корневые системы всегда в определенной мере защищены почвой от неблагоприятных условий. Поэтому зимостойкость корневых систем значительно слабее надземных органов. В различных условиях центральных районов России критическая температура для корней разных сортов яблони варьирует в пределах -12...-16 °C (Лосев А.П., 1979).

В практике садоводства (плодоводства) началом зимнего покоя принято считать время естественного листопада деревьев и кустарников (фаза «листопад»), отмечаемого по программам фенологических наблюдений. Даты наступления этой фазы различны у разных сортов одной и той же культуры, кроме того, они варьируют от года к году в связи со сроками смены сезонов. Одним из критериев анатомической диагностики состояния глубокого зимнего покоя растений является «обособление протоплазмы» в клетках зимующих древесных и кустарниковых пород (Генкель П.А. и Окнина Е.З., 1964). Сущность этого критерия заключается в установлении с помощью микроскопического среза степени обособления протоплазмы от оболочки клеток паренхимы в побегах исследуемых культур. До середины октября во всех клетках отчетливо видны на срезах плазмодесмы (микроканалы, непрерывно переходящие из клетки в клетку), при этом протоплазма плотно прилегает к оболочке клетки. В дальнейшем в октябре еще при положительных температурах воздуха происходит «отход» протоплазмы от оболочек у 30...40 % клеток, наблюдаемых в поле микроскопа, постепенно исчезают плазмодесмы. К концу января, началу февраля количество клеток с обособленной протоплазмой достигает максимума, а затем начинает убывать. С приближением весны протоплазма постепенно возвращается к оболочке и происходит восстановление плазмодесм. Таким образом, происходит физиологическая подготовка клеток зимующих растений к зимнему холодному периоду.

¹⁶ Генотип – наследственная основа организма, совокупность генов, локализованных в его хромосомах; в более широком понимании – совокупность всех наследственных факторов организма.

Плодовые культуры, как и другие зимующие культуры, проходят две фазы закаливания перед уходом в зиму. Первый этап проходит при температуре воздуха от + 6 до 0 °С и несколько ниже (в период до листопада), когда происходит переход крахмала в сахара. Ко времени листопада у плодовых наблюдается «крахмалистый» максимум, процесс накопления протекает активно при хорошем фотосинтезе. Второй этап протекает при температуре воздуха от 0 до -12 °С и характеризуется обезвоживанием тканей и клеток, дальнейшим накоплением сахаров и переходом растений в состояние глубокого покоя, необходимого для устойчивости к морозам.

Замечено, что плодовые деревья после обильного урожая обмерзают зимой сильнее, чем деревья после небольшого плодоношения. Более чувствительны к низким температурам листовые почки; плодовые почки, располагающиеся на укороченных побегах («плодушках»), успевают вызреть и успешнее перезимовывают. Кроме того, в листовых и плодовых почках происходят физиологические изменения, заключающиеся в образовании высокомолекулярных, труднорастворимых соединений (липоиды, жиры и т.п.), происходит обособление плазмы от стенок клеток, способствующее пониженному обмену веществ. Все виды зимующих почек имеют несколько покровных чешуй, склеенных морозостойкими смолами, защищающими от холодов листовые почки, и особенно зачаточные бутоны.

В течение зимы в условиях больших колебаний температуры воздуха зимостойкость почек уменьшается. Наиболее высокая зимостойкость характерна для плодовых культур в самые холодные месяцы (декабрь – февраль).

Уровень критических температур, повреждающих плодово-ягодные культуры, неодинаков для различных пород и сортов, поскольку он определяется биологическими свойствами культуры, степенью их акклиматизации к району возделывания и агроклиматическими условиями территории (табл. 19.11).

Таблица 19.11

**Критические температуры (°С) некоторых плодовых культур
для зимнего периода в Нечерноземной зоне (Побетова Т.А., 1986)**

Культура	Температура воздуха, °С			Температура почвы (корневая система)
	Кроны	Ростовые почки	Цветочные почки	
Яблоня (средне-русские сорта)	-30...-40	-40	-35...-40	-10...-15
Груша	-25...-30	-30...-35	-25...-30	-8...-10
Вишня	-30...-35	-25...-30	-25...-30	-10...-15
Слива	-30	-25...-30	-25...-30	-8...-10
Земляника	–	–	–	-7...-9
Смородина	–	–	–	-15...-16

Одним из объективных показателей условий зимовки является процент сохранившихся плодовых почек на деревьях и кустарниках. Это определяется методом отращивания выборочных побегов в комнатных условиях в различные сроки зимних месяцев. В условиях плохой летне-осенней подготовки культур к зимовке от низких температур зимой может погибнуть до 70...90 % плодовых и листовых почек (Побетова Т.А., 1986).

Яблони южных сортов повреждаются и гибнут при более высоких температурах воздуха, чем приведено в этой таблице. По другим источникам критические температуры гибели теплолюбивых плодовых культур имеют следующие значения: абрикос -25...-28 °С, персик -20...-25 °С, виноград -18...-20 °С, мандарин -9...-10 °С, лимон -7...-8 °С.

По данным измерения абсолютного минимума температуры поверхности снега, наблюдаемой в конкретном районе, несложно определить процент повреждения плодовых почек выращиваемых культур (табл. 19.12).

Таблица 19.12

Влияние абсолютного минимума температуры поверхности снега на повреждение плодовых почек

$T_{\text{абс. мин.}}$ поверхности снега, °С	-32	-34	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50	-52	-54
Повреждение плодовых почек, %	10	15	35	55	60	75	80	83	83	87	90	100

Распределение по территории Нечерноземной зоны среднего из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха (°С) приведены на рис. 19.15.

Кроны плодовых деревьев и кустарников имеют различную морозоустойчивость в зависимости от биологических особенностей вида и сорта. Большое влияние на устойчивость плодовых к низким температурам оказывают такие факторы, как уровень плодоношения текущего года, время созревания плодов и время опадения листьев, поздние осенние заморозки и их интенсивность. Поврежденные осенними заморозками листья не могут в полной мере накопить защитные, питательные вещества, что снижает морозоустойчивость кроны деревьев, особенно их молодых побегов. Например, катастрофической оказалась осень 1956 г., когда после теплого сентября внезапно наступившие холода (начало октября) в Узбекистане почти полностью погубили плантации плодовых культур и виноградников на тысячах гектарах. Своевременное вызревания древесины молодых побегов и окончание их роста осенью является необходимым условием подготовки плодовых культур к зимнему периоду.

Морозоустойчивость плодовых культур резко снижается в период длительных оттепелей. Они наблюдаются при резком повышении температуры воздуха на фоне устойчивой морозной погоды. В центральных

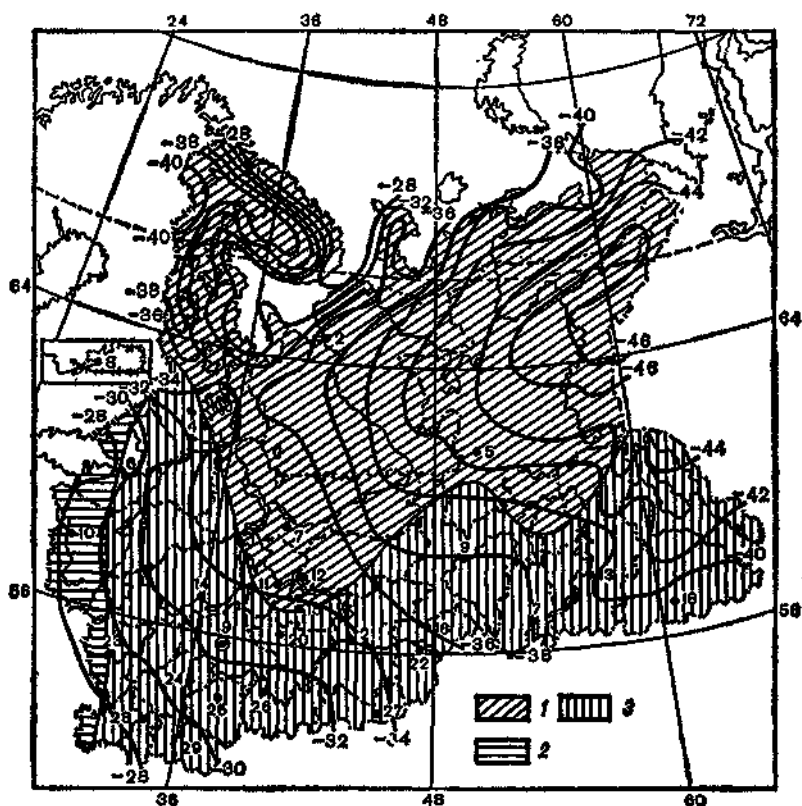


Рис. 19.15. Распределение по территории среднего из абсолютных годовых минимумов температуры воздуха $\bar{T}_m$ (изолинии, °C). Районы с различными типами кривых обеспеченности $\bar{T}_m$: 1 – Северный; 2 – Северо-Западный; 3 – Центральный и Южный

районах Нечерноземной зоны наибольшее число дней с оттепелями приходится на декабрь и март. В качестве примера по некоторым метеостанциям зоны данные о числе дней с оттепелью приведены в табл. 19.13.

Таблица 19.13

Среднее число дней с оттепелью по месяцам и за зимний период

Метеорологическая станция	XI	XII	I	II	III	IV	XI–IV
Калуга	5	7	4	4	14	–	34
Владимир	4	8	4	4	15	1	36
Москва (МСХА) *	4	8	5	5	16	2	40

* МСХА – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева.

В период оттепелей, особенно затяжных, может начаться сокодвижение, и плодовые почки трогаются в рост. Последующие волны холодов вызывают подмерзание молодых ветвей деревьев не только в суровые, но и в сравнительно мягкие зимы. Степень подмерзания почек и побегов зависит от продолжительности и интенсивности оттепелей, резкости смены температур, а также от сортовых и видовых особенностей культур. Наиболее часто повреждаются косточковые культуры.

При сильных морозах чаще всего повреждаются плодовые почки и концы однолетних ветвей, что снижает урожай следующего вегетационного периода. Более сильные повреждения древесины приводят к частичному или полному отмиранию крупных, «скелетных» частей дерева или значительной части кроны. При сильных морозах после оттепелей на коре и в древесине плодовых деревьев образуются глубокие (морозобойные) трещины.

Серьезное повреждение коры плодово-ягодных культур от солнечной радиации происходит в морозные ясные дни. В течение дня зимующие растения освещаются неодинаково. В исследованиях ряда авторов отмечены существенные различия в нагреве поверхности плодово-ягодных культур в зимние месяцы при ясной и пасмурной погоде. Под действием солнечной радиации поверхностные слои коры стволов и ветвей сильно нагреваются, несмотря на морозную погоду. Известно, что альбедо свежевыпавшего снега составляет 80...95 %, тогда как отражательная способность почвы, стволов и ветвей плодовых культур не превышает 10...20 %. Поэтому на кроны зимующих растений влияет прямая и отраженная солнечная радиация. На ткань коры, находящейся на уровне поверхности снега, с южной стороны ствола попадает почти вдвое больше прямой радиации, чем на участки коры северной части ствола. Количество солнечной радиации, падающей на поверхность ветвей деревьев, зависит от расположения ветвей по отношению к солнечным лучам. Больше количество радиации приходится на те ветви, которые составляют угол с солнечными лучами 45...90°. Например, в условиях Подмоскovie в первые дни марта высота Солнца равна 27°, в солнечные дни наибольшее количество радиации (26,5... 26,6 мДж/м²) получают ветви, наклоненные на север под углом 70...75°. В середине апреля при высоте Солнца 44° наибольшее количество энергии получают ветви, расположенные под углом 45...50° по отношению к горизонту (Константинов Л.К., 1985). В соответствии с количеством солнечной радиации, падающей на кроны деревьев, меняется и температура поверхности коры (табл.19.14).

В условиях Подмоскovie кора зимующих деревьев с северной стороны получает в два раза меньше солнечной радиации, чем с южной. Такое распределение солнечной радиации в холодный период является основной причиной различного нагрева растений. Температура коры в дневное

Таблица 19.14

Температура на поверхности коры ствола яблони в зависимости от состояния небосвода и освещенности ствола (Константинов Л.К., 1987)

Дата наблюдений	Состояние небосклона	Температура, °С		
		воздуха	стороны ствола	
			солнечной	теневой
15.03	Ясно	-3,0	14,6	0,5
18.03	Пасмурно	-5,5	-4,7	-4,8
19.03	Ясно	-1,5	25,7	1,5
26.03	Ясно	2,0	16,1	3,3
27.03	Пасмурно	0,5	0,8	0,9

время зависит еще и от толщины ствола (табл. 19.15). Толстые части взрослого дерева нагреваются сильнее, чем молодые и тонкие. Это происходит потому, что тонкие ветви (стволы) имеют бóльшую удельную поверхность теплоотдачи и поглощенное ими тепло быстро уходит в атмосферу.

Таблица 19.15

Температура коры (°С) в зависимости от толщины ствола яблони в Подмоскowie (Константинов Л.К., 1974)

Кора	Диаметр ствола, см						
	0,5	1,1	2,7	10,2	16,8	22,0	27,0
На солнечной стороне	-0,6	6,2	13,5	23,3	27,7	29,8	31,2
На теневой стороне	-1,3	-0,8	-0,5	-1,1	-1,5	-2,0	-2,0

По данным Г.Г. Белобородовой (1982), в предгорной зоне на юге Казахстана в январе–феврале на южную сторону стволов плодовых культур (на высоте 50...70 см от почвы) поступает солнечной радиации в полдень 568...935 Вт/м², что на 147...489 Вт/м² больше, чем на подстилающую поверхность (снег). Отраженная солнечная радиация от чистого свежевыпавшего снега в ясные дни составляет 38...82 %. По мере загрязнения и уплотнения снега процент отраженной радиации уменьшается. В зимние дни северная сторона стволов и ветвей плодовых деревьев и ягодных кустарников получает в 4...6 раз меньше энергии, чем южная. Количество суммарной солнечной радиации, приходящей на земную поверхность весной, увеличивается (698 Вт/м²), а в связи с изменением состояния подстилающей поверхности, освободившейся от снежного покрова, количество отраженной заметно уменьшается (15...20 % вместо 60...80 % зимой). Поэтому стволы деревьев получают заметно меньше энергии (582...496 Вт/м²), чем в январе–феврале.

Экспериментально было показано, что в ясные зимние дни наибольшая вероятность повреждения коры от перегрева наблюдается у стволов диаметром 3...5 см, что соответствует 4...7-летнему возрасту дерева.

Во второй половине зимы обычно наблюдаются значительные колебания температуры воздуха, особенно возрастает суточная амплитуда за

счет более сильного дневного прогрева в солнечные дни. Таким температурным колебаниям подвергаются ткани коры на южной стороне деревьев: днем их температура достигает положительных значений, ночью – снижается до отрицательных величин. Следствием периодического оттаивания и замерзания верхних слоев коры и камбия становится их частичное отмирание, заметное по появлению темных пятен, называемых *солнечными ожогами* или *морозобоинами*. Это одна из форм зимне-ранневесеннего повреждения плодовых и кустарниковых пород, возникающая вследствие воздействия прямой и отраженной от снега солнечной радиации в безоблачные дни. Солнечные ожоги относятся к опасным зимним повреждениям практически всех культур и сортов и распространены повсеместно, во всех плодородных зонах страны. Такое воздействие усугубляется обычно зимним иссушением тканей растения и отсутствием в этот период процессов фотосинтеза в коре.

Различают два вида солнечных ожогов: *поверхностный*, охватывающий периферийные ткани, и *внутренний* – в зоне камбия и прилегающих к нему тканях коры и древесины. Внешний вид поверхностного повреждения более типичен для молодых растений, внутренний – для взрослых особей. Длительные периоды с солнечной погодой зимой более опасны, чем отдельные ясные дни, чередующиеся с пасмурными.

Механизм повреждающего действия интенсивного солнечного света зимой весьма сложен, поскольку на растение одновременно действуют, помимо видимого света, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи, а в ночные часы повреждение усиливается влиянием низких температур. На ярком свете при слабом фотосинтезе в молодых побегах плодовых культур происходит распад хлоропластов, который начинается в поверхностных слоях коры и постепенно распространяется в более глубокие ткани побега.

Полевые наблюдения профессора М.А. Соловьевой (1967) показали, что солнечные ожоги коры чаще наблюдаются в годы и в районах с недостаточной увлажненностью почвы.

Защитной реакцией на ожоговые повреждения некоторых плодовых культур (например, яблони) является накопление в вакуолях клеток антоцианов. Поэтому в природных условиях саженцы «уходят» в зиму, как правило, с интенсивной буро-красной (антоциановой) окраской.

Существуют различные «агротехнические» средства защиты древесно-кустарниковых форм от солнечных ожогов зимой. Например, побелка стволов и крупных ветвей поздней осенью специально разработанным составом водоземлюсионной краски, которая образует на поверхности коры деревьев атмосферостойкое, не смываемое осадками покрытие, удерживающееся на дереве до двух лет. Благодаря высокой отражательной способности краски снижается нагрев коры побеленных деревьев. Практикуется также побелка стволов плодовых культур раствором извести

с добавлением медного купороса (Лосев А.П., 1979). К числу более трудоемких приемов относится обвязка стволов еловыми ветками и высокостебельными, сухими растениями (камышом, стеблями кукурузы, подсолнечника). Внесение азотных удобрений ранней весной в оптимальных дозах способствует созданию лучшего водного режима тканей, который снижает реакцию растений на перегрев, а внесение фосфорно-калийных удобрений осенью повышает общую устойчивость к холоду коры и камбия полностью одревесневших частей плодовых культур.

Недостаток почвенной влаги в летний и осенний периоды неблагоприятно влияет на перезимовку плодовых культур. Поливы, проведенные перед уходом в зиму после длительной засухи, увеличивают зимостойкость деревьев и кустарников. Обводненность веток деревьев в конце зимы в наибольшей степени зависит от средней температуры ($\eta = 0,68 \pm 0,11$) и влажности воздуха ($\eta = 0,80 \pm 0,07$) за декабрь – март (Белобородова Г.Г., 1982).

В зимний период кроны плодовых культур могут быть повреждены иссушению тканей коры, однолетние побеги и плодовые почки которых к весне погибают в результате воздействия сильных ветров, низкой относительной влажности воздуха, малых запасов влаги и глубокого промерзания корнеобитаемых горизонтов почвы. Кроме этого, иссушение наступает в результате неодинакового нагрева освещенных и теневых участков коры, что влияет на расход влаги при транспирации. Однако расход влаги на испарение при прочих равных условиях неодинаков у различных культур и сортов и определяется не только условиями погоды, но и биологическими особенностями растений, в частности физико-химическим составом и водными свойствами биокolloидов протоплазмы клеток, плотностью покровных тканей, степенью вызревания побегов и т.п. (Дурманов Д.Н., 1963).

По величине расхода влаги на испарение основные плодово-ягодные культуры располагаются в следующем порядке возрастания: семечковые (яблоня, груша), косточковые (слива, вишня, черешня), ягодные кустарники (смородина, крыжовник), малина и др. Например, смородина и малина транспирируют влаги за зиму больше в 3–4 раза, чем яблоня.

У растений северного происхождения потеря влаги в зимний период составляет не более 3...5 %, у южных она превышает 10...15 %. Морозоустойчивые сорта яблони характеризуются менее интенсивным зимним иссушением. Установлено, что при интенсивном зимнем иссушении снижается устойчивость коры плодовых культур к солнечным ожогам.

Морозоустойчивость корневой системы плодовых культур значительно ниже, чем у надземных органов. В течение зимы морозоустойчивость корней постепенно возрастает, но в начале зимы при резком наступлении холодов и невысоком снежном покрове (или при его отсутствии) их корневая система может полностью погибнуть. Гибель наступает из-за иссушения тканей в результате разрывов проводящих сосудов кристаллами льда. Ярким

примером стала суровая, многоснежная зима на территории Среднеазиатских республик в 1968–1969 гг., когда температура почвы на глубине залегания корней плодовых культур понижалась на длительное время до $-16\ldots -17\text{ }^{\circ}\text{C}$; в эту зиму на Европейской части России погибло более 30 % садов.

Зимний период, действительно, считается важнейшим в жизни многолетних плодово-ягодных культур. Повреждение плодово-ягодных растений происходит не только под воздействием низких температур воздуха и почвы в зоне расположения корневых систем. Опасным является зимнее иссушение молодых частей, когда засыхают не только почки, однолетние побеги, но и 2–3-летняя древесина. Это происходит в результате засушливого осеннего периода и последующих малоснежных зимних месяцев, когда молодые корни оказываются не обеспеченными влагой. Надежным способом, снижающим опасность зимнего иссушения плодовых культур, является проведение осенних влагонакопительных поливов в садах и ягодниках.

По данным физиологов, при понижении температуры почвы до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоне распространения корневых систем поступление воды через всасывание происходит настолько медленно, что не покрывает расходов растения на испарение. Холодная почва, по их мнению, несмотря на наличие в ней продуктивной влаги, может оказаться *физиологически сухой*, т.е. недоступной для корневых систем. В условиях недостаточного водоснабжения затрудняется процесс предзимнего закаливания плодово-ягодных культур.

Согласно Т.А. Побетовой (1977), повреждение корневой системы плодовых культур наблюдается в тех случаях, когда минимальная температура почвы (независимо от ее механического состава) на глубине 20 см опускается ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и удерживается на таком уровне в течение 5...10 дней. Зимой на метеорологических станциях не проводятся наблюдения за температурой почвы на глубине 20 см, т.е. в зоне расположения корневой шейки плодовых культур. Для получения такой информации автор установила корреляционную связь между минимальными температурами почвы на глубине 3 см (на уровне узла кущения) по регулярным наблюдениям сети метеорологических станций и на глубине 20 см ($r = 0,76$). Согласно этой связи критической температуре на глубине 20 см (равной $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) соответствует температура на глубине узла кущения озимых культур $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Даже при частичном повреждении корневой системы у плодовых культур ослабляется весенний рост, формируются мелкие листья, частично засыхают завязи, а урожай в течение последующих лет может быть низким. Известны случаи, когда в условиях почти полной гибели корневой системы, дерево возобновляло вегетацию весной и даже цвело за счет сохранившихся в штамбе запасов влаги и питательных веществ, а затем быстро погибало. После неблагоприятных зим, значительная обрезка усохших частей ослабляет дерево (куст), задерживает вступление их в фазу плодоношения, приводит к снижению урожая.

Пагубным оказывается влияние на деревья гололедных явлений. Под тяжестью нарастающей массы гололеда ломаются ветви и даже стволы деревьев, травмируется поверхность коры, когда по мере таяния сползающие по стволу прослойки гололеда царапают кору; впоследствии в таких ранках поселяются возбудители болезней, а царапины превращаются в незарастающие раны. На территории Центрально-Черноземного района России среднее число суток с гололедом в году составляет 3...5 и в основном приходится на декабрь (Лосев А.П., 1979).

Известно, что сорта каждой культуры различаются по степени устойчивости к неблагоприятным условиям зимнего периода, что, естественно, проявляется в их неодинаковой продуктивности (табл. 19.16).

Таблица 19.16

Влияние условий перезимовки на урожайность (т/га) различных сортов яблони (Белобородова Г.Г., 1982)

Морозостойкость сортов	Благоприятные зимы	Неблагоприятные зимы	В течение двух лет после неблагоприятной зимы
Слабая	>10,0	0,6	1,9
Средняя	20,0	3,4	6,5
Повышенная	24,9	5,7	9,8

В южных районах Казахстана, в предгорьях Заилийского Алатау сорта повышенной морозостойкости подмерзают в среднем 1 раз в 30...35 лет, среднеморозостойкие – 1 раз в 7...8 лет, а слабоморозостойкие – каждые 3 года.

По данным Р.С. Мкртчяна, А.С. Акопяна и др. (1977), в годовом цикле, развития абрикоса в Араратской долине период зимнего покоя является наиболее ответственным. Если сильные морозы вызывают повреждение зимующих почек, ветвей и ствола, то оттепели содействуют преждевременному выходу почек из состояния покоя, а последующие, даже небольшие морозы повреждают плодовые органы растений.

В 80...85 % лет величина урожая плодов абрикоса зависит от условий перезимовки, а в 15...20 % – от ранневесенних условий погоды, в основном от заморозков, поскольку абрикос – раннецветущая культура. Установлено, что в тех районах Армении, где средняя величина из абсолютных минимумов температуры воздуха достигает -22...-24 °С, абрикос не выращивается. Основными причинами снижения урожайности абрикоса являются: величина абсолютной минимальной температуры воздуха (≥ 24 °С) и продолжительность сильных морозов, зимние оттепели, заморозки в период цветения (≤ 3 °С) и затяжные дожди, резкое падение температуры осенью. Анализ агрометеорологических условий зимнего периода за 22 года по станциям, расположенным в Араратской долине, позволил выявить три уровня урожайности (ц/га) этой культуры: низкая (20...40); средняя (40...50); высокая (51...64 и выше).

Авторами получена удовлетворительная корреляционная зависимость между урожайностью (U , ц/га) и абсолютной минимальной температурой воздуха (t_{min}) за зимний период в Араратской долине:

$$U = -0,31t_{min} + 0,31t_{min}^2 + 0,01t_{min}^3 + 19,2, \quad R = 0,77, \quad S_u = 7,9 \text{ ц/га.} \quad (19.14)$$

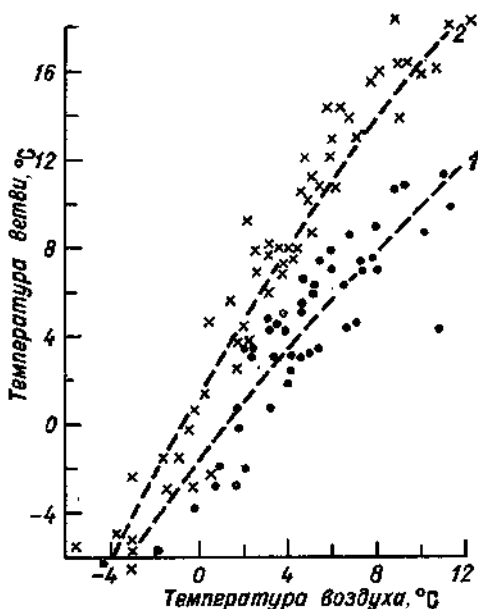
Одним из важных средств защиты плодовых культур и виноградников от опасных гидрометеорологических условий зимнего периода является учет микроклиматических особенностей местности при закладке новых садов и плантаций: посадки нельзя располагать в низких, морозоопасных формах рельефа, на склонах возвышенностей, подверженных господствующим направлениям ветров.

В районах с суровыми и малоснежными зимами проводят снегозадержание или мульчирование сыпучими материалами (торфом, перепревшей соломой, навозом и т.п.) приствольных кругов, надежно защищающих верхние слои почвы от промерзания. Даже в южных республиках осенью проводятся весьма трудоемкие работы по укрытию виноградников на зимний период, когда возможны низкие температуры воздуха.

Для защиты садовых насаждений от повреждений низкими температурами и зимнего иссушения в период зимовки применяется известный агроприем – побелка стволов и толстых ветвей кроны деревьев известковым раствором. Побелка, уменьшая нагрев поверхности крон деревьев и кустарников, приводит к снижению расходов влаги при транспирации и сохранению оводненности тканей на более высоком уровне. Особенно эффективна побелка деревьев в горных районах, где интенсивность солнечной радиации значительно выше, чем на равнине и в зоне предгорий (рис. 19.16). Амплитуда температуры поверхности побеленных стволов составляет порядка 2 °С, тогда как у непобеленных достигает 5...10 °С (Белобородова Г.Г., Маликова Г.И., 1978).

Различные виды и сорта винограда относятся к теплолюбивым культурам. Именно поэтому в большинстве промышленно-виноградарческих регионов бывшего СССР практикуются различные приемы укрытия виноградной лозы на зимний период. По мнению акад. Ф.Ф. Давитая (1948), зимостойкость виноградной лозы, закрытой на зиму под слоем земли, повышается по сравнению с ее зимостойкостью на открытом воздухе. «Влияние косвенных факторов, регулирующих действие мороза на растение (влажность воздуха, движение его и облачность как регулятор излучения с поверхности растения в ночные часы и нагревания в дневные), под землей равны нулю, а суточная амплитуда колебания температуры значительно уменьшается, и растение пребывает в глубоком покое». Поэтому укрытие винограда на зиму значительно раздвигает к северу границу его возможного выращивания, но в определенных пределах, за которыми даже укрытие не спасает лозу от вымерзания. «Степень повреждения лозы низкими температурами зависит от нескольких факторов:

Рис. 19.16. Нагрев двух-летних побеленных (1) и небеленных (2) ветвей смородины Алтайской десертной в ясные дни в зависимости от температуры воздуха. Высота 1370 м над уровнем моря. Февраль 1975 г.



морозостойкости сорта, характера подготовки растений к зиме, суровости морозов, наличия снежного покрова и т.д. Различные виды и сорта винограда имеют разную морозостойкость» (Турманидзе Т.И., 1981).

Установлено, что при прочих равных условиях вегетационного периода винограда его урожайность в значительной степени определяется условиями перезимовки. При использовании наиболее дешевого способа глубокого укрытия землей практически исключается гибель зимующих глазков (листовых и плодовых почек) от воздействия отрицательных температур зимних месяцев. Однако недостатком такого метода является потеря закалки и снижение морозостойкости лозы под укрытием. Это происходит в результате контакта лозы с влажной землей, который приводит к активизации процессов жизнедеятельности почек и живых тканей лозы, к обменным окислительно-восстановительным процессам, быстрому ферментативному превращению крахмала в сахара и трате его при дыхании, преждевременному оживлению эмбрионального роста и др. Все это ведет к снижению количества плодовых глазков.

Специальные физиологические и агрометеорологические наблюдения, выполненные С.П. Аникеевой (1962) и коллективом агрометеорологической станции «Самарканд» (Узбекистан), позволили установить, что под легкими укрытиями лозы (камыш, солома, сухая ботва растений, рогожа и т.п.) растения находились в более благоприятных условиях. Так если на стандартной высоте (2 м) абсолютный минимум температуры

был -15,2 °С, на высоте 90 см -18,2 °С, на поверхности почвы -22,2 °С, то под легким укрытием средняя минимальная температура сохранялась на уровне 4...6 °С выше, чем на открытом воздухе. При таком пониженном температурном фоне не было отмечено усиления активизации жизненных процессов лозы. Относительная влажность воздуха благодаря пористости укрывающего материала была близкой к влажности окружающего воздуха в открытом винограднике. Меньше всего сохранилось зимующих глазков на лозе, укрытой слоем почвы 30 см, где температура была преимущественно положительной, из-за отсутствия аэрации влажность воздуха достигала 88...96 %, а гибель глазков произошла не от вымерзания, а от выпревания. Кусты под укрытием землей летом дали наименьший урожай (11,9 кг/куст); кусты, находящиеся под легким укрытием, оказались наиболее урожайными (23,3 кг/куст), кусты с другими формами укрытия дали промежуточные урожаи между названными величинами.

Урожайность винограда находится в тесной зависимости от температурных условий холодного периода года, однако наилучшая корреляционная связь оказалась с числом суток (N) в период перезимовки лозы с минимальной температурой воздуха -15 °С для условий Ташкентской области (Аникеева С.П., Кожевникова А.А., 1986):

$$U = -2,28 N + 96,68, \quad r = -0,86, \quad \sigma = \pm 9,4 \text{ ц/га.} \quad (19.15)$$

Даже в самых теплых местах субтропической зоны бывшего СССР почти ежегодно в зимние месяцы наблюдаются морозы, хотя вероятность опасных морозов невелика. Согласно Г.Т. Селянинову (1961) оценку опасности морозов для теплолюбивых культур можно проводить по следующим данным (табл.19.17):

Таблица 19.17

Культура	Органы растения	Критическая температура, °С
Цитрусовые	Плоды	-2
Лимон	Верхушки однолетних побегов	-5
Мандарин Апельсин Лимон	Однолетние побеги осеннего роста Ветви Крона	-8
Мандарин Лимон	Крона Корень	-10
Мандарин	Вся крона и корень (гибель)	-12

Таким образом, в естественных условиях повреждение и гибель зимующих культур происходит под воздействием комплекса факторов, действующих, как правило, одновременно. Например, засушливая осень, малоснежная зима и сильные ветры приводят к иссушению верхнего слоя почвы, тканей растений, однолетних побегов плодовых культур с последующей их гибелью. Такие примеры несложно найти и при других проявлениях неблагоприятных условий зимнего периода.

19.5. Страхование урожая сельскохозяйственных культур с государственной поддержкой

Хорошо известно, что в России основная территория, занятая посевами сельскохозяйственных культур, относится к зоне рискованного земледелия. В условиях неопределенности получения конечного результата – урожая, его количества и качества, земледелец, начиная сельскохозяйственный год, всегда рискует. Выше была дана характеристика основных опасных и неблагоприятных для сельскохозяйственного производства погодных условий теплого и холодного периодов года, описаны методы оценки интенсивности и повторяемости этих явлений в России и сопредельных государствах, показаны основные методы и способы борьбы с ними с целью смягчения их отрицательного воздействия на аграрный сектор экономики. В то же время, несмотря на использование известных мер борьбы с опасными и неблагоприятными явлениями погоды, сельское хозяйство ежегодно несет значительные, а в отдельные годы – катастрофические убытки и потери.

Факты свидетельствуют, что на территории Российской Федерации последние два десятилетия характеризовались неустойчивыми условиями вегетационных и зимних периодов.

До 2004 г. Правительство России ежегодно выделяло средства на оказание финансовой поддержки пострадавшим от опасных погодных условий сельскохозяйственным производителям. Однако принципы таких выделений финансовых средств были несовершенны и потому малоэффективны. Взаимоотношения между страховщиками и страхователями регламентируются Руководящим документом (РД 52.88.699–2009) «Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения опасных природных явлений». Однако в этом документе не была предусмотрена дифференциация критериев оценки наличия или отсутствия опасных агрометеорологических явлений (ОАЯ) с учетом региональных особенностей той или иной территории. Действительно, устойчивость различных сельскохозяйственных культур к ОАЯ неодинакова и меняется как в процессе вегетации, так и в зависимости от складывающихся агрометеорологических условий каждого конкретного вегетационного периода. Например, озимые и ранние яровые зерновые культуры во время всходов выдерживают заморозки интенсивностью -9, -10 °С, а во время цветения – только -1, -2 °С. Более того, в условиях севера и юга одни и те же культуры поражаются различными уровнями отрицательных температур. Это приводит к тому, что экспертизы, подготовленные на базе указанного документа, в ряде случаев отличаются недостаточной точностью и могут оказаться необъективными. Это обстоятельство вызывает обострение конфликтных ситуаций между страховщиком и страхователем, снижает заинтересованность

сельскохозяйственных производителей в использовании этой формы государственной поддержки.

Одной из форм поддержки сельскохозяйственного производства со стороны государства стала новая система страхования сельскохозяйственных посевов от опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений с государственной поддержкой. В соответствии с решением Правительства РФ Министерством сельского хозяйства России с 2004 г. стала внедряться новая система, предусматривающая переход к страхованию возможных убытков от стихийных бедствий в сельскохозяйственном производстве. Для этого потребовалась разработка новых нормативных актов, позволяющих более четко определять критерии страховых случаев для признания убытков товаропроизводителей сельскохозяйственной продукции. В результате взаимодействия специалистов Росгидромета со страховыми компаниями достигнуто понимание в целесообразности перехода к новой системе страхования погодных рисков от неопределенного в нормативно-правовом отношении понятия «стихийные бедствия» к страхованию от «опасных погодных явлений», обеспеченных четкой терминологией и подкрепленных количественными критериями гидрометеорологических параметров.

В соответствии с новыми правилами страхования урожая сельскохозяйственных культур с государственной поддержкой, такое страхование производится в случае гибели и/или повреждения в результате действия опасных гидрометеорологических явлений, приведших к недобору урожая и произошедших в период действия Договора страхования. К таким явлениям относятся: засуха атмосферная и/или почвенная; заморозки, вымерзание, выпревание; сильные продолжительные дожди, ливни, переувлажнение почвы, дождевые паводки; сильный ветер, пыльные (песчаные) бури; град.

В последние годы в условиях перестройки системы ведения сельскохозяйственного производства и развития различных форм собственности в этой отрасли экономики все больше укрепляется страхование конечного труда земледельца, поскольку получить компенсацию в случае возможных убытков помогает система страхования сельскохозяйственных рисков. Функционально эта система осуществляется Федеральным государственным учреждением «Федеральное агентство по государственной поддержке страхования в сфере агропромышленного производства» Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

В новой системе государство компенсирует часть расходов на страхование, в частности, конечного урожая возделываемых культур. Внедрение механизмов страхования в практику работы по выращиванию урожая сельскохозяйственных культур подтверждает благополучие

сельскохозяйственного производителя, получения им стабильных доходов в условиях наступления неблагоприятных и опасных погодных явлений.

При государственной поддержке страхования урожая средства из федерального бюджета направляются в виде субсидий в бюджеты субъектов Российской Федерации и передаются сельскохозяйственным товаропроизводителям на компенсацию 50 % страхового взноса по специальным договорам на страхование будущего урожая сельскохозяйственных культур. Условия страхования урожая возделываемых культур регламентируются специальными нормативными документами Министерства сельского хозяйства страны.

Во всем цивилизованном мире активно действует подобная система государственной поддержки страхования в сельском хозяйстве, представляющая собой одну из изюминок рыночной инфраструктуры.

Наиболее полное и эффективное использование природного потенциала почвенно-климатических зон страны, каждого конкретного поля можно осуществить только на основе научно обоснованного оперативного управления технологическими процессами в поле. В помощь сельскохозяйственному товаропроизводителю в Федеральном государственном бюджетном учреждении (ФГБУ «ВНИИСХМ») Росгидромета разработаны и усовершенствованы методы дифференцированного применения региональных агротехнологий возделывания культур, учитывающих динамичный характер погоды и направленных на оптимизацию условий формирования урожая с учетом вероятностного характера агрометеорологических и хозяйственных реальностей.

Поэтому в каждом конкретном случае при подтверждении факта наступления страхового события, приведшего к гибели или повреждению урожая сельскохозяйственных культур, необходимо кроме использования общих критериев страховых ситуаций, рассматривать все сопутствующие условия, в особенности соблюдение агротехнологических схем выращивания сельскохозяйственных культур (Клещенко А.Д., Устинова О.К., Устинов П.В., 2006).

Таким образом, одним из эффективных механизмов регулирования и поддержки устойчивости сельскохозяйственных товаропроизводителей является страхование различных видов имущества сельскохозяйственных предприятий, в том числе основных – возделываемых продукты растениеводства и выращиваемых животных (животноводство).

В практике агрострахования целесообразно использование критериев ОАЯ, предложенных в типовом перечне ОАЯ (РД 52.88.699–2009).

Ч А С Т Ь V

СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В АГРОМЕТЕОРОЛОГИИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В представленной части приведены материалы обзора современных методов, способов и подходов, используемых в настоящее время для восстановления параметров растительного покрова посевов основных сельскохозяйственных культур по спутниковой информации. В качестве спутниковой информации используются данные с различных спутниковых систем метеорологической и природно-ресурсной направленности разнообразного пространственного, временного и спектрального разрешения.

В тексте ссылки на литературу не приводятся. В конце приведен общий список основной литературы. Следует отметить, что интернет-ссылки справедливы по состоянию на конец августа – начало сентября 2011 года.

Для понимания данной части необходимы знания на уровне курса физики для средней школы. Разъяснение некоторых параметров и понятий, используемых в тексте, приведено в Приложении.

ГЛАВА 20

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

О ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Если до этого вы слышали термин «дистанционное зондирование», то у вас мог возникнуть вопрос: «Что же это значит?» Это достаточно простая, знакомая деятельность, которой занимаются изо дня в день, но которая становится весьма сложной, если увеличивается масштаб наблюдения. Если вы смотрите на экран компьютера, то на самом деле вы уже вовлечены в процесс дистанционного зондирования (рис. 20.1). Следует отметить два аспекта дистанционного зондирования: сформированное изображение отображается на экране; человек, смотрящий на экран, использует свои глаза для рассматривания экрана на расстоянии.

Физический параметр (свет), излученный экраном, является источником электромагнитной радиации. Излученный свет проходит определенное расстояние (в этом смысле наблюдение изображения является дистанционным зондированием), до тех пор, пока не столкнется с приемником излучения (ваш глаз). Каждый глаз посылает сигнал в процессор (ваш мозг), который регистрирует данные и интерпретирует их в определенную информацию.

Несколько приемников излучения собирают полные сведения об окружающем мире, регистрируя множество сигналов, излученных или отраженных, активных или пассивных, от объектов, которые передают эту информацию в форме волн или импульсов. Так, можно ощутить изменения в атмосферном давлении, обусловленном звуковыми волнами, воспринять тепло (прямым контактом или излученной энергией), прореагировать на химические сигналы от пищи посредством вкуса и запаха, выяснить определенные материальные свойства типа шероховатости (недистанци-



Рис. 20.1. К понятию «дистанционное зондирование»

онно) и узнать форму, цвет и относительную позицию внешнего объекта и классы вещества, из которого сформирован объект, путем регистрации видимого света, излученного объектом.

На практике, однако, датчики (приемники излучения) не рассматриваются как вовлеченные в процесс дистанционного зондирования.

Дистанционное зондирование в наиболее общем приемлемом значении означает основанный на инструментах метод получения и измерения пространственно организованных или географически распределенных данных или информации о некоторых свойствах (спектральных, пространственных и/или физических) массива точек (пиксел) внутри рассматриваемой сцены, которые соответствуют свойствам, предметам и/или материалам, причем регистрируемые свойства не находятся в прямом, непосредственном контакте с наблюдающим датчиком, который находится на определенном, конечном расстоянии от наблюдаемого предмета. Методы включают накопленное знание, соответствующее рассматриваемой сцене (цели) и включают использование электромагнитного излучения, силовых полей или акустической энергии путем записывающих камер, радиометров и сканеров, лазеров, приемников радиочастоты, радарных систем, сонаров, термических устройств, детекторов звука, сейсмографов, магнетометров, гравиметров, сцинтилляционных датчиков и других инструментов.

Это довольно длинное и всеобъемлющее определение. Могут быть предложены два более простых приемлемых определения. Первое, более общее, включено в условия этой идеи: «дистанционное зондирование состоит из сбора данных и информации о физическом мире путем выявления и измерения сигналов, частиц и полей, излучаемых объектами, находящимися в непосредственной близости от датчиков». Второе – более ограниченное, но оно лучше соответствует предмету настоящей главы: «дистанционное зондирование является технологией по сбору электромагнитного излучения для получения и интерпретации фрагментированных географических и пространственных данных, из которых получают сведения о свойствах, объектах и классах на поверхности суши, океанов и атмосферы».

Дистанционное зондирование является выявлением и измерением электромагнитного излучения, произведенного объектами, находящимися на некотором расстоянии от приемника излучения. В связи с этим пользователь может идентифицировать и определять по изображению тип или класс объекта, его материал, пространственное разрешение. Это наиболее общее описание дистанционного зондирования имеет определенный критерий, на основании которого конечная точка может быть отнесена к данному термину: изображение, скорее всего, имеет фотоны в качестве источника для результирующей поверхности. Однако очень часто данные изображаются в виде карты или графа, или, значительно реже, в виде чисел, которые могут быть подвергнуты компьютерному анализу,

и в этом отношении весьма подобны данным из географических дистанционных систем. Что касается метеорологических данных, связанных с дистанционным зондированием, например изображения облаков, карты температурных вариаций, графы газов в атмосферном воздухе или его свойства, то они могут изображаться в любой форме. Все приведенные выше определения в совокупности дают общее представление о значении термина «дистанционное зондирование», но, естественно, точное значение термина зависит от контекста, в котором он используется.

В настоящей главе не рассматриваются гравитационные, магнитные, акустические и другие данные. Дело не в том, что соответствующие системы не существуют – просто для дистанционного зондирования подстилающей поверхности применительно к посевам сельскохозяйственных культур основным методом измерения является оценка распространения электромагнитного излучения.

Термин «дистанционное зондирование» является относительно новым. Впервые этот термин был использован госпожой Еленой Пруит (США) в середине пятидесятых годов прошлого столетия, когда она работала географом-океанографом в Американском морском научно-исследовательском институте. Традиционным способом рассмотрения дистанционного зондирования и соответствующих инструментов является оценка физических принципов, лежащих в основе описываемого процесса, но вначале рассмотрим более подробно само понятие «дистанционное зондирование». Дистанционное зондирование можно представить как процесс, при котором собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. Методы дистанционного зондирования основаны на регистрации в аналоговой или цифровой форме отраженного или собственного излучения участков поверхности в широком спектральном диапазоне. Космическое зондирование, интенсивно развивающееся в последние десятилетия, предоставило наукам о Земле новые возможности для исследования земной поверхности. За этот период существенно возросли объем, разнообразие и качество материалов дистанционного зондирования. К настоящему времени накоплен огромный фонд (более 100 млн) аэрокосмических снимков, полностью покрывающих всю поверхность Земли, а для значительной части районов – и с многократным перекрытием.

Данные дистанционного зондирования сразу поступают в цифровом виде, что позволяет непосредственно использовать для их обработки современные компьютерные технологии. Снимки на фотоносителях могут быть преобразованы в цифровую растровую форму представления с помощью специальных сканирующих устройств (сканеров). Цифровое изображение в форме раstra представляет собой матрицу чисел. Каждый элемент этой матрицы, называемый пикселом, отвечает какой-либо

характеристике участка местности в определенной зоне электромагнитного спектра. Следует отметить, что размер этого участка зависит от разрешения снимка. Данные многозональной съемки в цифровом виде можно рассматривать как многомерную матрицу, в этом случае каждому участку поверхности будет соответствовать целый набор значений, называемый вектором характеристик. Основные методы тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли, специфичные для многозональной съемки, основаны на операциях с многомерными матрицами.

Системы для обработки данных дистанционного зондирования Земли появились фактически в результате дальнейшего качественного развития программных средств, предназначенных для цифровой обработки изображений общего назначения: PhotoStyler, PhotoShop, CorelDraw и т.п. Отметим ряд существенных отличий, связанных со спецификой данных зондирования Земли: это файлы весьма большого объема, для эффективной работы с которыми необходимы специальные средства, в том числе особые форматы данных; это многомерные данные, число и параметры спектральных зон съемки которых не позволяют трактовать их как обычные цветные изображения типа RGB (красное – зеленое – синее), кроме того могут использоваться еще и другие координаты измерения (например время). Они нуждаются в предварительной геометрической, радиометрической и радиационной коррекции. Эта пространственная информация имеет, как правило, координатную привязку. Немаловажное значение имеет и то, что можно быстро перейти от предварительной обработки и тематического дешифрирования к выполнению операций моделирования и пространственного анализа средствами геоинформационных систем (интеграция в ГИС).

Цифровую обработку данных дистанционного зондирования Земли можно разделить на следующие основные (типовые) группы операций: восстановление или коррекция, предварительная обработка, классификация, преобразование изображений, специализированная тематическая обработка.

Рассмотрим более подробно каждую группу. Основной задачей восстановления изображений является исправление получаемых данных для достижения как можно более правдоподобного изображения земной поверхности. Данные дистанционного зондирования Земли содержат целый ряд случайных, системных и систематических искажений, связанных с влиянием атмосферы, кривизной Земли, движением съемочного аппарата относительно поверхности Земли в момент съемки, физическими характеристиками используемых датчиков и каналов связи. Для устранения упомянутых довольно многочисленных искажений с учетом их специфики используется коррекция нескольких видов: радиационная, радиометрическая, геометрическая и калибровка. Радиационное

восстановление связано с корректировкой количества электромагнитной энергии, принимаемой каждым датчиком, поскольку атмосфера неодинаково пропускает излучение различных участков спектрального диапазона. Калибровка заключается в преобразовании данных, получаемых с датчиков отдельных спектральных зон в истинные нормализованные значения отраженной или излучаемой энергии. Еще одна операция радиометрической коррекции связана с устранением искажений, вносимых самими датчиками и устройствами передачи и приема данных (системных искажений). Геометрическая коррекция или трансформирование снимков предназначено для устранения искажений, вызванных кривизной и вращением Земли, а также углом наклона орбиты спутника к плоскости экватора. Этот вид коррекции на первом этапе может выполняться автоматически по информации о параметрах орбиты спутника. Более точное трансформирование и привязка снимка к определенной координатной системе обычно выполняется с использованием интерактивно задаваемых опорных точек. В процессе трансформирования происходит пересчет значений пикселей на новую сетку раstra, при этом формы объектов на изображении в большей или меньшей степени меняются, а рамка снимка из обычно прямоугольной превращается в параллелепипед или в более сложную фигуру с криволинейными границами. Часто для представления и совместной обработки материалов разных видов (типов) съемок, а также одновременных снимков одной и той же территории используется специальная проекция, называемая ортопланом, которая применяется в мировой практике в качестве обменного стандарта. При геометрической коррекции фотографических изображений высокого разрешения устраняются искажения, возникающие за счет рельефа местности.

Основным предназначением второй группы операций – предварительной обработки – является модификация данных с целью улучшения зрительного восприятия изображения, либо преобразование его в форму, более удобную для дальнейшего визуального или компьютерного анализа. По особенностям организации обработки данных операции этой группы можно разбить на несколько типов.

К первому типу относятся модификации значений каждого отдельного пиксела, выполняемые, как правило, с использованием табличного способа представления преобразующей функции (таблица перекодировки). Различные виды линейного и нелинейного контрастирования, предназначенные для улучшения визуального восприятия видеоинформации, являются характерными представителями данных преобразований.

Следующий тип – это локальные операции, особенностью которых является модификация значения каждого элемента изображения с использованием значений соседних пикселей в какой-либо ограниченной (локальной) окрестности. Типичными преобразованиями этого вида являются

операции фильтрации изображений. Сглаживающие или низкочастотные фильтры позволяют снять шум и убрать мелкие детали, что позволяет получать более однородные участки изображения, пригодные для дальнейшей обработки с целью выявления тех или иных объектов. Высокочастотные фильтры предназначены для выделения или подчеркивания перепадов значений или яркости пикселей, что используется при поиске на изображении границ объектов и выявлении различных структур, проявляющихся в виде сдвига или скачка величины значений элементов изображения.

Преобразования геометрических характеристик изображений составляют следующий вид рассматриваемой группы операций. К ним относятся монтаж (мозаика) изображений из отдельных снимков или их фрагментов, вырезание нужного фрагмента, сжатие изображения или его растяжение, трансформирование снимка в какую-либо картографическую проекцию. Еще один вид рассматриваемых операций предназначен для создания различных цветовых композиций, оптимальных для визуального восприятия. Эта группа преобразований позволяет получать цветные изображения в условных (ложных) и псевдоцветах, что является одним из способов обработки многомерных видеоданных.

Классификация – это тематическая обработка, которая позволяет производить автоматизированное разделение снимков на однородные по какому-либо критерию области (классы объектов). Получающееся при этом изображение называется тематической картой. Поскольку обычно выделяют содержательно интерпретируемые классы объектов, то классификацию можно рассматривать как процедуру автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли. Процедура классификации основывается чаще всего на статистическом анализе различных характеристик изображения: пространственных, спектральных или временных. К простейшим полезным пространственным характеристикам относятся текстура, контекст, форма и структурные соотношения. Под временными характеристиками следует понимать сезонные изменения земных покровов (особенно растительности), которые могут служить их индикаторами. Однако принято считать, что основную информацию о природе объектов на земной поверхности содержат их спектральные характеристики. Поэтому в большинстве известных алгоритмов классификации используются спектральные образы (сигнатуры) типов покрытий.

Различают два основных методологических подхода к проведению рассматриваемой процедуры: классификацию с обучением и автоматическую классификацию. В случае классификации с обучением задача состоит в обнаружении на изображении объектов уже известных типов, что требует некоторых предварительных знаний об исследуемом участке земной поверхности. На первом шаге процедуры необходимо интерактивно выбрать на изображении эталонные участки, являющиеся характерными (типичными)

представителями выделяемых классов объектов. Этап обучения заключается фактически в расчете и анализе некоторого набора статистических характеристик распределения значений пикселей, составляющих эти эталонные участки или полигоны.

Однако большей популярностью пользуется другой вид классификации, который не требует дополнительной наземной информации и глубокого знания дистанционных методов обработки. Методологической основой автоматической классификации является кластерный анализ, в ходе которого пытаются определить все встречаемые типы объектов при некотором уровне обобщения (выбранных критериях объединения, разделения или числа классов), а задача их интерпретации решается на втором этапе. Существуют алгоритмы, сочетающие элементы классификаций с обучением и автоматической классификацией.

По способу отнесения отдельных элементов изображения к тому или иному классу объектов различают так называемые «жесткие» и «мягкие» классификаторы. В случае «жестких» (традиционных) классификаторов принимается строго определенное решение относительно принадлежности пикселей к некоторому классу. «Мягкие» же классификаторы оценивают вероятность, с которой анализируемый элемент изображения может принадлежать всем рассматриваемым классам покрытий, включая и неизвестные. Современные классификаторы позволяют также вводить элемент неопределенности на разных стадиях процесса, что допускает присутствие смешанных классов покрытий в каждом отдельном пикселе (субпиксельная классификация).

Еще один сравнительно новый вид классификации связан с обработкой гиперспектральных данных. Такие данные поступают с экспериментальных систем дистанционного зондирования, работающих с очень узкой шириной зон традиционного спектрального диапазона, что увеличивает количество спектральных каналов до десятков и даже сотен. В этом случае для автоматизированного выделения классов объектов покрытий используются библиотеки спектральных кривых различных земных материалов.

Часто возникает необходимость тематической корректировки результатов классификации, особенно автоматической, выполняемой фактически по информационным характеристикам объектов. Для этого используется целый набор процедур, называемый операциями после классификационной обработки: слияние классов, разделение классов, устранение мелких ложных объектов, сглаживание границ объектов и т.п. Важным этапом в процессе классификации является оценка точности полученных изображений, которая может выполняться как по данным полевых измерений, так и путем сравнения с соответствующими тематическими картами. Эта область обработки данных дистанционного зондирования Земли в настоящее время довольно интенсивно развивается: появляются новые

классификаторы, основанные на последних достижениях в области моделирования искусственного интеллекта и других областях прикладной математики (например нейронные сети).

Группа операций, связанных с преобразованием изображений, позволяет создавать новые (вторичные) изображения в процессе математических преобразований нескольких спектральных зон исходного изображения. Данный вид операций часто называют алгеброй изображений. Одним из широко используемых вторичных изображений являются различные вегетационные индексы, которые вычисляются как линейная комбинация инфракрасного и красного спектральных каналов или более сложная функция данных измерений. Другой пример вторичных видеоданных – изображение главных компонент первичного снимка. Анализ главных компонент используется для преобразования нескольких спектральных зон снимка таким образом, чтобы новые зоны вторичного изображения, называемые компонентами, не коррелировали друг с другом и располагались в порядке убывания количества информации, которую они содержат. Каждая такая компонента всегда несет только уникальную информацию, причем первые несколько новых зон содержат большую часть информации о первичном изображении.

Одной из последних групп является специализированная тематическая обработка. К этой группе относятся операции выделения каких-либо специфических природных или антропогенных объектов. Обычно такие объекты выделяются именно по их характерным особенностям. К этому типу относятся, например, операции, предназначенные для обнаружения и выделения линейных или кольцевых структур, например дорог, полей и т.п. Таким образом, космические или спутниковые системы имеют огромное значение для региональных и глобальных геофизических обследований. Это связано прежде всего с весьма трудными и высокзатратными способами наземных и самолетных обследований – огромные территории и достаточно затруднительная координация совместных работ.

Материалы дистанционного зондирования, получаемые с помощью аэро- и космосъемки, доступны для извлечения различной полезной пространственной экологической информации, изготовления различных тематических карт и обновления данных в геоинформационных системах (ГИС).

Важнейшей характеристикой аэро- или космоснимка является его разрешение на местности – чаще всего, чем оно выше, тем лучше. Второй по важности характеристикой является количество спектральных зон, в каждой из которых соответствующая местность может быть снята – чем их больше, тем больше возможностей для получения информации, т. е. у дешифровщика оказывается несколько идентичных снимков, только сделанных каждый в своей зоне спектра. Простейший

случай – панхроматический снимок. Он делается просто в видимом свете, т. е. сразу в нескольких зонах спектра. Это обычная черно-белая фотография. Космические снимки сейчас могут иметь практически те же масштабы и разрешение, что и аэроснимки. Однако аэросъемка имеет свою нишу, это наиболее оперативный способ для получения данных высокого разрешения для конкретных небольших территорий, и аэросъемка обычно дешевле в случае очень высоких разрешений порядка десятков сантиметров. Кроме того, при съемке длиннофокусной оптикой равнинной местности точность аэроснимка настолько высока, что можно обойтись без геометрической коррекции.

Основные наиболее применимые типы съемок: фотоснимки (аналоговые снимки) – негативы с фотоаппарата и отпечатки с них; цифровые снимки – принимаются с фотосканеров, тепловых сканеров и матриц светочувствительных элементов; радиолокационные цифровые снимки. Цифровые снимки принимаются из космоса на приемных станциях, а негативы аналоговых снимков отстреливаются на Землю в капсуле. Цифровые снимки, по сравнению с аналоговыми, значительно удобнее для применения, поскольку не требуют для своей компьютерной обработки предварительной прецизионной оцифровки на специально откалиброванных сканерах.

ГЛАВА 21

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

При дистанционном зондировании необходимо учитывать процессы, происходящие при взаимодействии электромагнитного излучения с изучаемым объектом и средой, передающей сигнал. При этом можно выделить следующие семь ключевых элементов (рис. 21.1):

- источник энергии или освещенность (А) – первое условие при проведении дистанционного зондирования земли – должен существовать источник, освещающий интересующий объект;

- взаимодействие с атмосферой (Б) – при распространении излучения от источника к объекту происходит взаимодействие излучения с атмосферой; подобный же процесс происходит и при распространении излучения от объекта к датчику;

- взаимодействие с объектом (В) – при попадании излучения на объект происходит его взаимодействие с объектом, зависящее от свойств как объекта, так и излучения;

- регистрация излучения датчиком (Г) – после того, как излучение рассеется объектом (или объект излучит некоторую энергию), необходим датчик (приемник излучения), не соприкасающийся с объектом для обнаружения и регистрации соответствующего излучения;

- передача, прием и обработка (Д) – зафиксированное приемником излучение должно быть передано на приемное устройство, зарегистрировано и обработано;

- интерпретация и анализ (Е) – из полученного изображения (сигнала) извлекается полезная тематическая информация о свойствах и параметрах объекта;

- приложения (Ж) – процесс обработки данных дистанционного зондирования Земли заканчивается только тогда, когда извлеченная из данных информация об объекте находит свое применение при решении конкретной задачи.

Электромагнитное излучение характеризуется длиной волны или частотой. Длина волны обычно обозначается греческой буквой λ и измеряется (для оптического диапазона) в нанометрах (нм – миллиардная доля метра) или микрометрах (мкм – миллионная доля метра) для инфракрасного, микро- и радиодиапазонов.

На рис. 21.2 представлен спектр электромагнитного излучения в шкале длин волн (слева сверху – длинная длина волны, внизу – короткая) и частот (справа сверху – низкая частота, внизу – высокая). Выделены

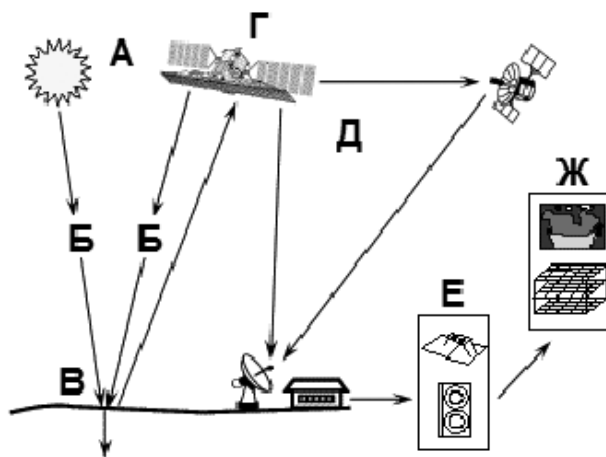


Рис. 21.1. Процесс дистанционного зондирования Земли

Длина волны (м) Частота (Гц)

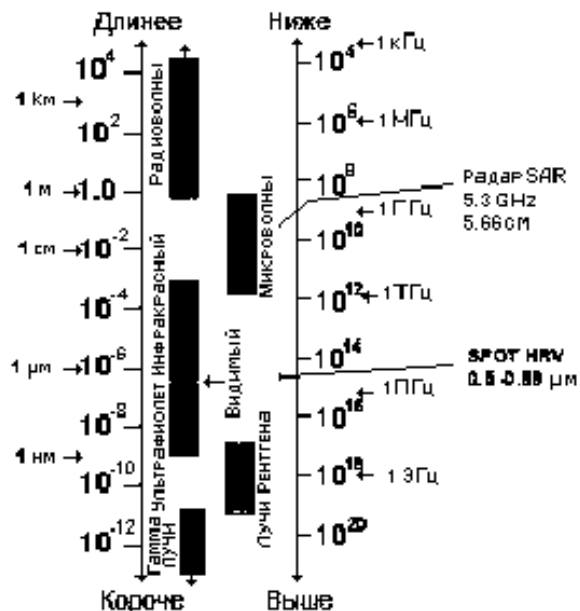


Рис. 21.2. Спектр электромагнитного излучения в шкале длин волн и частот

(сверху вниз) радио- и микроволновой диапазоны, инфракрасный (ИК), видимый и ультрафиолетовый диапазоны, участки рентгеновского и гамма-излучения.

Для целей дистанционного зондирования Земли и подстилающей поверхности наибольший интерес представляют три участка спектра: видимый участок спектра (рис. 21.3), инфракрасный (рис. 21.4) и микроволновый.

Сигнал, зарегистрированный датчиком на борту ИСЗ, состоит из нескольких компонент. К полезному сигналу, обусловленному отражением или излучением подстилающей поверхности и несущему информацию о параметрах соответствующего объекта (в нашем случае – посева сельскохозяйственной культуры), примешано искажающее влияние атмосферы, связанное как с ослаблением излучения при прохождении атмосферы, так и с появлением дополнительной компоненты, вызванной обратным рассеянием.

Основные механизмы взаимодействия излучения с атмосферой – рассеяние и поглощение. Обычно учитывают три типа рассеяния: релеевское, рассеяние Ми и неселективное. Релеевское рассеяние происходит на очень маленьких частицах, размер которых значительно меньше длины волны – мельчайшем аэрозоле, молекулах азота и кислорода. Процесс хорошо изучен и его учет не представляет теоретических и практических трудностей. Рассеяние Ми (рассеяние на сферических частицах) имеет место, когда размер частиц сопоставим с длиной волны проходящего через атмосферу излучения. Пыль, частицы дыма, водяной пар – далеко не полный перечень частиц, ответственных за соответствующее рассеяние. С теоретической точки зрения учет данного типа рассеяния не представляет труда, практическое же применение теоретических зависимостей ограничивается отсутствием фактических данных о параметрах частиц, присутствующих в атмосфере в момент прохождения излучения, – это прежде всего сведения о форме, химическом составе, распределении по размерам, распределении по высотам и т. п. Последний тип рассеяния – неселективный – обусловлен частицами, размер которых значительно превышает длину волны. Проблемы учета – аналогичные Ми-рассеянию.

Поглощение проходящего через атмосферу излучения происходит за счет его взаимодействия с молекулами озона, углекислого газа и водяного пара. Основная проблема – получение с приемлемой точностью данных о вертикальных профилях соответствующих компонент в месте и в момент проведения измерений. Поглощение происходит весьма избирательно в зависимости от длины волны (рис. 21.5), в связи с чем измерения при дистанционном зондировании подстилающей поверхности происходят в так называемых «окнах прозрачности».

Излучение, не рассеянное в атмосфере и не поглощенное в ней, достигает поверхности Земли и взаимодействует с ней. При этом излучение

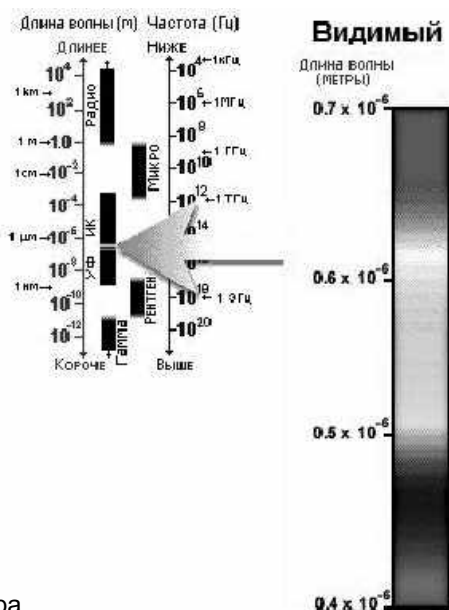


Рис. 21.3. Видимый участок спектра

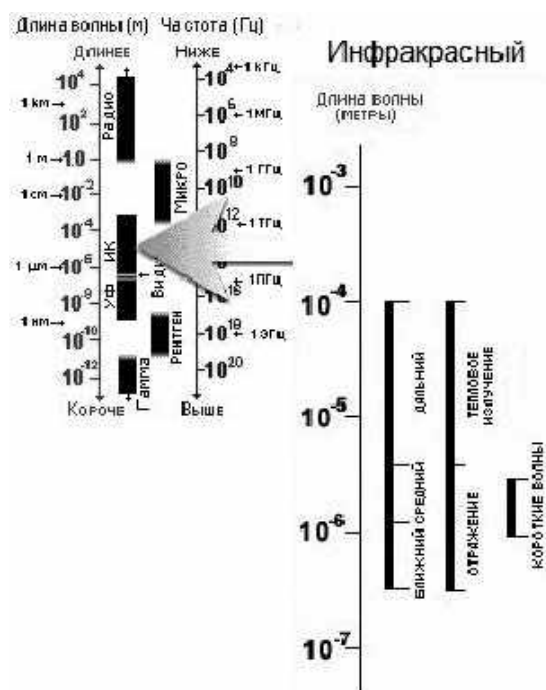


Рис. 21.4. Инфракрасный участок спектра

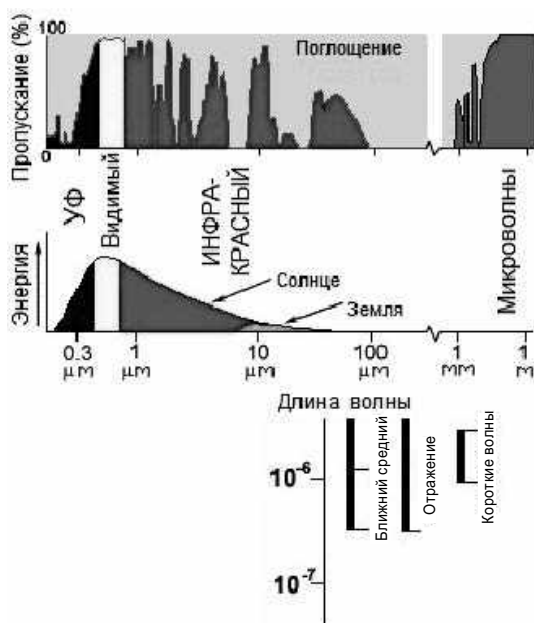


Рис. 21.5. Зависимость пропускания атмосферы от длины волны

частично поглощается, проходит через поверхность или отражается. Для целей мониторинга состояния подстилающей поверхности наибольшее значение имеет процесс отражения. На рис. 21.6 схематично представлен процесс взаимодействия электромагнитного излучения оптического диапазона с растительностью.

На приведенном рисунке видно, что излучение синего и красного диапазона преимущественно поглощается, а зеленого и инфракрасного диапазонов отражается.

Рассмотрим более подробно соответствующие процессы. Для наглядности на рис. 21.7 приведена схема строения листа. Поверхность листа почти прозрачна для солнечного излучения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Только пренебрежимо малая часть потока солнечной энергии отражается от поверхности листьев.

Солнечные лучи проходят через кутикулу и эпидермис внутрь листа. Здесь в мякоти листа (мезофилле) внутри основной ее ткани (паренхимы) на границе клеток двух ее слоев – многослойной плотной паренхимы, содержащей хлорофилл (хлоренхимы), и губчатой паренхимы, содержащей вакуоли воздуха (аэренхимы) – происходит такое взаимодействие потока солнечной энергии с тканью листа, которое определяет отражательные и абсорбционные (поглощательные) свойства листа того или иного вида растений.

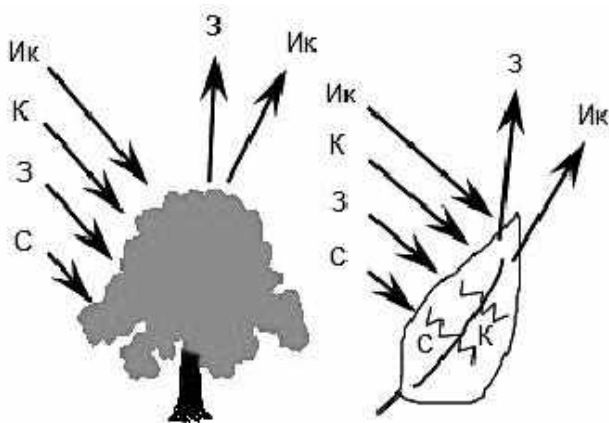


Рис. 21.6. Взаимодействие электромагнитного излучения оптического диапазона с растительностью (Ик-, К-, З-, С-излучение соответственно в инфракрасном, красном, зеленом и синем диапазонах)

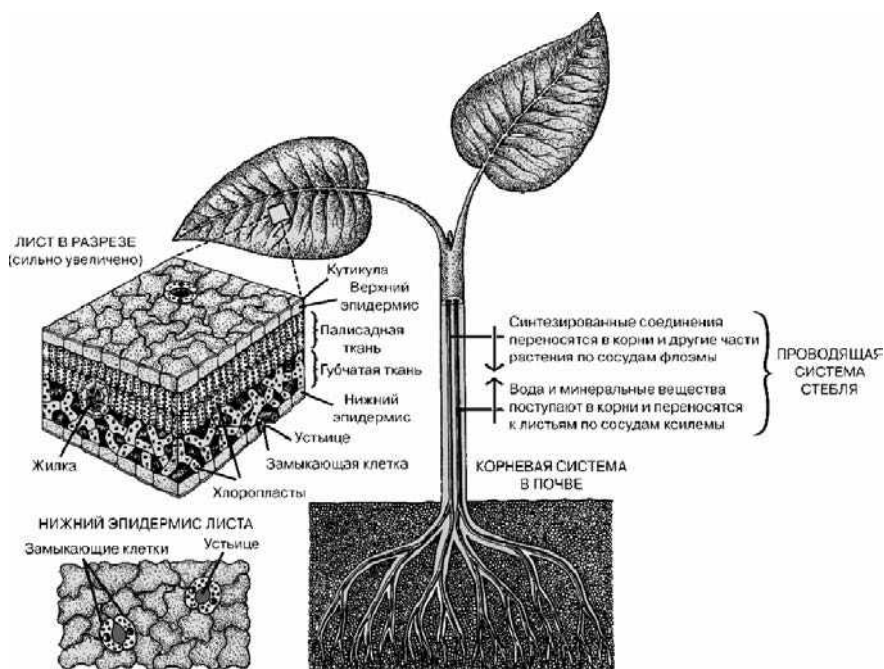


Рис. 21.7. Схема строения листа

Обогащенная хлоропластами (несущими окраску) многослойная паренхима состоит из одного или более слоев перпендикулярных к поверхности листа клеток-ячеек. Это собственно ассимилирующая ткань листа. К ней примыкает губчатая паренхима, которая характеризуется неравномерными, бедными хлоропластами клетками неправильной формы и большими межклетниками (пространство между клетками), заполненными воздухом. Нижняя сторона листа ограничена эпидермисом, в котором рассеяны многочисленные раскрывающиеся устьичные щели, которые сообщаются с межклетниками мезофилла. Благодаря этим щелевидным клеткам-каналам осуществляется испарение влаги растений, их дыхание и питание, т.е. поглощение кислорода и выделение углекислого газа при дыхании и поглощение двуокиси углерода при питании. У листьев некоторых растений такие устьичные щели находятся и на верхней части листа. В общем, листья разных растений различаются размерами, формой, свойствами своей поверхности и структурой мезофилла. Отражение, поглощение и пропускание падающих солнечных лучей зависит от длины волны света. Определенная часть падающего потока излучения поглощается листом, другая – отражается, а часть проходит сквозь него.

Рассмотрим типичную кривую спектрального отражения для здоровых зеленых листьев в диапазоне излучения 400...1000 нм (рис. 21.8).

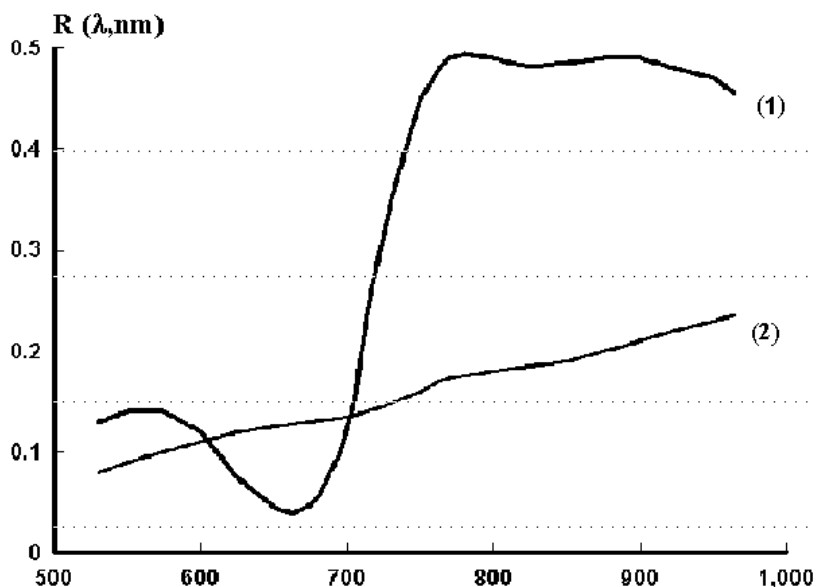


Рис. 21.8. Кривые спектральных коэффициентов яркости посевов озимой пшеницы в фазу колошение с проективным покрытием 100% (1) и почвы (2)

В интервале длин волн 400–700 нм световой поток проходит в мезофилл листа и в содержащую пигмент хлоренхиму, в которой поглощается. Поглощение солнечных лучей длиной около 450 нм дает необходимую для фотосинтеза энергию. В первую очередь процесс фотосинтеза обеспечивается хлорофиллом и другими пигментами, содержащимися в мезофилле. Хлорофилл составляет в высших растениях наряду с каротином и ксантофиллом большую часть пигмента листа (до 65 %). Он концентрируется в верхней части мякоти листа в многослойной паренхиме. В расположенной ниже губчатой паренхиме его содержание незначительно. Хлорофиллом поглощаются солнечные лучи, в основном голубой (400...480 нм) и красной (600...700 нм) частей спектра.

В течение последних пятидесяти лет опубликовано весьма много работ, в которых приведены данные по оптическим свойствам различных типов подстилающей поверхности, в том числе по самой разнообразной растительности. Одной из первых фундаментальных работ подобного рода, не потерявшей своего значения и до настоящего времени, является работа Е.Л. Кримова, который еще в 1947 году опубликовал соответствующий атлас. Ссылка только на англоязычные статьи по состоянию на 1996 год содержит упоминание 622 источников (<http://www.leo.ucl.uk/~mdisney/leaf.html>). По проблеме взаимодействия излучения с атмосферой существует огромное количество публикаций. В работе Кауфмана и Танрэ, опубликованной в 1966 году, посвященной важной, но частной проблеме – алгоритму определения тропосферного аэрозоля по спутниковым данным, список цитируемой литературы содержит более 200 наименований.

Зеленые лучи, наоборот, отражаются. Это оптическое взаимодействие обуславливает зеленый цвет свежих здоровых листьев и небольшой максимум в отражательной способности листа.

В интервале длин волн 700...1300 нм большая часть потока солнечной энергии отражается от листа. В этом диапазоне отражение растениями наиболее сильно, величина его зависит от вида растительности и составляет от 30 до 70 % всей энергии падающего потока излучения. В той части спектра, где кривая отражения имеет постоянно высокое положение, пигментарная система растения теряет свою способность поглощать фотоны. Поверхность листа и хлорофилл его мякоти прозрачны для инфракрасных лучей. В ближнем инфракрасном диапазоне отражательная способность листа определяется внутренней клеточной структурой его мягкой ткани. Важны число или количество, размер и форма клеток в мякоти листа, так как этими параметрами определяется число поверхностей и, соответственно, общая площадь, на которой совершаются процессы отражения и поглощения. При вхождении в мезофилл и при пропускании им инфракрасного излучения с длиной волны от 700 до 1300 нм стенки клеток мягкой ткани листа отражают и рассеивают поток излучения. Этот

процесс совершается благодаря изменениям коэффициента преломления на мембранах, стенках клеток и фотоплазме (хлоропластах). Уже многослойная паренхима имеет огромную площадь клетчатых стенок, на которых происходит внутреннее отражение и рассеянные лучи могут вновь отражаться и преломляться. Процесс многократного отражения, преломления и поглощения энергии светового луча намного сильнее в губчатой паренхиме (аэренхиме). Коэффициент преломления у заполненных воздухом межклеточных промежутков равен 1,0, а у собственно клеток целлюлозы, содержащих воду, он составляет 1,4. Подчеркнем, что именно количество, точнее – общая площадь граничных поверхностей «воздух – стенка» клетки, а не объем воздушного межклеточного пространства является важнейшим параметром отражательной способности листа в ближнем инфракрасном диапазоне. При этом многослойная паренхима влияет на внутреннее рассеяние инфракрасного излучения точно так же, как губчатая. Расположение воздушных межклеточников не играет значительной роли, так как проникающее внутрь листа излучение после прохождения кутикулы, эпидермиса и хлоренхимы уже имеет диффузный характер. Многократно повторенные отражение и рассеяние света в мякоти листа являются причиной сильного отражения солнечного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне.

В более длинноволновой части инфракрасного диапазона 1300...2500 нм кривая спектрального отражения здоровых зеленых листьев снова снижается. В этой части спектра поток солнечной энергии поглощается содержащей воду мягкой тканью листа. Кривая имеет два характерных минимума – полосы поглощения около 1450 и 1960 нм. Графики для коэффициентов спектральной яркости листьев в этом интервале длин волн конформны аналогичным графикам слоя воды такой же толщины. Изучение зависимости между содержанием воды и спектральными свойствами отражения для листьев кукурузы (рис. 21.9) показало, что отражение усиливается при уменьшении содержания воды в тканях листа.

Зависимость характеристик отражения растительного покрова от его фитомассы показана на рис. 21.10. Характерные особенности спектрального отражения позволяют проводить дешифрирование различных видов растительности при интерпретации результатов дистанционного зондирования. Растения реагируют на изменение окружающей среды изменениями содержания пигмента, структуры мезофилла, а также изменениями свойств поверхности листьев и влагосодержания. Такая реакция растений в соответствии с вышеизложенным всегда влияет на спектральные отражательные свойства и свойства поглощать свет и становится особенно заметной при экстремальных изменениях окружающей среды, например при сильной засухе, засолении почвы, высокой концентрации в ней тяжелых металлов и пр.

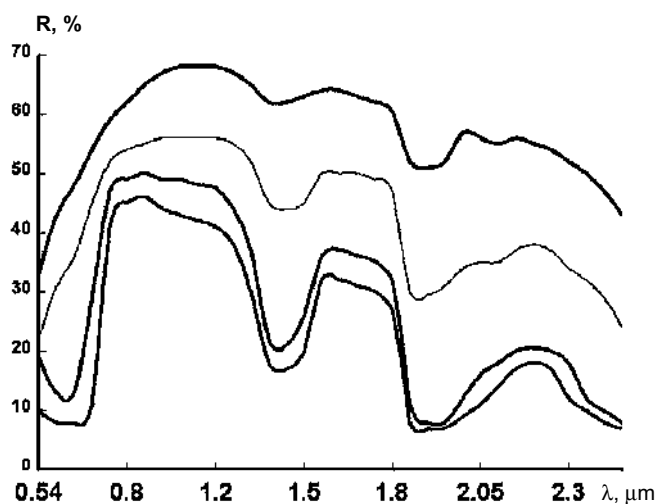


Рис. 21.9. Влияние содержания воды на отражение: 1 – < 40 %; 2 – 41–54 %; 3 – 55–66 %; 4 – > 66 %

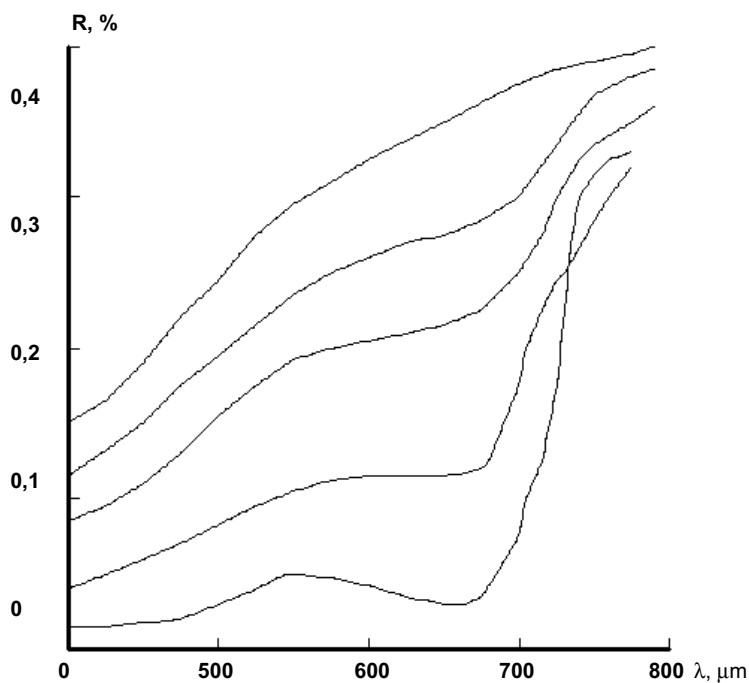


Рис. 21.10. Влияние биомассы посева на его спектр отражения

ГЛАВА 22

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В настоящее время имеется большое число спутниковых систем дистанционного зондирования, и количество подобных систем с каждым годом возрастает. Общее описание систем дистанционного зондирования можно найти как в периодических изданиях, так и в специализированных монографиях, в которых приводится обзор всех основных функций соответствующих систем дистанционного зондирования и рассмотрены требования к данным дистанционного зондирования со стороны потребителя при решении тех или иных задач. Ниже дан анализ спутниковых систем, информация с которых применима для выполнения работ агрометеорологической и сельскохозяйственной тематики.

Спутники системы «Метеор»

Начало российской метеорологической системы на базе аппаратов серии «Метеор» датируется 1969 годом. ИСЗ третьего поколения типа «Метеор-3» эксплуатируются с 1984 года. В целом к настоящему времени запущено более 50 космических аппаратов этой серии. Аппаратура, устанавливаемая на этих платформах, предназначена для получения глобальных изображений облачности и подстилающей поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, для изучения вертикального профиля температуры и влажности, а также потоков проникающих излучений в околоземном космическом пространстве. Разработчиком является ВНИИ электромеханики. Расчетный срок активной эксплуатации спутников этой серии составляет 2–3 года. Высота приполярной орбиты – около 1200 км, наклонение – 82,5°. Комплекс аппаратуры на «Метеор-3» позволяет оперативно на регулярной основе получать информацию два раза в сутки.

В последнее время были разработаны новые спутники серии «Метеор», прибавившие к своему названию букву М. Первый такой спутник был запущен 17 сентября 2009 года, следующий планируется запустить в конце 2011 года. Масса каждого спутника составляет 2630 кг, расчетное время функционирования – 5 лет. Высота орбиты составляет 832 км, наклонение – чуть более 98°. Орбита – солнечно-синхронная, просмотр того же места через сутки. На борту находятся МСУ-МР – многоканальное сканирующее устройство малого разрешения, КМСС – комплекс многозональной спутниковой съемки, МТВЗА – модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы, БРЛК – бортовой радиолокационный комплекс

для мониторинга ледовой обстановки, ГГAK-M – гелиогеофизический аппаратный комплекс для измерения параметров околоземного космического пространства. Для МСУ-MP и КМСС точность геодезической привязки не хуже 6–10 угловых минут. Некоторые характеристики указанной аппаратуры приведены в табл. 22.1.

Таблица 22.1

Основные характеристики аппаратуры МСУ-MP и КМСС ИСЗ «Метеор-M»

Название прибора	Полоса захвата (км)	Номер канала	Разрешение (м)	Участок спектра (нм)
МСУ-MP	≥2800	1	1000	500...700
		2	1000	700...1100
		3	1000	1600...1800
		4	1000	3500...4100
		5	1000	10500...11500
		6	1000	11500...12500
КМСС	900	1	120	370...450
		2	120	450...510
		3	120	580...690
	450	4	60	535...575
		5	60	630...680
		6	60	760...900

Пример изображения, получаемого рассматриваемой аппаратурой, приведен на рис. 22.1.

Полярно-орбитальные ИСЗ серии NOAA

Полярно-орбитальные ИСЗ серии NOAA POES (National Oceanic and Atmospheric Administration Polar Operational Environmental Satellites, США) уже более 20 лет являются основным космическим звеном метеорологических служб всего мира. Каждые 2–3 года запускается очередной спутник таким образом, что на орбитах одновременно находится не менее двух, а иногда четырех действующих аппаратов.

Орбита спутников – солнечно-синхронная, т.е. каждые сутки спутник проходит над любой территорией примерно в одно и то же местное время. Высота орбиты – около 800 км. Орбиты проходят вблизи полюсов Земли, и с учетом широкой полосы обзора это гарантирует съемку любого участка поверхности с нормальным пространственным разрешением не менее четырех раз в сутки с каждого спутника. Спутники выводятся на орбиты таким образом, чтобы съемка с разных спутников относительно равномерно распределялась по времени.

Основной объем информации составляют данные сканирующего радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), который с номинальной высоты орбиты формирует изображения подстилающей поверхности (табл. 22.2).

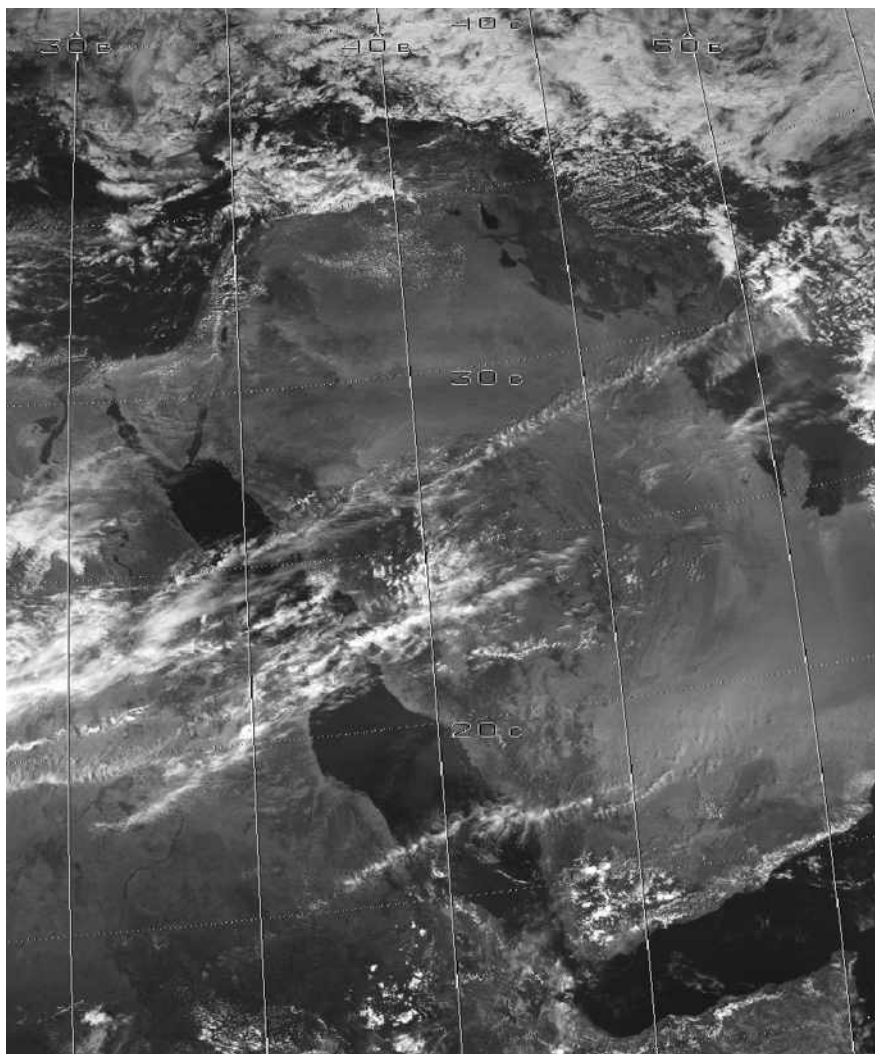


Рис. 22.1. Снимок с ИСЗ «Метеор-3» (Аравийский полуостров)

Таблица 22.2

Основные технические характеристики сканирующего радиометра AVHRR

Число спектральных каналов	5
Центральные длины волн в спектральных каналах	0;6, 0;9, 3;7, 11, 12 мкм
Пространственное разрешение в центре полосы обзора	1;1 км
Ширина полосы обзора	3000 км
Разрядность	10 бит/пиксель/канал

Начиная с NOAA-15, радиометр AVHRR имеет 6 спектральных каналов (дополнительно к названным 1,5 мкм). Однако, чтобы не менять формат, передаются данные либо канала 1,5 мкм, либо 3,7 мкм. Отличительные свойства радиометра AVHRR – широкий динамический диапазон, высокая радиометрическая разрешающая способность и наличие непрерывной бортовой калибровки. Помимо радиометра AVHRR, бортовой измерительный комплекс включает аппаратуру вертикального зондирования TOVS: 20-канальный ИК-радиометр HIRS; 4-канальный микроволновый радиометр MSU; ряд других относительно низкоинформативных датчиков и средства их калибровки.

Информация со спутников NOAA передается по радиолиниям в трех форматах: HRPT (High Resolution Picture Transmission), APT (Automatic Picture Transmission) и DSB (Direct Sounder Broadcasting). В формате HRPT передается вся информация, собираемая бортовым измерительным комплексом, и служебные данные. Формат – цифровой, данные передаются посредством бинарной фазовой модуляции излучения в диапазоне 1,7 ГГц, скорость потока – 665,4 кбит/с. Формат APT – аналоговый, информация передается посредством АМ/ЧМ-модуляции излучения в диапазоне 137 МГц с шириной полосы около 40 КГц. В формате APT передаются изображения только двух спектральных каналов AVHRR с заглубленным пространственным (примерно до 3 км), и радиометрическим (до 8 бит) разрешением. В формате DSB в цифровом виде в диапазоне 137 МГц передается информация только с низкоинформативных датчиков (без AVHRR). Съемка вдоль подспутниковой трассы и передача информации ведется непрерывно. Для приема не требуется лицензирования, если информация не используется в коммерческих целях.

Бортовая аппаратура и форматы сброса подробно описаны в документах NOAA: Technical Memorandum NESS 107 (описывает инструментальные комплексы спутников до NOAA-14 включительно) и NOAA KLM User's Guide (начиная с NOAA-15). Последний можно получить также в форматах PostScript и WordPerfect с FTP сервера <ftp://ftp2.ncdc.noaa.gov/pub/doc/klmguide/>.

Данные радиометра AVHRR с метеорологических спутников серии NOAA являются наиболее популярными и широко используются благодаря

высокому качеству информации и бесплатному доступу. Несмотря на невысокое пространственное разрешение, эти данные обладают очень высоким радиометрическим разрешением и возможностью абсолютной калибровки информации. Сейчас в активной эксплуатации находятся четыре космических аппарата NOAA.

Эта информация используется для определения температуры суши, температуры поверхности моря, мониторинга пожаров, измерения вегетационного индекса, наблюдения облачного, снежного и ледового покровов. Пример изображения подстилающей поверхности приведен на рис. 22.2.

Вторая большая группа спутников – спутники природно-ресурсного назначения. Здесь представлена более подробная информация об аппаратуре спутников «Ресурс». По остальным спутниковым системам даны только короткие справки.

Спутники системы «Ресурс»

На космическом аппарате «Ресурс-01» № 4 установлен комплекс аппаратуры для изучения природных ресурсов Земли, экологического контроля, метеорологического обеспечения, проведения гелио- и геофизических наблюдений, исследования радиационного баланса Земли. Орбита аппарата – солнечно-синхронная. Местное среднее солнечное время в подспутниковой точке в средних широтах на нисходящей ветви (пролет в направлении север–юг) составляет около 10 ч 15 мин, а на восходящей ветви (пролет в направлении юг–север) – около 20 ч 50 мин. Ориентация аппарата – трехосная, одна из осей направлена в нади́р, другая ось – по вектору скорости. Передача данных измерений и телеметрия осуществляется по цифровой и аналоговой радиолиниям.

Научно-информационный комплекс аппарата «Ресурс-01» включает следующие приборы:

- многоспектральное сканирующее устройство высокого разрешения – МСУ-Э – для получения изображений поверхности Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра с разрешением около 30 м (2 комплекта);

- многоспектральное сканирующее устройство среднего разрешения – МСУ-СК – для получения изображений облачности и подстилающей поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах спектра (2 комплекта);

- телевизионная аппаратура МР-900М для получения и непосредственной передачи изображений облачности и подстилающей поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра с разрешением 1,6 x 1,8 км;

- комплекс радиометрического контроля РМК-М для контроля радиационной обстановки;

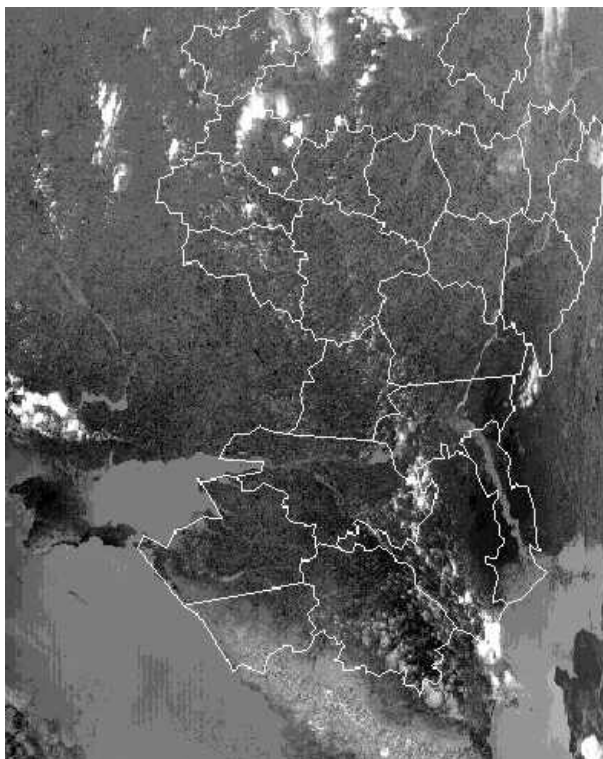


Рис. 22.2. Характеристика Юга России, полученная с помощью аппаратуры AVHRR. Нанесены контуры некоторых областей и краев

- измеритель ИСП-2 для контроля солнечной постоянной;
- многоспектральный сканирующий радиометр СРРБ для измерений составляющих радиационного баланса Земли (разработка специалистов Франции);
- малогабаритный телескоп НИНА для измерений характеристик потоков заряженных частиц (разработка специалистов Италии).

Бортовой природно-ресурсный информационный комплекс (БИК) работает в двух режимах: мониторинга и по заявкам потребителей. Типовая программа работы БИК предусматривает двухсуточный цикл.

Прием информации осуществляется в центрах приема НИЦ «Планета» (г. Обнинск), Западно-Сибирского РЦПОД (г. Новосибирск), Дальневосточного РЦПОД и сетью автономных пунктов приема информации (АППИ).

Основные характеристики космического аппарата «Ресурс-01» № 4 представлены ниже.

Таблица 22.3

Основные характеристики космического аппарата «Ресурс-01»

Дата запуска – 10 июля 1998 года	
Средняя высота орбиты	835 км
Наклонение орбиты	98,05°
Точность ориентации на Землю	10'
Несущая частота цифровой линии передачи данных с КА	8,192 ГГц
Несущая частота аналоговой линии передачи данных с КА в диапазоне	137–138 МГц
Скорость передачи данных с КА	До 61,44 мбит/с
Масса КА	3200 кг
Масса полезной нагрузки	1000 кг

Многозональное оптико-электронное сканирующее устройство высокого разрешения (МСУ-Э) предназначено для оперативного получения с борта космического аппарата видеоинформации о подстилающей поверхности Земли в трех спектральных зонах в диапазоне длин волн 0,5...0,9 мкм и с угловой разрешающей способностью около 7,1. Оно относится к классу узкоугольных сканирующих устройств с построчной разверткой. МСУ-Э построено по наиболее перспективному для таких устройств принципу использования твердотельных многоэлементных линейных приемников на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Каждая линейка состоит из 2000 фоточувствительных элементов, которые образуют набор мгновенных полей зрения, формирующих поле обзора прибора в виде строки. При считывании с ПЗС-фотоприемника зарядов формируется одна строка изображения. Для получения двумерного изображения используется метод последовательно построчного считывания информации с линейного ПЗС-фотоприемника при движении космического аппарата над подстилающей поверхностью. С целью получения информации в широкой зоне обзора МСУ-Э используется принцип перемещения оптической оси в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты космического аппарата. Перемещение оси в пределах $\pm 30^\circ$ с шагом 2° осуществляется с помощью плоского поворотного зеркала, расположенного перед объективом оптической системы. Для контроля стабильности градуировочной характеристики в полете в аппарате имеется система внутренней калибровки. На космическом аппарате установлены два прибора МСУ-Э, которые могут быть включены как отдельно, так и одновременно. При одновременной работе приборов зоны обзора частично перекрываются. Суммарная ширина полосы обзора примерно в 1,8 раза больше, чем у одного прибора. МСУ-Э на основе ПЗС обладают специфическими структурными шумами, обусловленными различием величины темновых токов и чувствительности элементов линейки ПЗС. Эти шумы проявляются в виде полос различной интенсивности вдоль кадра изображения. Кроме того, наблюдается спад сигнала и фона на краях

строки относительно центра, связанный с характеристиками объектива. Для уменьшения этих эффектов необходима соответствующая обработка видеoinформации при приеме и регистрации изображения.

Многозональное оптико-механическое сканирующее устройство среднего разрешения с конической разверткой (МСУ-СК) предназначено для получения с борта космического аппарата видеoinформации о подстилающей поверхности Земли в 4- спектральных диапазонах видимой и ближней ИК-области спектра в диапазоне 0,5...1,0 мкм с угловой разрешающей способностью не хуже 42, а также в средней и дальней ИК-области в диапазонах с номинальной шириной 3,5...4,1 и 10,4...12,6 мкм, соответственно, с угловой разрешающей способностью не хуже 140. В приборе использован принцип конического сканирования, заключающийся в перемещении визирного луча по поверхности конуса, ось которого совпадает с земной вертикалью. Выбор принципа конического сканирования обусловлен требованием постоянства геометрических и фотометрических условий наблюдения и постоянства величины разрешения по строке во всем поле обзора. Геометрические искажения, обусловленные таким сканированием, исправляются при обработке данных.

Существенным фактором, снижающим радиометрическую точность сканирующих радиометров, является нестабильность характеристики преобразования видеотракта за счет дрейфа нуля и изменения коэффициентов передачи усилителей. Для стабилизации характеристики преобразования в аппаратуре МСУ-СК используются схемы автокоррекции. Одна из них предназначена для коррекции дрейфа нуля усилителя, другая – для стабилизации коэффициента передачи. Автокоррекция осуществляется в период подачи на приемники потока от опорных источников. При этом в момент полного перекрытия светового потока на фотодиоде формируется сигнал уровня «черного», а в момент подачи максимального потока – сигнал уровня «белого». Коррекция характеристики преобразования видеотрактов V и VI зоны производится с использованием двух имитаторов абсолютно черного тела с температурами 240 и 320° К.

По метрическим и спектральным характеристикам получаемой информации система «Ресурс-О» сравнима с известной американской спутниковой системой «Landsat», а данные с ее сканеров вполне подходят для решения задач сельскохозяйственного назначения, таких, как инвентаризация угодий, выделение различных типов сельскохозяйственных культур, оценка их состояния и т.п., поскольку характеристические размеры сельскохозяйственных полей в России достаточно велики, по сравнению с полями стран Европы.

На двух следующих рисунках (рис. 22.3 и 22.4) приведены примеры изображений, получаемых с этого спутника.

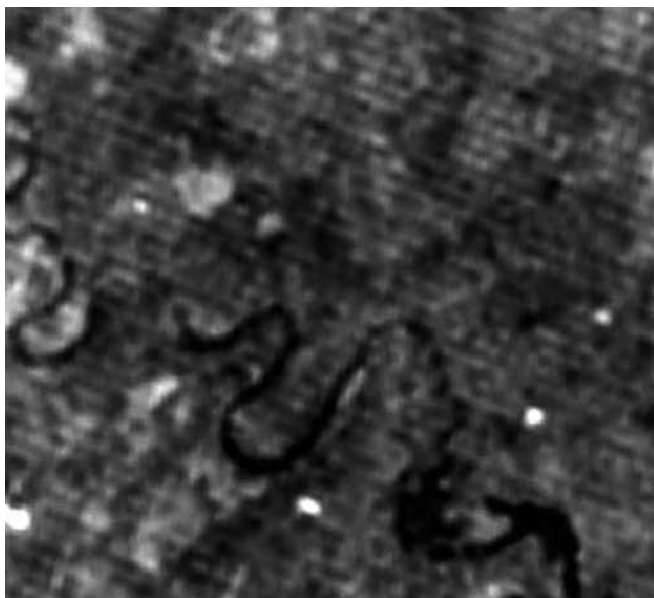


Рис. 22.3. Окрестности Москвы со спутника МСУ-СК

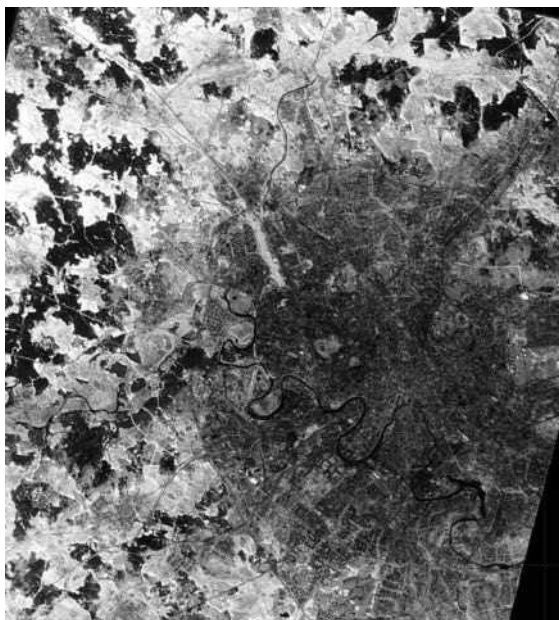


Рис. 22.4. Окрестности Москвы со спутника МСУ-Э

Спутник «Ресурс-ДК»

Космический аппарат «Ресурс-ДК» был запущен 15 июня 2006 года с помощью ракеты-носителя «Союз-У» с космодрома Байконур. Спутник входит в состав оперативного космического комплекса детального оптико-электронного наблюдения земной поверхности, создаваемого Государственным научно-производственным ракетно-космическим центром «ЦСКБ-Прогресс».

В зависимости от целевого применения спутник может эксплуатироваться на околокруговых или эллиптических рабочих орбитах с наклонениями 64,8°; 64,9°; 70,0°; 70,4°. Высоты рабочих орбит спутника имеют значения в диапазоне от 350 до 607 км. Спутник позволяет получать цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 1 м в панхроматическом режиме (один канал) и 2–3 м – в мультиспектральном режиме (три канала). Помимо аппаратуры ДЗЗ, на борту космического аппарата «Ресурс-ДК» установлено итальянское научное оборудование «Памела», предназначенное для космических исследований, и российская научная аппаратура «Ариана», обеспечивающая регистрацию высокоэнергичных электронов и протонов, их идентификацию, выделение всплесков высокоэнергичных частиц – предвестников землетрясений. Расчетный срок пребывания на орбите составляет около трех лет.

В табл. 22.4 приведены некоторые характеристики рассматриваемой системы.

Таблица 22.4

Основные технические характеристики

Дата запуска – 15 июня 2006 года		
Режимы	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон (мкм)	0,58...0,80	зеленый: 0,50...0,60 красный: 0,60...0,70 ближний ИК: 0,70...0,80
Пространственное разрешение	1 м	2–3 м
Максимальное отклонение от надира	30°	
Ширина полосы охвата (при H=350 км, надир)	До 28,3 км	
Скорость передачи данных на наземный сегмент	150, 300 мбит/с	
Радиометрическое разрешение	10 бит на пиксел	
Периодичность съемки	6 суток	
Возможность получения стереопары	С соседних витков	

Пример изображения высокого пространственного разрешения, полученного аппаратурой ИСЗ «Ресурс-ДК», представлен на рис. 22.5.



Рис. 22.5. «Ресурс-ДК», Франкфурт, Германия, разрешение 1 м

Спутник «Монитор-Э»

Космический аппарат «Монитор-Э» был запущен 26 августа 2005 года с помощью ракетно-космического комплекса легкого класса «Рокот» с космодрома Плесецк. Спутник является разработкой Государственного космического научно-производственного центра им. М.В. Хруничева. «Монитор-Э» был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 540 км и проходит над одной и той же точкой земной поверхности каждые 4...6 суток. Целевая аппаратура спутника позволяет осуществлять как панхроматическую, так и мультиспектральную съемку земной поверхности и передачу информации в масштабе времени, близком к реальному. Спутник позволяет получать цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 8 м в панхроматическом режиме (один канал) и 20 м – в мультиспектральном режиме (три канала). Съемка проводится в двух вариантах: трассовая съемка – когда камера снимает на земной поверхности по ходу движения спутника, и маршрутная

съемка – в этом случае спутник может отклоняться от трассы полета и производить съемку отдельных участков территории по заказу потребителя. Оптико-электронной целевой аппаратурой «Монитор-Э» проводится съемка одновременно во всех четырех каналах – в трех диапазонах многозональной аппаратурой и в одном диапазоне – панхроматической аппаратурой (табл. 22.5, рис. 22.6 и 22.7).

Таблица 22.5

Основные технические характеристики спутника «Монитор-Э»

Дата запуска – 26 августа 2005 года		
Режимы	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон (мкм)	0,536...0,843	зеленый 0,528...0,585 красный 0,626...0,672 ближний ИК: 0,783...0,883
Пространственное разрешение	8 м	20 м
Ширина полосы охвата	96 км	160 км
Периодичность съемки на широте 60°	6 суток	4 суток
Скорость передачи данных на наземный сегмент	15,36; 61,44; 122,88 мбит/с	

Спутник «Quickbird»

Космический аппарат «QuickBird» был запущен в 2001 году с авиабазы Ванденберг (США). Спутник был выведен на околоземную солнечно-синхронную орбиту высотой 450 км, обеспечивающую его прохождение над любым районом Земли каждые 1...5 суток (в зависимости от широты).



Рис. 22.6. Многозональное изображение. «Монитор-Э», Салинас, США. Разрешение 20 м, август 2006 года



Рис. 22.7. Панхроматическое изображение, «Монитор-Э», Египет. Разрешение 8 м, август 2006 года

Спутник «QuickBird» предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 61 см в панхроматическом режиме и 2,44 м – в мультиспектральном режиме при съемке в нади́р. Основными преимуществами спутника «QuickBird» являются широкая полоса охвата, размер сцены – 16,5 х 16,5 км, высокая метрическая точность и возможность заказа полигонов сложной формы. Расчетный срок пребывания на орбите составляет около 7 лет (табл. 22.6 и рис. 22.8).

Таблица 22.6

Основные технические характеристики спутника «QuickBird»

Дата запуска – 18 октября 2001 года		
Режимы	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон (мкм)	0,445...0,900	голубой 0,45...0,52 зеленый 0,52...0,60 красный 0,63...0,69 ближний ИК 0,76...0,90
Пространственное разрешение в нади́ре	61 см	2,44 м
Максимальное отклонение от нади́ра	45°	

Окончание таблицы 22.6

Метрическая точность	CE90 = 23 м
Радиометрическое разрешение	11 бит на пиксел
Формат файлов	GeoTIFF
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции
Периодичность съемки	1...5 суток (в зависимости от широты области съемки)
Возможность получения стереопары	С одного витка
Срок выполнения заказа	3...14 суток для архивных данных 7...90 суток для съемки на заказ
Минимальная площадь заказа	25 км ² для архивных данных, возможен заказ полигона произвольной формы 64 км ² для съемки на заказ, возможен заказ полигона произвольной формы

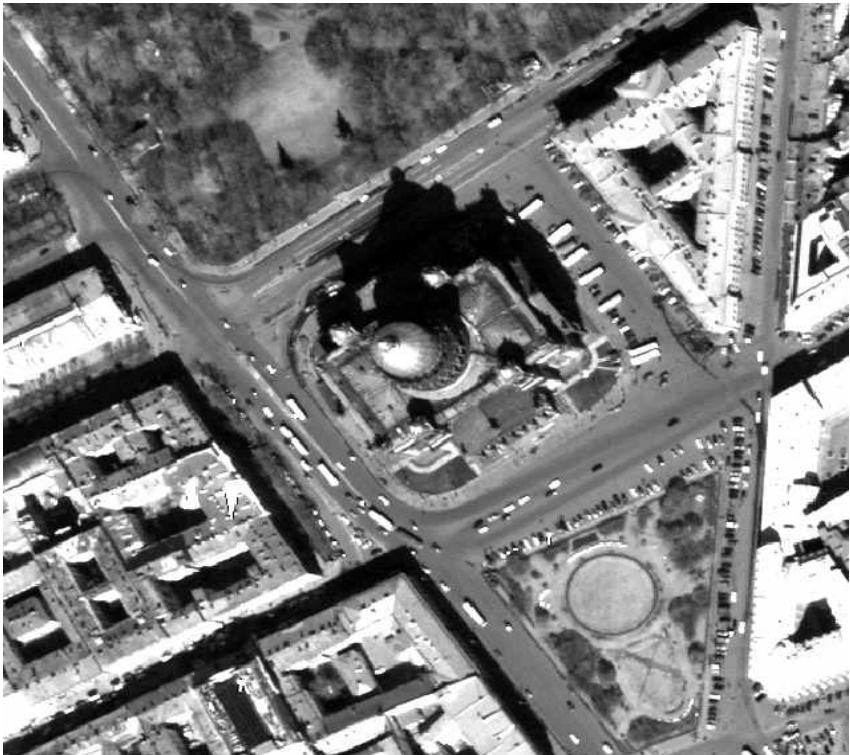


Рис. 22.8. Панхроматическое изображение с пространственным разрешением 60 см, «QuickBird». Исаакиевский собор, Санкт-Петербург, 5 мая 2003 года

Спутник «WorldView-1»

Космический аппарат «WorldView-1» был запущен в 2007 году с авиабазы Ванденберг. Владелец спутника является компания DigitalGlobe (США).

В проекте создания спутника участвовали такие компании, как Ball Aerospace (платформа, интеграция), Eastman Kodak (оптическая камера), ITT (интеграция), BAE Systems (система обработки). Спутник «WorldView-1» был выведен на околоземную солнечно-синхронную орбиту высотой 450 км, обеспечивающую его прохождение над любым районом Земли каждые 1–2 суток (в зависимости от широты). «WorldView-1» оснащен телескопом с апертурой 60 см для съемки только в панхроматическом режиме с пространственным разрешением до 0,5 м. Спутник сможет снимать по различным схемам: кадровая съемка, маршрутная съемка (вдоль береговых линий, дорог и других линейных объектов), площадная съемка (зоны размером 60 х 60 км), а также стереосъемка. По сравнению со своим предшественником – спутником «QuickBird» – на этом спутнике применяются новые технологические решения для обеспечения высокой производительности съемки, качества и точности координатной привязки изображений. Расчетный срок пребывания на орбите составит не менее 7 лет (табл. 22.7 и рис. 22.9).

Таблица 22.7

Основные технические характеристики спутника «WorldView-1»

Запуск – 18 сентября 2007 года	
Режимы	Панхроматический
Спектральный диапазон (мкм)	0,5...0,9
Пространственное разрешение в надири	50 см
Максимальное отклонение от надира	40°
Ширина полосы съемки	16 км
Точность геопозиционирования	CE90 = 12,2 м
Скорость передачи данных на наземный сегмент	800 мбит/с
Радиометрическое разрешение	11 бит на пиксел
Формат файлов	GeoTIFF
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция. Приведение к картографической проекции
Периодичность съемки	1...2 суток в зависимости от широты
Возможность получения стереопары	С одного витка

Спутник «Ikonos»

Космический аппарат «Ikonos» был запущен в 1999 году с авиабазы Ванденберг. Владелец спутника до начала 2006 года являлась компания Space Imaging (США). В феврале 2006 года компания OrbImage объявила о слиянии с фирмой Space Imaging. Объединенная компания



Рис. 22.9. Панхроматическое изображение с пространственным разрешением 50 см, «WorldView-1». Хьюстон, Техас

получила новое название – GeoEye. Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 680 км, обеспечивающую его прохождение над любым районом Земли в зависимости от широты каждые 1...5 суток.

Спутник «Ikonos» предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 1 м в панхроматическом режиме и 4 м – в мультиспектральном режиме. Основными преимуществами спутника «Ikonos» являются высокая маневренность и, как следствие, возможность съемки больших площадей за один проход (до 5000 кв. км), а также возможность получения стереопар с одного витка. Расчетный срок пребывания на орбите составляет около 7 лет (табл. 22.8 и рис. 22.10).

Таблицы 22.8

Основные технические характеристики Спутника «Ikonos»

Дата запуска – 24 сентября 1999 года		
Режимы	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон (мкм)	0,445...0,90	голубой 0,45...0,52 зеленый 0,52...0,61 красный 0,64...0,72 ближний ИК 0,77...0,88

Пространственное разрешение	1 м	4 м
Максимальное отклонение от надира	45°	
Ширина полосы охвата	11 км	
Метрическая точность	СЕ90=23 м	
Радиометрическое разрешение	11 бит на пиксел	
Формат файлов	GeoTIFF	
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции	
Периодичность съемки	1...5 суток (в зависимости от широты области съемки)	
Возможность получения стереопары	С одного витка	
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных 7...90 суток для съемки на заказ	
Минимальная площадь заказа	49 км ² для архивных данных, возможен заказ полигона произвольной формы с расстоянием между вершинами не менее 5 км 100 км ² для съемки на заказ, возможен заказ полигона произвольной формы с расстоянием между вершинами не менее 5 км	

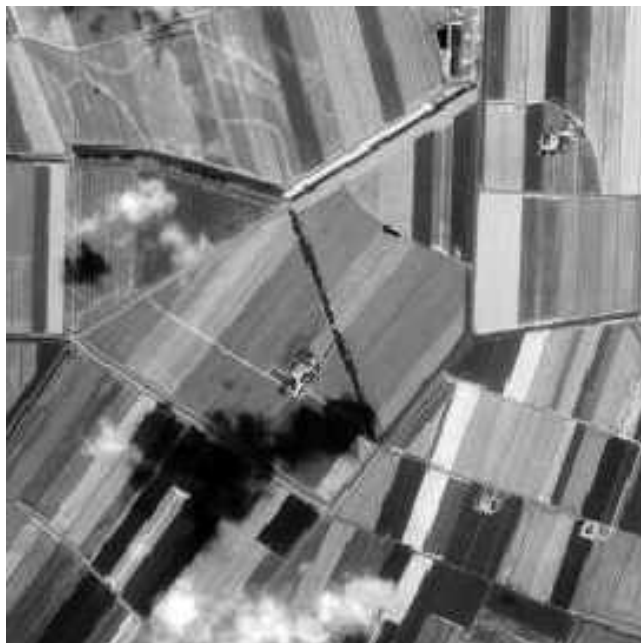


Рис. 22.10. Изображение юга Франции с разрешением 1 м, «Ikonos»

Спутник «OrbView-3»

Спутник «OrbView-3» был запущен в 2003 году с авиабазы Ванденберг. Владелец спутника до начала 2006 года являлась компания OrbImage (США). Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 470 км, обеспечивающую его прохождение над любым районом Земли каждые 1...5 суток (в зависимости от широты). Спутник «OrbView-3» предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 1 м в панхроматическом режиме и 4 м в мультиспектральном режиме. Преимуществом спутника «OrbView-3» является возможность съемки больших площадей, за один проход длительностью 10 мин до 20000 кв. км (разрешение 1 м моно) или 7200 кв. км (разрешение 1 м стерео). Расчетный срок пребывания на орбите составляет 5...7 лет (табл. 22.9 и рис. 22.11).

Таблица 22.9

Основные технические характеристики спутника «OrbView-3»

Дата запуска – 26 июня 2003 года		
Режимы	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон (мкм)	0,445...0,90	голубой 0,45...0,52 зеленый 0,52...0,60 красный 0,625...0,695 ближний ИК 0,76...0,90
Пространственное разрешение в надира	1 м	4 м
Максимальное отклонение от надира	50°	
Ширина полосы съемки	8 км	
Скорость передачи данных на наземный сегмент	150 мбит/с	
Радиометрическое разрешение	11 бит на пиксел	
Формат файлов	GeoTIFF 1,0	
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции	
Периодичность съемки	1...5 суток (в зависимости от широты области съемки)	
Возможность получения стереопары	С одного витка	
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных 7...90 суток для съемки на заказ	
Минимальная площадь заказа	64 км ² (1 сцена) для архивных данных 192 км ² (3 сцены) для съемки на заказ	

Спутник «Landsat-7»

Космический аппарат «Landsat-7» был запущен 15 апреля 1999 года с авиабазы Ванденберг. Спутник является проектом трех крупнейших американских правительственных организаций: NASA, NOAA и USGS. Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км.

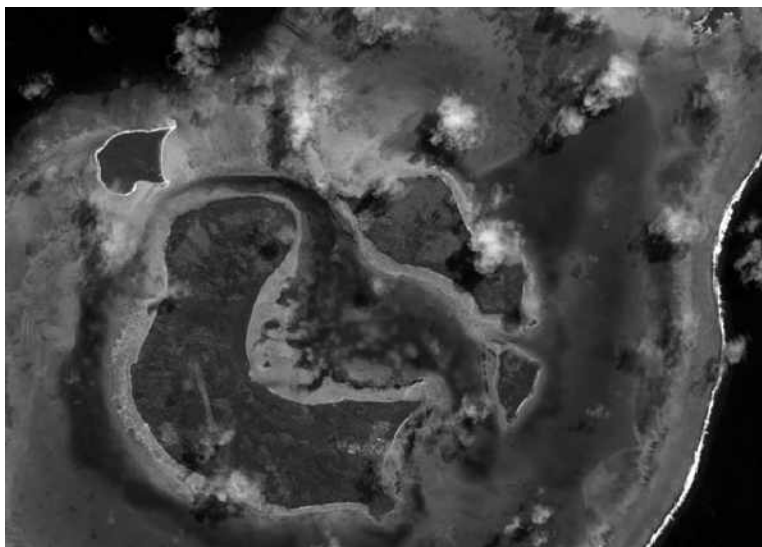


Рис. 22.11. Многозональное изображение с пространственным разрешением 4 м, «OrbView-3». Фиджи, Оно-Илау

Установленная на спутнике «Landsat-7» съемочная аппаратура ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus – усовершенствованный тематический картограф) обеспечивает съемку земной поверхности в шести каналах с разрешением 30 м, в одном ИК-канале с разрешением 60 м и одновременную панхроматическую съемку с разрешением 15 м при ширине полосы обзора для всех каналов около 185 км. Расчетный срок пребывания на орбите составляет около 7 лет (табл. 22.10 и рис. 22.12).

Таблица 22.10

Основные технические характеристики спутника «Landsat-7»

Дата запуска – 15 апреля 1999 года				
Высота орбиты 705 км				
Режимы	VNIR	SWIR	TIR	PAN
Спектральный диапазон (мкм)	голубой 0,45...0,52 зеленый 0,53...0,61 красный 0,63...0,69 ближний ИК: 0,78...0,90	средний ИК 1,55...1,75 средний ИК 2,09...2,35	тепловой ИК 10,40...12,50	0,52...0,90
Пространственное разрешение	30 м	30 м	60 м	15 м
Скорость передачи данных на наземный сегмент	150 мбит/с			

Ширина полосы охвата	185 км
Радиометрическое разрешение	8 бит на пиксел
Формат файлов	GeoTIFF
Периодичность съемки	16 суток
Возможность получения стереопар	Нет
Срок выполнения заказа	1...10 суток для архивных данных
Минимальная площадь заказа	185 x 170 км (1 сцена) для архивных данных



Рис. 22.12. Многозональное изображение с пространственным разрешением 30 м, «Landsat-7». Район Волгограда

Спутник «Aqua»

Космический аппарат «Aqua», как и другие спутники, был запущен 4 мая 2002 года с авиабазы Ванденберг. Спутник «Aqua» является частью комплексной программы НАСА EOA (Earth Observing System), направленной на исследование Земли и состоящей из трех специализированных спутников «Terra», «Aqua» и «Aura», предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно. Спутник был выведен на околополярную солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км. На борту спутника «Aqua» установлено шесть научных инструментов, часть из которых предназначена для изучения свойств облачного покрова и определения температуры воды в морях, другая – для определения температуры атмосферы Земли и ее влажности. Одним из ключевых

инструментов американских спутников серии EOS является спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах и позволяет производить регулярную съемку одной территории с пространственным разрешением до 250 м. Расчетный срок пребывания на орбите составляет около 6 лет (табл. 22.11 и рис. 22.13).

Таблица 22.11

Основные технические характеристики спутника «Aqua (MODIS)»

Дата запуска – 4 мая 2002 года						
Режимы/Каналы	1...2	3...7	8...19	20...25	26	27...36
Спектральный диапазон (мкм)	0,62... 0,88	0,46... 2,16	0,41... 0,97	3,66... 4,55	1,36... 1,39	0,54... 14,39
Пространственное разрешение	250 м	500 м	1000 м			
Ширина полосы съемки	2300 км					
Радиометрическое разрешение	12 бит на пиксел					
Периодичность съемки	Два раза в сутки					



Рис. 22.13. Изображение с пространственным разрешением 250 м. Район Волгограда

Спутник «Terra»

Космический аппарат «Terra» был запущен NASA 18 декабря 1999 года с авиабазы Ванденберг. На спутнике установлен аппаратный комплекс космического дистанционного зондирования «Aster» (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – усовершенствованный термально-оптический радиометр космического базирования). Своему появлению «Aster» обязан совместному проекту NASA, Японского министерства экономики, торговли и промышленности (METI) и Японского центра анализа данных ДЗЗ Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC). Спутник был выведен на солнечно-синхронную полярную орбиту высотой 705 км.

Комплекс «Aster» состоит из трех различных подсистем: VNIR (видимый диапазон и ближний ИК), позволяет получать данные с разрешением до 15 м, SWIR (коротковолновый ИК-диапазон) с пространственным разрешением 30 м и TIR (тепловой ИК-диапазон) с пространственным разрешением 90 м. Основным преимуществом является широкий спектральный диапазон и возможность стереосъемки. Расчетный срок пребывания на орбите составляет 6–7 лет (табл. 22.12 и рис. 22.14).

Таблица 22.12

Основные технические характеристики комплекса «Aster»

Дата запуска – 18 декабря 1999 года			
Режимы	VNIR	SWIR	TIR
Спектральный диапазон (мкм)	1 0,52...0,60 2 0,63...0,69 3N 0,76...0,86 3B 0,76...0,86	4 1,600...1,700 5 2,145...2,185 6 2,185...2,225 7 2,235...2,285 8 2,295...2,365 9 2,360...2,430	10 8,125...8,475 11 8,475...8,825 12 8,925...9,275 13 10,25...10,95 14 10,95...11,65
Пространственное разрешение	15 м	30 м	90 м
Скорость передачи данных на наземный сегмент	62 мбит/с	23 мбит/с	4,2 мбит/с
Ширина полосы съемки	60 км	60 км	60 км
Радиометрическое разрешение	8 бит на пиксел	8 бит на пиксел	12 бит на пиксел
Формат файлов	GeoTIFF		
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции		
Периодичность съемки	16 суток		
Возможность получения стереопары	С одного витка		
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных		
Минимальная площадь заказа	60 x 60 км (одна сцена) для архивных данных		



Рис. 22.14. Многозональное изображение в синтезе CIR с пространственным разрешением 15 м, «Aster», Аркаим, Челябинская область, 10 сентября 2002 года

Спутник «ЕО-1»

Космический аппарат «ЕО-1 (Earth Observing-1)» был запущен 21 ноября 2000 года с авиабазы Ванденберг. Спутник «ЕО-1» стал первым спутником программы «Новое тысячелетие», проводимой NASA. Основная идея разработки спутника состояла в поиске замены космического аппарата «Landsat-7», действующего на орбите начиная с 1999 года. Спутник «ЕО-1» был выведен на полярную солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км.

«ЕО-1» несет на своем борту полезную нагрузку в виде приборов ALI, Hyperion и дополнительно – аппаратуру LAC, которая позволяет установить и исключить возмущающее влияние атмосферы. Гиперспектральный сенсор Hyperion предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением до 30 м в 220-спектральных диапазонах видимой и инфракрасной области. Изначально планировался годовой орбитальный полет спутника, но после успешного завершения этого срока было принято решение о продлении пребывания «ЕО-1» на орбите на неопределенный срок (табл. 22.13 и рис. 22.15).

Таблица 22.13

Основные технические характеристики спутника «ЕО-1»

Дата запуска – 21 ноября 2000 года			
Режимы	Hyperion	ALI	
		мультиспектральный	панхроматический
Спектральный диапазон (мкм)	0,43-2,40 (220 каналов)	0,433...0,453 0,450...0,515 0,525...0,605 0,630...0,690 0,775...0,805 0,845...0,890 1,200...1,300 1,550...1,750 2,080...2,350	0,480...0,690
Пространственное разрешение	30 м	30 м	10 м
Ширина полосы съемки	7,7 км		
Скорость передачи данных на наземный сегмент	105 мбит/сек		
Радиометрическое разрешение	16 бит на пиксел		
Периодичность съемки	16 суток (в зависимости от широты области съемки)		

Спутник «SPOT-5»

Космический аппарат «SPOT- 5» был запущен 3 мая 2002 года с космодрома Куру с помощью ракетопосителя «Ариан-42Р». Владелец спутника является компания SpotImage (Франция). Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 822 км. Спутник оснащен высокоточным стереоскопическим детектором, позволяющим получать стереопары для построения глобальной модели рельефа SPOTDEM, а также двумя камерами высокого разрешения, позволяющими получать черно-белые изображения с разрешением 5 м в режиме SuperMode – до 2,5 м и цветные – с разрешением 10 м.

Кроме того, на «SPOT-5» установлена камера Vegetation-2, позволяющая получать практически ежедневно снимки всей поверхности Земли с разрешением 1 км. Расчетный срок пребывания на орбите составляет не менее 5 лет (табл. 22.14 и рис. 22.16).

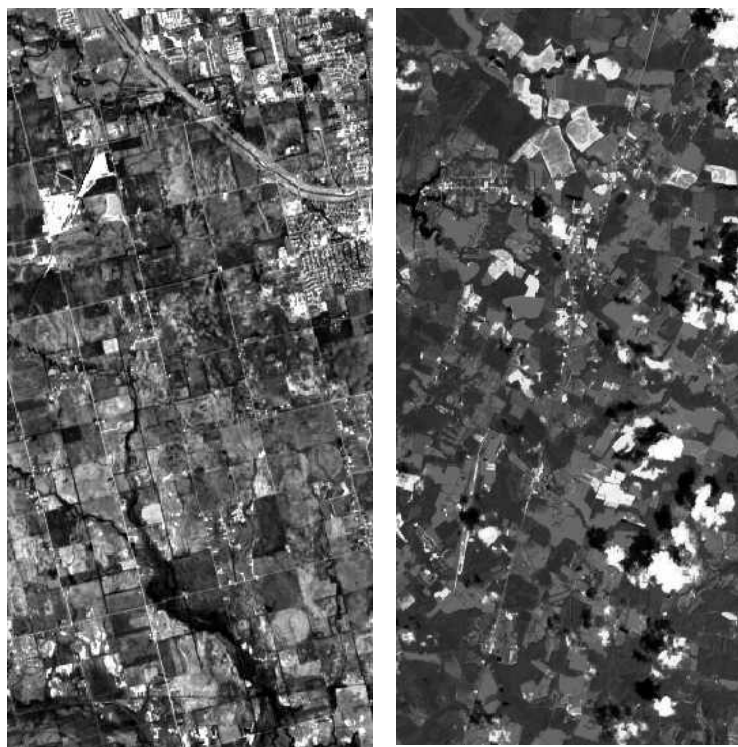


Рис. 22.15. Слева – многозональное изображение в естественных цветах (каналы 30, 20, 10) с разрешением 30 м. (14.03.2004, «ЕО-1», США, штаты Канзас и Оклахома); справа – многозональное изображение в синтезе CIR (каналы 40,30,20) с разрешением 30 м (28.08.2004), США, побережье Чесапикского залива)

Таблица 22.14

Основные технические характеристики «SPOT-5»

Дата запуска – 3 мая 2002 года			
Режимы	PAN	MS	Vegetation-2
Спектральный диапазон (мкм)	0,48...0,71	зеленый: 0,50...0,59 красный: 0,61...0,68 ближний ИК: 0,78...0,89 средний ИК: 1,58...1,75	0,45...0,52 0,61...0,68 0,78...0,89 1,58...1,75
Пространственное разрешение	5 м (в режиме SuperMode – до 2,5 м)	10 м	1 км

Окончание таблицы 22.14

Ширина полосы съемки	60 км (в надире)	60 км (в надире)	1000 и 2000 км
Радиометрическое разрешение	8 бит на пиксел	8 бит на пиксел	10 бит на пиксел
Формат файлов	GeoTIFF		
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции		
Периодичность съемки	26 суток (при съемке в надире)		
Возможность получения стереопары	С одного витка		
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных 7...90 суток для съемки на заказ		



Рис. 22.16. Изображение с разрешением 10 м, «SPOT-5». Обнинск

Спутник «Formosat-2»

Космический аппарат «Formosat-2» был запущен 21 мая 2004 года космическим агентством Тайваня NSPO (National Space Organization). Эксклюзивные права на поставку данных со спутника «Formosat-2» получила компания SpotImage (Франция). Спутник был выведен на солнечно-синхронную геостационарную орбиту высотой 891 км и предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 2 м в панхроматическом режиме и 8 м – в мультиспектральном режиме. Основными преимуществами спутника являются

маневренность (спутник может выполнять съемку с отклонением 45° от надира), возможность ежесуточной съемки, а также более раннее прохождение над любой точкой Земли (9 ч 30 мин утра по местному времени, тогда как у большинства спутников – 10 ч 30 мин), что увеличивает возможность безоблачной съемки. Расчетный срок пребывания на орбите составляет не менее 5 лет (табл. 22.15 и рис. 22.17).

Таблица 22.15

Основные технические характеристики спутника «FORMOSAT-2»

Дата запуска – 21 мая 2004 года		
Режимы	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон (мкм)	0,45...0,90	голубой: 0,45...0,52 зеленый: 0,52...0,60 красный: 0,63...0,69 ближний ИК: 0,76...0,90
Пространственное разрешение в надире	2 м	8 м
Максимальное отклонение от надира	45°	
Ширина полосы охвата	24 км	
Скорость передачи данных на наземный сегмент	120 мбит/с	
Радиометрическое разрешение	8 бит на пиксел	
Формат файлов	GeoTIFF	
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции	
Периодичность съемки	Ежедневно	
Возможность получения стереопары	Нет	
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных 7...60 суток для съемки на заказ	
Минимальная площадь заказа	24 x 24 км (1 сцена) для архивных данных 24 x 24 км (1 сцена) для съемки на заказ	

Спутник «Komsat-2»

Второй корейский многоцелевой спутник «Komsat-2» (Korean Multi-Purpose Satellite-2) был запущен 28 июля 2006 года с помощью ракеты-носителя «Рокот» с космодрома Плесецк в России. Спутник был разработан инженерами Корейского авиационно-космического научно-исследовательского института KARI (Korea Aerospace Research Institute). Эксклюзивные права на поставку данных со спутника «Komsat-2» получила компания SpotImage (Франция). Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 685 км. «Komsat-2» предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 1 м в панхроматическом режиме и 4 м – в мультиспектральном режиме. Основные параметры спутника приведены в табл. 22.16.

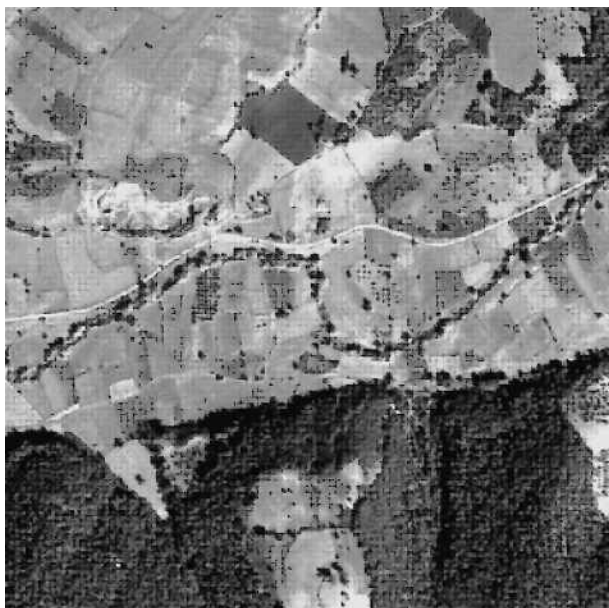


Рис.22.17. Панхроматическое изображение с разрешением 2 м, «Formosat-2», Западная Турция, 21.10.2005.

Таблица 22.16

Основные технические характеристики спутника «Kompsat-2»

Дата запуска – 28 июля 2006 года		
Режимы	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон	500...900 нм	голубой: 450...520 нм зеленый: 520...600 нм красный: 630...690 нм ближний ИК: 760...900 нм
Пространственное разрешение в на- дире	1 м	4 м
Ширина полосы охвата	15 км	
Скорость передачи данных на назем- ный сегмент	320 мбит/с	
Радиометрическое разрешение	10 бит на пиксел	
Формат файлов	GeoTIFF	
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометри- ческая коррекция. Приведение к картографи- ческой проекции	
Периодичность съемки	3 суток	
Возможность получения стереопары	Да	
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных 7...60 суток для съемки на заказ	

Спутники «IRS-1C/1D», «IRS-P6» («Resourcesat-1»), «IRS-P5» («Cartosat-1 »)

Космический аппарат «IRS-1C» был запущен 28 декабря 1995 года российской ракетой «Молния» с космодрома Байконур. «IRS-1D» был запущен 29 сентября 1996 года с помощью ракеты PSLV-C1 с полигона космического центра им. Сатиша Дхвана (остров Шрихарикота). Космическая программа Индии IRS (Indian Remote Sensing) начала существовать с момента запуска первого спутника этой серии «IRS-1A». Программа реализуется под руководством правительственного департамента космических исследований Индии. Спутники «IRS-1C», «IRS-1D» были выведены на полярную солнечно-синхронную орбиту высотой 817 км и 373...823 км соответственно. Спутник предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 5,8 м в панхроматическом режиме с разрешением 23,5 и 70 м в мультиспектральном режиме (LISS-3), а также с разрешением 188 м (WiFS). Расчетный срок пребывания на орбите спутников «IRS» – не менее трех лет (табл. 22.17).

Таблица 22.17

Основные технические характеристики спутников «IRS»

Дата запуска – 29 сентября 1996 года			
Режимы	PAN	LISS-3	WiFS
Спектральный диапазон (мкм)	0,5...0,75	зеленый: 0,52...0,59 красный: 0,62...0,68 ближний ИК: 0,77...0,86 средний ИК: 1,55...1,70	красный 0,62...0,68 ближний ИК: 0,77...0,86
Пространственное разрешение	5,8 м	23,5 м и 70 м	188 м
Ширина полосы охвата	70 км	142 км	804 км
Радиометрическое разрешение	6 бит на пиксел	7 бит на пиксел	7 бит на пиксел
Периодичность съемки	5 суток	24...25 суток	5 суток
Возможность получения стереопар	С соседних витков	Нет	Нет
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных		
Минимальная площадь заказа	PAN: 23 x 23 км (1/9 сцены) для архивных данных LISS-3: 70 x 70 км (1/4 сцены) для архивных данных		

Космический аппарат «IRS-P6» («Resourcesat-1») был запущен 17 октября 2003 года с помощью ракеты PSLV-C5 с полигона космического центра им. Сатиша Дхвана (остров Шрихарикота). Владелец спутника является индийская организация ISRO (Indian Space Research Organization). Космическая программа Индии IRS (Indian Remote Sensing) начала

существовать с момента запуска первого спутника этой серии «IRS-1A». Программа реализуется под руководством правительственного департамента космических исследований Индии. Спутник «Resourcesat-1» был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 817 км. Конструктивно спутник «Resourcesat-1» выполнен на базе платформы KA IRS-1C/1D. Но, помимо устройства LISS-3, на его борту установлен усовершенствованный сканер LISS-4, позволяющий получать цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 5,8 м как в панхроматическом, так и в мультиспектральном режимах с повышенным радиометрическим качеством, а также сканер нового поколения AWiFS, который предоставляет возможность получения изображений с разрешением 55 м в полосе шириной 740 км. Расчетный срок пребывания на орбите «Resourcesat-1» составляет не менее пяти лет (табл. 22.18 и рис. 22.18).

Таблица 22.18

Основные технические характеристики космического аппарата «IRS-P6»

Дата запуска – 17 октября 2003 года				
Режимы	LISS-4		LISS-3	AWiFS
	PAN	MSS		
Спектральный диапазон (мкм)	0,62...0,68	0,52...0,59 0,62...0,68 0,77...0,86	0,52...0,59 0,62...0,68 0,77...0,86 1,55...1,70	0,52...0,59 0,62...0,68 0,77...0,86 1,55...1,70
Пространственное разрешение	5,8 м	5,8 м	23,5 м	50–70 м
Ширина полосы охвата	70 км	23 км	140 км	740 км
Периодичность съемки	5 суток	5 суток	24 суток	5 суток
Радиометрическое разрешение	10 бит на пиксел	10 бит на пиксел	7 бит на пиксел	10 бит на пиксел
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных			
Минимальная площадь заказа	LISS-4 PAN: 23 x 23 км (1/9 сцены) для архивных данных LISS-4 MSS: 11,5 x 11,5 км (1/4 сцены) для архивных данных LISS-3: 70 x 70 км (1/4 сцены) для архивных данных AWiFS: 370 x 370 км (1/4 сцены) для архивных данных			

Космический аппарат «IRS-P5» («Cartosat-1») был запущен 5 мая 2005 года с помощью ракеты «PSLV-C6». Владелец спутника является индийская организация ISRO (Indian Space Research Organization). Космическая программа Индии IRS (Indian Remote Sensing) начала существовать с момента запуска первого спутника этой серии «IRS-1A». Программа реализуется под руководством правительственного департамента космических исследований Индии. Спутник «IRS-P5» был выведен на полярную солнечно-синхронную орбиту высотой 618 км. На борту спутника установлены два панхроматических сканера, позволяющих

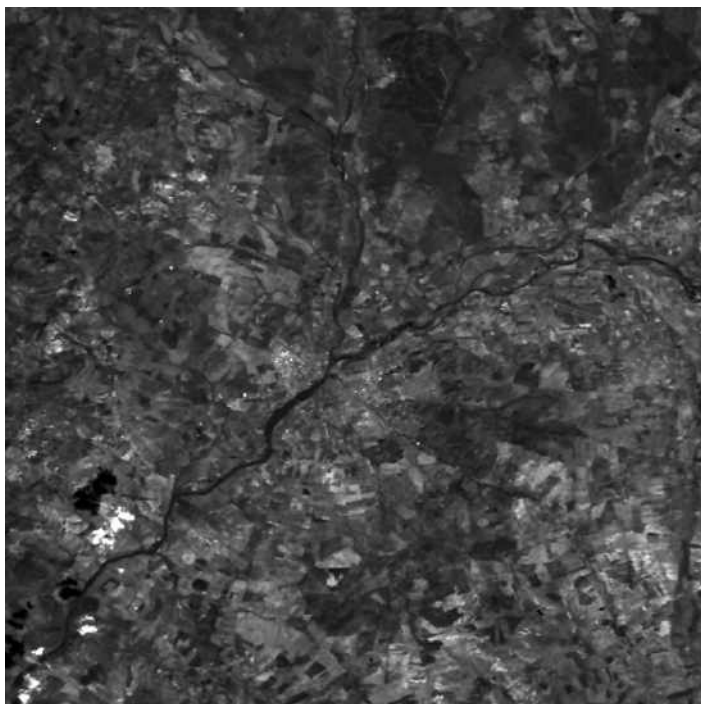


Рис. 22.18. Изображение с космического аппарата «IRS-6». Многозональный сканер AWiFS. Синтез CIR, разрешение 60 м. Центральная Португалия

получать цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 2,5 м для съемки в полосе шириной 30 км. Спутник «IRS-P5» предназначен для получения стереоизображений с высокими метрическими характеристиками. На основе данных, полученных со спутника, возможно построение ЦМР с точностью порядка 5 м по высоте. Расчетный срок пребывания на орбите спутников «IRS» составляет не менее трех лет (табл. 22.19).

Таблица 22.19

Основные технические характеристики космического аппарата «IRS-P5»

Дата запуска – 5 мая 2005 года		
Режимы	PAN Fore	PAN After
Спектральный диапазон	500...850 нм	500...850 нм
Пространственное разрешение	2,5 м	2,5 м
Ширина полосы охвата	30 км	27 км
Периодичность съемки	5 суток	5 суток
Радиометрическое разрешение	10 бит на пиксел	10 бит на пиксел

Спутник «ALOS»

Космический аппарат «ALOS» (Advanced Land Observation Satellite) был запущен 24 января 2006 года с японского космодрома Танегашима. Владелец спутника является Японское аэрокосмическое агентство JAXA. Спутник был выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 691,65 км. Спутник «ALOS» оснащен радаром L-диапазона (PALSAR), предназначенным для круглосуточного и всепогодного наблюдения Земли и позволяющим получать изображения с разрешением от 7 до 100 м, картографической стереокамерой (PRISM), позволяющей получать снимки с разрешением до 2,5 м, а также мультиспектральной камерой (AVNIR-2) для получения цветных снимков с разрешением 10 м. Данные, полученные со спутника, могут быть использованы для картографирования, наблюдения за использованием природных ресурсов, а также для проведения научных исследований (табл. 22.20 и рис. 22.19).

Таблица 22.20

Основные технические характеристики спутника «ALOS»

Дата запуска – 24 января 2006 года			
Режимы	PRISM (панхроматический)	AVNIR-2 (мультиспектральный)	PALSAR (радарный)
Спектральный диапазон (мкм)	0,52...0,77	голубой 0,42...0,50 зеленый 0,52...0,60 красный 0,61...0,69 ближний ИК 0,76...0,89	Радар L-диапазона с синтезированной апертурой
Пространственное разрешение	2,5 м (в надири)	10 м (в надири)	7 м...100 м
Скорость передачи данных на наземный сегмент	960 мбит/с	160 мбит/с	240 мбит/с
Ширина полосы съемки	35 км (в надири)	70 км (в надири)	70 км...350 км
Радиометрическое разрешение	8 бит на пиксел	8 бит на пиксел	5 бит на пиксел
Периодичность съемки	46 суток	46 суток	46 суток
Возможность получения стереопары	С одного витка	Нет	Нет

Спутник «ENVISAT»

1 марта 2002 года Европейским космическим агентством (ESA) в целях дальнейшего развития программы исследований земной поверхности, начатой спутниками «ERS», был осуществлен запуск космического аппарата «ENVISAT». Была избрана солнечно-синхронная орбита со средней высотой 790 км, наклоном – 98,55 градуса и 35-суточным циклом повтора, обеспечивающим глобальное покрытие в промежутках от 1 до 3 суток.



Рис. 22.19. Изображение Санкт-Петербурга. Радар PALSAR. 7 июля 2006 г.

Спутник является многоцелевым. На нем установлено 9 разнообразных инструментов дистанционного зондирования, включая оптические сканеры, ультрафиолетовые и инфракрасные спектрометры, радарный альтиметр и т.д. Наибольший интерес для широкого круга пользователей представляет усовершенствованный радар бокового обзора с синтезированной апертурой (ASAR), выполняющий съемку земной поверхности в С-диапазоне длин волн (5,6 см), с изменяемой поляризацией излучения в диапазоне съемочных углов от 15 до 45 ° (табл. 22.21 и рис. 22.20).

Таблица 22.21

Основные технические характеристики спутника «ENVISAT»

Дата запуска – 1 марта 2002 года			
Спектральный диапазон	5,6 см (С-диапазон)		
Режимы	Среднего разрешения (Image Mode)	Низкого разрешения (Wide Swath mode)	Глобального мониторинга (Global Monitoring mode)
Номинальное пространственное разрешение	30 м	150 м	1000 м
Ширина полосы съемки	100 км	400 км	400 км
Скорость передачи данных	105 мбит/с		
Радиометрическое разрешение	8 бит на пиксел		

Формат файлов	CEOS
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции
Периодичность съемки	От 2,5 до 35 суток
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных 7...40 суток для съемки на заказ
Минимальная площадь заказа	Одна квадратная сцена с длиной, равной ширине полосы съемки для любого режима



Рис. 22.20. Изображение Волгограда с разрешением 150 м, ASAR – Wide Swath mode (Синтез: R – HV, G – HH, B – HV/HH, 16.04.2003)

Спутники «ERS-1», «ERS-2»

Спутниковая система «ERS» разрабатывалась Европейским космическим агентством (ESA) с начала 80-х гг. прошлого века. 17 июля 1991 года на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 785 км и наклонением $98,5^\circ$ был запущен первый аппарат серии – «ERS-1». Вторым спутником – «ERS-2», ставший преемником и конструктивным аналогом «ERS-1», был выведен на такую же орбиту 21 апреля 1995 года. На первом

из спутников установлено 5, на втором – 6 разнообразных инструментов дистанционного зондирования, включая оптические ультрафиолетовые и инфракрасные сканеры, радарный альтиметр и т.д. Однако, учитывая сверхнизкое пространственное разрешение большинства перечисленных приборов, наибольший интерес для широкого круга пользователей представляет радар бокового обзора с синтезированной апертурой (SAR), выполняющий съемку земной поверхности в С-диапазоне длин волн (5,6 см) с вертикальной поляризацией излучения (VV) в диапазоне съемочных углов от 20 до 26 °.

Расчетный срок пребывания на орбите спутника «ERS-1» определялся в три года, однако аппарат продолжал успешно работать до 10 марта 2000 года, что позволило ESA в течение почти пяти лет эксплуатировать спутниковую группировку, обеспечивавшую удвоенную частоту съемки поверхности Земли. Также благодаря этому был проведен ряд экспериментов по радарной интерферометрии, в частности осуществлен проект «ERS Tandem», продолжавшийся в 1995–1996 гг. и значительно продвинувший технологии радарного дистанционного зондирования. Срок пребывания на орбите «ERS-2» определялся в два года, однако, несмотря на мелкие неисправности, он успешно проработал до июня 2003 года. С тех пор в связи с поломкой записывающего устройства съемка ведется только в пределах доступности наземных станций ESA (табл. 22.22 и рис. 22.21).

Таблица 22.22

Основные технические характеристики спутников ERS-1 и ERS-2

Дата запуска «ERS-1» – 17 июля 1991 г., «ERS-2» – 21 апреля 1995 года	
Спектральный диапазон	5,6 см (С-диапазон)
Режимы	Основной режим (AMI-SAR Image Mode)
Номинальное пространственное разрешение	26 x 30 м
Ширина полосы съемки	100 км
Скорость передачи данных на наземный сегмент	105 мбит/с
Радиометрическое разрешение	8 бит на пиксел
Формат файлов	CEOS
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции
Периодичность съемки	Не более 35 суток
Срок выполнения заказа	7...14 суток для архивных данных Не более 50 суток для съемки на заказ
Минимальная площадь заказа	Одна квадратная сцена с длиной, равной ширине полосы съемки для любого режима

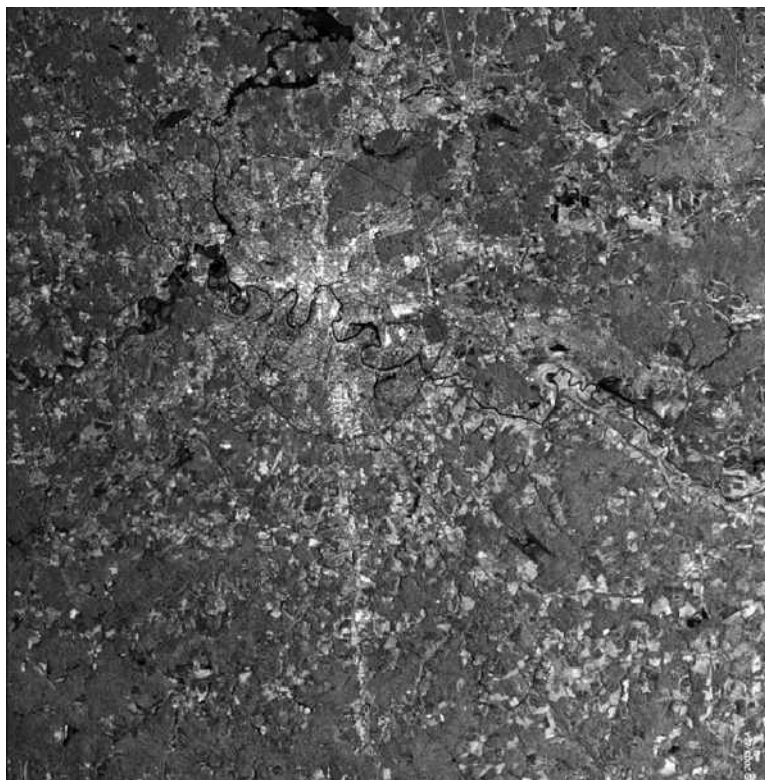


Рис. 22.21. Изображение Москвы и Подмосквья, SAR, Временной композит: R – 20 июня 2004 г.; G – 11 апреля 2004 г.; B – 25 августа 2004 г. «ERS-2»

Спутник «TerraSAR X»

Спутник «TerraSAR X», разработанный немецким аэрокосмическим центром (DLR) и компанией EADS Astrium GmbH, был запущен 15 июня 2007 года с космодрома Байконур. Спутник был выведен на солнечно-синхронную полярную орбиту высотой 514 км с наклоном $97,44^\circ$. Расчетный срок пребывания на орбите аппарата «TerraSAR X» составляет около пяти лет.

Оснащение спутника новейшим радаром с синтезированной апертурой позволяет выполнять интерферометрическую съемку земной поверхности с беспрецедентным пространственным разрешением в 1 м. Радар будет выполнять съемку земной поверхности в X-диапазоне длин волн (3,1 см) с изменяемой поляризацией излучения (HH, VH, HV, VV) в диапазоне съемочных углов от 20 до 55° (табл. 22.23 и рис. 22.22).

Таблица 20.23

Основные технические характеристики спутника «TerraSAR»

Дата запуска – 15 июня 2007 года				
Спектральный диапазон	(3,1 см) – X-диапазон			
Режимы	Сверхвысокого разрешения (High Resolution SpotLight)	Высокого разрешения (SpotLight)	Широкополосный высокого разрешения (StripMap)	Среднего разрешения (ScanSAR)
Номинальное пространственное разрешение	1 м	2 м	3 м	16 м
Размер сцены	10 x 5 км	10 x 10 км	30 x 50 км	100 x 150 км
Скорость передачи данных	300 мбит/с			
Радиометрическое разрешение	16 бит на пиксел			
Формат файлов	GeoTIFF			
Обработка	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция. Приведение к картографической проекции, создание ЦМР, производных картографических продуктов			
Периодичность съемки	11 суток, подцикл: 2,5 суток			
Срок выполнения заказа	1...3 суток для архивных данных 1...6 суток для съемки на заказ			
Минимальная площадь заказа	Одна стандартная сцена для любого из четырех режимов			



Рис. 22.22. Изображение Волгоградской области с разрешением 16 м, «TerraSAR», режим ScanSAR, поляризация HH. 19 июня 2007 года

Подробная информация по этим и другим системам приведена на <http://gis-lab.info>.

Все перечисленные выше спутники используются для решения задач в различных областях деятельности общества. Для мониторинга посевов сельскохозяйственных культур наибольшее распространение получила информация с метеорологических (с полярной орбитой) спутников «NOAA» («AVHRR») и «METEOR».

Достоинство этих спутников – широкая полоса обзора (до 2000 км и более) и достаточное количество съемок за сутки: для «NOAA» – до 10 суток с учетом функционирования нескольких спутников одновременно, недостаток – низкое пространственное разрешение (минимальное пространственное разрешение составляет 1 км² и более). Тем не менее с помощью подобной информации могут решаться следующие задачи оценки состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур, мониторинга засух и наводнений, обнаружения очагов пожаров и др.

Более перспективным является следующее поколение спутниковых систем, например, американские «MODIS» и «RQVA», российские «МСУСК» и др. В этих системах существенно возросло количество спектральных каналов, а пространственное разрешение для некоторых каналов возросло в четыре раза. Применительно к задачам, решаемым первой группой спутников, появляется возможность выявления более мелких очагов возгорания при диагностике пожаров, проведение оценки состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур с большей детализацией и с выходом на отдельные культуры. Основная проблема – короткие ряды наблюдений для получения статистических зависимостей.

Очень хорошими по качеству являются изображения с природно-ресурсных спутников типа американского «Landsat», французского «Spot» и российского «Ресурс». Очень высокое пространственное разрешение (от 100 и до 1 м) позволяет проводить оценку отдельных полей и выявлять конкретные причины, такие, как болезни, вредители, полегание посевов и т.д., влияющие на ухудшение условий вегетации. Но информация не оперативна – очень узкая полоса обзора, съемка возможна только один раз за 10 – 14 суток, а с учетом облачности, режима работ и других факторов – еще реже. Однако в отдельные периоды, особенно при аномальных условиях, эта информация крайне полезна.

ГЛАВА 23

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Параметры растительного покрова вообще и посевов сельскохозяйственных культур в частности зависят от многих факторов: характеристик самого покрова, произрастающей или культивируемой на данной территории культуры, состояния, в котором находится растительность и т.д. Они могут быть определены непосредственно при контакте с растительным покровом, или же косвенным путем – определением оптических и других характеристик растительного покрова по отраженной им радиации, а затем – преобразованием оптических характеристик в обычные, тематические параметры. Наиболее существенным при использовании спутниковой информации является метод перехода от оптических характеристик к тематическим параметрам.

В настоящем разделе рассматриваются способы, методы и процедуры определения оптических характеристик растительного покрова по спутниковой информации различного пространственного, временного и спектрального разрешения и перехода от этих характеристик к обычным, тематическим параметрам посева. Раздел начинается с вегетационных индексов. Дано их определение и приведены формулы, по которым рассчитываются различные вегетационные индексы. Среди индексов большое внимание уделяется такому вегетационному индексу, как NDVI, и приведены более подробные свойства этого индекса; показано несколько примеров карт, построенных на основании NDVI и связанных с различными тематическими параметрами. Будут рассмотрены методы кластеризации и распознавания образов применительно к многозональным изображениям, а также построение композитных изображений с последующим распознаванием ряда тематических картинок, основанных на информации с прибора ЕТМ+.

23.1. Перечень индексов и формул для их определения

Вегетационный индекс – это показатель, рассчитываемый в результате операций с сигналами, полученными в разных спектральных диапазонах (каналах) данных дистанционного зондирования, и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка. Эффективность вегетационного индекса, выведенного преимущественно эмпирически, определяется особенностями отражения. Основное предположение по использованию вегетационного индекса состоит в том, что некоторые математические операции с разными каналами данных дистанционного зондирования могут

дать полезную информацию о растительности. Это подтверждается множеством эмпирических данных. Второе предположение – это идея, что открытая почва на снимке будет формировать в спектральном пространстве прямую линию, так называемую почвенную линию, метод построения которой описан в работе Р. Каута и Дж. Томаса еще в 1976 году. Почти все распространенные вегетационные индексы используют только соотношение красного и ближнего инфракрасного каналов (RED, NIR), предполагая, что в ближней инфракрасной области лежит линия открытой почвы. Подразумевается, что эта линия означает нулевое количество растительности.

На настоящий момент имеются две различные идеи о направлении линий одинаковой растительности (изовегетационных линий): 1. Все изовегетационные линии сходятся в одной точке. Индексы, которые придерживаются этого предположения – это «ratio-based», относительные индексы, которые измеряют наклон линий между точкой конвергенции и точкой RED, NIR – соотношения в пикселе. Примерами являются индексы NDVI, SAVI, и RVI (см. определения индексов дальше). 2. Все изовегетационные линии идут параллельно почвенной линии. Эти индексы обычно называют «перпендикулярными» индексами, они измеряют перпендикулярное расстояние от почвенной линии до точки RED-NIR в пикселе. Примеры PVI, WDV и DVI.

Случай разреженной растительности

При всем своем разнообразии вегетационные индексы большей частью работают для территорий с разреженным растительным покровом очень плохо. Если растительный покров скудный, то спектр снимка в основном зависит от почвы. Почвы могут различаться очень сильно по отражению, даже если для анализа используются очень широкие спектральные диапазоны. В 1985 г. группами исследователей под руководством А. Хьюэта и К. Д. Элвиджа было показано, что почвенный фон сильно влияет на индексы. Если фон яркий, значение индекса будет меньше, если темный, индекс будет больше. Многие фоновые материалы – почва, камни, растительная подстилка – сильно варьируют в красном – ближнем инфракрасном диапазоне, и это может сильно изменить индекс. Для решения этих проблем более эффективным методом является применение анализа спектральных смесей.

Для определенных вегетационных индексов существуют свои пороги чувствительности к разреженности растительности, например NDVI не стоит применять, если растительный покров составляет меньше 30% общей площади. Соответствующие пороги для различных индексов приведены ниже:

RVI, NDVI, IPVI = 30 %

SAVI, MSAVI1, MSAVI2 = 15 %

DVI = 30 %

PVI, WDV, GVI = 15 %

Выбор вегетационного индекса

NDVI – самый распространенный и широко используемый индекс. Он прост для вычисления, имеет самый широкий динамический диапазон из распространенных вегетационных индексов и лучшую чувствительность к изменениям в растительном покрове. Индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного и атмосферного фона, кроме случаев с бедной растительностью. Для оценки состояния растительности на снимке с количественной точки зрения следует применять индекс NDVI, но не для территории с разреженным покровом.

Индекс PVI также получил достаточное распространение. Он имеет более узкий динамический диапазон и меньшую чувствительность и очень чувствителен к изменению атмосферы. Данный индекс относительно прост в использовании и нахождении почвенной линии, что важно для использования других индексов. Он лучше, чем NDVI, на изображениях с разреженной растительностью.

SAVI – хороший вариант индекса для исследования разреженной растительности. MSAVI также пригоден для этой цели, но он очень редко используется.

Многие индексы, корректирующие влияние почвы, требуют предварительной атмосферной коррекции. Если планируется использование вегетационных индексов для долговременного мониторинга, то необходимо очень внимательно проанализировать вариабельность почв и выполнить атмосферную коррекцию. Существуют некоторые нюансы в изменениях значений вегетационных индексов, если точка съемки отличается от надир, но это может быть не очень важно для рассматриваемого случая. В табл. 23.1 приведена классификация вегетационных индексов.

Таблица 23.1

Типы вегетационных индексов

Вегетационные индексы	Вегетационные индексы, минимизирующие влияние почвы	Вегетационные индексы, минимизирующие влияние атмосферы
RVI	SAVI	GEMI
NDVI	TSAVI	ARVI
IPVI	MSAVI	SARVI
WDVI	MSAVI2	GVI

Рассмотрим более подробно отдельные индексы.

Относительный вегетационный индекс (Ratio VI, RVI)

$$RVI = NIR/RED$$

Впервые индекс описан в работе Ц.Ф. Джордана в 1969 году. Это наиболее широко распространенный индекс растительности, хотя его редко так называют. Обычная практика в обработке данных дистанционного зондирования Земли – использование отношений каналов для

нивелирования различных эффектов альбедо. Отношение NIR к RED используется как вегетационный компонент снимка.

Параметры индекса: изовегетационные линии сходятся в начале координат; почвенная линия с наклоном = 1 проходит через начало координат; возможные значения – от 0 до бесконечности.

Нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference VI, NDVI)

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) = (RVI - 1) / (RVI + 1)$$

Впервые индекс описан в работе Дж. В. Роуза в 1973 году, но концепция этого вегетационного индекса впервые была представлена в работе Ф. Дж. Криглера еще в 1969 году. Одно из преимуществ NDVI состоит в том, что его значения изменяются от -1 до 1, в отличие от RVI (см. выше).

RVI и NDVI функционально равнозначны и связаны друг с другом следующим образом:

$$NDVI = (RVI - 1) / (RVI + 1).$$

Параметры индекса: изовегетационные линии сходятся в начале координат; почвенная линия с наклоном, равным 1, проходит через начало координат; возможные значения варьируют от -1 до +1.

Инфракрасный вегетационный индекс (Infrared Percentage VI, IPVI)

$$IPVI = NIR / (NIR + RED) = (NDVI + 1) / 2.$$

Впервые индекс описан в 1990 году в работе Р.Е. Криппера, который обнаружил, что вычитание красной компоненты из числителя необязательно, что делает этот индекс более быстрым с точки зрения вычислений. Индекс может принимать значения от 0 до 1, что устраняет необходимость хранить знак, так же как убирает концептуально странные, отрицательные значения индекса. Функционально IPVI и NDVI эквивалентны.

Параметры индекса: изовегетационные линии сходятся в начале координат; почвенная линия с наклоном, равным 1, проходит через начало координат; возможные значения изменяются от 0 до +1.

Разностный вегетационный индекс (Difference VI, DVI)

$$DVI = NIR - RED$$

Впервые индекс описан в работе А. Дж. Ричардсона в 1992 году, но упоминается в работе Т. М. Лиллесанда еще в 1987 году.

Параметры индекса:

- перпендикулярный индекс;
- изовегетационная линия может иметь произвольный наклон и проходит через начало координат;
- возможные значения – любые.

Перпендикулярный вегетационный индекс (Perpendicular VI, PVI)

$$PVI = \sin(\alpha) * NIR - \cos(\alpha) * RED,$$

где α – угол между почвенной линией и осью NIR.

Впервые индекс описан в работе А. Дж. Ричардсона в 1977 году. Этот индекс может рассматриваться как обобщение DVI с различным наклоном почвенной линии. PVI довольно чувствителен к влиянию атмосферы. Сравнение значений PVI для данных различных дат некорректно, если не была проведена атмосферная коррекция этих данных.

Параметры индекса:

- перпендикулярный индекс;
- изовегетационные линии параллельны почвенной линии;
- почвенная линия может иметь разный наклон и проходит через начало координат;
- возможные значения изменяются от -1 до +1.

Взвешенный разностный вегетационный индекс (Weighted Difference VI, WDWI)

$$WDVI = NIR - g * RED,$$

где g – наклон почвенной линии.

Впервые индекс описан в работе Дж. Г. Клеверса в 1988 году. Индекс связан с PVI примерно так же, как IPVI связан с NDVI. WDWI – это математически более простой вариант PVI, но имеет неограниченный диапазон значений. Как и PVI, WDWI очень чувствителен к атмосферному воздействию.

Параметры индекса:

- перпендикулярный индекс;
- изовегетационные линии параллельны почвенной линии;
- почвенная линия может иметь разный наклон и проходит через начало координат;
- возможные значения – любые.

Индексы, устойчивые к влиянию почвы

Различные почвы имеют разные спектры отражения. Как обсуждалось выше, все вегетационные индексы подразумевают, что существует почвенная линия, которая имеет один наклон в пространстве RED–NIR. Однако часто случается так, что почвы различаются очень сильно и имеют разные углы наклона на одном и том же снимке. Таким же образом понятие об изовегетационных линиях (параллельных или пересекающихся в точке 0) является не совсем верным, поскольку изменения влажности почвы, которые идут вдоль изовегетационных линий, будут вносить ошибки в определение значения индекса. Проблема почвенного шума – увеличение влияния почвы на отраженный сигнал от посевов –

наиболее актуальна для тех территорий, где растительность разрежена. Эта группа индексов стремится уменьшить почвенный шум, изменяя характер поведения изовегетационных линий. Все они являются относительными, и способ, которым они пытаются уменьшить почвенный шум – это сдвиг точки, где встречаются изовегетационные линии.

Эти индексы уменьшают почвенный шум ценой уменьшения динамического диапазона индекса. Они менее чувствительны к изменению растительного покрова, чем NDVI, но более чувствительны, чем PVI.

Почвенный вегетационный индекс (Soil Adjusted VI, SAVI)

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} (1 + L),$$

где $L = [0;1]$; $L = 0$ для наибольшего индекса облиствения; $L = 1$ для наименьшего, оптимальное значение $L = 0,5$; $L + 1$ – множительный фактор, присутствующий в SAVI и MSAVI и приводящий к тому, что их значения варьируют от -1 до 1, введен для того, чтобы свести эти индексы к виду NDVI при L , стремящемся к 0.

Индекс, введенный А. Р. Хьюэтом в 1988 году, представляет собой нечто среднее между относительными и перпендикулярными индексами. Изовегетационные линии не являются параллельными и не сходятся в одной точке. Исходно формулировка индекса была основана на измерении отражения хлопка и пастбищной травы на темной и светлой почвах, и эмпирическом уточнении фактора L до тех пор, пока индекс не начинал выдавать одинаковый результат для разных типов почв. В результате получился относительный индекс, где точка пересечения изолиний не является точкой 0. Точка пересечения должна находиться в квадранте отрицательных значений в RED и NIR, что приводит к тому, что изовегетационные линии являются более параллельными в области положительных RED и NIR, чем в случае RVI, NDVI и IPVI. Теоретические основы этого индекса построены на простом излучательном переносе, что делает этот индекс одним из самых теоретически обоснованных. С другой стороны, теоретические вычисления дают существенно различающийся корректирующий фактор L для LAI = 1 (0,5) вместо эмпирически найденного (0,75). Показано, что корректирующий фактор может варьировать от 0 (для очень плотных областей) до 1 (для очень разреженных областей). В большинстве приложений для промежуточных плотностей растительности используется стандартное значение 0,5.

Параметры индекса:

- относительный индекс;
- изовегетационные линии сходятся в квадранте отрицательных значений RED и NIR;
- почвенная линия имеет наклон, равный 1, и проходит через точку 0;
- возможные значения варьируют от -1 до +1.

Трансформированный почвенный вегетационный индекс (Transformed Soil Adjusted VI, TSAVI)

$$TSAVI = \frac{s \times (NIR - s \times RED - \alpha)}{(\alpha \times NIR + RED - \alpha \times s + X \times (1 + s^2))},$$

где α – координата пересечения почвенной линии с осью NIR; s – наклон почвенной линии; X – коэффициент коррекции для уменьшения почвенного шума (в статье-оригинале $X=0,08$).

TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index) – трансформированный корректированный почвенный индекс растительности, разработан Ф. Багетом в 1989 году. Этот индекс предполагает, что почвенная линия может иметь произвольный наклон и пересечение с осью координат, и позволяет использование этих величин для уточнения вегетационного индекса. Это позволило бы избежать неопределенности в выборе фактора L в SAVI, если бы не необходимость введения дополнительного параметра. Параметр X введен для «корректировки уменьшения фонового почвенного влияния». В работах автора этот фактор был равен 0,08. Точка пересечения изовегетационных линий лежит между точкой 0 и точкой, используемой в индексе SAVI для $L=0,5$.

Параметры индекса:

- относительный индекс;
- изовегетационные линии сходятся в квадранте отрицательных значений RED и NIR;
- почвенная линия имеет произвольный наклон и точку пересечения;
- возможные значения варьируют от -1 до +1.

Модифицированный почвенный вегетационный индекс (Modified Soil Adjusted VI, MSAVI)

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} (1 + L),$$

$$\text{где } L = 1 - \frac{2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - RED)}}{2}.$$

MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) – модифицированный корректированный почвенный индекс разработан группой под руководством Дж. Ку в 1994 году. Как сказано выше, корректирующий фактор L для индекса SAVI зависит от наблюдаемого растительного покрова, что ведет к замкнутому кругу – необходимо узнавать состояние вегетационного покрова перед вычислением индекса, который должен описать растительность. Основная идея MSAVI была в том, чтобы найти изменяющийся корректировочный фактор L . В этом индексе используется корректировочный

фактор, полученный в результате вычисления NDVI и WDVl, что приводит к тому, что изовегетационные линии не сходятся в одной точке.

Параметры индекса:

- относительный индекс;
- изовегетационные линии пересекают почвенную линию в разных точках;
- почвенная линия может иметь произвольный наклон и проходит через точку 0;
- возможные значения изменяются в пределах от -1 до +1.

Индексы, устойчивые к влиянию атмосферы

Состояние атмосферы все время изменяется. Воздушная прослойка поглощает некоторое количество света, проходящее через нее, а также рассеивает его благодаря взвешенным аэрозолям. Атмосфера может изменяться очень сильно на протяжении одной сцены, особенно в условиях горного рельефа. Это изменяет количество света, попадающее на приборы, и может вызвать ошибки в вычислении индексов. Особенно сильно эта проблема сказывается на сравнении результатов, полученных в разное время. Следующие индексы позволяют решить в какой-то мере эту проблему без применения специальной атмосферной коррекции.

Эти индексы достигают уменьшения чувствительности к влиянию атмосферы ценой уменьшения динамического диапазона. В целом они менее чувствительны к изменению растительного покрова, чем NDVI. Если растительность невысока, они подвержены сильному влиянию почвенного слоя.

Индекс глобального мониторинга окружающей среды (Global Environmental Monitoring Index, GEMI)

$$GEMI = E(1 - 0,25E) - \frac{RED - 0,125}{1 - RED},$$
$$E = \frac{2(NIR^2 - RED^2) + 1,5NIR + 0,5RED}{NIR + RED + 0,5},$$

GEMI (Global Environmental Monitoring Index) – индекс глобального мониторинга окружающей среды, разработанный Б. Пинти в 1991 году. При этом была предпринята попытка избежать необходимости проводить детальную атмосферную коррекцию путем конструирования общего набора атмосферной коррекции для вегетативного индекса. Не была приведена подробная аргументации применимости этого индекса, кроме того, что опытным путем была установлена его нечувствительность к атмосферному влиянию. В настоящее время различными авторами проводятся исследования этого индекса с целью оценки его пригодности в различных условиях.

Параметры индекса:

- нелинейный;
- сложные вегетационные изолинии;
- возможные значения варьируют от 0 до 1.

Вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (Atmospherically Resistant VI, ARVI)

$$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb},$$

где $Rb = RED - a \cdot (RED - BLUE)$; как правило, $a = 1$, при малом покрытии растительности и неизвестном типе атмосферы $a = 0,5$.

Первый атмосфероустойчивый вегетационный индекс введен Я. Дж. Кауфманом и Д. Танге в 1992 году. Они также предложили провести такую же замену и в индексе SAVI, получив индекс SARVI (атмосфероустойчивый скорректированный почвенный вегетативный индекс – Soil adjusted Atmospherically Resistant Vegetation Index).

Подобная замена возможна и в индексе MSAVI2, что приводит к ASVI (Atmosphere-Soil-Vegetation Index – атмосферно-почвенный вегетационный индекс). Было показано, что этот класс индексов немного более чувствителен к изменению растительного покрова, чем GEMI, и немного менее чувствителен к почвенному и атмосферному шуму, чем GEMI, если растительность средняя или высокая. Устойчивость к атмосферному и почвенному шуму резко падает, если растительный покров низкий.

Параметры индекса:

- относительный;
- изовегетационные линии ведут себя как в исходных индексах;
- почвенные линии ведут себя как в исходных индексах;
- возможные значения – от -1 до +1.

Почвенный вегетационный индекс, устойчивый к влиянию атмосферы (Soil Adjusted and Atmospherically Resistant VI, SARVI)

$$SARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb} (1 + L).$$

Вегетационный индекс зелени (Green VI, GVI)

$$GVI = -0,29 \cdot MSS4 - 0,56 \cdot MSS5 + 0,6 \cdot MSS6 + 0,49 \cdot MSS7;$$

$$VI = -0,2848 \cdot TM1 - 0,2435 \cdot TM2 - 0,5436 \cdot TM3 + 0,7243 \cdot TM4 + 0,0840 \cdot TM5 - 0,1800 \cdot TM7,$$

где $MSSn$ – в n-канале сенсора MSS аналогично для ТМ.

Существует несколько GVI. В их основе лежит использование двух или более участков открытой почвы для построения почвенной линии,

затем используется ортогонализация Грама–Шмидта (Gram–Schmidt orthogonalization) для нахождения «зеленой» линии («greenness» line), которая проходит через точку 100 % (очень плотного) растительного покрова и является перпендикуляром к почвенной линии. Расстояние в пикселях спектрального пространства от почвенной линии вдоль по «зеленой» оси – это и есть значение индекса. PVI – это 2-канальная версия индекса. Р. Каус и Дж. Томас в 1976 году разработали 4-канальный вариант индекса для MSS-снимков, Е. Крис и Р. Сикон в 1984 году создали 6-канальный вариант для ТМ, Р. Джексон в 1983 году описал, как создать n-канальную версию.

Параметры индекса:

- перпендикулярный вегетационный индекс, использующий n-каналов;
- изовегетационные линии параллельны почвенной линии;
- почвенная линия может иметь произвольный наклон n-мерном пространстве;
- возможные значения – от -1 до +1.

23.2. NDVI – теория и практика

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности – простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова.

Как уже отмечалось, этот индекс вычисляется по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра, а *RED* – отражение в красной области спектра.

Согласно этой формуле, плотность растительности (NDVI) в определенной точке изображения равна разности интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазонах, деленной на сумму их интенсивностей. Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных не зависящих от прочих факторов участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0,6...0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7...1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Иными словами, высокая фотосинтетическая активность, обусловленная, как правило, плотным растительным покровом, приводит к меньшему отражению в красной области спектра и к большему – в инфракрасной. Отношение этих показателей позволяет четко отделять и анализировать

растительные объекты от прочих природных объектов. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещенности снимка, облачность, дымка, поглощение радиации атмосферой и др. (рис. 23.1).

NDVI может быть рассчитан на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющих спектральные каналы в красном (0,55...0,75 мкм) и инфракрасном диапазонах (0,75...1,0 мкм). Алгоритм расчета NDVI встроен практически во все распространенные пакеты программного обеспечения, связанные с обработкой данных дистанционного зондирования, такие, как Arc View Image Analysis, ERDAS Imagine, ENVI, Ermapper, Scanex MODIS Processor, ScanView и др. (табл. 23.2).

Таблица 23.2

Комбинации каналов камер спутников, используемых для расчета NDVI

MSS Landsat(4,5)	5 (0,6...0,7 мкм), 6 (0,7...0,8 мкм) или 7 (0,8...1,1 мкм)
TM Landsat(4,5)	3 (0,63...0,69 мкм), 4 (0,76...0,90 мкм)
ETM+ Landsat7	3 (0,63...0,69 мкм), 4 (0,75...0,90 мкм)
AVHRR NOAA	1 (0,58...0,68 мкм), 2 (0,72...1,0 мкм)
MODIS Terra(Aqua)	1 (0,62...0,67 мкм), 2 (0,841...0,876 мкм)
ASTER Terra	2 (0,63...0,69 мкм), 3 (0,76...0,86 мкм)
LISS IRS(1C/1D)	2 (0,62...0,68 мкм), 3 (0,77...0,86 мкм)

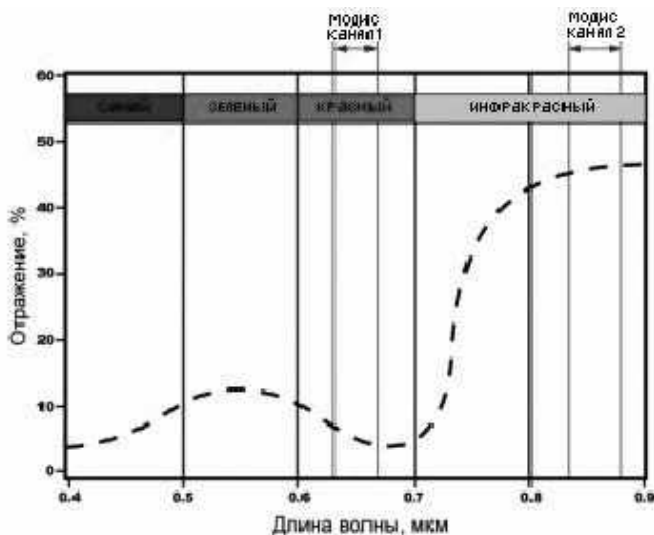


Рис. 23.1. Участки характеристической кривой отражения растительности (усредненной), используемые для расчета NDVI с помощью данных ИСЗ «MODIS»

Со времени разработки алгоритма для расчета NDVI появилось довольно много его модификаций, предназначенных для уменьшения влияния различных помехообразующих факторов – поглощение аэрозолями атмосферы (atmospheric – resistant vegetation index – ARVI), отражение от почвенного слоя (soil adjusted vegetation index – SAVI) и др. Для расчета этих индексов используются формулы, учитывающие отношение между отражающей способностью различных природных объектов и растительностью в других диапазонах, помимо красного и инфракрасного, что делает их более сложными в применении. Существуют также индексы, основанные на NDVI, но корректирующие сразу несколько помехообразующих факторов, как, например, EVI (Enhanced vegetation index). Для отображения индекса NDVI используется стандартизованная непрерывная градиентная или дискретная шкала, показывающая значения в диапазоне от -1 до 1, или в так называемой масштабированной шкале в диапазоне от 0 до 255 (используется для отображения в некоторых пакетах обработки данных дистанционного зондирования, соответствует количеству градаций серого), или в диапазоне 0..200 (-100..100), что более удобно, так как каждая единица соответствует 1 % изменения показателя (рис. 23.2).



Рис. 23.2. Дискретная шкала NDVI

Благодаря особенности отражения в NIR – RED-областях спектра, природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение NDVI, что позволяет использовать этот параметр для их идентификации (табл. 23.3).

Таблица 23.3

Значения NDVI для различных объектов

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0,1	0,5	0,7
Разреженная растительность	0,1	0,3	0,5
Открытая почва	0,25	0,3	0,025
Облака	0,25	0,25	0
Снег и лед	0,375	0,35	-0,05
Вода	0,02	0,01	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

Но, как правило, для задач, связанных с картографированием растительности, используют немасштабированную шкалу, начинающуюся с 0 (значения NDVI меньше 0 растительность принимать не может). Для перевода из шкалы $[-1, 0, 1, 0]$ в $[0, 200]$ (масштабирование) используется формула:

$$\text{Масштабированный NDVI} = 100 * (\text{NDVI} + 1).$$

Существует устойчивая корреляция между показателем NDVI и продуктивностью для различных типов экосистем (рис. 23.3). Это свойство довольно активно используется для регионального картирования и анализа различных типов ландшафтов, при оценке ресурсов и площадей биосистем в масштабе стран и континентов. Однако чаще расчет NDVI производится на основе серии разновременных (разносезонных) снимков с заданным временным разрешением, что позволяет получать динамическую картину процессов изменения границ и характеристик различных типов растительности (месячные, сезонные и годовые вариации).

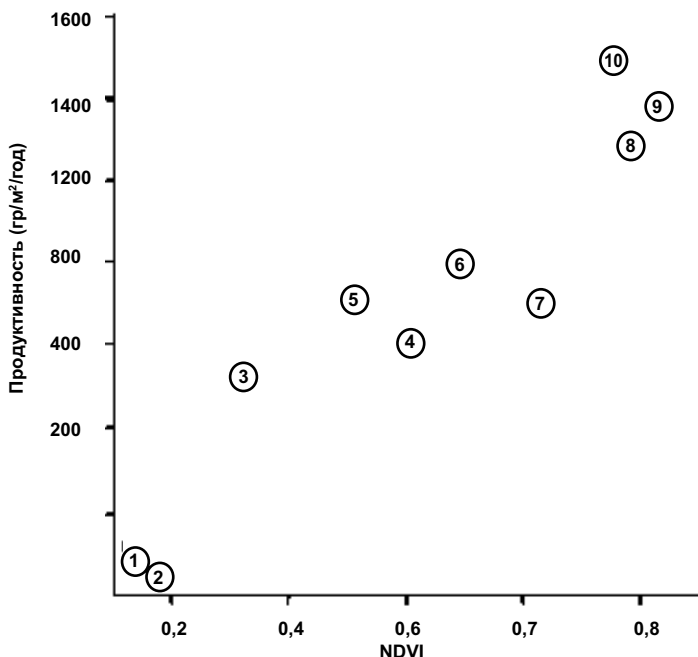


Рис. 23.3. Продуктивность различных типов экосистем:

1 Тундра	6 Бореальные леса (хвойные)
2 Пустыня	7 Сельскохозяйственные земли
3 Лесотундра	8 Хвойно-широколиственные леса
4 Степи и луга	9 Лиственные леса
5 Саванны	10 Дождевые прибрежные леса

Являясь искусственным безразмерным показателем, NDVI используется для измерения эколого-климатических характеристик растительности, но в то же время может показывать значительную корреляцию с некоторыми параметрами совсем из другой области:

- продуктивностью (временные изменения);
- биомассой;
- влажностью и минеральной (органической) насыщенностью почвы;
- испаряемостью (эвапотранспирацией);
- количеством выпадающих осадков;
- мощностью и характеристиками снежного покрова.

Зависимость между этими параметрами и NDVI, как правило, не прямая и связана с особенностями исследуемой территории, ее климатическими и экологическими характеристиками, кроме этого, часто приходится учитывать несоответствие времени измерения параметра и NDVI.

С учетом этих особенностей, карты NDVI часто используются в качестве промежуточных дополнительных этапов для проведения более сложных типов анализа, результатами которых могут являться карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты типов ландшафтов, растительности и природных зон, почвенные, аридные, гидрологические и другие эколого-климатические карты. На его основе возможно получение численных данных для использования в расчетах оценки и прогнозирования урожайности и продуктивности, биологического разнообразия, степени нарушенности и ущерба от различных естественных и антропогенных бедствий, аварий и т.д. Часто эти данные используются для вычисления других, универсальных и территориально привязанных индексов: LAI – индекс листовой поверхности, FPAR – индекс фотосинтетической активной радиации, поглощаемой растительностью и пр.

В целом главным преимуществом NDVI является простота его получения: для вычисления индекса не требуется никаких дополнительных данных и методик, кроме непосредственно самой космической съемки и знания ее параметров. Так, благодаря минимальному временному разрешению данных MODIS/Terra, вычисление NDVI на их основе может давать оперативную информацию об эколого-климатической обстановке и возможность отслеживать динамику различных параметров с периодичностью до одной недели. А большой пространственный охват позволяет проводить мониторинг территорий, соразмерный с площадями областей и целых стран. Камеры высокого разрешения типа «Landsat», «IRS», «Aster» позволяют следить за состоянием объектов размерами вплоть до отдельного поля или лесного выдела.

Следует, однако, учитывать и главные недостатки использования NDVI-индекса:

- невозможность использования данных, не прошедших этап радиометрической коррекции (калибровки);

– погрешности, вносимые погодными условиями, сильной облачностью и дымкой – их влияние можно частично скорректировать использованием улучшенных коэффициентов и композитных изображений с сериями NDVI за несколько суток, недель или месяцев (MVC – Maximum Value Composite). Усредненные значения позволяют избежать влияния случайных и некоторых систематических погрешностей. Как показывает практика, это очень часто применяемый подход для подготовки данных для создания карт NDVI; примеры показанные в дальнейшем, к сожалению, сделаны на основе разовой съемки, ошибки которой не скорректированы с помощью MVC;

– необходимость для большинства задач сравнения полученных результатов с предварительно собранными данными тестовых участков (эталонов), в которых должны учитываться сезонные эколого-климатические показатели как самого снимка, так и тестовых площадок на момент сбора данных. Особенно значимыми данные материалы становятся при расчетах продуктивности, запасах биомассы и прочих количественных показателях;

– возможность использования съемки только в период вегетации для исследуемого региона.

NDVI не эффективен на снимках, полученных в период ослабленной или не вегетирующей в этот период растительности.

Ниже приведены несколько примеров.

Важнейшей областью применения NDVI остается область сельского хозяйства. Четкость обрисовки полей, высокая градиентность посевов и другие особенности отображения находят активное применение в земле-устроительных, картографических и кадастровых работах (рис. 23.4).

Динамические (разносезонные) карты NDVI позволяют также получать количественные оценки прогнозируемого урожая различных сельскохозяйственных культур, отмечать особенности сезонной вегетации, ее нарушения, оценивать качество проведенных работ, производить планирование и т.д. (рис. 25.5).

Задачи оценки урожайности рисовых посевов обычно представляют трудности, связанные с шумовым эффектом сигнала воды на затопляемых чеках. Построение индекса NDVI позволяет получать реальную продуктивность посевов и производить количественные оценки урожая.

NDVI может быть использованы для мониторинга реального использования земель, выявления заброшенных полей, оценки эффективности сельскохозяйственного оборота, отслеживания зарастания и закустаривания, слежения за эрозионными и другими динамическими процессами в зоне целинных земель (рис. 23.6).

На рис. 23.7 приведена карта изменения NDVI по Северному полушарию Земли, отражающая наблюдаемые изменения климата.

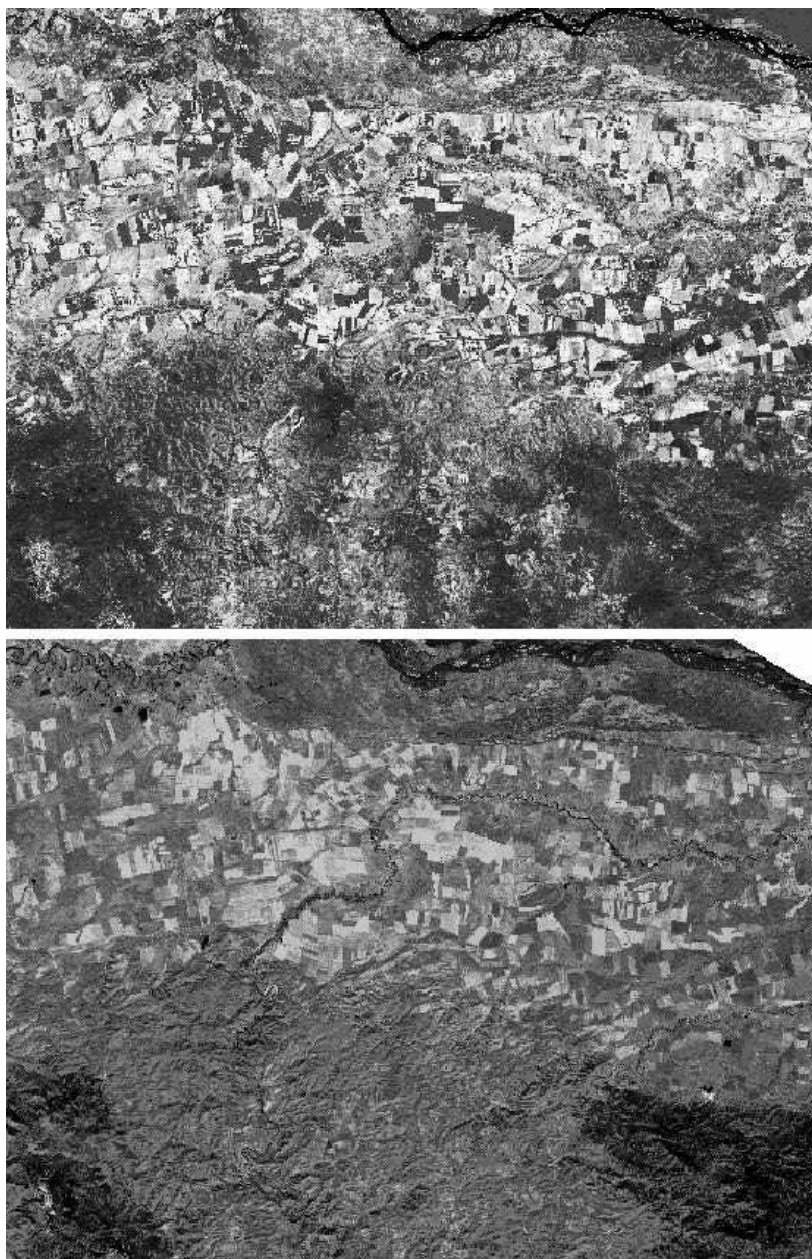


Рис. 23.4. Крупномасштабное картирование посевов и пастбищ, «Landsat», ETM+. Республика Горный Алтай, Усть-Канский район. 08.2000 г.

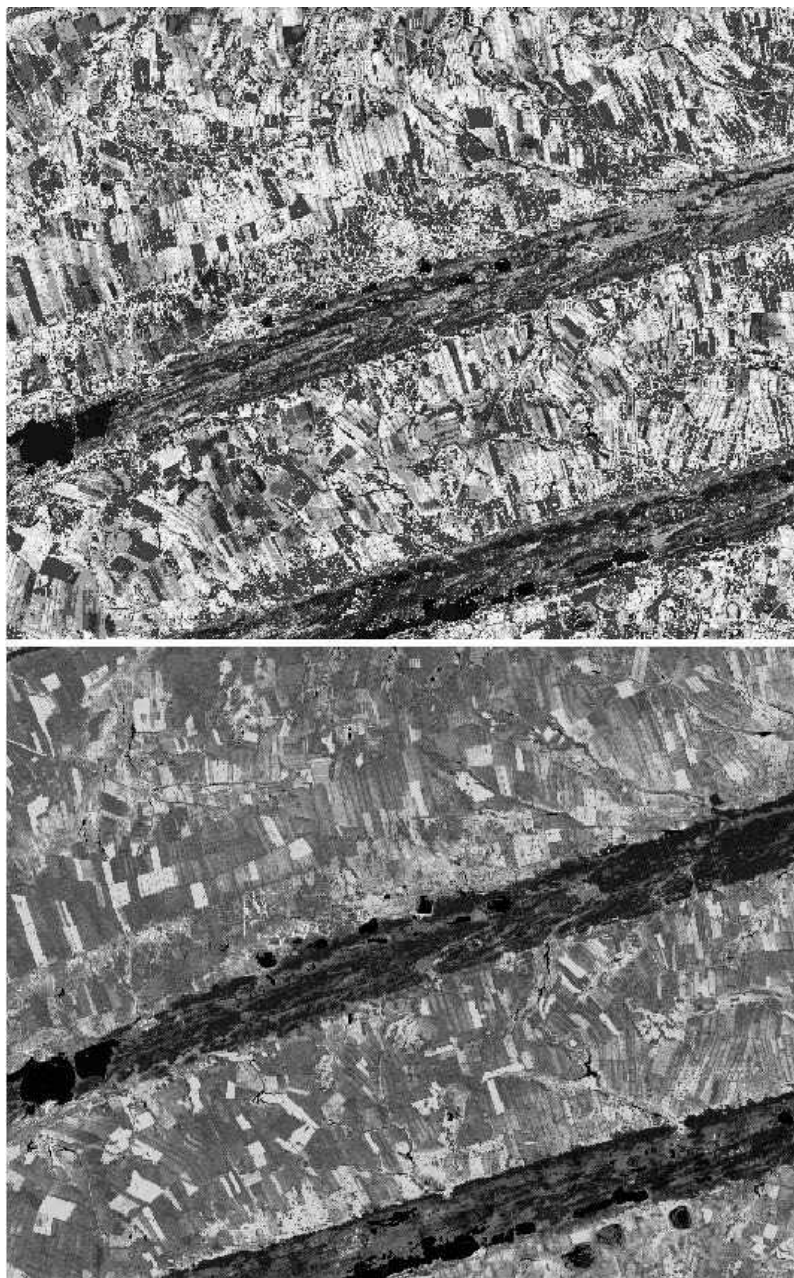


Рис. 23.5. Мониторинг всходов сельскохозяйственных культур, «Landsat», ETM+. Алтайский край, Мамонтовский район. 07.1999–08.1999 г.

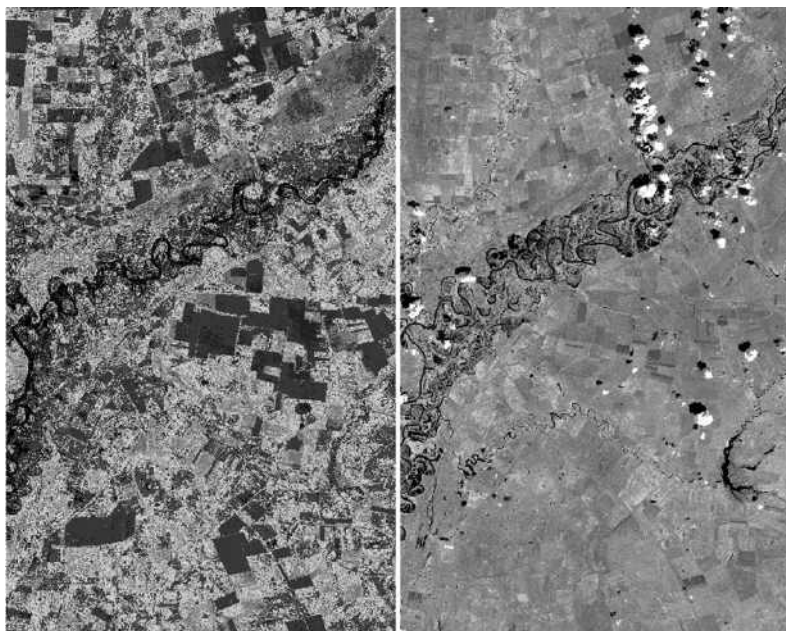


Рис. 23.6. Мониторинг использования сельскохозяйственных земель, картографирование и анализ залежных земель, «IRS Liss3». Оренбургская обл., Первомайский район. 05–07.2000 г.

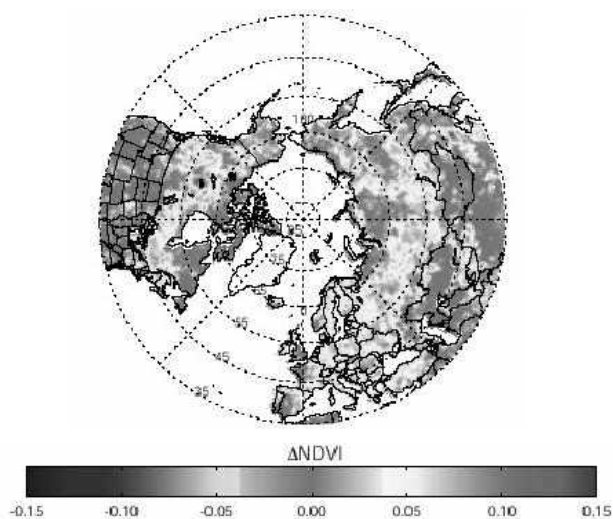


Рис. 23.7. Изменение осредненных значений NDVI по Северному полушарию за период 1982–1991 гг.

23.3. Применение методов распознавания образов при дистанционном зондировании. Классификация и кластерный анализ

Распознавание образов с точки зрения применения в дистанционном зондировании представляет собой машинно-ориентированную методологию анализа данных дистанционного зондирования, используемую с целью отнесения элементарного наблюдения (измерения), или их совокупности, к некоторому из конечного набора классов. Физическая форма образа при этом, вообще говоря, для распознающей системы не имеет существенного значения, а под образом обычно понимается любой корректно определенный набор измерений. Однако на этапе отбора или конструирования информативных признаков распознаваемых объектов (рабочего словаря признаков) или на этапе интерпретации данных, получаемых на выходе распознающих систем, физический аспект, физические связи между измерением и изучаемой предметной областью приобретают основополагающее значение. Типичный в этом смысле пример применения методов распознавания дает классификация данных мультиспектрального зондирования с ИСЗ сельскохозяйственных территорий по типам сельскохозяйственных культур, а также оценка их площадей и состояния как текущего, так и по отношению к прогнозируемому урожаю. Этот класс задач является, вероятно, одновременно и одним из наиболее сложных и трудоемких.

Формально любая система распознавания может рассматриваться как система, реализующая на пространстве образов (измерений, наблюдений, признаков и т.п.) отображение в «фактор-пространство» классов на основе некоторого правила принятия решений (классификационного правила). В тривиальном случае речь может идти о классах эквивалентности, образующих разбиение исходного множества наблюдений, при задании на нем какого-либо отношения эквивалентности. Блок выделения признаков может отсутствовать, если классификатор работает непосредственно с вектором измерений.

Методы распознавания образов можно условно разделить на два типа – статистические (вероятностные) и все остальные. Первые предполагают статистический характер распределения образов по классам и по ряду причин особенно подходят для прикладных исследований в дистанционном зондировании. Они требуют оценки функций распределения вероятностей принадлежности образов классу и, в зависимости от способа получения этих оценок, бывают параметрическими и непараметрическими, а по отношению к выбору классификатора являются применением теории статистических решений или дискриминантного анализа. Оптимальными здесь являются байесовские классификаторы, минимизирующие средний риск неправильной классификации. Классификаторы, которые строятся на основе «обучающих» выборок в пространстве образов, приводят к системам распознавания с обучением (с учителем).

Широкое распространение получил метод классификации на основе квадратичных решающих границ, которые определяются из условия максимума отношения правдоподобия в предположении гауссовского типа распределения. Квадратичное решающее правило заключается в выборе класса ω_i , который дает наибольшее значение функции $g_i(\vec{x})$:

$$g_i(\vec{x}) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2} \ln \left| \sum_i \right| - \frac{1}{2} (\vec{x} - \vec{M}_i)^T \sum_i^{-1} (\vec{x} - \vec{M}_i),$$

где $\vec{x}$ – вектор многоспектральных измерений; $\vec{M}_i$ – средний вектор класса ω_i , оцениваемый по обучающим выборкам; $\sum_i$ – ковариационная матрица класса, $p(\omega_i)$ – априорная вероятность класса ω_i , т.е. вероятность наблюдения образа из класса безотносительно к любой иной информации. Заметим, что когда по обучающим выборкам статистические параметры уже определены, то в процессе классификации должны вычисляться только квадратичные формы для предъявляемых векторов $\vec{x}$, для чего можно использовать специальные быстрые алгоритмы.

Реальные системы распознавания не сводятся только лишь к выполнению того или иного алгоритма классификации. Существуют более сложные иерархические (многоуровневые) системы распознавания и системы, адаптирующиеся к виду входных данных и характеру решаемой задачи. Хорошим примером систем подобного типа может служить система распознавания природных объектов на многозональных аэроснимках, разработанная Т. Мацуяма и др. в университете Киото, Япония.

В первое десятилетие развития методов распознавания образов в применении к дистанционному зондированию с ИСЗ усилия были в основном сосредоточены на принципах поэлементной обработки, т.е. сцена классифицировалась на основе векторов измерений, ассоциированных с каждым отдельным пикселем. Но для многих случаев лучшие результаты могут быть достигнуты, если в дополнение к спектральным данным используется пространственная информация, содержащаяся в изображении. В связи с этим получил развитие метод так называемой контекстуальной классификации. Он основан на предположении, что вид земного покрова, который связывается с заданным пикселем, т.е. его «класс», является зависимым от классов, соседних с рассматриваемым пикселем. В рамках статистической классификации речь идет о том, чтобы повысить вероятность правильной классификации, принимая в расчет не только спектральные измерения для отдельного пикселя, но и измерения для его «соседей», а, возможно и классы, к которым соседние пиксели относятся. Классификаторы, оперирующие, помимо классифицируемого пикселя, также и его окрестностью (контекстом), называются контекстными классификаторами. Очевидно, что при их использовании требования по памяти и быстродействию, предъявляемые к вычислительным средствам, будут более жесткими. Поэтому при реализации таких алгоритмов обычно ориентируются на применение

ЭВМ с повышенным быстродействием или параллельных многопроцессорных систем. Один из подходов и результаты его экспериментальной реализации приведены в работе Ф. Свейна и др. Авторы, рассматривая изображение как двумерный случайный процесс и следуя общей байесовской стратегии (минимального риска), строят составное правило принятия решений (классификации), позволяющее достичь значительного улучшения точности классификации. Так, на имитационных данных, соответствующих сельскохозяйственной сцене с разрешением сканера TM LANDSAT D, точность классификации при использовании 8-пиксельной окрестности превысила 95 % при 82,5 % для безконтекстного классификатора.

Нашли свое применение методы статистической классификации, сопряженные с предварительной сегментацией изображения в предположении, что собственно объекты, подвергаемые классификации (результат сегментации) довольно велики в сравнении с элементом разрешения. В этих случаях основная вычислительная нагрузка приходится на этап обработки, который скорее относится к методам обработки изображений, а не распознавания образов.

Как отмечалось, существует ряд причин использования статистических методов распознавания в дистанционном зондировании. Одной из них является возможное перекрытие классов в пространстве измерений. На практике это приводит к принятию классификатором ошибочных решений, так как в пространстве измерений имеются области, где представители разных классов неразличимы. Статистический же подход позволяет минимизировать частоту появления ошибочных решений. Вообще, необходимо отметить, что вопрос о количественной оценке качества распознавания достаточно сложен. В дистанционных исследованиях оценка ошибочной классификации обычно приводится либо по контрольным данным (т.е. данным с известным распределением по классам), либо на основе индикатора качества классификаторов – статистической разделимости классов. Между статистической разделимостью и вероятностью ошибочной классификации существует обратная зависимость: чем больше первая, тем меньше последняя.

Известно множество мер (критериев) статистической разделимости классов. Часто употребляемые из них – дивергенция и расстояние Джеффриса – Матуситы. Эти меры связаны с отношением правдоподобия для пар классов и выражаются через плотности условной вероятности для классов. Дивергенция D_{ij} классов ω_i и ω_j записывается в виде

$$D_{ij} = E \left[L_{ij}(\vec{x}) | \omega_i \right] + E \left[L_{ij}(\vec{x}) | \omega_j \right],$$

где L_{ij} – логарифмическое отношение правдоподобия, $L_{ij} = \ln p(\vec{x} | \omega_i) - \ln p(\vec{x} | \omega_j)$, а $E \left[L(\vec{x}) | \omega_i \right]$ – математическое ожидание, т.е.

$$E \left[L_{ij}(\vec{x} | \omega_i) \right] = \int_x L_{ij}(\vec{x}) \cdot p(\vec{x} | \omega_i) d\vec{x}.$$

Расстояние Джеффриса – Матуситы формально определяется таким образом:

$$J_{ij} \left\{ \int_x \left[\sqrt{p(\vec{x}|\omega_i)} - \sqrt{p(\vec{x}|\omega_j)} \right]^2 d\vec{x} \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

В приведенных выражениях $p(\vec{x}|\omega_i)$ – функция условной плотности вероятности. Разъяснение смысла этих мер и их применение как критерия разделимости для m -классов можно найти в соответствующих работах. Мы же отметим тот факт, что наличие подобных мер разделимости классов позволяет не только оценивать качество классификации, но и идти дальше, т.е. пытаться найти преобразование пространства измерений (признаков) в новое пространство описаний объектов, которое будет оптимальным в смысле упомянутых выше мер.

Следующий обширный набор методов анализа данных дистанционного зондирования, примыкающий к статистическим методам, дает кластерный анализ. Он обеспечивает проведение так называемой неконтролируемой классификации, полезной в случае малого числа (или полного отсутствия) обучающих выборок. Кластеризация в статистической интерпретации представляет собой анализ совокупности векторов измерений в предположении о существовании тенденции к группировке измерений вблизи мод распределения (или смеси распределений) по классам. В таких случаях нужно уметь разделить совокупность на подклассы, каждый из которых имеет одномодальную и почти нормальную функцию плотности вероятности. Кластерный анализ оперирует такими понятиями, как расстояние в пространстве образов между точками пространства, расстояние между группами (кластерами) точек, внутрикластерное расстояние, или дополнительным к расстоянию понятием «сходства» между объектами, а также понятием критерия кластеризации. Широко распространены алгоритмы кластеризации с использованием евклидовой метрики, L_1 - расстояния, расстояния Махаланобиса, Бхаттачария, Колмогорова и т.п. Методы кластерного анализа подробно рассмотрены в ряде работ. Вероятно, из-за интуитивно легко воспринимаемой эвристической основы кластерный анализ наряду со статистическими методами одним из первых был применен для обработки дистанционных данных. Однако опыт использования в задачах изучения природных ресурсов Земли выявил специфику кластерного анализа.

Заметим, что методы кластеризации разрабатывались с целью выявления «естественной» структуры данных, предъявляемых к распознаванию. Предположение о существовании подобной структуры обычно выдвигается при попытке интерпретировать данные, исследуя какое-либо (например графическое) их представление. Рассмотрим простейший пример, типичный для сельскохозяйственных применений данных дистанционного зондирования. Пусть имеется набор многоспектральных обучающих

образов, о которых известно, что они относятся к полям пшеницы. На плоскости в осях, отвечающих видимому и ближнему ИК-диапазонам длин волн, эти данные изобразятся в виде некоторого распределения точек. Если на основе наших знаний о полях пшеницы, ее физиологии, времени года и т.п. мы можем интерпретировать естественную структуру этого множества данных, как в известной мере достоверно отражающую различия в стадиях зрелости, сортовые различия или типы подстилающих почв и т.п., то можно говорить, что класс «пшеница» имеет многомодальную функцию плотности вероятности. В этом случае можно пытаться разбить исходный класс на одномодальные подклассы и получить их характеристики. Но на практике нам чаще не известны объекты, которые порождают ту или иную совокупность данных в пространстве измерений. При обычном ходе обработки данных дистанционного зондирования кластеризация (или классификация) предшествует идентификации получающейся кластерной структуры данных. Одна из особенностей кластеризации состоит в том, что для реальных данных с мультиспектральных сканеров разбиение их на кластеры может быть неоднозначным как по количеству кластеров, так и по определению разделяющих границ между ними. Целям выбора наилучшего из разбиений и служит критерий кластеризации (функционал качества кластеризации). Он связывает меру кластеризации с каждым назначением точек данных в кластеры. Одним из простейших и широкоизвестных критериев качества является сумма квадратов ошибок (СКО), минимизация которой отвечает стремлению получить максимально «плотные» кластеры. Существование критериев качества разбиения пространства образов позволяет строить итерационные процедуры кластеризации, минимизирующие выбранный критерий, который выступает тогда в роли целевой функции. В случае СКО это записывается в виде

$$CKO = \sum_{j=1}^n \sum_{x_i \in C_j} \left\| \bar{x}_i - \bar{x}_j \right\|^2 \rightarrow \min ,$$

где $\bar{x}_j$ – вектор среднего значения для j -го кластера; C_j – набор точек данных, принадлежащих j -му кластеру. Говоря по-иному, это соответствует минимизации суммы внутрикластерных дисперсий.

Однако, несмотря на существование большого количества конкретных кластерных алгоритмов, прямое применение их в обработке мультиспектральных изображений редко оказывается удовлетворительным без привнесения в процесс кластеризации некоторых экзогенных критериев (или признаков), позволяющих в какой-то мере идентифицировать кластеры (т.е. отождествлять их с реальными объектами или сущностями на поверхности Земли).

Статистические методы и методы кластеризации, в принципе, могут применяться к обработке данных любой конечной размерности. Однако,

как уже отмечалось выше, с ростом размерности пространства измерений увеличивается и вычислительная сложность (количество операций на обработку одного вектора измерений) используемых алгоритмов. Поэтому на практике процедурам классификации предпосылаются различного вида процедуры сокращения размерности пространства признаков без потери существенной для распознавания информации, что эквивалентно отбору или конструированию наиболее информативных признаков. Фактически данные дистанционного зондирования часто имеют большую избыточность за счет коррелированности компонент векторов пространства измерений. Для сжатия пространства признаков используются линейные и нелинейные преобразования данных. Их можно подразделить на следующие типы:

- линейные отображения на пространства, размерности, меньшей или равной трем, соответствующей количеству основных главных компонент (собственных векторов) корреляционной или ковариационной матриц наборов данных большой размерности;
- линейные и нелинейные отображения на одно- и двумерные пространства для увеличения разделимости классов;
- нелинейные преобразования с помощью алгоритмов многомерно-го масштабирования и определения «истинной» размерности данных. При этом пространство размерности n , $n > 2$ отображается в двумерное с максимально возможным сохранением значения метрики для соответствующих пар точек.

Детальные сведения о принципах и способах редукции размерности пространства признаков и критериях отбора признаков можно почерпнуть из соответствующих руководств и монографий. Кроме упомянутых, существует множество способов графического представления данных в дистанционном зондировании, которые особенно важны при использовании интерактивных (диалоговых) систем распознавания и обработки изображений. В частности, большинство средств машинной графики применимо и при обработке данных дистанционного зондирования как для визуального представления выходного продукта обработки, так и в процессе диалога.

В дальнейшем ограничимся упоминанием методов в распознавании образов при дистанционном зондировании. Это комбинаторно-логические методы, метод потенциальных функций, синтаксические методы, методы с использованием теоретико-графовых представлений, теории нечетких (размытых) множеств, моделей перцептрона, нейронных сетей и т.п. Заметим, что в коммерческих системах распознавания и обработки изображений (в базовом математическом обеспечении) до недавнего времени были реализованы, как правило, достаточно простые в функциональном отношении алгоритмы. Лишь в последнее десятилетие в связи с технологическим прогрессом в микропроцессорной электронике и стремительным развитием рынка персональных ЭВМ, видеотехники и соответствующего

программного и математического обеспечения оказалась возможной реализация сложных в математическом отношении алгоритмов, что в свою очередь стимулировало теоретические исследования в области коммуникаций, искусственного интеллекта и обработки изображений (теория вэйвлетов, математическая морфология, нейронные сети, случайные поля, нечеткие множества, генетические алгоритмы и т.п.). Отметим также, что в этот период возросла сложность спутниковых систем для дистанционного зондирования Земли, повысилась разрешающая способность сканеров как в пространственном отношении, так и по электромагнитному спектру, что приводит к необходимости обработки данных очень большой размерности (AVIRIS, MODIS).

До сих пор речь шла о процедурах распознавания с позиций используемого в них математического аппарата. Но в дистанционном зондировании важным моментом является и физическое «содержание» данных, поступающих на распознавание. Информация, получаемая посредством многоспектральной сканирующей системы, отражает спектральные, пространственные и временные вариации электромагнитного излучения, приходящего на датчики сканера. Более того, эта информация может дополняться и вспомогательными (например наземными) данными. Поэтому в настоящее время методы извлечения полезной информации из данных, получаемых со спутниковых систем, основываются на использовании не одного, а нескольких видов их характеристик, и, соответственно алгоритмы распознавания можно разделить на следующие:

- алгоритмы на основе спектральных характеристик;
- алгоритмы на основе пространственных характеристик (статистика первого и второго порядка, текстура, двумерный энергетический спектр Фурье и т.д.);
- алгоритмы, использующие временные характеристики;
- гибридные алгоритмы и алгоритмы с использованием вспомогательных данных (интерактивные и с «замешиванием» на входе в систему распознавания).

В целом оказывается, что алгоритмическое (программное) наполнение системы обработки данных дистанционного зондирования зависит как от ее назначения (поточковая работа или научные исследования), от типа тематических задач, под которые проектируется и создается система, так и от вида используемых характеристик сцены (спектральные, временные, пространственные). Последнее касается, в частности, сельскохозяйственных приложений, для которых важно глубокое понимание причинной обусловленности спектральных характеристик объектов, их зависимость от временных и пространственных изменений.

Примером описанной теоретической схемы является система распознавания, применяемая при обработке данных со спутника «Landsat».

Приведенные ниже описания в определенной степени зависят от условий конкретной сцены (район, сезон и т.д.), но являются достаточно универсальными.

Комбинация каналов спутника	Возможная информация
4,3,2	Стандартная комбинация «искусственные цвета». Растительность отображается в оттенках красного, городская застройка – зелено-голубых, а цвет почвы варьируется от темно- до светло-коричневого. Лед, снег и облака выглядят белыми или светло-голубыми (лед и облака по краям). Хвойные леса будут выглядеть более темно-красными или даже коричневыми, по сравнению с лиственными. Эта комбинация очень популярна и используется главным образом для изучения состояния растительного покрова, мониторинга дренажа и почвенной мозаики, а также для изучения сельскохозяйственных культур. В целом насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) широколиственной растительности, в то время как более светлые оттенки характеризуют травянистую или редколесья/кустарниковую растительность.
3,2,1	Комбинация «естественные цвета». В этой комбинации используются каналы видимого диапазона, поэтому объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зеленой, убранные поля – светлыми, нездоровая растительность – коричневой и желтой, дороги – серыми, береговые линии – белесыми. Эта комбинация каналов дает возможность анализировать состояние водных объектов и процессы седиментации, оценивать глубины. Эта комбинация также используется для изучения антропогенных объектов. Вырубки и разреженная растительность детектируются плохо, в отличие от комбинации 4-5-1 или 4-3-2. Облака и снег выглядят одинаково белыми и трудно различимы. Кроме того, трудно отделить один тип растительности от другого. Эта комбинация не позволяет отличить мелководье от почв, в отличие от комбинации 7-5-3.
7,4,2	Эта комбинация дает изображение, близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать состояние атмосферы и дым. Здоровая растительность выглядит ярко-зеленой, травянистые сообщества – зелеными, ярко-розовые участки детектируют открытую почву, коричневые и оранжевые тона характерны для разреженной растительности. Сухостойная растительность выглядит оранжевой, вода – голубой. Песок, почва и минералы могут быть представлены очень большим числом цветов и оттенков. Эта комбинация дает великолепный результат при анализе пустынь и опустыненных территорий, кроме того, может быть использована для изучения сельскохозяйственных земель и водно-болотных угодий. Сгоревшие территории будут выглядеть ярко-красными. Эта комбинация используется для изучения динамики пожаров и постпожарного анализа территорий. Городская застройка отображается в оттенках розово-фиолетового, травянистые сообщества – зелеными и светло-зелеными. Светло-зеленые точки внутри городских территорий могут быть парками, садами или полями для гольфа. Оливково-зеленый цвет характерен для лесных массивов, более темный цвет является индикатором примеси хвойных пород.
4,5,1	Здоровая растительность отображается в оттенках красного, коричневого, оранжевого и зеленого. Почвы могут выглядеть зелеными или коричневыми, урбанизированные территории – белесыми, серыми и зелено-

Комбинация каналов спутника	Возможная информация
	голубыми, ярко-голубой цвет может детектировать недавно вырубленные территории, а красноватые – восстановление растительности или разреженную растительность. Чистая, глубокая вода будет выглядеть темно-синей (почти черной), если же это мелководье или в воде содержится большое количество взвесей, то в цвете будут преобладать более светлые синие оттенки. Добавление среднего инфракрасного канала позволяет добиться хорошей различимости возраста растительности. Здоровая растительность дает очень сильное отражение в 4 и 5 каналах. Использование комбинации 3-2-1 параллельно с этой комбинацией позволяет различать затопляемые территории и растительность. Эта комбинация малопригодна для детектирования дорог и шоссе.
4,5,3	Эта комбинация ближнего, среднего ИК-каналов и красного видимого канала позволяет четко различить границу между водой и суши и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона. С большой точностью будут детектироваться водные объекты внутри суши. Эта комбинация отображает растительность в различных оттенках и тонах коричневого, зеленого и оранжевого. Эта комбинация дает возможность анализа влажности и полезна при изучении почв и растительного покрова. В целом, чем выше влажность почв, тем темнее она будет выглядеть, что обусловлено поглощением водой излучения ИК-диапазона.
7,5,3	Эта комбинация дает изображение, близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать состояние атмосферы и дым. Растительность отображается в оттенках темно- и светло-зеленого, урбанизированные территории выглядят белыми, зелено-голубыми и малиновыми; почвы, песок и минералы могут быть очень разных цветов. Практически полное поглощение излучения в среднем ИК-диапазоне водой, снегом и льдом позволяет очень четко выделять береговую линию и подчеркивать водные объекты на снимке. Горячие точки (как, например, кальдеры вулканов и пожары) выглядят красноватыми или желтыми. Одно из возможных применений этой комбинации каналов – мониторинг пожаров. Затопляемые территории выглядят очень темно-синими и почти черными, в отличие от комбинации 3-2-1, где они выглядят серыми и плохо различимы.
5,4,3	Как и комбинация 4-5-1, эта комбинация дает дешифровщику очень много информации и цветовых контрастов. Здоровая растительность выглядит ярко-зеленой, а почвы – розовато-лиловыми. В отличие от 7-4-2, включающей седьмой канал и позволяющей изучать геологические процессы, эта комбинация дает возможность анализировать сельскохозяйственные угодья. Эта комбинация очень удобна для изучения растительного покрова и широко используется для анализа состояния лесных сообществ.
5,4,1	Комбинация похожа на 7-4-2, здоровая растительность выглядит ярко-зеленой, за исключением того, что эта комбинация лучше для анализа сельскохозяйственных культур.
7,5,4	Эта комбинация не включает ни одного канала из видимого диапазона и обеспечивает оптимальный анализ состояния атмосферы. Береговые линии четко различимы. Может быть использована для анализа текстуры и влажности почв. Растительность выглядит голубой.
5,3,1	Эта комбинация показывает топографические текстуры, в то время как 7-3-1 позволяет различить горные породы.

ГЛАВА 24

РОССИЙСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ

Все описанные в предыдущих разделах подходы в той или иной мере применяются в конкретных системах, связанных с мониторингом состояния посевов. В настоящей главе рассматриваются современные российские системы сбора и обработки спутниковой информации применительно к состоянию посевов сельскохозяйственных культур.

24.1. Система Росгидромета

В начале девяностых годов в Росгидромете (Всероссийский НИИ сельскохозяйственной метеорологии) была разработана и введена вначале в опытную, а затем и в постоянную эксплуатацию оперативная система мониторинга состояния посевов по спутниковой информации. Ее принципиальными отличительными чертами были:

- использование в качестве исходной информации данных с метеорологических спутниковых систем типа «Метеор» (Россия) или «NOAA» (США);
- использование для калибровки спутниковой информации данных стандартных агрометеорологических наблюдений на сети станций Росгидромета.

На рис. 24.1 приведен состав автономного приемно-аппаратного и программно-методического комплекса. Не останавливаясь на сугубо технических деталях, рассмотрим вкратце основные процедуры, выполняемые при обработке и интерпретации спутниковых данных.

Первой операцией является формальная проверка качества исходного изображения. Она предусматривает как чисто визуальный просмотр снимка, так и автоматический поиск сбойных строк путем проверки времени сканирования каждой строки, а также предварительное определение процента облачности по заданной территории.

На следующем этапе осуществляется географическая привязка спутникового изображения. При этом устанавливается соответствие между элементами (точками) на изображении и стандартными географическими координатами. Основой процедуры является модель движения спутника по орбите, данные фактической орбиты (используются данные телеграмм TBUS), точная временная привязка начала измерений для каждого пиксела. К сожалению, поскольку при расчетах используются данные прогноза орбиты спутника, а не фактическая орбита, имеют место расхождения между истинными координатами точки и координатами, рассчитанными по



Рис. 24.1. Состав автономного приемно-аппаратного и программно-методического комплекса

орбитальным данным. Наиболее наглядно эти неточности можно наблюдать по береговой линии. Для устранения указанных погрешностей используется более точная привязка по опорным (реперным) точкам. В качестве таковых используются характерные изгибы или устья рек, водохранилища, особенности береговой линии, впадение одной реки в другую и т. п.

Процедура выполняется в интерактивном режиме. Основа процедуры: построение по парам соответствующих точек аффинного преобразования и применение полученных зависимостей к исходному изображению.

На следующем этапе производится преобразование привязанного изображения к одной из стандартных картографических проекций. Это необходимо как для совмещения разновременных снимков, так и для оценивания площадей, занятых посевами. В рассматриваемой технологии используется равнопромежуточная коническая проекция с двумя главными параллелями. Данная проекция обеспечивает минимальные пространственные и площадные искажения вдоль заданных параллелей и подходит как для представления небольших участков земной поверхности, так и крупных территорий, имеющих большую протяженность по долготе. Таким образом, эту проекцию можно использовать для картирования всей территории Российской Федерации и отдельных ее областей.

Для дальнейшей обработки снимка осуществляется маскирование основной части пикселей, «загрязненных» облаками, с применением пороговой техники, когда сама спектральная яркость каждого пикселя или некоторая функция от спектральных яркостей сопоставляется с заранее определенной величиной (порогом). Решение о том, чистый пиксел или нет,

принимается в зависимости от попадания вычисленных значений в соответствующий интервал. Результатом данного этапа является маска облаков. Выделенные таким образом пиксели не участвуют в следующей процедуре обработки – кластеризации, так как значения в них зачастую обладают большой неоднородностью и могут разбиваться на непредвиденное количество кластеров. В результате же кластеризации, как правило, выявляется еще один кластер, который легко идентифицируется как «облачность» по расположению относительно уже существующей маски и по своим численным характеристикам. Такой двухступенчатый подход дает достаточно хорошие результаты выделения облачности на спутниковых изображениях.

Указанная процедура кластеризации является многомерной неконтролируемой кластеризацией, основанной на минимизации суммы квадратов евклидовых расстояний элементов кластеров от их центров (средних значений). Она позволяет идентифицировать сельскохозяйственный объект как целое благодаря объединению в одно спектральное пространство исходных сигналов с заданных каналов и производных от них величин, таких, как, например, вегетационный индекс.

Получаемые таким образом кластеры являются объектами, достаточно хорошо совпадающими с реальными объектами на поверхности Земли.

Получившиеся формальные кластеры в автоматическом или интерактивном режиме объединяются в тематические (смысловые) кластеры.

Рассчитанные ранее вегетационные индексы (используется нормализованная разность – NDVI) накапливаются за декаду путем совмещения серии разновременных снимков по одной и той же территории с целью удаления «загрязненных» облаками пикселей и трансформируются в описанную выше проекцию. Полученная таким образом карта распределения NDVI по заданной территории может являться одним из выходных продуктов системы. С ее помощью можно следить за динамикой развития растительного покрова от декады к декаде, особенно на ранних стадиях вегетационного периода, а также во время его окончания. Однако для количественной оценки состояния посевов разработана процедура пересчета вегетационных индексов в 3-балльную систему с точки зрения видов на урожай.

Градация «плохое» соответствует ожидаемой урожайности менее 80 % от среднегодовой урожайности. Градация «удовлетворительное» – ожидаемая урожайность от 80 до 105 %, а градация «хорошее» – ожидаемая урожайность более 105 % от среднегодовой урожайности. В качестве промежуточного параметра для перехода от NDVI к урожаю был выбран такой традиционный агрометеорологический показатель, как густота посева. Аргументами в пользу подобного выбора является его широкое распространение, наличие устойчивых связей с урожайностью и проективным покрытием, незначительное число пропусков в декадных агрометеорологических телеграммах. Процедура калибровки состоит из двух этапов.

На первом этапе устанавливается соответствие между данными наземных наблюдений и спутниковой информацией.

На основании отобранных данных строится регрессия между густотой посева и вегетационными индексами.

При обработке и интерпретации цифровой спутниковой информации для оценки состояния посевов необходимо иметь количественные критерии для идентификации посевов сельскохозяйственных культур на изображении изучаемой территории. В осенний период процесс распознавания существенно затрудняется, так как в связи с ухудшением условий освещенности подстилающей поверхности из-за малых высот Солнца уменьшается динамический диапазон получаемых цифровых данных во всех каналах, что приводит к потере контрастности снимков и информационной мощности NDVI как одного из критериев оценки состояния посевов. В связи с этим была разработана новая процедура многомерной классификации, позволяющая идентифицировать сельскохозяйственный объект как целое благодаря объединению в одно спектральное пространство исходных сигналов и NDVI. В дальнейшем, используя идеи Ф. Беккера и Ж. Ли (1990) об информационной совместимости NDVI и температурно-независимых индексов (TISI), вместо исходных сигналов в процедуру классификации был введен TISI как дополнительный признак. Это позволило улучшить качество классификации. Для идентификации получаемых классов была разработана интерактивная процедура с элементами экспертного оценивания. Она дает возможность интерпретатору при необходимости объединять кластеры на основе анализа их статистических характеристик и геометрического расположения на обрабатываемом снимке, а также соответствующей картографической информации. Тем самым частично снимается проблема выбора количества кластеров, естественным образом соответствующего характеристикам неоднородности изображения изучаемой территории.

Определенные усилия были предприняты по уточнению процедур выделения лесных массивов. В традиционных технологиях и оперативных схемах процедура выделения лесов сводится к наложению на снимок маски предварительно оконтуренных крупных лесных массивов. Такой метод не дает полной достоверности получаемых результатов при отделении лесных территорий от сельскохозяйственных.

В результате введения в технологию новой многомерной классификации, позволяющей легко наращивать признаковое пространство и просматривать результаты на экране дисплея с помощью дополнительной интерактивной процедуры идентификации классов, была достигнута достаточно хорошая разделимость классов, относящихся к лесным и сельскохозяйственным районам, без ущерба для разделимости остальных классов.

Качество интерпретации спутниковой информации во многом определяется характеристиками применяемых процедур многомерной

кластеризации и сегментации. Программа неконтролируемой классификации, использованная при обработке, реализована на основе ординарной переработки алгоритма кластерного анализа, применяемого ранее для кластеризации многоспектральных данных высокого разрешения.

В качестве критерия кластеризации принимается локальная минимизация целевой функции:

$$Z(C_1, \dots, C_n) = \sum_{j=1}^n \sum_{i \in C_j} \|x_i - \bar{x}_j\|^2,$$

т.е. минимизация суммы сумм квадратов евклидовых расстояний элементов кластеров от их центров (средних значений). Здесь подразумевается, что

$$x_i \in R^p, \quad \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i \in C_j} x_i, \quad j = 1, \dots, n,$$

где C_j – j -й кластер; R^p – p -мерное пространство (пространство признаков) с евклидовой метрикой.

Алгоритм предполагает задание некоторого начального разбиения исходного мультиспектрального или мультивременного спутникового изображения и дает на выходе локально-оптимальное разбиение в смысле критерия Z . Алгоритм хотя и является итерационным, но в целом достаточно экономичен, поскольку на каждой итерации уменьшение целевой функции достигается за счет так называемого «быстрого обменного метода». Обработка данных дистанционного зондирования высокого разрешения показала, что алгоритм дает устойчивые результаты, т.е. хорошо сохраняет пространственную «топологическую» структуру изображения при небольших изменениях входных (начальных) условий. Поскольку информация с радиометра типа AVHRR (именно эти данные являются основой сформированного архива, спутник типа «NOAA») обладает пространственным разрешением ниже среднего (наземное разрешение в надире около 1,1 км), и, следовательно, большинство пикселей цифрового изображения в энергетическом отношении являются смесью сигналов от различных видов подстилающей поверхности из мгновенного поля зрения прибора. Поэтому, хотя разрешение по энергиям отраженного сигнала у датчиков AVHRR хорошее, результаты классификации для территорий, не имеющих сплошных протяженных природных образований, часто выглядят в пространственном отношении как реализации случайного поля или фракталы (при сохранении, естественно, объективной отделимости кластеров в спектральном пространстве). При этом следует заметить, что пространственная картина для таких территорий приобретает некоторые свойства неопределенности при увеличении числа кластеров, задаваемого на входе в процедуру кластеризации. Этот факт послужил основанием для дополнения программы кластерного анализа интерактивной процедурой идентификации классов.

Для территорий с достаточно «большими» кластерами, т.е. большими площадями однородных по виду природных образований, представляется очевидным попытаться идентифицировать (распознать) именно эти кластеры. Это соображение инициировало введение в качестве дополнительного информационного признака некоторых, отличных от NDVI, физически обоснованных при сканерной съемке величин – характеристик земной поверхности. В качестве такого был выбран так называемый температурно-независимый индекс (TISI) термических диапазонов радиометра AVHRR.

Подробное описание и физическое обоснование концепции температурно-независимых индексов приведено в упомянутой работе Беккера и Ли (1990). В простейшем случае для двух спектральных каналов с номерами i и j температурно-независимые тепловые ИК-индексы берутся в виде отношения канальных яркостей или яркостных температур при соответствующем выборе показателей степени $a[i]$ и $a[j]$:

$$\frac{R_i^{a_i}}{R_j^{a_j}} = \frac{\epsilon_i^{a_i} \alpha_i^{a_i}}{\epsilon_j^{a_j} \alpha_j^{a_j}} \quad (24.1)$$

или

$$\frac{T_{gi}^{a_i n_i}}{T_{gj}^{a_j n_j}} = \frac{\epsilon_i^{a_i}}{\epsilon_j^{a_j}} \quad (24.2)$$

$$\text{при } a_i \cdot n_i - a_j \cdot n_j = 0, \quad (24.3)$$

где R_j – канальная яркость, наблюдаемая в канале i на уровне земли; ϵ_i – излучательная способность (спектральная степень черноты) поверхности; T_{gj} – канальная радиояркость температура поверхности; α_i, n_i – так называемые канальные константы.

Условие (24.3) связывает канальные константы, которые вычисляются исходя из некоторых условий аппроксимации для конкретных спектральных каналов и характеристик датчиков. Собственно тепловой индекс для каналов определяется следующим образом:

$$TISI_{ij} = \frac{\alpha_j^{n_j}}{\alpha_i} \cdot \frac{R_i}{R_j^{n_j}} = M_{ij} \cdot \frac{R_i}{R_j^{n_j}}$$

или

$$TISI_{ij} = (T_{gj} / T_{gi})^{n_i}, \text{ где } n_{ij} = n_i / n_j.$$

Теоретическое обоснование получаемых соотношений подразумевает пренебрежимо малый вклад восходящего излучения атмосферы в принимаемый сигнал на борту спутника либо, что в данном случае эквивалентно, проведение радиационной атмосферной коррекции сигнала. На практике можно, конечно, использовать введенные соотношения непосредственно, пытаясь при этом «настроить» ограничение (24.3) исходя из некоторого экзогенного критерия.

Заметим, что соотношения (24.1–24.3) обобщаются на случай большего числа спектральных диапазонов.

В описываемой технологии использован вариант TISI для трех каналов прибора AVHRR:

$$TISI = M_R \cdot R_3^{a_3} \cdot R_4^{a_4} \cdot R_5^{a_5},$$

где $M_R = \alpha_3^{-a_3} \cdot \alpha_4^{-a_4} \cdot \alpha_5^{-a_5}$, $\alpha_3 = 3,0 \cdot 10^{-39}$, $\alpha_4 = 1,0924 \cdot 10^{-16}$, $\alpha_5 = 1,019 \cdot 10^{-15}$ – каналные константы, а $a_3 = 1$, $a_4 = -1$, $a_5 = -2$ – весовые коэффициенты; R_3 , R_4 , R_5 – энергетические яркости в соответствующих каналах.

В процессе опытной эксплуатации оказалось, что некоторые операционные системы в зависимости от текущих настроек не запоминают информацию о том, в каком именно каталоге (папке, директории) находились обрабатываемые файлы, что при сложной структуре файловой системы требовало значительной дополнительной работы от пользователя при последовательной работе с несколькими фрагментами спутниковых изображений. Проблема была решена путем введения дополнительных переменных и специального вспомогательного файла для хранения текущих установок, произведенных пользователем. При повторном запуске программы восстанавливается значение параметров, установленных пользователем при последнем сеансе работы с программой. Перечислим соответствующие параметры:

- Тип фрагмента со спутниковой информацией (на фрагменте информация только по одной области или же на фрагменте данные по региону с несколькими областями) – параметр изменяется автоматически при открытии файла другого типа. Использование этого параметра позволяет исключить обязательный выбор пользователем типа файла со спутниковой информацией.

- В программном комплексе реализованы три различные процедуры выделения растительности и оценки ее состояния – путем калибровки спутниковой информации по данным наземных измерений; по гистограмме распределения вегетационного индекса (NDVI); по результатам выделения кластеров пикселей, имеющих минимальную внутрикластерную дисперсию. Пользователь имеет возможность подключать или отключать любую указанную процедуру. Три параметра (по одному на каждую процедуру) содержат информацию о выборе пользователя. Для изменения параметров вызывается специальное диалоговое окно.

- Три параметра используются для хранения информации в названиях файлов. В первом из них хранится полный путь к рабочему каталогу с исполнительным файлом, в двух других – имена файлов, в которых хранятся данные наземных измерений, используемых при калибровке вегетационных индексов, и файлов с данными для формирования цветов при визуальном представлении промежуточных данных и результатов расчетов. Указанные три параметра изменяются и запоминаются автоматически

при запуске программы (первый параметр), либо при открытии соответствующего файла или его редактировании.

- Специальный параметр определяет режим автоматического включения в результаты расчета даты съемки обрабатываемого фрагмента (территории). Режим включается – отключается при вызове соответствующего пункта меню.

- Отдельный параметр предназначен для хранения сведений о требуемом режиме представления результатов расчетов. При оценке состояния посевов агрометеорологи, как правило, выделяют два удовлетворительных состояния посевов. Первое удовлетворительное состояние посевов соответствует таким сельскохозяйственным угодьям, густота посева на которых ниже оптимальной для данной культуры в соответствующем районе. Второе удовлетворительное состояние соответствует загущенным посевам. При расчетах выделяются два удовлетворительных состояния. Но некоторые потребители привыкли к представлению результатов, при котором два указанных удовлетворительных состояния объединяются в одно. Рассматриваемый параметр фиксирует произведенный пользователем выбор режима представления данных. Режим включается – отключается при вызове соответствующего пункта меню.

По просьбе ряда потребителей в программу была включена опция (предоставлена возможность) изменения цветовой схемы для визуального представления результатов расчетов. В программе используется система кодирования цветов RGB (красный–зеленый–синий) с выделением на каждую компоненту 8-битового представления (числовое значение от 0 до 255). Список используемых в программе цветов хранится в файле в виде трех наборов по 16 цветов (общий для представления вегетационных индексов и для представления результатов кластеризации), при этом каждый цвет в каждом наборе представлен тройкой чисел – интенсивностями красной, зеленой и синей компонент соответственно. Соответствующий файл является обычным текстовым файлом, и для его редактирования можно использовать любой текстовый редактор. Интенсивности компонент для выбранного цвета пользователь может определить с помощью любых графических редакторов, даже самых простейших, например paint.exe. Вместе с тем пользователь может воспользоваться встроенной в программу процедурой изменения одного или произвольного набора используемых в программе цветов. После внесения изменений список новых цветов можно сохранить в новом файле и, при желании, использовать этот новый файл цветов в качестве основного.

Следующая проблема была связана со списком обрабатываемых областей. Первый вариант программы поставлялся с заранее зашитым списком областей, представляющий интерес для соответствующего потребителя. И поскольку в программе были предусмотрены средства

для выбора произвольного набора областей, предполагалось, что у потребителя претензий к данной опции быть не должно. Однако оказалось, что потребителям необходимо средство для запоминания и последующего восстановления сформированного им списка областей. В связи с этим были добавлены блоки записи нового сформированного списка областей в рабочий файл и считывания его при последующих запусках программы.

Достаточно серьезная проблема выявилась в процессе активного использования процедур кластеризации. Существовавшие в первом варианте средства были ориентированы скорее на проведение исследований, чем на оперативную работу. Была проведена достаточно объемная работа, включающая большое число численных экспериментов, обсуждений получаемых результатов с агрометеорологами территориальных управлений, внесение изменений, численные эксперименты и т.д., что позволило прийти к следующей двухэтапной схеме кластеризации.

Для кластеризации используется информация по всем пяти спектральным каналам и по вегетационному индексу (NDVI) – каждая точка изображения представляется шестимерным вектором. Информация по двум первым каналам преобразуется в значения спектрального альбедо в соответствии с рекомендациями KLM NOAA Guide. Информация по двум последним каналам преобразуется в радиационную температуру по алгоритмам, описанным в упомянутом руководстве. Данные третьего канала, в зависимости от режима измерений бортовой аппаратуры, также преобразуются в физические параметры. Для расчета NDVI используются значения альбедо, что существенно расширяет динамический диапазон.

После этого проводится нормализация данных по каждому спектральному каналу. При этом каждое значение параметра заменяется его относительным значением в интервале (min, max) для соответствующего канала. Подобная процедура позволяет исключить чрезмерное влияние отдельных каналов при кластеризации.

Затем изображение разбивается на 15 кластеров путем присвоения последовательным точкам номеров кластеров по порядку. Процедура кластеризации осуществляется путем минимизации внутрикластерной дисперсии за счет перемещения точек из одного кластера в другой. Процедура кластеризации выполняется итерационно. Критерий остановки – общее количество пикселей, перемещенных между кластерами на данном итерационном шаге, не превышает 75, или общее количество итераций более 50. Выход из процедуры кластеризации по первому критерию в 70 % случаев прогонов процедуры.

После этого рассчитываются средние значения NDVI по каждому кластеру и сами кластеры упорядочиваются по возрастанию вегетационного индекса. Все кластеры с отрицательными средними значениями NDV относим к облачности и водоемам. Также к облачности относим кластеры

с положительными значениями вегетационного индекса при условии, что в кластер попали пиксели с отрицательными значениями NDVI и их суммарное количество более 10 % объема кластера. Последняя операция позволяет устранить пиксели, частично «загрязненные» облаками. Затем в автоматическом режиме остальные кластеры разделяются на почву и посевы в различном состоянии. После завершения работы пользователь имеет возможность изменить распределение кластеров (включая визуальный контроль). На второй стадии кластеризация осуществляется только над пикселями, отнесенными к классу «растительность».

Ряд исправлений чисто технического характера позволило увеличить быстродействие программы на 15 %.

На рис. 24.2 и 24.3 в качестве примера приведены результаты оценки состояния посевов по двум областям на весну 2011 года.

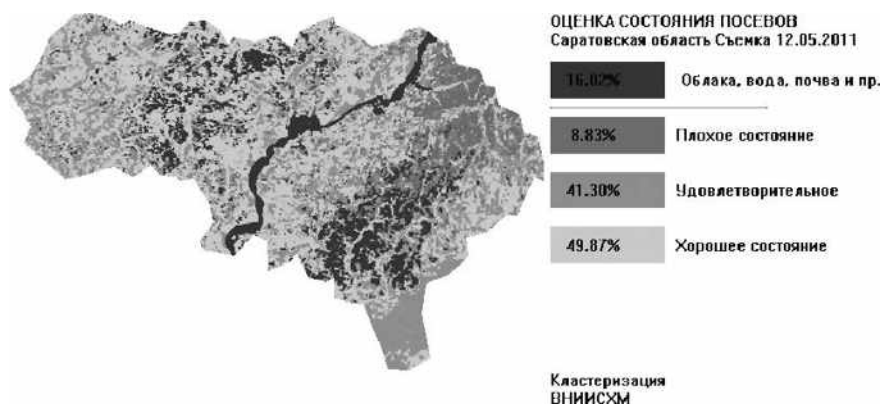


Рис. 24.2 Оценка состояния посевов на территории Саратовской области

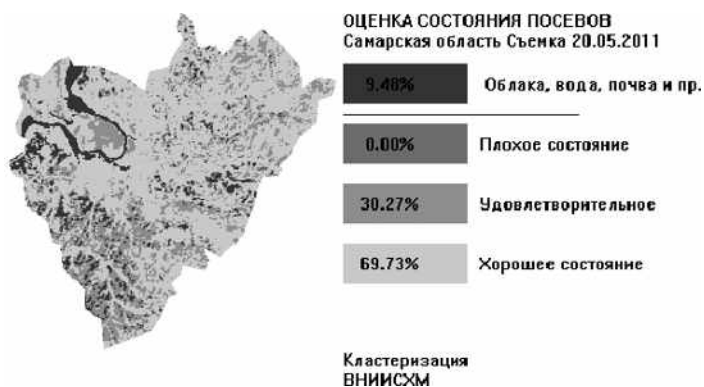


Рис. 24.3 Оценка состояния посевов на территории Самарской области

24.2. Система института космических исследований Академии наук России

Начиная с 2003 года в России по заказу Министерства сельского хозяйства России разрабатывается национальная система спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель страны. Одним из разработчиков системы является Институт космических исследований российской академии наук (ИКИ РАН). Система призвана обеспечить получение объективной информации об использовании сельскохозяйственных угодий. Система спутникового мониторинга позволит обеспечивать министерство и другие заинтересованные государственные и коммерческие структуры оперативной и объективной информацией о сельскохозяйственном производстве. При разработке системы мониторинга ставились следующие основные задачи:

- создание базовой маски используемых пахотных земель за период 2001–2008 гг.;
- обновление маски и оценка динамики используемых пахотных земель;
- выявление залежных земель;
- оценка используемых пахотных земель, оставленных под паром;
- оценка используемых пахотных земель, занятых многолетними травами;
- оценка соблюдения правил севооборота;
- оценка посевных площадей в текущем году;
- оценка посевных площадей озимых культур;
- оценка состояния сохранившихся озимых культур;
- мониторинг развития сельскохозяйственных культур в течение вегетационного периода;
- прогнозирование урожайности и валового сбора основных культур.

Основой информационного обеспечения растениеводства является карта пахотных земель России. Построение такой карты – основа для дальнейшего мониторинга сельскохозяйственных культур. Алгоритмы детектирования посевов позволяют вести оперативный мониторинг состояния культур. Таким образом, первоочередной задачей мониторинга станет разработка методов для построения карты пахотных земель и фактического пространственного размещения посевов.

При разработке требований к системе мониторинга сельскохозяйственных угодий и выбору спутниковой системы следует учитывать особенности, присущие именно сельскому хозяйству. Наблюдение за пахотными землями может осуществляться с использованием широкого спектра приборов дистанционного зондирования, различающихся уровнем пространственного разрешения, спектральными каналами, частотой наблюдения и другими параметрами. Однако данные дистанционного

зондирования должны удовлетворять специальным требованиям: для мониторинга растительности спутниковая съемка должна проводиться в зонах спектра, позволяющих наилучшим образом отделять зеленую растительность от других типов подстилающей поверхности.

Пространственное разрешение используемых данных дистанционного зондирования должно позволять наблюдать отдельные сельскохозяйственные поля. В силу достаточно быстрого развития культур необходима высокая периодичность съемки (один раз в несколько дней).

Немаловажным фактором выбора используемых спутниковых данных является их стоимость. Так как система мониторинга должна охватывать все аграрные регионы России, стоимость данных дистанционного зондирования может сделать всю систему неоправданно дорогой. Поэтому для системы мониторинга необходимо в максимальной степени использовать свободно распространяемые данные. В наилучшей степени указанным требованиям удовлетворяют данные наблюдений прибором MODIS, установленным на борту спутников «Terra» и «Aqua». Широкая полоса обзора при съемке указанной системой обеспечивает возможность наблюдения территории России с частотой не менее одного раза в сутки. Данные съемки свободно распространяются, доступен архив изображений с 2001 года. В качестве вспомогательного источника данных высокого пространственного разрешения используются изображения Landsat-TM/ETM+.

В табл. 24.1 и 24.2 приведены значения вегетационного индекса (NDVI), полученного по информации с «MODIS» за период с 2002 по 2006 г. и урожайность основных видов сельскохозяйственных культур за этот же период по некоторым регионам России, а на рис. 24.4 и 24.5 представлена информация по тому же вегетационному индексу для зернопроизводящего региона России по пахотным и непашотным землям.

Таблица 24.1

NDVI по пахотным и непашотным землям

Дата	Непахотные земли					Пахотные земли				
	2002	2003	2004	2005	2006	2002	2003	2004	2005	2006
Саратов										
06.03	0,41		0,40			0,43		0,45		
22.03	0,33		0,37			0,34		0,42		
07.04	0,31	0,35	0,30	0,28	0,27	0,29	0,35	0,29	0,28	0,27
23.04	0,35	0,28	0,31	0,28	0,28	0,31	0,27	0,29	0,28	0,25
09.05	0,46	0,32	0,37	0,40	0,35	0,37	0,25	0,31	0,32	0,28
26.05	0,54	0,45	0,53	0,57	0,50	0,43	0,32	0,42	0,45	0,40
10.06	0,57	0,54	0,60	0,62	0,63	0,47	0,40	0,48	0,52	0,52
26.06	0,59	0,61	0,63	0,61	0,66	0,52	0,52	0,54	0,53	0,59
12.07	0,57	0,67	0,65	0,62	0,60	0,50	0,64	0,58	0,55	0,53
28.07	0,50	0,68	0,63	0,56	0,55	0,43	0,67	0,55	0,48	0,48

Окончание таблицы 24.1

13.08	0,47	0,62	0,60	0,53	0,52	0,38	0,57	0,52	0,42	0,42
29.08	0,44	9,59	0,53	0,48	0,48	0,35	0,50	0,42	0,37	0,38
14.09	0,43	0,55	0,50	0,46	0,46	0,33	0,46	0,38	0,33	0,35
30.09	0,40	0,50	0,58	0,40	0,40	0,31	0,40	0,37	0,31	0,32
16.10	0,39	0,44	0,46	0,38	0,39	0,30	0,37	0,39	0,32	0,33
01.11	0,37	0,43	0,43	0,35	0,38	0,29	0,39	0,39	0,30	0,34
17.11	0,34	0,40	0,39	0,34	0,31	0,28	0,40	0,38	0,32	0,30
03.12	0,32	0,35	0,38	0,35	0,31	0,27	0,35	0,38	0,34	0,28
12.12	0,31	0,37		0,40	0,27	0,27	0,38		0,40	0,28
02.01				0,33		0,27			0,32	

Таблица 24.2

Урожайность основных сельскохозяйственных культур

Область	Годы	Зерновые и зерно- бобовые	Озимая пшеница	Озимая рожь	Яровая пшени- ца	Озимый ячмень	Яровой ячмень	Овес
Краснодар	2002	41,5	47,2	36,0	23,8	46,1	22,3	24,7
	2003	29,6	33,4	28,5	13,7	35,0	16,0	13,3
	2004	41,0	43,1	23,6	23,6	44,9	22,3	25,5
	2005	42,5	46,7	30,3	27,3	41,2	23,6	20,5
	2006	41,0	42,7					
Москва	2002	21,6	27,2	24,3	17,9		18,5	16,8
	2003	20,9	18,0	15,0	21,0		24,3	20,4
	2004	23,0	28,2	23,3	16,9		22,7	21,2
	2005	18,9	21,6	18,9	15,5		17,8	17,2
	2006							
Ростов	2002	23,4	30,1	16,9	12,3	30,9	17,7	14,1
	2003	14,9	17,7	11,0	7,1	13,6	12,4	12,1
	2004	26,8	35,6	19,4	16,0	31,9	16,8	16,3
	2005	24,9	30,2	17,2	16,2	21,4	15,0	14,7
	2006	24,7	29,0					
Саратов	2002	14,2	21,9	16,8	10,4		9,6	10,4
	2003	14,1	12,4	13,2	14,0		14,9	16,6
	2004	14,9	21,5	15,7	11,3		10,7	13,0
	2005	13,9	16,5	14,3	11,7	20,2	11,7	14,1
	2006	14,5	18,5					
Самара	2002	15,1	21,2	19,1	12,0		12,9	12,9
	2003	12,2	9,3	12,5	12,1		13,7	14,4
	2004	11,3	14,5	12,4	10,5		10,1	11,4
	2005	8,9	12,1	15,2	7,3		7,2	8,4
	2006	10,7	13,6					

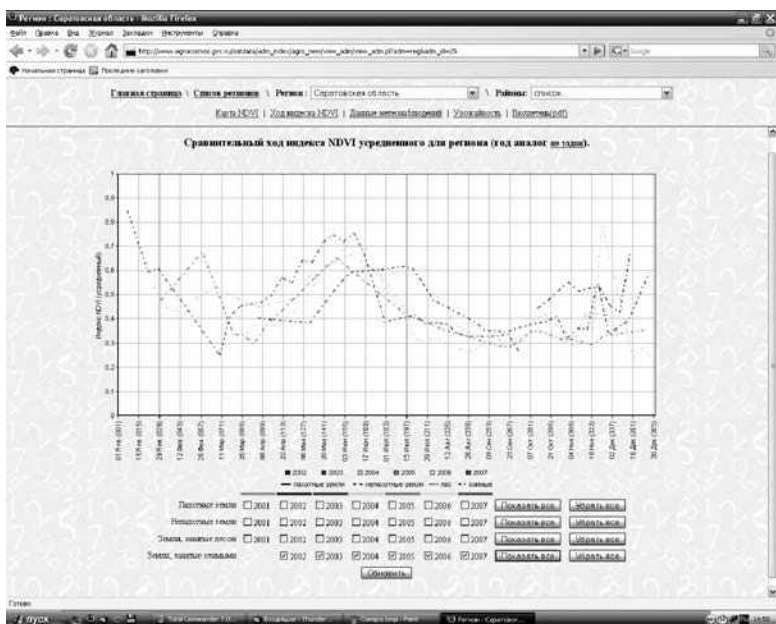


Рис. 24.4. Сравнительный ход NDVI для Саратовской области

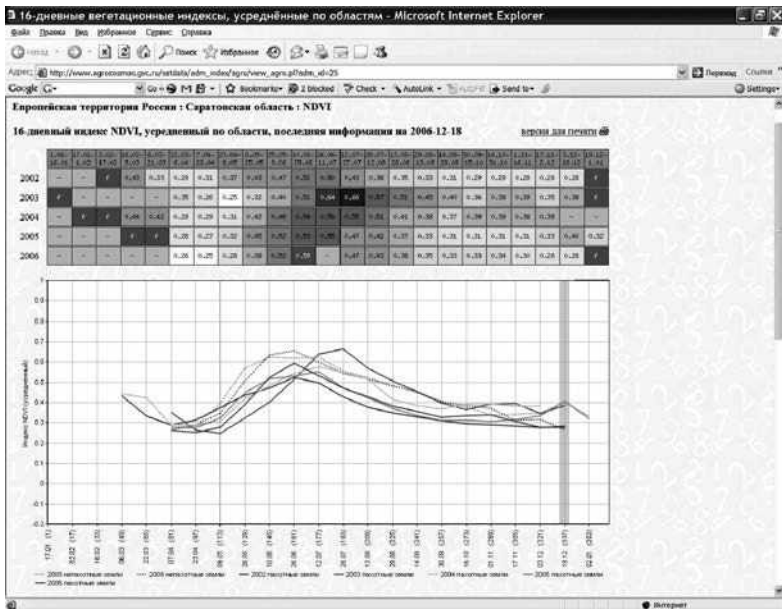


Рис. 24.5. Другой вид графиков NDVI по Саратовской области

Хорошо видно, что и в таблицах, и на рисунках информация отличается от года к году, но в целом соответствует наблюдаемым величинам. Соотношение между информацией Министерства сельского хозяйства и Комитета по статистике достаточно неплохое, хотя различие имеет место.

24.3. Система компании «СканЭкс»

Инженерно-технологический центр «СканЭкс» основное внимание уделяет вопросам приема информации с соответствующих спутниковых систем. Поэтому говорить о системе мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур по спутниковой информации различного пространственного и спектрального разрешения не совсем верно. Вместе с тем разрабатываемое центром программное обеспечение включает в себя отдельные элементы и целые подсистемы, которые можно и нужно отнести к системам мониторинга состояния посевов.

Инженерно-технологический центр «СканЭкс» в настоящее время – это лидирующая на рынке российская фирма, предоставляющая полный комплекс услуг: от приема до тематической обработки изображений Земли из космоса. На момент написания учебника центр является единственной в России компанией, подписавшей лицензионные соглашения с ведущими мировыми операторами программ данных дистанционного зондирования Земли на прямой прием данных с ИСЗ серий «IRS», «SPOT», «EROS», «RADARSAT», «ENVISAT» на наземные станции собственного производства. Впервые появилась возможность регулярного обзора территории России и стран СНГ в реальном времени с пространственным разрешением от сотен до единиц метров и больше.

Организация существует как независимая коммерческая компания с 1989 года. Используя все лучшее, что могла дать российская образовательная и научная школа, специалисты центра предлагают самые передовые и экономичные решения в сфере оперативного спутникового мониторинга.

Центром созданы, поддерживаются и развиваются ведомственные сети станций приема спутниковой информации Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета), Министерства по чрезвычайным ситуациям России, а также региональные центры космического мониторинга на базе образовательных и научных учреждений. На технологиях центра основаны центры данных дистанционного зондирования в Испании, ОАЭ, Вьетнаме, Нигерии, Иране, Казахстане. Имея подписанные лицензионные соглашения с операторами программ данных дистанционного зондирования, центр обладает правами на предоставление сублицензий на прием данных владельцам наземных станций в России и странах СНГ, а также на поставку станций за рубеж.

Являясь оператором коммерческой сети станций собственного производства в России, центр предоставляет пользователям изображения

со спутников «IRS-P5» («CARTOSAT-1»), «IRS-P6» («Resourcesat-1»), «SPOT 2/4», «EROS A», «EROS B», «RADARSAT-1», «ENVISAT-1» в оперативном режиме и из собственных архивов. В 2008 г. центр получил эксклюзивные права на распространение данных «CARTOSAT-1» и «Resourcesat-1» на территории России.

На основании дистрибьюторских и партнерских соглашений с мировыми операторами космических программ центр распространяет данные высокого и сверхвысокого разрешения со спутников «IKONOS», «QuickBird», «WorldView-1», «KOMPSAT-2», «FORMOSAT-2», «TerraSAR-X», «ALOS».

Центр предлагает создание «под ключ» геопорталов – результата интеграции последних достижений в сфере дистанционного зондирования Земли, ГИС и Web-технологий, которые являются эффективным инструментом управления территориями на основе актуальной и постоянно обновляемой информации о Земле из космоса.

Миссия центра – демократизация доступа к данным дистанционного зондирования, что означает их удешевление для конечного пользователя, сокращение времени получения данных, упрощение процесса их обработки. Центр реализует эту миссию на практике посредством:

- внедрения универсальных аппаратно-программных комплексов для приема данных в реальном времени собственного производства на базе персональных компьютеров и ОС Microsoft Windows;
- применения средств программного обеспечения собственного производства для приема, хранения, предварительной, углубленной и тематической обработки изображений Земли из космоса;
- гибкой ценовой политики при распространении данных дистанционного зондирования;
- создания Интернет-геопорталов на основе изображений Земли из космоса, доступ к которым предоставлен неограниченному числу посетителей;
- проведения регулярных учебных курсов по обработке и практическому применению спутниковой съемки Земли как для специалистов, так и для начинающих пользователей данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий;
- реализации образовательных проектов в среднем и высшем образовании, организации международной конференции «Земля из космоса – наиболее эффективные решения».

Центр предлагает пользователям полный цикл программного обеспечения для приема, хранения, предварительной и углубленной тематической обработки и интерпретации спутниковых снимков.

Описание программных средств для приема и хранения данных дистанционного зондирования находится в разделе о персональных станциях

приема спутниковых изображений, так как это программное обеспечение является неотъемлемой частью аппаратных средств приема данных. В этом разделе представлены программы, которые позволяют производить углубленную тематическую обработку изображений и создавать конечные продукты интерпретации спутниковой информации: карты, физические индексы, модели – или экспортировать данные в распространенные геоинформационные системы (ГИС) и программы обработки изображений.

Программные средства ScanMagic®, ScanEx Image Processor®, ScanEx SAR Processor® и ScanEx SPOT Processor® могут поставляться как в составе персональных станций, которые производит центр, так и отдельно, так как спектр форматов для графических, геоинформационных и данных дистанционного зондирования, с которыми работают эти программы, значительно шире того списка форматов, которые получают на выходе после приема данных персональными станциями центра и могут быть заимствованы как из архивов настоящего центра, так и других мировых архивов данных.

Можно предположить, что представленные на Web-сайте центра (www.scanex.ru) программные средства заинтересуют читателей. В каждом разделе предлагаются как демонстрационные версии, так и подробные описания указанных программных продуктов.

При желании научиться работать в программах обработки данных дистанционного зондирования подстилающей поверхности профессионально и эффективно, можно посетить специализированные курсы по обучению работе с программными средствами центра, а также курсы по тематическому дешифрированию данных дистанционного зондирования. На этих курсах пользователь сможет, используя современные технологии, научиться предварительной и тематической обработке спутниковых снимков, а также получать конечные продукты интерпретации данных зондирования подстилающей поверхности.

ГЛАВА 25

ЗАРУБЕЖНЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ

25.1. Американские системы оценки состояния посевов

В американском министерстве сельского хозяйства (USDA) работает специальная служба (FAS – Foreign Agricultural Service), в задачи которой входит техническая помощь, образование и другие социально ориентированные программы для развивающихся стран, которые сконструированы таким образом, чтобы оказывать содействие научно обоснованной политике регуляции и обеспечивать продовольственную безопасность.

Примером таких программ может быть Foreign Market Development Program – программа развития зарубежных рынков. Она известна как программа кооперации, которая использует средства кредитной корпорации для продуктов питания, принадлежащей министерству, для помощи в создании, распространении и долговременном функционировании ориентированных на экспорт рынков американских сельскохозяйственных товаров.

Другим примером может служить то, что FAS является организацией для адресации запросов в соответствии с мерами по санитарии и фитосанитарии, применимых ко всем странам, участникам Всемирной торговой организации. FAS отвечает за подготовку и распространение отчетов по продовольствию, сельскохозяйственному импорту и стандартам, которые должны объединить сведения по импорту из зарубежных стран. Кроме того, FAS несет ответственность за техническую информацию о наличии пестицидов в продуктах питания и их маркировку и стандарты, требования санитарии и фитосанитарии, о пищевых добавках, сертификации и проверке стран, импортирующих в США сельскохозяйственные продукты питания.

FAS имеет сотрудников в 99 учреждениях в 80 странах мира. Специалисты службы наблюдают и информируют министерства по сельскохозяйственным проблемам соответствующих стран.

Для оказания помощи в распространении важнейшей сельскохозяйственной информации FAS разработала Global Agriculture Information Network (GAIN – сеть глобальной сельскохозяйственной информации). GAIN является Web-ориентируемой системой, позволяющей пользователям работать с базой данных FAS по зарубежным отчетам с 1995 г. по настоящее время. Пользователи имеют возможность выбрать отчет по дате, стране, продукции или по ключевым словам. Ежегодно FAS представляет более 3000 отчетов, приблизительно половина из которых поступает в определенное время.

Для примера на рис. 25.1 приведены сведения об изменении спроса на зерно низкого качества по сравнению с пшеницей (рисунок заимствован из одного из последних отчетов FAS по зерну за 2008 год).

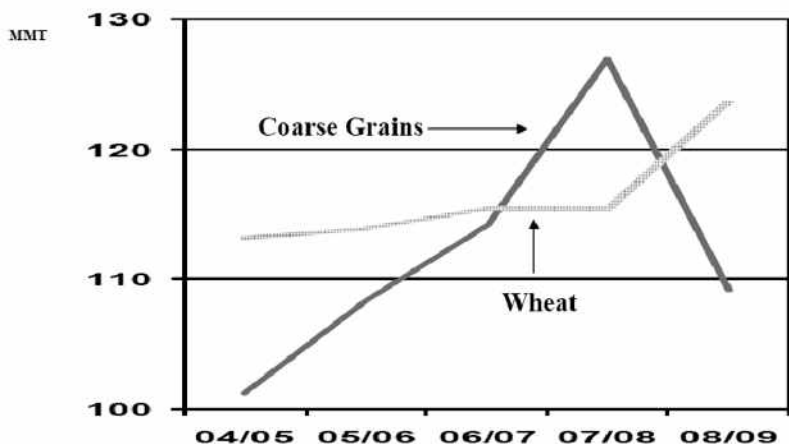


Рис. 25.1. Изменение в глобальном спросе на пшеницу по сравнению с зерном низкого качества

В целом использование данных дистанционного зондирования в службе FAS имеет определенное значение, но в основном используется информация природно-ресурсных спутников высокого пространственного разрешения. В большинстве же случаев FAS ориентируется на информацию, предоставляемую специализированными агентствами, службами и отделами.

Отдел по прогнозированию производства сельскохозяйственных культур (PECAD) того же министерства разрабатывает программу и средства глобального мониторинга сельскохозяйственной продукции с использованием данных дистанционного зондирования. Основная цель программы – предоставить надежные, объективные и точные данные о глобальном производстве сельскохозяйственной продукции. Для этих целей используют данные высокого пространственного разрешения для оценки площадей посевов и прогнозирования урожайности основных культур на территории США и данные низкого пространственного разрешения для прогнозирования урожайности важнейших культур на территории других стран. Методика отдела основана на комплексном использовании метеорологических данных, данных полевых наблюдений и данных дистанционного зондирования среднего и высокого пространственного разрешения для выделения культур, определения фаз их развития и прогнозирования конечного урожая. Результаты анализа используются, чтобы подтвердить или опровергнуть информацию об ожидаемом урожае и для

раннего оповещения о событиях, которые могут существенно повлиять на производство (<http://www.fas.usda.gov/pecad>).

Особое место занимает программа FEWS. Эта программа разрабатывается в партнерстве между несколькими ведомствами США. Цель программы – определить группы людей, испытывающих недостаток продовольствия, и найти возможности для смягчения неблагоприятных условий и резких изменений в области доступности продовольствия. Программа оценивает факторы риска, приводящие к недостатку продовольствия, позволяет выявлять регионы и группы людей, наиболее подверженных такого рода риску, а также разрабатывает возможные действия для смягчения последствий возникающих ситуаций и продовольственных ограничений. Для этого программа использует наблюдения за сетью хозяйств, оценивает их доход и уровень доступности продовольствия. Информация о хозяйствах позволяет понять конкретные причины недостатка продовольствия и принять меры для его устранения. Наряду с этим программа ведет мониторинг осадков, оценивает доступность воды, сезонное развитие растительности и основных сельскохозяйственных культур, а также динамику рыночных цен на сельскохозяйственную продукцию. В программе используются данные наблюдений Земли с нескольких приборов дистанционного зондирования (AVHRR, VEGETATION, MODIS) и продукты спутникового мониторинга (десятидневный NDVI, динамика снежного покрова по данным MODIS и AVHRR, десятидневные композитные изображения AVHRR, данные NASA-TRMM о выпадении осадков и данные NOAA-GDAS о метеорологических и климатических параметрах) для еженедельных оценок неблагоприятных погодных явлений и мониторинга сельскохозяйственных культур. Получаемая информация используется для поддержки принятия решений в области сельскохозяйственной политики и оказания продовольственной помощи (<http://www.fews.net>).

25.2. Система Международной организации по продовольствию и сельскому хозяйству (ФАО)

В принципе, система Международной организации по продовольствию и сельскому хозяйству (ФАО) содержит множество подсистем, среди которых можно упомянуть подсистему прогнозирования урожайности, подсистему учета наземной информации, логистическую подсистему и т. д. В нашу задачу не входит описание всех подсистем. Основное внимание сосредоточим на получении, обработке и использовании спутниковой информации.

В системе CFSAMs (Crop and Food Supply Assessment Missions – системы помощи снабжения продовольствием и сельскохозяйственными культурами) спутниковые изображения имеют две основные функции. Прежде всего, они служат для выявления областей, которые, скорее всего, могут

быть подвержены засухе, с тем чтобы страны-участники могли правильно спланировать свои полевые работы. Во-вторых, эти изображения являются основой для объединения различных типов агрометеорологической информации с точки зрения видов на урожай. Частично эти данные заменяют собой обычные метеорологические наблюдения для тех стран, в которых они не проводятся совсем или проводятся в ограниченном объеме. Только в исключительных случаях эта информация используется напрямую для оценки урожая.

В работе системы используются два вида спутниковых изображений. Первый из них относится к Африке, а именно к ARTEMIS (African Real Time Environmental Monitoring System – африканская система реального времени для мониторинга окружающей среды). Система получает данные спутника «METEOSAT» из Европы, которые затем превращаются в изображения типа Cold Cloud Duration (CCD – продолжительность нахождения над данным местом холодных облаков), выраженные в часах. Дальнейшее преобразование трансформирует полученные изображения в количество дней с осадками. Второй источник принадлежит Америке и представляет собой данные со спутников типа «NOAA». Соответствующие данные в конце концов превращаются в NDVI.

Два вида спутниковых изображений система CFSAMs превращает в цветные отпечатки на персональных компьютерах, работающих под управлением операционной системы типа Windows. Эти отпечатки сравниваются с соответствующими отпечатками текущего сезона для года-аналога или с материалами, осредненными за несколько лет. Сравнение проводится путем сопоставления соответствующих изображений или графиков. Все изображения превращаются в мозаичные картинки, соответствующие декадам (10 дням). Изображения типа CCD обеспечивают сведения о фактических осадках на каждом участке площадью порядка 50 км², в то время как NDVI используется для измерения фотосинтетически активной листовой биомассы на площади 42 или 1 км². Последний показатель является индикатором состояния растительности.

Как уже отмечалось, изображения типа CCD используются для оценки фактических осадков. При этом используются методы калибровки и оценивания параметров по соответствующим моделям. Следует подчеркнуть, что если осадки продолжаются от 5 до 10 дней, в этом случае модель не используется, а относительно осадков принимается предположение об их «значительности». Таким образом, изображения типа CCD используются для локализации засух, и совместно с другими метеорологическими данными (включая NDVI) могут быть использованы для определения фактического уровня выпадения осадков и их интенсивности. Для примера на рис. 25.2 приведены сведения об осадках, полученные на основе изображений типа CCD.

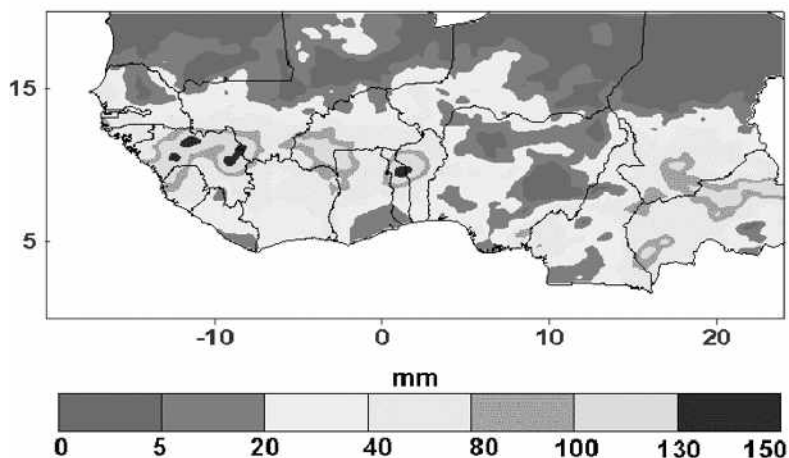


Рис. 25.2. Карта распределения суммы осадков за первую декаду августа для западного побережья Африки (по CCD изображению)

NDVI является достаточно грубой оценкой величины роста растений или их состояния. Следует подчеркнуть, что не существует различий между зерновыми и другими продовольственными культурами, а также травами и сорняками. Значительный отклик NDVI при высокой температуре в начале сезона дождей не обязательно отражает рост растений. Кроме того, NDVI не дает возможности определить, какие культуры достигли зрелости или находятся в состоянии уборки. Значительное снижение NDVI в конце вегетационного сезона отражает состояние зрелости культуры или ее уборку, или же является следствием засухи. Таким образом, для правильной интерпретации значений NDVI в обязательном порядке следует располагать информацией о фактических сроках сева, фенологии или сельскохозяйственном календаре растения. Так, например, достаточно значительный рост NDVI вскоре после всходов означает, что вода больше не является лимитирующим фактором для растения.

Близкое к нулю или нулевое значение NDVI между всходами и зрелостью свидетельствует о том, что растение испытывает стресс от недостатка воды.

В случае, если отсутствует дополнительная информация по развитию растений в конкретном месте, то система осуществляет сравнение изображений типа CCD и NDVI за пять вегетационных сезонов при условии учета фактического урожая за эти годы. Совет из ФАО (Рима) может быть получен, если необходимо выбрать один год в качестве года-аналога.

Весьма полезно построить график, на осях которого отложить значения вегетационного индекса и урожайность (или урожай) за соответствующие

годы. Если не будет четкой корреляции между урожаем и значениями CCD/NDVI за последние годы, то следует использовать значение тренда. В случае же четкой корреляции, необходимо вычислить отклонение от нормы, определить возможное расхождение и построить соответствующий сценарий, а не использовать конкретное значение урожая. При использовании спутниковых изображений следует «размытое» значение урожая отметить в окончательном отчете.

CCD и NDVI потенциально весьма полезны при оценке условий на пастбищах для аридных и полуаридных территорий. Для стран, где пастбища занимают значительную часть территории или продукция животноводства составляет большую часть валового внутреннего продукта, следует очень внимательно обрабатывать и интерпретировать соответствующие спутниковые изображения.

В качестве примера приведена карта начала вегетационного периода в Эфиопии, полученная по спутниковой информации малого пространственного разрешения (рис. 25.3), поскольку начало вегетации в Эфиопии наблюдается несколько раз в год.

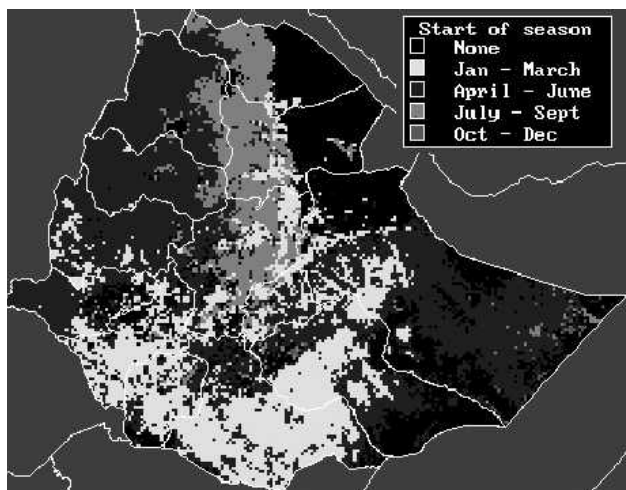


Рис. 25.3. Оценка начала вегетационного периода по территории Эфиопии

25.3. Европейская система мониторинга состояния посевов

Практически в каждой из европейских стран разрабатывается или эксплуатируется соответствующая система мониторинга состояния и продуктивности посевов основных сельскохозяйственных культур. Вместе с тем для Европы в целом работает система мониторинга посевов, основу которой составляют наземные данные и спутниковые изображения.

Программа MARS – Monitoring of Agriculture by Remote Sensing (мониторинг сельского хозяйства по данным дистанционного измерения) , разрабатываемая центром научных исследований в г. Испра (JRC EC), предназначена как для мониторинга продовольственной безопасности в Европе, так и урожая и урожайности в наиболее подверженных риску регионах мира.

В настоящее время существует два проекта: проект MARS-STAT обеспечивает информационную поддержку Европейского союза в области продовольственной политики, проект MARS-FOOD осуществляет поддержку политики Европейского союза в области продовольственной помощи.

Проект MARS-STAT использует метеорологические данные и данные высокого пространственного разрешения для распознавания культур и оценки площадей, занятых конкретными культурами. Метеорологические и климатические данные, информация о характеристиках почвы и культурах, приемах агротехники используются для моделирования развития сельскохозяйственных культур (модель WOFOST) и прогнозирования их урожайности и общего урожая. Данные высокого пространственного разрешения позволяют проводить детальный контроль деятельности отдельных фермеров. В целом в течение года обрабатывается информация о примерно 1,5 млн фермерских хозяйств. Каждая из стран объявляет соответствующий тендер, в котором принимают участие государственные и частные фирмы. Каждый победитель конкурса обеспечивается паспортом хозяйства, в который входит информация за последние 10...15 лет: площади полей, культуры, их урожайность, количество и качество внесенных удобрений, календарь работ и т.д., а также информация высокого пространственного разрешения, которая централизованно закупается организаторами конкурса. Несколько лет тому назад бюджет проекта составлял несколько миллиардов евро.

Проект MARS-FOOD использует только данные низкого пространственного разрешения и соответствующие метеорологические данные. Эта информация используется совместно с региональными агрономическими данными для прогнозирования урожая и урожайности по основным видам сельскохозяйственных культур, культивируемых в различных странах мира. В основе методологии лежат анализ трендов, подобие текущей ситуации по отношению к другим годам (сравнение с аналогичным годом), регрессионный анализ и оценки экспертов. Проект MARS-FOOD регулярно выпускает бюллетени о текущей и прогнозируемой ситуации развития сельскохозяйственных культур в различных регионах мира. В выпускаемых бюллетенях публикуется ряд параметров для качественного и количественного анализа предполагаемого производства сельскохозяйственной продукции: количество осадков, солнечная радиация, температура, водный баланс, в том числе в сравнении с данными многолетних наблюдений. Таким образом, при принятии решений в области

продовольственной безопасности существует более полная картина фактических условий в регионах потенциального риска (<http://agrifish.jrc.it>).

В заключение приведем два рисунка из бюллетеня проекта за 2007 год (рис. 25.4 и 25.5).

Agro meteorological Bulletin №3, 2007. Russia & Central Asian Countries

Highlights Country by Country

	Russia	Agro-meteorological conditions during May-June 2007 were favourable for winter crops, and the situation during the whole current season was close to the previous season. The winter wheat yield 2007 is likely to be slightly higher than normal.
	Armenia	Agro-meteorological conditions during May-June 2007 were favourable for winter crops, and the situation during the whole current season was better than in the previous season. The winter wheat yield 2007 is likely to be close to normal.
	Azerbaijan	Agro-meteorological conditions during May-June 2007 were favourable for winter crops, and the situation during the whole current season was better than in the previous season. The winter wheat yield 2007 is likely to be higher than normal.
	Georgia	Agro-meteorological conditions during May-June 2007 were favourable for winter crops but, the situation during the whole current season was worse than in the previous season. The winter wheat yield is likely to be slightly higher than normal.
	Kazakhstan	The weather during May-June 2007 was favourable for winter crops, and in spite of severe winter the situation during the whole current season was better than in the previous season. The winter wheat yield 2007 is likely to be close to normal.
	Kyrgyzstan	Agro-meteorological conditions during May-June 2007 were favourable for winter crops, and the situation during the whole current season was better than in the previous season. The winter wheat yield 2007 is likely to be close to normal.
	Tajikistan	Agro-meteorological conditions during May-June 2007 were favourable for winter crops, and the situation during the whole current season was better than in the previous season. However, the winter wheat yield 2007 is likely to be close to normal.
	Turkmenistan	Agro-meteorological conditions during May-June 2007 were favourable for winter crops, and the situation during the whole current season was better than in the previous season. The winter wheat yield 2007 is likely to be higher than normal.

Рис. 25.4. Основные сельскохозяйственные события в странах региона

Favourability of meteorological conditions during May – June 2007 for winter crops (in color): color on the map shows favorability and main limitations (see legend on the left)

Comparison with the conditions of previous season:

hatchings show units, where: bt – better temperature conditions; bm – better moisture regime; wt – worse temperature conditions; wm – worse moisture regime; nd – no difference

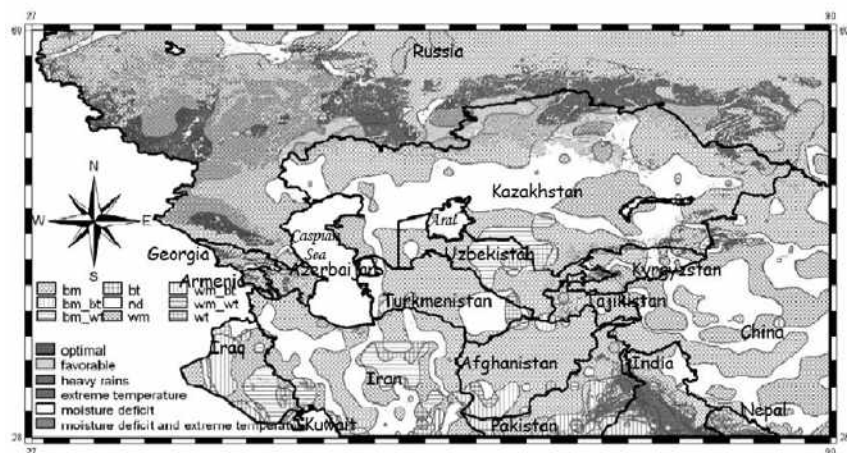


Рис. 25.5. Результаты анализа периода

В первом из них в верхнем прямоугольнике (Россия) приведены агрометеорологические условия мая-июня 2007 года, которые были достаточно благоприятны для озимых культур. Ситуация в целом по вегетационному сезону была близка к сезону предыдущего года. Урожай озимой пшеницы за 2007 год прогнозируется немного выше, чем норма.

Аналогичные данные, учитывающие местную специфику, приведены в остальных прямоугольниках: для Армении, Азербайджана, Грузии, Казахстана, Киргизии, Таджикистана и Туркменистана.

На рис. 25.5 представлены соответствующие данные, а также сведения по другим странам.

25.4. Системы мониторинга посевов в других странах

В различных странах существуют и эксплуатируются соответствующие системы мониторинга состояния и продуктивности посевов основных культур. Как уже было видно из приведенных примеров, каждая система использует те или иные локальные особенности – это может быть элемент инфраструктуры (например сеть наземных станций), система получения информации (налоговая служба), специфика проведения определенных наблюдений (очень часто и во многих местах проводятся определения влажности почвы); определенный параметр имеет существенное прогностическое значение. В связи с этим прямой перенос даже успешной системы мониторинга в другую страну практически невозможен. Но знание особенностей той или иной системы мониторинга в других странах дает основание для улучшения работы действующей системы.

Практически все системы используют наземную информацию и спутниковые данные. В основном используются данные «AVHRR» и «MODIS».

Одной из наиболее развитых является китайская система мониторинга посевов. В системе достаточно успешно используются нестандартные индексы. На рис. 25.6 приведена схема оценки площади территории, занятой кукурузой, а на рис. 25.7 – величина альбедо территории.

Такая страна, как Бразилия, следит за состоянием посевов с помощью спутниковой системы, апробация которой началась в декабре 2008 года с наблюдений за посадками кофе.

Управление государственной системой, куда также входят 15 частных компаний и исследовательские центры, будет осуществлять агентство CONAB. На начальном этапе спутники будут использованы для изучения урожая кофе в провинциях Сан-Паулу, Эспириту-Санто и Минас-Жерайс, где выращивается 90 % урожая кофе Бразилии.

Федеральная администрация по государственным доходам Аргентины, включающая фискальную службу и таможенную, прибегла к использованию принципиально новых механизмов в борьбе с неуплатой налогов в аграрном секторе, достигшей 30 %, что составляет, по данным Международного валютного фонда, 2,5 % от всего ВВП Аргентины.

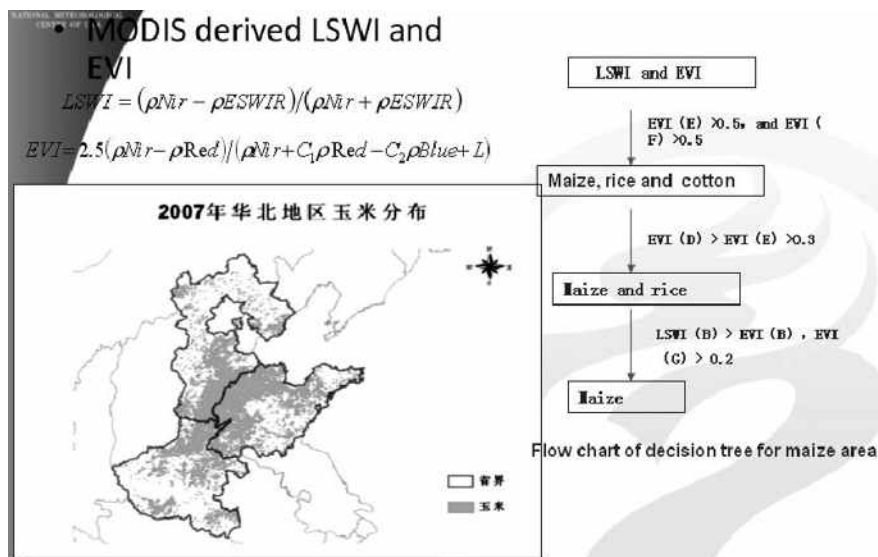


Рис. 25.6. Схема оценки территории, занятой кукурузой (Китай)

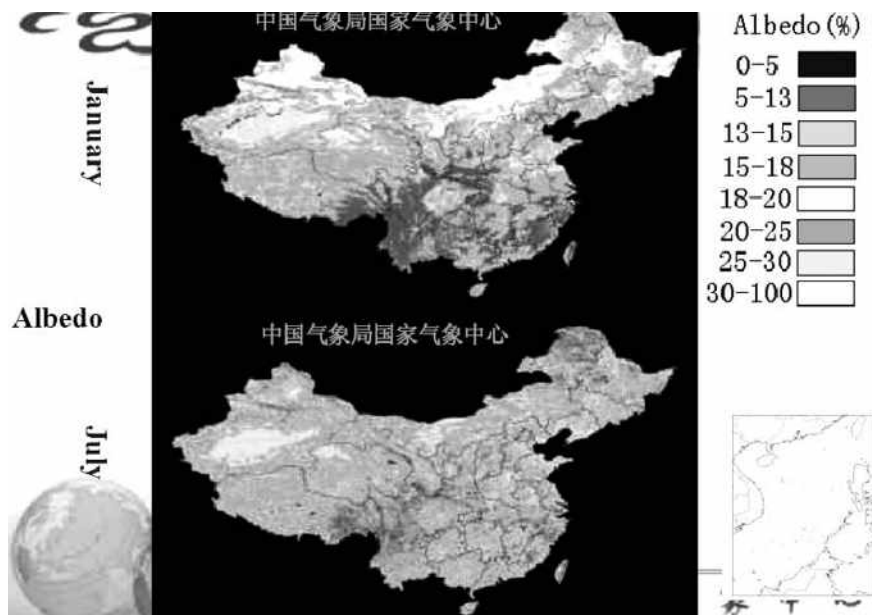


Рис. 25.7. Альbedo территории Китая

Налоговые органы страны объявили, что будут отслеживать сбор урожая зерновых культур из космоса с помощью спутников.

В рамках эксперимента с 2001 года спутники следили за 80 % производителей пшеницы. Отныне эта практика распространилась и на другие культуры – сою, кукурузу, подсолнечник. Власти страны ожидают значительного пополнения казны с учетом прогнозируемого рекордного урожая.

По словам ответственного сотрудника фискального ведомства Аргентины Альберто Абада, речь идет об использовании специального фотооборудования на спутнике «Landsat TM», с помощью которого с высоты 700...800 км будет осуществляться мониторинг всех полей страны.

Абад уверен, что «используемая технология настолько продуктивна, что вполне реально прогнозировать рост налоговых поступлений от аграриев на 25 %».

По утверждению Абада, «каждый вложенный в программу песо вернет дополнительно 138 песо в виде налогов в государственный бюджет».

Казахстан имеет определенный опыт применения спутниковой съемки при оперативном мониторинге зернового производства в Северном Казахстане, выполняемом в интересах Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан. Десять миллионов гектаров посевов яровых зерновых культур, являющихся монокультурой этого региона, анализируются с помощью данных «MODIS» и наземных обследований. В список контролируемых параметров входят предпосевная влажность почв, даты сева, засоренность, состояние на фазу «колошение–цветение» и прогноз объема производства зерна по трем основным зернопроизводящим областям Северного Казахстана. На рис. 25.8 показан фрагмент карты прогнозной урожайности по Казахстану.

На Украине мониторинг состояния посевов ведется на основе информации с «AVHRR» и «MODIS».

В целом направление, связанное с использованием спутниковых данных для мониторинга состояния и продуктивности посевов, активно развивается – появляются новые спутники и новая информация, усвершенствуются и разрабатываются новые алгоритмы обработки информации, повышается точность интерпретации.



Рис. 25.8. Фрагмент карты прогнозной урожайности по Казахстану

Рекомендуемая литература к Части I

Агроэкология. Учебник для студентов вузов по агрономическим специальностям / Под ред. проф. В.А. Черникова и канд. геогр. наук А.И. Чекереса. М.: Колос, 2000. 535 с.

Агроэкология. Методология, технология, экономика. Т. 2. Учебник для студентов вузов по агрономическим специальностям / Под ред. проф. В.А. Черникова и доцента А.И. Чекереса. М.: Колос, 2004. 399 с.

Биосфера / пер. с англ. А.М. Гилярова и Ю.М. Фролова. М.: Мир, 1972. 183 с.

Будыко М.И. Эволюция биосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 488 с.

Бялко А.В. Динамика послевоенного мира // Природа. 1995. № 5. С. 18–25.

Вернадский В.И. Несколько слов о биосфере // Успехи современной биологии. 1944. Т. 18, вып. 2.

Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. М.: Наука, 1988. 520 с.

Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера. М.: Наука, 1994. 396 с.

Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1994 году» // Газета «Зеленый мир». 1995. № 32 (202).

Данилов-Данильян В.И. и др. Проблемы экологии России (Федеральный экологический фонд Российской Федерации). М., 1993. 348 с.

Жученко А.А. Стратегия адаптивной интенсификации сельского хозяйства в XXI веке // Чтения памяти акад. А.Л. Яншина. Вып. 1. Глобальные проблемы биосферы. М.: Наука, 2001. С. 95–115.

Зволинский В.П., Хомяков Д.М. Земледелие и рациональное землепользование. 1998.

Ковда В.А. Земельные ресурсы СССР, их использование и охрана. М.: Изд-во АН СССР, 1978. 187 с.

Милащенко Н.З., Соколов О.А., Брайсон Т., Черников В.А. Устойчивое развитие агроландшафтов. Т. 2. Пушино, 2000. С. 319–598.

Моисеев Ю., Родина Н., Марков А. Продовольственная безопасность России // Международный сельскохозяйственный журнал. 1996. № 6. С. 30–35.

Никонов А.А. Спираль многовековой драмы: аграрная наука и политика России (XVIII–XX вв.). М.: Изд-во «Энциклопедия российских деревень», 1995. 574 с.

Охрана и использование сельскохозяйственных земель, подверженных засолению // Сб. лекций международных учебных курсов ЮНЕП. ВНИАЛМИ, 12.09–01.10.1994 г., Волгоград / Под общей ред. акад. РАСХН Е.С. Павловского. М., 1995. 229 с.

Покровский А.А. Проблемы питания и биосфера // Методологические аспекты исследования биосферы. М.: Наука, 1975.

Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2006. 304 с.

Рамад Ф. Основы прикладной экологии. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 543 с.

Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России / Под ред. проф. А.Д. Клещенко и проф. И.Г. Грингофа. Изд. 2-е, перераб. и расширенное. Обнинск, 2009. 570 с.

Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 183 с.

Савченко Е. Пути обеспечения продовольственной безопасности России // Международный сельскохозяйственный журнал. 1998. № 2. С. 29–32.

Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем. М.: Гидрометеиздат, 1981. 166 с.

Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии / Под ред. проф. И.Г. Грингофа и д-ра эконом. наук А.М. Шамена. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 471 с.

Толковый словарь по охране природы / Под ред. В.В. Снакина. М.: Экология, 1995.

Хргиан А.Х. Очерки развития метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1948. 351 с.

Черников В.А., Соколов О.А., Черкерес А.И. Агроэкология. Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов (интерактивная форма). М., 2001. 135 с.

Baade F. Wettlauf zum Jahre 2000-2 derchgeschene Auflage. Berlin, 1968.

Vernadsky W.I. La biosphere. Paris, 1929.

Рекомендуемая литература к Части II

Бабушкин Л.Н. О климатической характеристике летней воздушной засухи и суховеев в хлопковой зоне Узбекистана // Суховеи, их происхождение и борьба с ними. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 59–64.

Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации растений при недостатке почвенной влаги. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 223 с.

Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.

Бондаренко Н.Ф., Жуковский Е.Е., Мушкин И.Г., Нерпин С.В., Полуэктов Р.А., Усков И.Б. Моделирование продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 264 с.

Вилли К. Биология / Пер. с англ. 5-е изд. М.: Мир, 1968. 808 с.

Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. М.: Наука, 1982. 280 с.

Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М., 2006. 512 с.

Грингоф И.Г. Пастбищные растения Кызылкума и погода. Труды САНИГМИ, вып. 34(49). Л.: Гидрометеиздат, 1967. 138 с.

Двораковский М.С. Экология растений. М.: Высшая школа, 1983. 190 с.

Климат России // Под ред. проф. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 655 с.

Куперман Ф.М., Чирков Ю.И. Биологический контроль за развитием растений на метеорологических станциях. Микрофенология. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 146 с.

Лархер В. Экология растений. М.: Мир, 1978. 384 с.

Лебедев С.И. Физиология растений. Учебник для сельскохозяйственных вузов. Изд-е 2-е. М.: Колос, 1982. 463 с.

Максимов Н.А. Краткий курс физиологии растений. М.: ОГИЗ-Сельхозгиз, 1948. 496 с.

Ничипорович А.А., Строгонова Л.Е., Чмора С.Н., Власова М.П. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах. Методы и задачи учета в связи с формированием урожаев. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 133 с.

Овчаров К.Е. Тайны зеленого растения. АН СССР, сер. «Настоящее и будущее земли и человечества». М.: Наука, 1973. 208 с.

Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата / Под ред. А.И. Бедрицкого. М., 2008. 227 с.

Полевой А.Н. Агрометеорологические условия и продуктивность картофеля. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 118 с.

Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 175 с.

Полевой А.Н. Сельскохозяйственная метеорология. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Агрометеорология». СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 424 с.

Полевой В.В. Физиология растений. Учебник для студентов биологических факультетов вузов. М.: Высшая школа, 1989. 464 с.

Полуэкттов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2006. 394 с.

Рамад Ф. Основы прикладной экологии. Воздействие человека на биосферу / Пер. с фр.; Предисловие Ю.А. Израэля. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 543 с.

Рубин Б.А. Курс физиологии растений. Учебник для студентов биологических факультетов университетов. Изд. 3-е. М.: Высшая школа, 1971. 672 с.

Семенов В.А. Оценка земель и прогноз урожая. Л.: Лениздат, 1977. 96 с.

Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивность агроэкосистем. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 167 с.

Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России. М., 2005. 28 с.

Суховец, их происхождение и борьба с ними / Под ред. Б.Л. Дзержевского. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 370 с.

Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии / Под ред. И.Г. Грингофа и А.М. Шамена. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 471 с.

Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 200 с.

Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 264 с.

Тимирязев К.А. Жизнь растения. Десять общедоступных чтений с приложением четырех публичных лекций / Под ред. чл.-кор. РАСХН В.М. Баутина. М.: Изд-во МСХА, 2006. 319 с.

Харин Н.Г., Кирильцева А.А., Грингоф И.Г. Сезонные явления природы. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 135 с.

Шевелуха В.С. Периодичность роста сельскохозяйственных растений и пути ее регулирования. Минск: Ураджай, 1977. 423 с.

Шульгин И.А. Растение и Солнце. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 251 с.

Шульгин И.А. Солнечные лучи в зеленом растении. Физиолого-метеорологические аспекты. М.: Изд-во ООО «ПКЦ Альтекс», 2009. 213 с.

McCree K.J. An equation for the rate of respiration on white clover plants grown under controlled conditions // Prediction and Measurement of Photosynthetic Productivity, Wageningen, Pudoc, 1970. P. 221–230.

Monsi M. Mathematical models of plant communities // Funct. Terrestr. Ecosyst at the Primary Prod. Level. Paris. UNESCO, 1968. P. 131–150.

Davidson J.L., Philip J.R. Light and pasture growth // Climatology and microclimatology. UNESCO, 1958. P. 181–187.

Рекомендуемая литература к Части III

Абрамов В.К. Климат и культура огурца. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 142 с.

Алпатьев А.М. Влагооборот культурных растений. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 248 с.

Бабушкин Л.Н. Метеорологические факторы и растение. Труды САГУ. Биологические науки. Новая серия. Вып. XXXV, книга 13. 1953.

Бабушкин Л.Н. Основы агрометеорологии в Узбекистане. Ташкент: Изд-во Отд. НИГМИ, Узгидромет, 2004. 288 с.

Бадина Г.В. Возделывание бобовых культур и погода. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 242 с.

Белобородова Г.Г. Агрометеорологические основы повышения продуктивности плодоводства. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 166 с.

Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 472 с.

Вольвач В.В. Моделирование влияния агрометеорологических условий на развитие колорадского жука. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 239 с.

Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. М.: Наука, 1982. 279 с.

Грингоф И.Г. Пастбищные растения Кызылкума и погода. Труды САНИГМИ, вып. 34(49). Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 138 с.

Грингоф И.Г., Пасечнюк А.Д. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения. Учебник для гидрометеорологических средних специальных учебных заведений Росгидромета. СПб., 2005. 552 с.

Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 512 с.

Гулинова Н.В. Погода и урожай сеяных и луговых трав. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 176 с.

Гулинова Н.В. Агрометеорологические условия, баланс кормов и продуктивность животноводства. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 247 с.

Давитая Ф.Ф. Климатические зоны винограда в СССР. М.: Пищепромиздат, 1948. 192 с.

Драгавцева И.А. Экологические ресурсы продуктивности абрикоса на юге России. Краснодар, 1999. 94 с.

Дружелюбова Т.С., Макарова Л.А. Погода и прогноз размножения вредных насекомых. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 83 с.

Жуков В.А., Полевой А.Н., Витченко А.Н., Даниелов С.А. Математические методы оценки агроклиматических ресурсов. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 207 с.

Зоидзе Е.К., Овчаренко Л.И. Сравнительная оценка сельскохозяйственного потенциала климата территории Российской Федерации и степени использования ее агроклиматических ресурсов сельскохозяйственными культурами. СПб., 2000. 75 с.

Климат России / Под ред. проф. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 655 с.

Константинов А.Р. Погода, почва и урожай озимой пшеницы. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 263 с.

Константинов Л.К. Биометеорологические основы годичной периодичности роста и развития плодовых и ягодных растений. Чебоксары, 2011. 345 с.

Коровин А.И. Растения и экстремальные температуры. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 271 с.

Куперман Ф.М., Моисейчик В.А. Вызревание озимых культур. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 168 с.

Лархер В. Экология растений. М.: Мир, 1978. 384 с.

Лекции по сельскохозяйственной метеорологии / Под ред. М.С. Кулика и В.В. Синельщикова. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 340 с.

Личикаки В.М. Перезимовка озимых культур. М.: Колос, 1974. 208 с.

Лосев А.П. Сборник задач и вопросов по агрометеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 144 с.

Лосев А.П., Журина Л.П. Агрометеорология. Учебник для студентов вузов по агрономическим специальностям. М.: Колос, 2001. 301 с.

Макарова Л.А., Минкевич И.И. Погода и болезни культурных растений. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 144 с.

Макарова Л.А., Доронина Г.М. Агрометеорологическое обоснование оптимизации защиты зерновых культур от вредной черепашки. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 144 с.

Максимов Н.А. Краткий курс физиологии растений. Учебник для сельскохозяйственных вузов. Изд. 8-е, перераб. М.–Л.: ОГИЗ-Сельхозгиз, 1948. 496 с.

Мельник Ю.С. Климат и произрастание подсолнечника. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 143 с.

Мищенко З.А. Биоклимат дня и ночи. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 280 с.

Моисейчик В.А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 295 с.

Моисейчик В.А., Шавкунова В.А. Агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая озимой ржи. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 165 с.

Муминов Ф.А. Погода, климат и хлопчатник. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 191 с.

Ничипорович А.А., Строгонова Л.Е., Чмора С.Н., Власова М.П. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 133 с.

Пасечнюк А.Д. Погода и полегание зерновых культур. Л.: Гидрометеоздат, 1990.

Пасечнюк Л.Е., Сенников В.А. Агроклиматическая оценка суховея и продуктивность яровой пшеницы. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 128 с.

Полевой А.Н. Агрометеорологические условия и продуктивность картофеля. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 118 с.

Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 175 с.

Полевой А.Н. Сельскохозяйственная метеорология. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Агрометеорология» / Под ред. И.Г. Грингофа. СПб., 1992. 424 с.

Полевой В.В. Физиология растений. Учебник для студентов биологических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1989. 464 с.

Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2006. 394 с.

Просвиркина А.Г. Агрометеорологические условия и продуктивность проса. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 159 с.

Просунко В.М. Агроклиматические ресурсы и продуктивность риса. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 101 с.

Рубин Б.А. Курс физиологии растений. Учебник для студентов биологических специальностей вузов. Изд. 4-е. М.: Высшая школа, 1976. 576 с.

Свислюк И.В. Погода и урожайность озимой пшеницы на Северном Кавказе и в Нижнем Поволжье. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 280 с.

Сельскохозяйственный энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1989. 656 с.

Селянинов Г.Т. Перспективы субтропического хозяйства СССР в связи с природными ресурсами. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 195 с.

Семенов В.А. Оценка земель и прогноз урожая. Л.: Лениздат, 1977. 96 с.

Синицына Н.И., Гольцберг И.А., Струнников Э.А. Агроклиматология. Уч. пособие для студентов гидрометеорологических специальностей / Под ред. И.А. Гольцберг. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 344 с.

Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 167 с.

Смирнов В.А., Корнейчук В.А. Гречиха и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 68 с.

Степнова В.М. Биоклиматология сои. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 124 с.

Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии / Ред. совет под председ. И.Г. Грингофа и А.М. Шамена. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 471 с.

Тооминг Х.Г. Солнечная радиация и формирование урожая. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 200 с.

Тооминг Х.Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 264 с.

Турманидзе Т.И. Климат и урожай винограда. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 223 с.

Уланова Е.С. Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 302 с.

Уланова Е.С. Методы оценки агрометеорологических условий и прогнозов урожайности зерновых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 53 с.

Федосеев А.П. Климат и пастбищные травы Казахстана. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 317 с.

Федосеев А.П. Агротехника и погода. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 240 с.

Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. Учебник для студентов географических специальностей вузов. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1994. 519 с.

Чирков Ю.И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 251 с.

Чирков Ю.И. Агрометеорология. Учебник для студентов вузов по агрономическим специальностям. Изд. 2-е / Под ред. И.Г. Грингофа. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 296 с.

Шарапов Н.И. Повышение качества урожая сельскохозяйственных культур. Л.: Колос, 1973. 223 с.

Шарапов Н.И., Смирнов В.А. Климат и качество урожая. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 128 с.

Шашко Д.И. Агроклиматические ресурсы СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 248 с.

Шевелуха В.С. Периодичность роста сельскохозяйственных растений и пути ее регулирования. Минск: Ураджай, 1977. 423 с.

Шульгин А.М. Агрометеорология и агроклиматология. Уч. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Метеорология». Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 200 с.

Шульгин И.А. Растение и Солнце. Л.: Гидрометеоиздат, 1973.

Шульгин И.А. Солнечные лучи в зеленом растении. Физиолого-метеорологические аспекты. М., 2009. 213 с.

Яковлев Н.Н. Климат и зимостойкость озимой пшеницы. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 419 с.

Brereton A.J., Danielov S.A., Scott D. Agrometeorology of Grass and Grassland for Middle Latitudes. Technical Note, 197, WMO № 839, Geneva, 1996. P. 2–36.

Gringof I.G., Gerbier N., Covas G. et al. The Analysis of Data collected from International Experiments on Lucerne // Technical Note, 182. CAgM Working Group // WMO № 629, Geneva, 1986. P. 133.

Рекомендуемая литература к Части IV

Алексеев Н.А. Стихийные явления в природе: проявление, эффективность защиты. М.: Мысль, 1988. 256 с.

Алпатыев А.М. Влагооборот культурных растений. Л.: Гидрометеоиздат, 1954. 248 с.

Атлас природных и техногенных опасностей в Российской Федерации / Под ред. С.К. Шойгу. М. ИПЦ «Дизайн. Информации. Картография», 2005. 270 с.

Бабушкин Л.Н. О климатической характеристике летней воздушной засухи и суховеев в хлопковой зоне Узбекистана // Суховеи, их происхождение и борьба с ними. АН СССР, Институт географии / Под ред. проф. Б.Л. Дзердзеевского. М.: Из-во АН СССР, 1957. 370 с.

Бабушкин Л.Н. Агроклиматическое описание Средней Азии // Труды ТашГУ, сер. 236. Ташкент, 1964, кн. 28. С. 5–185.

Бедрицкий А.И. О влиянии погоды и климата на устойчивость и развитие экономики // Метеорология и гидрология. 1997. № 10. С. 5 – 11.

Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Шаймарданов М.З. Опасные гидрометеорологические явления и их влияние на экономику России. Обнинск, 2001. 36 с.

Белобородова Г.Г. Агрометеорологические основы повышения продуктивности плодового хозяйства. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 166 с.

Берлянд М.Е., Красиков П.Н. Предсказание заморозков и борьба с ними. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 148 с.

Бихеле З.Н., Молдау Х.А., Росс Ю.К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 223 с.

Бокова П.А. Град // Опасные гидрометеорологические явления в Средней Азии. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 203–222.

Броунов П.И. Атлас схематических карт вероятности наступления засушливых декад в Европейской России. Изд. 1913 г.

Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеоиздат, 1956. 255 с.

Бучинский И.Е. Засухи и суховеи. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 214 с.

Воейков А.И. Людность селений европейской части России и Западной Сибири // Изв. Российского географического общества. 1909. Том. 45, вып. 1–3. С. 21–71.

Вольвач В.В., Ген А.А., Мамаев Е.В., Матухно В.Н., Мкртчян Р.С. и др. Аэродианционное зондирование заморозков и динамический способ борьбы с ними // Аэрокосмические методы исследования сельскохозяйственных угодий. Доклады Всесоюзного совещания-семинара, г. Обнинск, ноябрь 1983 г. / Под ред. Ю.К. Росса, И.Ф. Берестовского, А.Д. Клещенко.

Генкель П.А. Устойчивость растений к засухе и пути ее повышения. Институт физиологии растений. Т.V, вып. 1. М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1946.

Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. М.: Наука, 1982. 280 с.

Гольцберг И.А. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 198 с.

Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1994 г.» // Газета «Зеленый мир». 1995. № 32 (202).

Грингоф И.Г., Пасечнюк А.Д. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения. Учебник для гидрометеорологических средних специальных учебных заведений Росгидромета. СПб., 2005. 552 с.

Давид Р.Э. Сельскохозяйственная метеорология. Уч. пособие для растениеводческих вузов. М.: Сельхозгиз, 1936. 406 с.

Давитая Ф.Ф. Климатические зоны винограда в СССР. М.: Пищепромиздат, 1948. 192 с.

- Драгавцев А.П.* Яблоня горных обитаний. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 253 с.
- Драгавцева И.А.* Экологические ресурсы продуктивности абрикоса на юге России. Краснодар, 1999. 94 с.
- Дроздов О.А.* Засухи и динамика увлажнения. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 95 с.
- Заславский М.П.* Эрозиоведение. М.: Высшая школа, 1983. 320 с.
- Захаров П.С.* Пыльные бури. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 164 с.
- Звонков В.В.* Водная и ветровая эрозия земли. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 175 с.
- Зоидзе Е.К., Овчаренко Л.И.* Сравнительная оценка сельскохозяйственного потенциала климата территории РФ и степени использования ее агроклиматических ресурсов сельскохозяйственными культурами. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 75 с.
- Исаев А.А.* Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2001. 456 с.
- Кальянов К.С.* Динамика процессов ветровой эрозии почв. АН СССР. Научный совет по проблемам почвоведения и мелиорации почв. М.: Наука, 1976. 155 с.
- Климат России* / Под редакцией д-ра геогр. наук проф. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 655 с.
- Константинов Л.К.* Погода и сад. М.: Московский рабочий, 1974. 95 с.
- Константинов Л.К.* Биометеорологические основы годичной периодичности роста и развития плодовых и ягодных культур. Чебоксары, 2011. 345 с.
- Константинов А.Р., Струзер Л.Р.* Лесные полосы и урожай. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 176 с.
- Константинов А.Р.* Погода, почва и урожай озимой пшеницы. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 263 с.
- Коровин А.И.* Растения и экстремальные температуры. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 271 с.
- Коровин А.И., Мамеев Е.В., Мокиевский В.М.* Осенне-весенние условия погоды и урожай озимых. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 160 с.
- Кулик М.С.* Погода и минеральные удобрения. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 139 с.
- Куперман Ф.М.* Биологические основы культуры пшеницы. Часть 1, 1950; ч. 2, 1953; ч. 3, 1956. М.: Изд-во МГУ.
- Куперман Ф.М., Дворянкин Ф.А.* Этапы формирования органов плодоношения злаков. М.: Изд-во МГУ, 1955. 318 с.
- Куперман Ф.М., Моисейчик В.А.* Выпревание озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 168 с.
- Курбаткин В.П., Ушинцева В.Ф.* Активные воздействия на гидрометеорологические процессы в Средней Азии. Ташкент: Среднеазиатский научно-исследовательский гидрометеорологический институт. 2003. 145 с.
- Личикаки В.М.* Перезимовка озимых культур. М.: Колос, 1974. 207 с.

Логинов В.Ф., Неушкин А.И., Рочева Э.В. Засухи, их возможная причина, предпосылки, предсказания. Обзор. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1976. 72 с.

Лосев А.П. Погода и урожай яблони. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 88 с.

Лосев А.П., Журина Л.Л. Агрометеорология. Учебник для студентов вузов по агрономическим специальностям. М.: Колос, 2001. 301 с.

Максимов Н.А. Развитие учений о водном режиме и засухоустойчивости растений от Тимирязева до наших дней // Тимирязевские чтения, т. IV. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1941.

Максимов Н.А. Избранные работы по засухоустойчивости растений. Т. 1–2. М.: Изд-во АН СССР, 1952.

Махмудов К.М. Град и хлопчатник. Среднеазиатский научно-исследовательский гидрометеорологический институт им. В.А. Бугаева. Ташкент, 1999. 105 с.

Мкртчян Р.С., Акопян А.С., Садоян З.В., Хачатрян Л.С. Агроклиматические условия зимовки абрикоса в Араратской равнине и методика прогнозирования урожая // Агрометеорологические аспекты перезимовки растений. Материалы Всесоюзного межведомственного совещания, март 1975 г. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 187–197.

Моисейчик В.А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 295 с.

Моисейчик В.А., Шавкунова В.А. Агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая озимой ржи. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 165 с.

Неушкин А.И., Санина А.Т. Погодно-климатические характеристики экономических районов европейской части России // Сборник-справочник материалов за 1881 – 1994 гг. СПб.: Гидрометеиздат – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2002. 407 с.

Остаплюк Е.Д. Причины вымокания растений. Киев: Наукова думка, 1977. 188 с.

Пасечнюк А.Д. Погода и полегание зерновых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 212 с.

Пасечнюк Л.Е., Сенников В.А. Агроклиматическая оценка суховея и продуктивность яровой пшеницы. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 128 с.

Побетова Т.А. Влияние зимнего периода на урожай плодовых культур // Агрометеорологические аспекты перезимовки растений. Материалы Всесоюзного межведомственного совещания, март 1975 г. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 177–182.

Побетова Т.А. Плодовые садовые культуры // Справочник агронома по сельскохозяйственной метеорологии. Нечерноземная зона европейской части РСФСР. Раздел 3.10 / Под ред. И.Г. Грингофа. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 444–451.

Полевой А.Н. Сельскохозяйственная метеорология. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «агрометеорология» / Под ред. И.Г. Грингофа. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 424 с.

Полевой В.В. Физиология растений. М.: Высшая школа, 1989. 464 с.

Порядок действий организаций и учреждений Росгидромета при возникновении опасных природных (гидрометеорологических и гелиогеофизических) явлений. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 31 с.

Процеров А.В. Оценка влагообеспеченности яровой пшеницы (овса и ячменя) в период вегетации // Сборник методических указаний по анализу и оценке сложившихся и ожидаемых агрометеорологических условий. Л.: Гидрометеоиздат, 1957. С. 49–53.

РД 52.04.563–96 Инструкция. Критерии стихийных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. М.: Росгидромет. 1996. 15 с.

Роде А.А. Почвоведение. Уч. пособие для лесохозяйственных факультетов вузов. М.–Л.: Гослесбумиздат, 1955.

Русакова Т.И. Моделирование влияния погодных условий на полегание зерновых колосовых культур // Метеорология и гидрология. 1985. № 4. С. 102–107.

Сверлова Л.И., Костырина Т.В. Засуха и лесные пожары на Дальнем Востоке. Хабаровск: Хабаровское книжное изд-во, 1985. 118 с.

Свислюк И.В. Погода и урожайность озимой пшеницы на Северном Кавказе и в Нижнем Поволжье. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 208 с.

Селянинов Г.Т. Перспективы субтропического хозяйства СССР в связи с природными условиями. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 194 с.

Синицина Н.И., Гольцберг И.А., Струнников Э.А. Агроклиматология. Уч. пособие для студентов гидрометеорологических специальностей вузов / Под ред. И.А. Гольцберг. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 344 с.

Смирнова С.И. Суховеи в степях Нижнего Дона и Северного Кавказа. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 140 с.

Соловьева М.А. Зимостойкость плодовых культур при разных условиях выращивания. М.: Колос, 1967. 238 с.

Справочник агронома по сельскохозяйственной метеорологии / Составители: А.П. Федосеев, В.М. Пасов; под ред. И.Г. Грингофа. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 527 с.

Смирнова С.И. Суховеи в степях Нижнего Дона и Северного Кавказа. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 140 с.

Страшная А.И. Агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая семян многолетних сеяных трав на европейской части СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 157 с.

Сурмач Г.П. Водная эрозия и борьба с ней. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 254 с.

Суховеи, их происхождение и борьба с ними / Под ред. проф. Б.Л. Дзердзеевского; Институт географии. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 370 с.

Тимирязев К.А. Борьба растений с засухой. Саратов: ОГИЗ, Саратовское областное изд-во, 1948.

Толковый словарь по сельскохозяйственной метеорологии / Под ред. И.Г. Грингофа и А.М. Шамена. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 470 с.

- Туманов И.И. Физиологические основы зимостойкости культурных растений. М. – Л.: Сельхозгиз, 1940. 366 с.
- Турманидзе Т.И. Климат и урожай винограда. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 223 с.
- Уланова Е.С. Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 302 с.
- Уланова Е.С. Методы оценки агрометеорологических условий и прогнозов урожайности зерновых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 53 с.
- Утешев А.С. Атмосферные засухи и их влияние на природные явления. Алма-Ата, 1972. 175 с.
- Федоров Е.К. Активные воздействия на гидрометеорологические процессы // Метеорология и гидрология за 50 лет советской власти. Л.: Гидрометеиздат, 1967. С. 215–226.
- Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. Учебник для студентов географических специальностей вузов. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1994. 519 с.
- Цубербиллер Е.А. Агроклиматическая характеристика суховея. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 119 с.
- Чирков Ю.И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 251 с.
- Чудновский А.Ф. Заморозки. Л.: Гидрометеиздат, 1949. 124 с.
- Шавкунова В.А. Влияние перезимовки на урожайность и валовой сбор озимой ржи // Метеорология и гидрология. 1980. № 7. С. 90–96.
- Шатилов И.С. Морозостойкость и зимостойкость клевера красного в зависимости от возраста и продолжительности засухи // Доклады ТСХА. 1956. Вып. 25. С. 77–82.
- Шульгин А.М. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур // Сельскохозяйственная биология. 1970. Том V, № 4. С. 533–541.
- Якубов Т.Ф. Ветровая эрозия почвы и борьба с нею. М.: Сельхозгиз, 1946.
- Ярославцев И.М. Заморозки. Л.: Гидрометеиздат, 1949.
- Яшкина И.И., Чуреева Т.В. Методическое пособие по оценке изреженности посевов клевера в зимний период. М.: Гидрометеиздат, 1982. 12 с.
- Kleschenko A.D., Zoidze E.K., Boken V.K. Monitoring Agricultural Drought in Russia // Monitoring and Predicting Agricultural Drought. Oxford University Press. 2005. P. 196–207.
- Landsberg H.E. Drought, a recurrent element of climate. In: Special Environmental Report N.5. Drought. Lectures presented at the Twenty-sixth session of the WMO Executive Committee. WMO – N 403; Geneva – Switzerland. 1975. P. 40–90.
- Palmer W.C. Meteorological Drought. U.S. Department of Commerce, Weather Bureau. Research Paper N 45; USA. 1965. P. 1–58.

Hounam C.E. Assessment of Drought. Report CAgM-V. doc. N 22. World Meteorological Organization. Geneva. Switzerland, 1971.

Landsberg H.E. Drought, a recurrent element of Climate. In: Special Environmental Report, N 5. Drought. WMO – N 403. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva. – Switzerland, 1975. P.41–90.

Thornwaite C.W. and *Maher J.R.* Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance // Publications in Climatology. 1957. Vol. X, N 3.

Рекомендуемая литература к Части V

Габрук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во А и Б, 1997. 296 с.

Дистанционное зондирование: количественный подход / Под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвис. М.: Недра, 1983. 415 с.

Дуда Р., Харп П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1974. 419 с.

Кашкин В.Б., Сухонин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. Уч. пособие. М.: Логос, 2001. 264 с.

Клещенко А.Д. Оценка состояния зерновых культур с применением дистанционных методов Л.: Гидрометеиздат, 1986. 192 с.

Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.

Рачулик В.И., Ситникова М.В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 288 с.

Fundamentals of Remote Sensing. Remote Sensing Tutorial. Canada, 2005. 258 p.

Agbu P. A. and James M. E., The NOAA/NASA Pathfinder AVHRR Land Data Set User's Manual. Goddard Distributed Active Archive Center, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 1994.

ISPRS WG VIII/10 Workshop Remote Sensing Support to Crop Yield Forecast and Area Estimates. Stresa, Italy. Editors B. Baruth, A. Royer, G. Genovese. Organisers Joint Research Center, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2006.

Оглавление

Предисловие	4
Часть I. Ресурсы биосферы и проблемы продовольствия	7
Глава 1. Понятие о биосфере	7
Глава 2. Ресурсы биосферы и проблемы продовольствия	17
2.1. Солнечная радиация	19
2.2. Земельные ресурсы и землепользование	28
2.3. Водные ресурсы	33
2.4. Лесные ресурсы	44
2.5. Ресурсы Мирового океана	51
2.6. Население	53
2.7. Проблемы питания людей и продовольственная безопасность	57
2.7.1. Биологическое разнообразие и его роль в природе и жизни людей	65
2.7.2. Продовольственная безопасность	68
Глава 3. Понятие об экосистемах и агроэкосистемах	77
3.1. Понятие об устойчивом развитии экосистем и агроэкосистем	90
Глава 4. Сельскохозяйственная метеорология и ее место среди научных дисциплин о Земле	95
4.1. Принципы и методы агрометеорологических и зоомете- орологических наблюдений (измерений) и исследований	96
4.2. Основные биологические и экологические законы, используемые в сельскохозяйственной метеорологии	102
Глава 5. Краткий очерк развития сельскохозяйственной метеорологии	106
5.1. Важнейшие современные задачи сельскохозяйственной метеорологии	124
Часть II. Физиологические основы агрометеорологии	126
Введение	126
Глава 6. Строение и функции растительного организма	130
6.1. Органы, ткани, функциональные системы высших растений	130
6.1.1. Растительная клетка, строение и функции	130
6.1.2. Органы растения: побег, лист, корень, вегетативные и генеративные органы, строение и функции	133
Глава 7. Фотосинтез растений	150
7.1. Общие сведения о фотосинтезе растений	150
7.2. Зависимость фотосинтеза от факторов окружающей среды	166

7.2.1. Интенсивность и спектральный состав света.....	166
7.2.2. Влияние концентрации двуокиси углерода	173
7.2.3. Влияние температуры среды.....	175
7.2.4. Влияние водного режима	177
7.2.5. Влияние минерального питания	179
Глава 8. Дыхание растений.....	180
8.1. Общие сведения о дыхании растений	180
8.2. Зависимость дыхания растений от факторов окружающей среды	183
Глава 9. Значение воды в жизнедеятельности растений	190
9.1. Основные функции, выполняемые водой в биологических объектах	191
9.2. Транспирация растений.....	192
9.3. Влага и экологические типы растений	195
9.4. Засухоустойчивость, жароустойчивость и солеустойчивость растений	198
9.5. Засухи и продуктивность сельскохозяйственных культур	206
9.6. Влияние переувлажнения почвы	212
9.7. Холодостойкость, морозоустойчивость и зимостойкость растений.....	216
Глава 10. Минеральное (или корневое) питание растений.....	222
10.1. Типы питания растений	222
10.2. Общие сведения о минеральном (или корневом) питании растений.....	223
10.3. Роль азота, фосфора, серы, калия, кальция, магния в питании растений.....	225
10.4. Роль макро- и микроэлементов в питании растений	239
10.5. Зависимость минерального питания растений от внешних и внутренних факторов.....	242
10.6. Физиологические основы применения удобрений в растениеводстве	243
10.7. Классификация удобрений	245
10.8. Способы внесения удобрений	247
Глава 11. Общие закономерности роста и развития растений. Форми- рование продуктивности растений	249
11.1. Понятия онтогенеза и филогенеза. Рост и развитие растений. Этапы онтогенеза высших растений.....	249
11.2. Понятие «жизненная форма» растений.....	266
11.3. Основные фазы развития растений и этапы органогенеза.....	269
11.4. Стадии развития растений.....	277

11.5. Фотопериодизм растений	279
11.6. Ростовые движения растений	287
11.7. Регенерация у растений (физиологическая и травма- тическая)	290
Глава 12. Физиология размножения растений	292
12.1. Половое размножение растений	292
12.2. Вегетативное размножение растений	295
Глава 13. Значение растений для биосферы (космическая роль растений)	299
13.1. Накопление органической массы	300
13.2. Обеспечение постоянства содержания CO ₂ в атмосфере	301
13.3. Парниковый эффект	301
13.4. Накопление кислорода в атмосфере	305
13.5. Озоновый экран	305
Ч а с т ь III. Агрометеорологические условия, сельскохозяйственные культуры и пастбищная растительность	307
Глава 14. Особенности сельскохозяйственного производства как отрасли экономики	307
Глава 15. Роль экологических и агрометеорологических факторов в жизнедеятельности растений	312
15.1. Свет как фактор жизнедеятельности растений	313
15.2. Тепло как фактор жизнедеятельности растений	318
15.3. Влага как фактор жизнедеятельности растений	330
Глава 16. Продуктивность растений, программирование урожаев, продукционный процесс	333
16.1. Общие закономерности формирования продуктивности растений	333
16.2. Продукционный процесс растений	348
Глава 17. Потребность сельскохозяйственных культур и пастбищной растительности в агрометеорологических условиях	354
17.1. Зерновые культуры	355
17.2. Зерновые бобовые (зернобобовые) культуры	410
17.3. Пряжильные и масличные культуры	418
17.4. Корнеплоды и клубнеплоды	425
17.5. Овощные и бахчевые культуры	431
17.6. Плодовые и ягодные культуры	440
17.7. Многолетние и однолетние сеяные травы	448
17.8. Естественные пастбища и сенокосы	458
17.9. Влияние агрометеорологических условий на качество урожая сельскохозяйственных культур	463
17.10. Влияние метеорологических условий на развитие и распространение вредителей и болезней сельскохо- зяйственных культур	471

Часть IV. Неблагоприятные и опасные погодные явления для сельскохозяйственного производства.....	498
Введение	498
Глава 18. Характеристика неблагоприятных и опасных агрометеорологических условий теплого периода года, их влияние на сельскохозяйственные культуры и меры защиты	505
18.1. Заморозки.....	505
18.1.1. Географическое распространение заморозков и их вероятность	512
18.1.2. Влияние заморозков на сельскохозяйственные и плодовые культуры.....	520
18.1.3. Методы прогноза заморозков	524
18.1.4. Методы защиты сельскохозяйственных и плодовых культур от заморозков	527
18.2. Засухи, суховеи и засушливые явления	539
18.2.1. Происхождение засух и суховеев.....	544
18.2.2. Методы оценки засух	547
18.2.3. Методы оценки суховеев.....	558
18.2.4. Условия возникновения суховеев.....	564
18.2.5. Повторяемость и вероятность засух и суховеев в России и сопредельных странах СНГ.....	566
18.2.6. Влияние засух и суховеев на урожайность зерновых и плодовых культур.....	574
18.2.7. Меры борьбы с засухами и суховеями	580
18.3. Лесные и степные пожары	583
18.4. Сильные ветры, пыльные бури и ветровая эрозия.....	585
18.5. Сильные ливневые дожди, переувлажнение почвы и водная эрозия	601
18.6. Град, градобитие и противогололедная защита сельскохозяйственных угодий	614
Глава 19. Характеристика неблагоприятных и опасных гидрометеорологических условий холодного периода года, их влияние на зимующие сельскохозяйственные культуры и меры защиты	622
19.1. Зимостойкость и морозостойкость растений.....	623
19.2. Основные причины гибели озимых культур и меры защиты посевов	627
19.3. Неблагоприятные условия перезимовки сеяных кормовых трав.....	648
19.4. Неблагоприятные и опасные условия перезимовки плодовых культур, виноградников и меры защиты.....	656
19.5. Страхование урожая сельскохозяйственных культур с государственной поддержкой	671

Часть V. Спутниковые методы исследования в агрометеорологии и их практическое применение.....	674
Введение	674
Глава 20. Общие сведения о дистанционном зондировании.....	675
Глава 21. Физические основы дистанционного зондирования.....	684
Глава 22. Спутниковые системы дистанционного зондирования.....	694
Глава 23. Современные методы определения параметров растительного покрова по спутниковой информации	732
23.1. Перечень индексов и формул для их определения.....	732
23.2. NDVI – теория и практика.....	741
23.3. Применение методов распознавания образов при дистанционном зондировании. Классификация и кластерный анализ	750
Глава 24. Российские системы мониторинга состояния посевов	759
24.1. Система Росгидромета.....	759
24.2. Система Института космических исследований Академии наук России	769
24.3. Система компании «СканЭкс»	773
Глава 25. Зарубежные системы мониторинга состояния посевов	776
25.1. Американские системы оценки состояния посевов	776
25.2. Система Международной организации по продовольствию и сельскому хозяйству (ФАО).....	778
25.3. Европейская система мониторинга состояния посевов	781
25.4. Системы мониторинга посевов в других странах	784
Рекомендуемая литература к Части I	788
Рекомендуемая литература к Части II	789
Рекомендуемая литература к Части III	791
Рекомендуемая литература к Части IV	795
Рекомендуемая литература к Части V	801

БЛАГОДАРНОСТИ

В подготовке материалов настоящего учебного пособия принимали участие:

заведующий отделом ФГБУ «ВНИИСХМ», кандидат физико-математических наук **О.В. Вирченко**;

заведующая лабораторией, кандидат географических наук **О.К. Устинова**;

ведущий программист **А.М. Овчаренко**;

инженер **Л.А. Шестакова**.

Авторы выражают им искреннюю признательность за помощь и сотрудничество.

И.Г. Грингоф, А.Д. Клещенко

Основы сельскохозяйственной метеорологии

Том I

Потребность сельскохозяйственных культур
в агрометеорологических условиях
и опасные для сельскохозяйственного производства
погодные условия

Корректоры: *Н.А. Иванова, Л.В. Гришкина*

Компьютерная верстка: *Т.А. Киселева*

Оригинал-макет подготовлен в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»

249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, 6