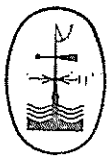
А.Н.Полевой

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

Рекомендовано Комитетом по высшей школе Министерства науки, высшей школы и технической политики Российской Федерации в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Агрометеорология»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1992

УДК 630 : 551.5 (075)

Рецензенты: д-р геогр. наук, проф. М. А. Петросянц,
д-р биол. наук И. А. Шульгин (МГУ), д-р физ.-мат. наук, проф. Л. Т. Матвеев,
канд. геогр. наук В. Д. Петрушенко (ЛГМИ)

Ответственный редактор д-р биол. наук И. Г. Грингоф

В книге изложены основные разделы курса сельскохозяйственной метеорологии. На основе теории энерго- и массообмена в системе почва — растение — атмосфера рассмотрено формирование гидрометеорологического режима в растительном покрове. С позиций количественной теории фотосинтеза исследовано воздействие факторов внешней среды (метеорологических, климатических, гидрологических, почвенных) на рост, развитие и формирование продуктивности растений. Особое внимание уделено влиянию агрометеорологических условий на сельскохозяйственное производство.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов гидрометеорологических институтов и государственных университетов, а также для специалистов, работающих в области сельскохозяйственной метеорологии, экологии и сельского хозяйства.

All the main subjects of general agrometeorology are presented. Basing on the theory of energy and mass exchange in the system soil—plant—atmosphere the formation of hydrometeorological regime within plant canopy is considered. The impact of environmental factors (meteorological, climatic, hydrological, soil) on the growth, development and yield formation of crops through the quantitative photosynthesis theory is discussed, the influence of agrometeorological conditions on agricultural production is considered.

The textbook by professor A. N. Polevoy is of particular interest to students and degree — level students of hydrometeorological institutes and universities, and also to specialists in the field of agricultural meteorology, ecology and agriculture.

Гидрометеороло... БИБЛИОТЕКА
Ч-д 195196 Малоохтинский ...

П $\frac{3702030000-086}{069(02)-92}$ 38-92

ISBN 5-286-00829-1

© А. Н. Полевой, 1992 г.

Светлой памяти моего отца, Полевого Николая Ивановича, хлебороба и солдата Великой Отечественной войны посвящаю

Автор

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Сельскохозяйственная метеорология» — основной при подготовке инженеров-агрометеорологов в Одесском гидрометеорологическом институте. Этот институт по существу является единственным высшим учебным заведением в нашей стране, которое ведет подготовку специалистов такого профиля. На базе этого курса строится последующее изучение таких важных дисциплин, как агрометеорологические измерения, агроклиматология, агрометеорологические прогнозы.

В книге изложены современные знания о формировании гидрометеорологического режима в системе почва — растение — атмосфера, о воздействии факторов внешней среды на важнейшие процессы жизнедеятельности растений и животных и на их продуктивность. В учебник включены все основные разделы, в которых закладываются основы изучения других агрометеорологических дисциплин.

Особое внимание уделено изложению количественной теории энерго- и массообмена в системе почва — растение — атмосфера, с позиций количественной теории фотосинтеза исследовано воздействие экстремальных условий на рост, развитие и формирование продуктивности растений, а также влияние агрометеорологических условий на сельскохозяйственное производство.

Изложение материала построено таким образом, чтобы читатель, ознакомившись с содержанием учебника, оказался подготовленным к изучению других агрометеорологических дисциплин, в которых рассматриваются наиболее важные проблемы агрометеорологии.

Развитие агрометеорологических исследований, возникновение новых научных направлений, сопровождающиеся появлением большого числа научных публикаций, позволили подойти к составлению современного учебника. В учебник включены результаты исследований, которые теоретически достаточно обоснованы, представляют научную и практическую ценность и служат теоретической базой для изучения других агрометеорологических дис-

циплин. При этом автор стремился к ясному последовательному изложению результатов исследований в сжатой форме. С учетом этого в книге приводится список литературных источников, использованных при написании учебника. Этот список будет полезен как при изучении курса, так и при выполнении студентами курсовых и дипломных проектов.

Учебник «Сельскохозяйственная метеорология» является первой попыткой обобщения обширных теоретических и экспериментальных исследований в различных областях агрометеорологии.

Появлению учебника способствовало доброжелательное внимание и одобрение работы над ним со стороны сотрудников коллектива отдела агрометеорологических прогнозов Всесоюзного НИИ сельскохозяйственной метеорологии. При подготовке учебника к печати большую техническую помощь оказали сотрудники отдела ВНИИСХМ Н. И. Енина, О. И. Юдина, Л. М. Осицына, Н. А. Сунцева, Н. Ф. Мищенко. Всех их автор искренне благодарит.

Особую признательность автор выражает канд. физ.-мат. наук А. П. Бойко, доценту Н. И. Синицыной, рецензентам: проф. Л. Т. Матвееву, проф. М. А. Петросянцу, д-ру биол. наук И. А. Шульгину, канд. геогр. наук В. Д. Петрушенко, а также научному редактору д-ру биол. наук И. Г. Грингофу за просмотр рукописи и ряд полезных критических замечаний, способствовавших ее улучшению.

Автор будет признателен всем, кто после ознакомления с книгой сочтет возможным сообщить в произвольной форме свои замечания по адресу: 270016, Одесса, ул. Львовская 15, Одесский гидрометеорологический институт, кафедра агрометеорологии.

ВВЕДЕНИЕ

В.1. Предмет и методы сельскохозяйственной метеорологии

Сельскохозяйственная метеорология — наука, изучающая метеорологические, климатические и гидрологические условия в их взаимодействии с объектами и процессами сельскохозяйственного производства. По своим свойствам объекты сельского хозяйства и процессы сельскохозяйственного производства весьма разнообразны и изменчивы в пространстве и времени.

Объекты сельского хозяйства представляют собой искусственно создаваемые человеком в условиях окружающей среды агроценозы (или агрофитоценозы), основу которых составляют искусственные и естественные *фитоценозы* (устойчивые сообщества растений) и *зооценозы* (совокупность взаимосвязанных видов животных), связанные условиями среды и взаимоотношениями в пределах более или менее однородного участка территории (биотопа).

Из большого числа экологических компонентов среды обитания фито- и зооценозов сельскохозяйственная метеорология рассматривает метеорологические, климатические, гидрологические и почвенные условия в их сложной взаимосвязи. Из значительного числа живых организмов, составляющих агроценоз, сельскохозяйственная метеорология изучает воздействие среды обитания на искусственные фито- и зооценозы (культивируемые популяции, сорта растений, породы животных) и процессы их культивирования и ограниченный состав растительных компонентов естественных фитоценозов (сенокосно-пастбищные растения).

Сельскохозяйственная метеорология представляет собой научную систему специфических знаний, объединенных законами, методами и понятиями, которая исследует во времени и пространстве метеорологические, климатические, гидрологические и почвенные условия во взаимодействии с искусственными фито- и зооценозами и процессами их культивирования.

Методологической основой сельскохозяйственной метеорологии как части всей советской науки являются: 1) принцип единства теории и практики при определяющем значении общественной практики в развитии науки; 2) философские положения диалек-

тического материализма; 3) охранно преобразовательный подход к явлениям природы для целей сельского хозяйства.

Методы агрометеорологических исследований базируются на следующих основных законах.

1. Закон равнозначности (или незаменимости) основных факторов жизни. Суть его состоит в том, что ни один из необходимых для развития растений факторов (воздух, свет, тепло, влага, питательные вещества) не может быть ни исключен, ни заменен другим; все они необходимы для жизни растений.

2. Закон неравноценности факторов среды для растений. Согласно этому закону, факторы среды по своему воздействию на растения подразделяются на основные и второстепенные. Основные факторы оказывают непосредственное и значительное влияние на растения, второстепенные — играют косвенную роль, корректируют (усиливают или ослабляют) действие (влияние) основных факторов.

3. Закон минимума (или лимитирующего фактора), согласно которому при неизменяющихся других условиях уровень урожая определяется тем фактором, который находится в минимуме. Например, в засушливых зонах количество влаги является лимитирующим фактором урожая.

4. Закон оптимума (или совокупного действия факторов). Согласно этому закону, наивысшая продуктивность растений обеспечивается только оптимальным сочетанием разных факторов при непрерывном повышении качества агротехники возделывания растений.

5. Закон критических периодов, в соответствии с которым в отдельные периоды жизни растения особо чувствительны к определенным количественным значениям факторов среды, особенно к влаге, теплу, солнечной радиации.

Цель основных методов исследований сельскохозяйственной метеорологии, базирующихся на указанных законах,— установить количественные значения основных и второстепенных факторов среды, обусловливающих существование растений, их лимитирующие значения и оптимальные сочетания с учетом критических периодов. Для этого в сельскохозяйственной метеорологии применяются следующие методы исследований.

1. Метод сопряженных (*параллельных*) *наблюдений* за состоянием, ростом, развитием растений и метеорологическими условиями, в которых произрастают объекты наблюдений (сравнительный метод). С помощью этого метода на материалах полевых и лабораторных наблюдений устанавливаются количественные и качественные связи между условиями погоды и ростом, развитием и формированием продуктивности растений, выявляется потребность растений в основных факторах среды — количестве света, тепла, влаги, питательных веществ, определяются пороговые (критические) значения этих факторов для жизнедеятельности различных культур и сортов.

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 растительных объектов. При этом высеваемые растения (например, через каждые 5—10 дней начиная с весны и до конца вегетационного периода) попадают в неодинаковые условия тепла, влаги и освещенности. Сопряженные наблюдения за метеорологическими условиями, ростом и развитием растений позволяют 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) на разных континентах, одновременно в нескольких странах. Этот метод предусматривает использование идентичного посевного материала, соблюдение единообразия предложенных агротехнических приемов и методики наблюдений. Различия в почвенно-климатических условиях отражаются на особенностях роста, развития и формирования урожайности изучаемых растений.

4. Экспериментально-полевой метод предусматривает использование различных стационарных и передвижных камер искусственного климата (фитотронов), теплиц, газометрических экологических камер, в которых изучается реакция растений на заданные параметры света, тепла, влаги, газового состава и питательные компоненты.

5. Метод дистанционного определения параметров состояния подстилающей поверхности (почвы, растительного покрова), *фенологии растений, температуры и влажности, объемов биомассы, отдельных элементов продуктивности растений, запасов древесины* и т. д. предусматривает использование специальной аппаратуры, установленной на летательных аппаратах (на самолетах, вертолетах, а также на искусственных спутниках Земли) или на различных видах наземного транспорта. Результаты измерений, полученные этим методом, дают информацию об изучаемых объектах на больших площадях.

6. Картографический метод исследования заключается в использовании разнообразных карт для выявления климатических и микроклиматических особенностей территории в их статике и динамике для наиболее рационального размещения объектов сельскохозяйственного производства.

7. Исторический метод базируется на сравнении состояний климатических условий сельскохозяйственного производства, между которыми происходят или будут происходить какие-то изменения существенных характеристик либо самого комплекса, либо факторов, его формирующих. В качестве источника информации о состоянии объектов сельскохозяйственного производства в их взаи-

модействии с климатическими условиями используются результаты прошлых наблюдений, зафиксированные в виде составленных в разное время исторических документов (каталоги засух, неурожайных лет), текстовых описаний, карт и т. д.

8. Математические методы. Среда обитания во взаимодействии с объектами сельскохозяйственного производства представляют собой сложные динамические системы со множеством прямых и обратных связей, которые чаще всего не являются однозначными, жестко детерминированными. Они осложнены многочисленными второстепенными факторами и обычно корреляционные, а не функциональные. Для их изучения широко используются различные методы математической статистики, математический и векторный анализ, теория информации и теория множеств, теория графов, теория распознавания образов и теория вероятностей.

9. Метод математического моделирования как метод исследования в последние годы получает все более широкое распространение. Моделирование представляет собой естественный прием познания и практической деятельности, особую форму опосредования. При моделировании между исследователем и интересующим его объектом ставится некоторое промежуточное звено — модель, которая выступает в качестве представителя (заместителя) объекта — оригинала. Сведения об объекте исследователь получает на основании анализа модели. Объективная основа такого модельного опосредования — некоторое сходство между моделью и объектом, на который направлены интересы исследователя. Моделируются: процессы энерго- и массообмена между растительным покровом и атмосферой (перенос солнечной радиации, тепло- и влагообмен, турбулентность и режим углекислого газа в растительном покрове); воздействие факторов среды на важнейшие жизненные процессы растений и животных, формирование количества и качества урожая сельскохозяйственных культур.

В.2. Связь сельскохозяйственной метеорологии с другими науками. Деление на научные дисциплины

Сельскохозяйственная метеорология как прикладная наука входит в состав метеорологической науки.

При изучении метеорологических, климатических, гидрологических и почвенных условий в их взаимосвязи с искусственными фито- и зооценозами сельскохозяйственная метеорология опирается на ряд законов, установленных другими науками, такими, как физика атмосферы, физика почвы, биофизика, агрономия.

Наиболее тесно сельскохозяйственная метеорология связана с метеорологией, климатологией, гидрологией, почвоведением, физической географией, экологией, физиологией растений, растениеводством и земледелием, а также другими геофизическими, географическими, биологическими и сельскохозяйственными отраслями знаний.

Развитие сельскохозяйственной метеорологии на стыке геофизических, географических, биологических и сельскохозяйственных

наук позволило выделить крупные ее разделы в самостоятельные области научных знаний. К ним относятся следующие:

1. Общая сельскохозяйственная метеорология — учение об общих закономерностях формирования радиационного, водно-теплового, турбулентного и углекислотного режимов в растительном покрове, о воздействии этих режимов на важнейшие процессы жизнедеятельности растений, их рост, развитие и продуктивность, а также о влиянии агрометеорологических условий на сельскохозяйственное производство.

2. Агрометеорология — прикладная отрасль метеорологии, изучающая метеорологические, гидрологические и почвенные условия, влияющие на рост, развитие и продуктивность растений.

3. Агроклиматология — прикладная отрасль метеорологии, изучающая климатические условия и их взаимодействие с процессами и объектами сельскохозяйственного производства.

4. Агрогидрология — прикладная отрасль метеорологии, изучающая состояние, водно-физические свойства и водный режим почвы сельскохозяйственных угодий и их взаимодействие с метеорологическими условиями и процессами сельскохозяйственного производства.

5. Зоометеорология — прикладная отрасль метеорологии, изучающая влияние метеорологических условий на сельскохозяйственных животных.

Из вышеперечисленных прикладных отраслей сельскохозяйственной метеорологии можно выделить самостоятельные разделы, а именно:

1) агрометеорологические прогнозы — прикладная область, изучающая закономерности распределения и изменения во времени и пространстве агрометеорологических условий, влияющих на объекты и процессы сельскохозяйственного производства, и методы прогнозирования этого влияния. Здесь отдельно выделяются собственно *агрометеорологические расчеты и прогнозы*, а также *статистические*, *динамико-статистические* и *синоптико-статистические методы прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур*;

2) агрометеорологические измерения — прикладная область знаний, изучающая способы измерения характеристик среды обитания сельскохозяйственных объектов и их состояния; среди них выделяют отдельно наземные, авиационные и спутниковые агрометеорологические измерения;

3) сельскохозяйственная микроклиматология, фитоклиматология и другие.

В.3. Основные задачи сельскохозяйственной метеорологии

Задачи сельскохозяйственной метеорологии определяются требованиями ведения сельского хозяйства, его интенсификации путем механизации, химизации, мелиорации земель, селекции высокопродуктивных сортов культурных растений.

Важнейшие задачи сельскохозяйственной метеорологии следующие:

1) изучение и описание закономерностей формирования метеорологических и климатических условий сельскохозяйственного производства в пространстве и во времени;

2) разработка методов количественной оценки влияния метеорологических факторов на состояние почвы, развитие, рост и формирование урожая агрофитоценозов, на состояние сельскохозяйственных животных, на развитие и распространение вредителей и болезней сельскохозяйственных культур;

3) разработка методов агрометеорологических прогнозов и усовершенствование форм агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства;

4) агроклиматическое районирование, размещение новых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур и пород животных, агроклиматическое обоснование приемов наиболее полного и рационального использования ресурсов климата для повышения продуктивности растениеводства и животноводства;

5) агроклиматическое обоснование приемов мелиорации земель и изменения микроклимата полей, внедрения индустриальных технологий в растениеводстве, в том числе дифференцированного применения агротехники в соответствии со сложившимися и ожидаемыми условиями погоды;

6) разработка методов борьбы с неблагоприятными и опасными для сельского хозяйства гидрометеорологическими явлениями, в том числе методов активного воздействия на эти явления.

Эти задачи решаются агрометеорологической наукой и практикой с целью оперативного обеспечения различными видами агрометеорологической информации сельскохозяйственного производства.

Опыт последних лет показывает, что использование разнообразной гидрометеорологической информации в сельском хозяйстве происходит на трех временных уровнях: 1) при выборе проектных решений; 2) при выработке плановых решений; 3) при принятии оперативно-хозяйственных решений.

При выборе проектных решений обосновывается рациональное размещение и специализация сельского хозяйства, районирование культур и сортов сельскохозяйственных растений и пород животных, создание гидромелиоративных систем и т. д. При этом используется климатическая и агроклиматическая информация.

При выработке плановых решений планируются размеры урожаев, определяются потребности в удобрениях и ядохимикатах, объемы поливной воды, составляются сезонные графики полевых работ и т. д. Здесь в первую очередь используется текущая оперативная агрометеорологическая и гидрологическая информация, анализируются сложившиеся агрометеорологические условия применительно к конкретным территориям и культурам, а также гидрометеорологические прогнозы различной заблаговременности.

При принятии оперативно-хозяйственных решений разрабатываются действия непосредственного управления технологическими процессами в период вегетации растений и мероприятиями, осуществляемыми на животноводческих фермах и выпасах. Для этого используется оперативная информация о фактическом состоянии среды приземного слоя атмосферы, почвы, посевов и гидрометеорологические прогнозы. Для успешного решения задач сельскохозяйственной метеорологии, для эффективного использования агро- и гидрометеорологической информации в сельскохозяйственном производстве постоянно совершенствуются методы агрометеорологических исследований и наблюдений.

В.4. Краткий очерк истории развития сельскохозяйственной метеорологии

Первые научные представления о роли климата и погоды в сельском хозяйстве относятся к XVIII и XIX вв., когда начали вестись инструментальные наблюдения за атмосферными процессами и явлениями.

Впервые М. В. Ломоносов (1758 г.) указал на значение метеорологических условий и их прогноза для земледелия.

Крупнейшие русские ученые агрономы А. Т. Болотов, И. М. Комов вели систематические наблюдения за состоянием культурных растений и условиями погоды, изучали климатические условия страны. Французский ученый Р. Реомюр исследовал темпы развития растений в связи с температурой воздуха, впервые применив для этого показатель суммы температур; другой французский ученый Гаспарен в своих работах рассматривал связь климата с земледелием.

Основоположниками сельскохозяйственной метеорологии как науки были выдающиеся русские ученые Александ Иванович Воейков (1842—1916) и Петр Иванович Броунов (1852—1927 гг.).

А. И. Воейков впервые доказал возможность и необходимость применения знаний о климате в сельском хозяйстве. В своей знаменитой книге «Климаты земного шара, в особенности России» (1884 г.) А. И. Воейков в двух главах описывал взаимосвязь между климатом и растительностью. Им впервые были оценены климатические ресурсы России для сельскохозяйственного производства, в частности кукурузы на зерно и фураж; он уделил большое внимание развитию орошаемого земледелия в южных районах страны, развитию хлопководства в Туркестане (ныне Среднеазиатские республики), дал агроклиматическое обоснование возделывания субтропических культур (чая, цитрусовых, бамбука и др.) в Закавказье.

А. И. Воейков сделал важный вывод о роли снежного покрова как климатообразующего фактора, показал целесообразность проведения снегозадержания как агротехнического приема для улучшения условий влагообеспеченности и перезимовки озимых культур. Многие его работы посвящены проблемам облесения степной

и лесостепной зон, им доказана роль лесопосадок в улучшении водного режима почв в засушливых районах.

В 1885 г. А. И. Воейковым были организованы первые в России 12 агрометеорологических станций и разработана программа наблюдений на этих станциях.

Однако передовые и практически важные идеи А. И. Воейкова не находили широкого применения в дореволюционной России. С большой горечью он писал: «Сотни и тысячи образованных и богатых хозяев, применяющих усовершенствованные орудия, знают о климате и погоде своей местности не более, чем их соседи, неграмотные крестьяне, и это незнание отражается на производстве громадными убытками». Тяжелейшие последствия жестоких засух 1891—1892 гг. в России обратили внимание широкой общественности на значение климата и погоды в сельскохозяйственном производстве.

Немалая роль в развитии сельскохозяйственной метеорологии и организации агрометстанций принадлежит А. В. Клоссовскому (1846—1917 гг.).

П. И. Броунов в 1890 г. организовал сеть метеорологических станций в Приднепровье, причем в программу их работы были включены наблюдения за сельскохозяйственными растениями. В 1897 г. по инициативе и при активном участии П. И. Броунова при Департаменте земледелия России было организовано Метеорологическое бюро — первое в стране и во всем мире научное агрометеорологическое учреждение. Руководителем этого бюро был назначен П. И. Броунов.

Главным в разработанной П. И. Броуновым программе наблюдений станций и постов было проведение сопряженных наблюдений за развитием и ростом сельскохозяйственных культур и метеорологическими условиями, а также другими явлениями, имеющими отношение к возделыванию растений. Это положение и в наши дни является основным в программах агрометеорологических наблюдений на территории всей страны.

С 1901 г. бюро стало издавать «Труды по сельскохозяйственной метеорологии», и первым редактором их был П. И. Броунов. Ему принадлежит открытие закона о критических периодах в развитии растений, им выявлены критерии засушливости и вероятности наступления засушливых декад в Европейской России, выделены климатические и сельскохозяйственные районы России.

В 1912 г. была опубликована монография П. И. Броунова «Полевые культуры и погода», в которой были обобщены первые итоги агрометеорологических исследований.

За рубежом агрометеорологические исследования начались во второй половине XIX в. Большое значение для развития сельскохозяйственной метеорологии во многих странах имело создание в 1913 г. Комиссии по агрометеорологии при Международной метеорологической организации (ММО) в Риме. В числе организаторов Комиссии по сельскохозяйственной метеорологии был П. И. Броунов.

Новый этап в развитии агрометеорологии начался вскоре после Октябрьской социалистической революции 1917 г. В апреле 1921 г. В. И. Ленин подписал Декрет Совета Труда и Обороны об организации метеорологической и агрометеорологической государственной службы (Метеочасть Наркомзема РСФСР). Этим документом был определен порядок сбора метео- и агрометеорологической информации, их внеочередной передачи в Главное метеорологическое управление, на которое возлагались функции по сбору и анализу всех материалов сети наблюдений.

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. Весной 1922 г. по данным этой сети (около 100 станций) был составлен и опубликован Сельскохозяйственный бюллетень № 1, ставший прообразом современных агрометеорологических бюллетеней. Так была создана агрометеорологическая службы в государственном масштабе.

С 1930 г. агрометеорологические исследования были продолжены в Центральном бюро погоды в Москве, реорганизованном впоследствии в Центральный институт прогнозов (ЦИП).

В 1932 г. в Ленинграде на базе созданного П. И. Броуновым отдела был организован Агрогидрометеорологический институт (АГМИ) и несколько позднее Институт засухи в Саратове; оба института входили в состав гидрометеорологической службы. В этих институтах были развернуты агрометеорологические исследования. Разрабатывалась теория агрометеорологических прогнозов, изучалась динамика запасов почвенной влаги на территории СССР, была составлена первая карта агроклиматического районирования СССР, опубликован «Мировой агроклиматический справочник», выполнены агроклиматические исследования, продолжалось изучение засух и суховеев, были разработаны основы агрометеорологического обслуживания сельского хозяйства. Большая заслуга в развитии и практическом применении этих исследований принадлежит Г. Т. Селянинову, С. И. Небольсину, П. И. Колоскову, Р. Э. Давиду.

В 1936 г. было опубликовано первое в стране учебное пособие «Сельскохозяйственная метеорология», написанное Р. Э. Давидом и его сотрудниками. В этом же году вышла в свет капитальная книга Р. Э. Давида «Пшеница и климат».

В 1937—1938 гг. АГМИ был реорганизован в отдел агрометеорологии Всесоюзного института растениеводства (Ленинград), а Институт засух — в отдел агрометеорологии Института земледелия Юго-Востока (Саратов); в 1985 г. на базе этого института создано научно-производственное объединение «Элита Поволжья».

С началом Великой Отечественной войны агрометеорологическая тематика была передана из системы Гидрометслужбы СССР в систему Наркомзема СССР. В 1948 г. она вновь была возвра-

щена в систему Гидрометслужбы СССР. В 1948 г. в Одесском гидрометеорологическом институте было создано агрометеорологическое отделение, преобразованное впоследствии в агрометеорологический факультет.

В 50-е годы в ЦИПе проводилась работа по укреплению и развитию сети станций и постов, обслуживающих сельское хозяйство. Продолжались исследовательские работы (Н. А. Зубарев, А. В. Процеров, А. А. Шиголев, Е. А. Цубербиллер и др.). Для освоения целины была подготовлена коллективная монография (под ред. Ф. Ф. Давитая) «Агроклиматические и водные ресурсы районов освоения целинных и залежных земель» (1958).

В эти годы были организованы региональные (зональные) научно-исследовательские гидрометеорологические институты в Казахстане (Алма-Ата), в Средней Азии (Ташкент), на Украине (Киев), в Закавказье (Тбилиси), в Западной Сибири (Новосибирск), и на Дальнем Востоке (Владивосток). Во всех этих институтах были созданы отделы агрометеорологических исследований, выполняющие в основном региональные работы.

В 60-е годы в Гидрометцентре СССР, в региональных (зональных) гидрометеорологических институтах были разработаны и внедрены в оперативную практику методы агрометеорологических прогнозов урожая основных сельскохозяйственных культур, прогнозов перезимовки озимых культур (Е. С. Уланова, В. А. Моисейчик, М. С. Кулик, Ю. И. Чирков и др.), методы прогнозов запасов влаги в почве и методы оптимизации водного режима сельскохозяйственных полей (А. М. Алпатьев, С. А. Вериго, Л. А. Разумова, А. Р. Константинов, А. М. Шульгин, С. И. Харченко и др.). В эти годы получили развитие исследования в области пастбищной метеорологии, была организована система оперативного агрометеорологического обслуживания пустынно-пастбищного животноводства в Казахстане и в республиках Средней Азии (А. П. Федосеев, И. Г. Сабинина, Л. Н. Бабушкин и др.).

Большое практическое значение имели работы М. С. Кулика и А. П. Федосеева по обоснованию применения минеральных удобрений и дифференцированной агротехники в сельском хозяйстве.

Ученики и последователи Г. Т. Селянинова активно продолжали агроклиматические исследования (И. А. Гольцберг, Ф. Ф. Давитая, А. И. Руденко, С. А. Сапожникова, Н. Н. Яковлев и др.). Они заложили основы микроклиматологии, районирования отдельных культур, влагооборота культурных растений, исследовали засухи, заморозки. В 1972 г. был опубликован уникальный труд «Агроклиматический атлас мира» (под ред. И. А. Гольцберг).

Большой вклад в агроклиматологию 60—80-х годов внесли труды П. И. Колоскова, Ф. Ф. Давитая, Д. И. Шашко, А. М. Шульгина, Ю. И. Чиркова, Л. Н. Бабушкина и др.

В 1977 г. в Обнинске был организован Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ). Он был создан на базе сектора сельскохозяйственной метеорологии Института экспериментальной метеорологии.

ВНИИСХМ стал главным научно-методическим центром в области с.-х. метеорологии, головным учреждением в стране по этой отрасли знаний.

В 1981 г. организован межведомственный научный Совет по проблеме «Агрометеорология», в состав которого вошли ведущие ученые-агрометеорологи ВНИИСХМ, Гидрометцентра, региональных НИИ Росгидромета, институтов Академии наук и ВАСХНИЛ, МГУ, Всесоюзной сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева (ТСХА), Одесского гидрометеорологического института (ОГМИ). Научный Совет разрабатывает генеральные направления развития современной сельскохозяйственной метеорологии.

Агрометеорологические исследования все больше опираются на новейшие технические средства, новые приборы с использованием камер искусственного климата, авиации, спутниковой информации, парка ЭВМ.

Комитет по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Министерства экологии и природных ресурсов Российской Федерации представляет нашу страну во Всемирной метеорологической организации (ВМО), которая входит в состав Организации Объединенных Наций (ООН). Ведущие агрометеорологи активно участвуют в деятельности Комиссии по сельскохозяйственной метеорологии (КСХМ) ВМО. Советские агрометеорологи осуществляют совместные исследования со специалистами из других стран, оказывают действенную помощь в организации агрометеорологических служб и т. д.

Опираясь на научно обоснованные методы агрометеорологических оценок, прогнозов и рекомендаций, Росгидромет, его научно-оперативные институты (Гидрометцентр и др.), республиканские и территориальные управления по гидрометеорологии обеспечивают информацией все сельскохозяйственные отрасли Агропромышленного комплекса.

За годы советской власти организовано 9 гидрометеорологических техникумов, подготавливающих техников-агрометеорологов. Будущие инженеры-агрометеорологи обучаются на метеорологическом факультете Одесского гидрометеорологического института.

В.5. Понятие об агроэкосистеме и системе почва — растение — атмосфера

Экологическая система представляет собой сложный объект, состоящий из десятков, а нередко из многих сотен видов организмов, наделенный способностью к накоплению и многократному использованию энергии и вещества, с большим количеством механизмов, поддерживающих целостность его структуры в изменяющихся условиях среды.

При направленном антропогенном воздействии естественные экосистемы разрушаются и на их месте создаются искусственные экологические системы — агроэкосистемы.

Агроэкосистемой называется специальный вид экосистемы — экологическая система сельскохозяйственного поля, на котором произрастают культурные растения, обитают другие виды растений и животных и происходит сложная цепь физических и биогеохимических трансформаций энергии и вещества.

В отличие от естественных экологических систем, которые обладают полной приспособляемостью и саморегуляцией и обеспечивают устойчивое равновесное состояние — протективные экосистемы, у агроэкосистем саморегуляция во многом нарушена. Они нестабильны. В агроэкологических системах разорвано большинство обратных связей, нарушен естественный повторяющийся из года в год обмен энергией и веществом на различных трофических уровнях.

Фитоценоз агроэкосистемы не может самовозобновляться, для этого необходима антропогенная деятельность.

Биотическая часть агроэкосистемы содержит все звенья, характерные для любых надземных систем: продуценты, консументы и редуценты.

Вместе с популяциями живых организмов различных видов в состав агроэкосистем входят определенные абиотические компоненты, связанные с биотическими компонентами, а также с внешними факторами разнообразными отношениями, которые наряду с биотическими компонентами образуют структуру агроэкосистемы и играют важную роль в функционировании ее как целого.

Абиотическая часть системы — *среда обитания растений и животных* — используется ими как «жизненное пространство» и как источник энергии и минеральных элементов.

Растительное сообщество одновременно находится в двух средах — в приземном слое атмосферы и верхних слоях литосферы и активно взаимодействует с ними.

Из неорганических соединений, поступающих из внешней среды, растение синтезирует углеводы и другие богатые химической энергией органические вещества. Поступление энергии и веществ осуществляется путем «краевых процессов» (О. Д. Сиротенко, 1981), протекающих на границах растения с физической средой. Так, процесс фотосинтеза происходит в листьях, стеблях и формирующихся репродуктивных органах, т. е. на границе растения и атмосферы, а поступление воды и минеральных веществ осуществляется через границы корневой системы и почвы. Процессы обмена между средой и растениями, происходящие в фитоэлементах и корневой системе, функционально неразделимы, они могут происходить только одновременно. Связь между ними обеспечивает сложная совокупность процессов переноса внутри растения (углеродный и водный обмен растений, обмен минеральных веществ).

Состав и режим воздушной и почвенной сред обитания растений, находясь под непосредственным и определяющим воздействием внутренних компонентов агроэкосистемы, прежде всего растительности, испытывает сильное влияние внешних атмосфер-

ных и почвенных процессов. Осуществляя краевые обменные процессы, фитоценоз изменяет воздушную и почвенную среду своего обитания, смягчая в какой-то мере резкие колебания внешних условий.

В воздушной среде эти изменения охватывают следующие процессы: перенос солнечной радиации в растительном покрове, ее поглощение и рассеяние фитоэлементами, поглощение и отражение солнечной радиации почвой, ослабление скорости ветра и изменение характеристик атмосферной турбулентности в слоях воздуха над растительным покровом и внутри него, конвективный перенос тепла в слоях воздуха над растительным покровом и внутри него, выделение водяного пара из почвы (испарение) и фитоэлементов (транспирация) и его перенос в воздухе. Под влиянием этих процессов формируются температурные режимы почвы и растительности. Вместе с тепловым излучением атмосферы они обусловливают перенос теплового излучения в слоях воздуха над растительным покровом и внутри него. Процессы фотосинтеза и дыхания растительного покрова определяют режим углекислого газа, охватывающий выделение CO_2 из почвы, его перенос в воздухе и поглощение (днем) или выделение (ночью) растениями. Противоположно переносу CO_2 идет перенос кислорода и его поглощение почвой и выделение (днем) или поглощение (ночью) растениями.

Почвенная среда является своего рода фокусом агроэкосистемы, так как она связана со всеми другими ее компонентами, причем поддержание этих связей имеет жизненно важное значение для функционирования всей агроэкосистемы. Ее свойства целесообразно разбить на две группы.

К первой относятся относительно консервативные свойства, которые, хотя и различны в почвах различных агроэкосистем, но в каждом конкретном типе почвы изменяются сравнительно мало, отражая исходные условия формирования и современный комплекс экологических факторов в данной агроэкосистеме. Это основные физические и химические свойства почвенной массы (плотность, пористость, механический состав, валовой химический состав, содержание гумуса и азота, кислотность, емкость катионного обмена), а также биомасса и распределение живых организмов.

Вторую группу свойств почвы образуют достаточно изменчивые характеристики почвенного профиля, которые определяются процессами взаимодействия почвы с атмосферой и растительным покровом. Под влиянием этих процессов формируется тепловой, водный и воздушный режим почвы, содержание в почве элементов минерального питания.

Вся *система почва — растение — атмосфера* подразделяется на 6 горизонтальных слоев (рис. В.1). По вертикали от поверхности почвы до верхней границы растительности $h_0(t)$ и до нижней границы распространения корней $r_0(t)$ выделяется внутренняя среда — неотъемлемая составная часть агроэкосистемы. Это соответственно атмосферная и почвенная среды агроэкосистемы. К ним

Ленинградский 17
Гидрометеоиздат

примыкают переходные, буферные зоны, в которых элементы фитомассы отсутствуют, но физические характеристики этих зон благодаря процессам обмена сохраняют некоторую зависимость от культурного *фитоценоза* (*агроценоза*).

Свойства внутренней атмосферной и почвенной сред агроэкосистемы, охватывающих приземный слой атмосферы и верхние слои почвы определяются процессами взаимодействия с другими компонентами агроэкосистемы (теплообмен, влагообмен, фотосинтез, дыхание и др.). В отличие от них свойства внешней среды агроэкосистемы ($z > H_1$ и $z < R_1$) формируется под влиянием процессов иного, более крупного масштаба, независимых от влияния агроэкосистемы: атмосферных процессов и процессов, протекающих в подстилающей породе.

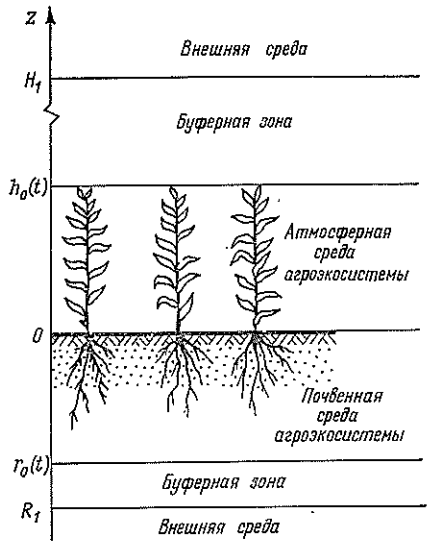


Рис. В.1. К определению системы почва — растение — атмосфера (по О. Д. Сиротенко, 1981).

Граница внешней и внутренней среды агроэкосистемы весьма подвижна во времени и в пространстве, она определяется ростом и развитием агрофитоценоза. В зависимости от вида агрофитоценоза и фазы его развития граница атмосферной и почвенной сред агроэкосистемы может колебаться от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров.

Для системы почва — растение — атмосфера характерны такие особенности, как высокая сложность, целостность, динамичность, способность к саморегулированию и адаптации.

Раздел I

РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Глава 1

РАДИАЦИОННОЕ ПОЛЕ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ

1.1. Показатели геометрической структуры растительного покрова

Радиационный режим растительного покрова (РП) формируется в результате переноса лучистой энергии в биологической среде, состоящей из расположенных определенным образом элементов растений с известными геометрическими и оптическими свойствами.

Геометрическая структура РП характеризуется (Ю. К. Росс, Т. А. Нильсон, 1963) с помощью следующих функций.

1. Площадь листьев в единице объема РП на высоте z — $u_L(z)$.
2. Относительная площадь листьев РП

$$L_0 = \int_0^{z_0} u_L(z)\, dz. \tag{1.1}$$

3. Относительная площадь листьев выше данного уровня z

$$L(z) = \int_z^{z_0} u_L(z')\, dz', \tag{1.2}$$

где z_0 — высота всего РП.

4. Пространственная ориентация листьев — $g_L(z, r_L)$, где $r_L = (\theta_L, \varphi_L)$ — направление нормали верхней стороны листа; θ_L — угол наклона нормали листа, отсчитываемый от вертикальной оси; φ_L — азимут нормали листа, отсчитываемый от севера по часовой стрелке.

Вертикальное распределение плотности листовой поверхности $u_L(z)$ посева кукурузы в различные периоды вегетации представлено на рис. 1.1. Кривые распределения изменяются в процессе роста растений. Максимум кривых растет (от 0,3 до 1,3 дм^2/дм^3) и положение его перемещается в более высокие слои. В начальной стадии развития посева кривые распределения близки к симметричным относительно максимума, который находится на высоте $z_0/2$. С увеличением высоты посева максимум перемещается на высоту, большую, чем $z_0/2$.

В табл. 1.1 приведены значения функции $L(z)$, которая выражает относительную площадь листьев выше уровня z. Для лучшего сравнения посевов с различными z_0 в этой таблице высота z заменена на глубину $z_0 - z$, т. е. начало отсчета перенесено на верхнюю границу посева. Последнее число в каждом столбце соответствует относительной площади листьев всего посева.

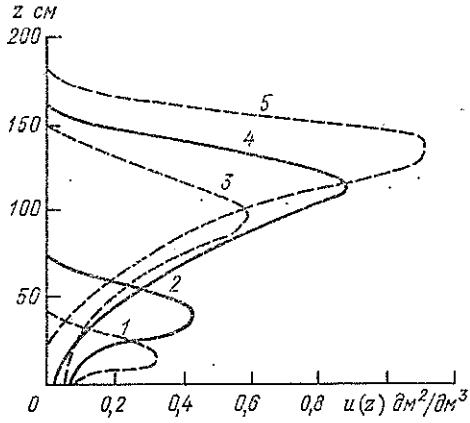


Рис. 1.1. Изменение вертикального распределения плотности листовой поверхности посева кукурузы в течение вегетационного периода (по Ю. К. Россу, 1975).

1 — появление 7-го листа, *2* — 9-го листа, *3* — 11-го листа, *4* — 12-го листа, *5* — выметывание метелки.

Для объяснения сущности функции $g_L(z, r_L)$ выбираем (рис. 1.2) в горизонтальном слое посева на высоте z некоторую область V. В этой области определяем направление нормали и площадь каждого листа или отдельных его частей. Суммарная площадь листьев $u_L(z)$ в области V выражается следующим интегралом по верхней полусфере:

$$\int_{2\pi} \bar{g}_L(z, r_L)\, d\Omega_L = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \bar{g}_L(z, \theta_L, \varphi_L)\, d\varphi_L \sin\theta_L\, d\theta_L \equiv u_L(z), \qquad (1.3)$$

Таблица 1.1

Функция $L(z)$ (м²/м²) для листьев рядкового посева кукурузы; Йыгева. 1963 г. (по Ю. К. Россу, Т. А. Нильсону, 1966)

Слой, см	Дата сева				
	12 VII	25 VII	3 VIII	13 VIII	20 VIII
20	0,29	0,05	0,01	0,29	0,41
40	0,75	0,68	0,45	1,53	2,19
60	—	1,47	1,32	3,20	4,30
80	—	1,62	1,82	4,50	5,72
100	—	—	2,03	5,35	6,60
120	—	—	2,18	5,89	7,24
140	—	—	—	6,25	7,64
160	—	—	—	6,39	7,75
180	—	—	—	—	7,85

где $\bar{g}_L(z, r_L)\,d\Omega$ — сумма площадей всех листьев, нормали которых находятся в телесном угле $d\Omega$, а $\bar{g}_L(z, r_L)$ — площадь тех листьев в области V, нормали которых находятся в единичном телесном угле вокруг направления r_L. Телесный угол $d\Omega_L$ связан с координатами θ_L и φ_L соотношением $d\Omega_L = \sin\theta_L\, d\theta_L\, d\varphi_L$.

Выражение (1.3) можно переписать в виде

$$\int_{2\pi} g_L(z, r_L)\, d\Omega_L = \int_0^{\pi/2}\int_0^{2\pi} g_L(z, \theta_L, \varphi_L)\, d\varphi_L \sin\theta_L\, d\theta_L \equiv 1, \qquad (1.4)$$

где $g_L(z, r_L) = \dfrac{\bar{g}_L(z, r_L)}{u_L(z)}$ — функция пространственной ориентации листьев в РП на высоте z.

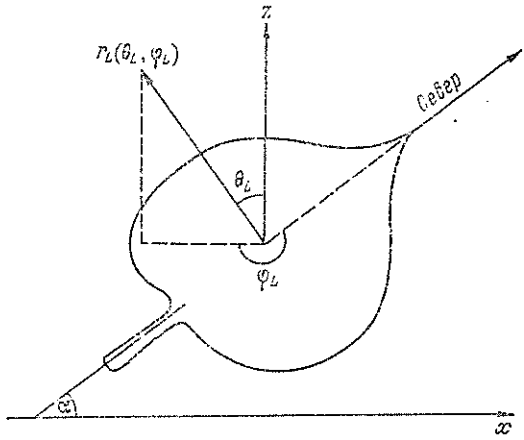


Рис. 1.2. Геометрические характеристики листа (по Х. Г. Тоомингу, 1977).

Выражение (1.4) называется *условием нормирования для функции* $g_L(z, r_L)$.

Пространственная ориентация листьев задана, если известна функция $g_L(z, \theta_L, \varphi_L)$. Аналогично определяется функция пространственной ориентации стеблей, ветвей, цветков и т. д.

При практическом определении функции $g_L(z, \theta_L, \varphi_L)$ верхнее полупространство обычно подразделяется на 48 областей, на 6 поясов через 15° по углу наклона θ_L и на 8 секторов через 45° по азимуту φ_L. Из измерений определяется доля суммарной площади листьев, имеющих угол наклона в промежутке θ_L и $\theta + d\theta_L$ и ориентированных по азимуту в направлении φ_L и $d\varphi_L$, т. е. функция $g^*_L(z, \theta_L, \varphi_L)$.

Функция $g^*_L(z, \theta_L, \varphi_L)$ различна у разных культур и сортов. В качестве примера приведем функцию пространственной ориентации листьев в расчете на интервал углов наклона $g^*_L(\theta_L)$ для

посева картофеля (рис. 1.3 *а*). При этом на оси ординат отложена величина $\pi/12 g_L^*(\theta_L)$. Отдельные значения этой величины соответствуют интервалу углов наклона, распространяющемуся по обе стороны от рассматриваемого угла наклона θ_L на расстояние 7,5°. Функция $g_L^*(\theta_L)$ имеет максимум при $\theta_L = 25°$. В интервале углов наклона 15—30° находится около 30 % всех листьев. Горизонтальных листьев ($\theta_L = 0... 15°$) в посевах картофеля 18—19 %, а вертикальных ($\theta_L = 75... 90°$) только 4 %. Функция $g_L^*(\varphi_L)$ асимметрична относительно стран света (рис. 1.3 *б*). Максимум $g_L^*(\varphi_L)$

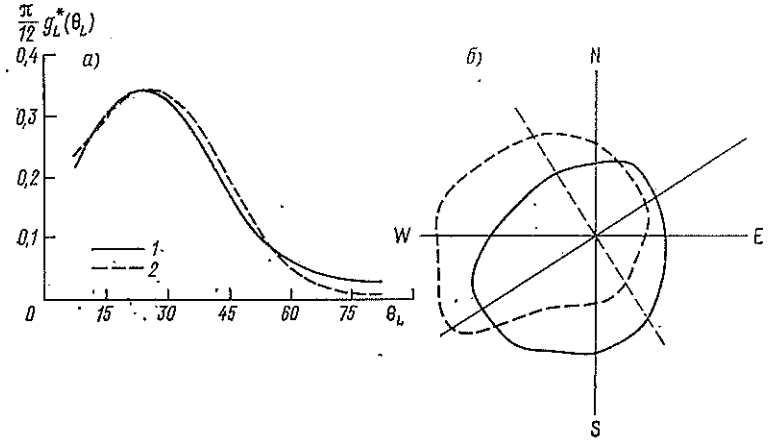


Рис. 1.3. Ориентация листовой поверхности в посеве картофеля; сорт Сулев, конец августа (по Х. Г. Тоомингу, 1977).

а — функция $\frac{\pi}{12} g_L^*(\theta_L)$; *б* — функция $g_L^*(\varphi_L)$; *1* — направление рядов с северо-востока на юго-запад, *2* — направление рядов с северо-запада на юго-восток.

независимо от направления рядков картофеля наблюдается при $\varphi_L = 225°$ (юго-запад), а не при $\varphi_L = 180°$ (юг), как следовало бы ожидать.

В течение вегетационного периода распределение листьев по углу наклона существенным образом изменяется. На примере посева ячменя (табл. 1.2) видно, что до колошения максимальное число листьев имеет углы наклона 75—90° (29—40 %).

Листьев, близких к горизонтальным ($\theta_L = 0... 45°$), в первую половину вегетации сравнительно мало (20—29 %). Исключение составляет период 5-го листа (41 %), когда первый (по порядку) лист, имеющий уже очень малые углы наклона, сохраняется практически для всех стеблей. Начиная с 8-го листа постепенно возрастает количество листьев с углами 0—45° и уменьшается количество более вертикальных листьев. В фазу молочной спелости максимум листьев наблюдается при $\theta_L = 45... 60°$, а в фазу восковой спелости — при $\theta_L = 0... 15°$. В конце вегетации листьев, близких

Таблица 1.2

Распределение ориентации листьев в посеве ячменя Московский-121 в течение вегетационного периода; Валдай, 1973 г. (по Е. В. Абашиной, В. А. Горбачеву, 1977)

Дата	Фаза	Угол наклона θ_L°					
		0—15	15—30	30—45	45—60	60—75	75—90
25 V	3-й лист	0,047	0,107	0,107	0,300	0,120	0,320
5 VI	5-й лист	0,198	0,135	0,068	0,185	0,122	0,293
15 VI	7-й лист	0,080	0,104	0,064	0,173	0,189	0,390
23 VI	8-й лист	0,044	0,076	0,080	0,192	0,208	0,400
3 VII	Колошение	0,130	0,068	0,087	0,106	0,186	0,422
13 VII	Молочная спелость	0,133	0,186	0,097	0,248	0,195	0,142
23 VII	Восковая спелость	0,286	0,178	0,071	0,214	0,143	0,107

к горизонтальным ($\theta_L = 0 \ldots 45°$), становится даже больше, чем более вертикальных; в фазу восковой спелости количество листьев, имеющих угол наклона 0—45°, составляет 54 %. Такой вегетационный ход ориентации листьев по углу наклона естествен и связан с изменением углов наклона листьев при старении.

1.2. Основные показатели радиационного режима посевов

Лучистая энергия Солнца является привычным источником биологических и физиологических процессов, протекающих в системе почва — растение — атмосфера.

В биофизическом аспекте спектр радиации Солнца и неба делят на четыре области (табл. 1.3). Область спектра, которой соот-

Таблица 1.3

Биологическое значение различных участков спектра радиации Солнца и неба (по Ю. К. Россу, 1975)

Вид радиации	Область, нм	Процент солнечной радиации	Эффект действия радиации на растение		
			тепловой	фотосинтез	рост и развитие
Ультрафиолетовая	290—380	0—4	несущественный	несущественный	существенный
Фотосинтетически активная	380—710	21—46	существенный	существенный	То же
Близкая инфракрасная	710—4000	50—79	То же	несущественный	»
Инфракрасная	4000—100 000	—	»	То же	несущественный

ветствуют длины волн 290—380 нм, называют *ультрафиолетовой* (УФ). Промежуток спектра лучистой энергии от 380 до 710 нм называется *фотосинтетически активной радиацией* (ФАР). В интервале длин волн 710—4000 нм выделяется *близкая инфракрасная радиация* (БИКР). Излучение волн в диапазоне 4000—100 000 нм называют *инфракрасной радиацией* (ИКР).

Выделяются (см. табл. 1.3) три основные стороны влияния радиации на растительный покров:

1) *тепловой эффект радиации* — из поглощенной растениями солнечной энергии более 70 % превращается в тепло и используется для транспирации, поддержания температуры растений и т. д.;

2) *фотосинтетический эффект радиации* — из поглощенной в интервале спектра 380—710 нм радиации (область ФАР) до 28 % используется в процессе фотосинтеза для создания разнообразных органических веществ;

3) *фотоморфогенетический* (*регуляторный*) *эффект радиации* в процессах роста и развития — фитобиологически активная область радиации начинается с ультрафиолетовой части, охватывает область ФАР и небольшую часть БИКР и оканчивается около 760 нм.

Приведенные эффекты влияния радиации, наряду с другими факторами внешней среды, в значительной степени определяют закономерности развития РП во всем его многообразии.

Падающая на РП суммарная радиация $Q_0(h_\odot)$, состоящая из потоков прямой радиации $S_0'(h_\odot)$, приходящей на горизонтальную поверхность, и рассеянной радиации неба $D_0(h_\odot)$, вступает во взаимодействие (отражение, рассеивание, поглощение) с фитоэлементами. В результате этого изменяется плотность потока радиации, пространственная структура и спектральный состав ее. Изменения эти зависят от высоты Солнца $h_\odot$ и геометрической структуры РП L, от спектральных оптических свойств фитоэлементов и спектрального состава падающей ФАР.

Радиационное поле внутри РП можно рассматривать состоящим из следующих компонентов:

1) осредненная в горизонтальных направлениях плотность потока прямой радиации Солнца на глубине $L - S'(L, h_\odot)$;

2) осредненная в горизонтальных направлениях плотность потока рассеянной радиации неба на глубине $L - D(L, h_\odot)$;

3) плотность потока радиационного поля, возникающего в растительном покрове в результате взаимодействия между падающей на растительный покров радиацией Солнца и неба и элементами растительного покрова (листья, стебли и др.).

Первые два вида радиации характеризуются коэффициентом, или функцией, пропускания:

а) для прямой радиации

$$a_S(L, h_\odot) = \frac{S'(L, h_\odot)}{S_0'(h_\odot)}, \qquad (1.5)$$

б) для рассеянной радиации

$$a_D(L, h_\odot) = \frac{D(L, h_\odot)}{D_0(h_\odot)}. \quad (1.6)$$

Так как под $S'(L, h_\odot)$ и $D(L, h_\odot)$ понимаются осредненные в горизонтальных направлениях потоки прямой и рассеянной радиации, доходящие до данного уровня без взаимодействия с элементами РП, то по спектральному составу они не отличаются от падающих потоков S'_0 и D_0. Ослабление их происходит за счет затенения на данном уровне части небосвода элементами РП.

Радиационное поле, возникающее в результате взаимодействия падающей на РП радиации с элементами РП, следует рассматривать состоящим из потоков, направленных вверх и вниз. Вверх направлен отраженный поток суммарной радиации $R_к$, состоящий из потоков отраженной прямой $R_S(L, h_\odot)$ и рассеянной $R_D(L, h_\odot)$ радиации. Альбедо — это отношение отраженного от РП потока к падающему на него потоку. Альбедо суммарной радиации

$$A_к(L, h_\odot) = \frac{R_к(L, h_\odot)}{Q_0(h_\odot)}. \quad (1.7)$$

Иногда рассматривают отдельно альбедо прямой $A_S(L, h_\odot)$ и рассеянной $A_D(L, h_\odot)$ радиации.

Вниз направлены потоки той части прямой и рассеянной радиации, которая рассеивается элементами РП — соответственно $S'^{н}(L, h_\odot)$ и $D^{н}(L, h_\odot)$, характеризуемые коэффициентами $a_S^{н}(L, h_\odot)$ и $a_D^{н}(L, h_\odot)$.

Величина

$$a_Q(L, h_\odot) = \frac{Q(L, h_\odot)}{Q_0(h_\odot)} =$$

$$= \frac{S'(L, h_\odot) + D(L, h_\odot) + S'^{н}(L, h_\odot) + D^{н}(L, h_\odot)}{S'_0(h_\odot) + D_0(h_\odot)} \quad (1.8)$$

является функцией пропускания суммарной радиации.

Глава 2

ПРОПУСКАНИЕ РАДИАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫМ ПОКРОВОМ

2.1. Пропускание прямой солнечной радиации в растительном покрове

Из потоков солнечной радиации внутри РП в энергетическом отношении наиболее существенное значение имеет поток прямой радиации Солнца $S'(L, h_\odot)$. Пропускание его РП зависит прежде всего от направления солнечных лучей: $r_\odot = (\theta_\odot, \varphi_\odot)$, где $\theta_\odot$ — зе-

нитное расстояние Солнца и $\varphi_\odot$ — азимут Солнца. Влияние геометрической структуры РП на пропускание прямой радиации значительно и определяется предложенной Ю. К. Россом и Т. А. Нильсоном (1963) функцией

$$G_L(z, r_\odot) = \int_{2\pi} g_L(z, r_\odot) |\cos \widehat{r_\odot r_L}| \, d\Omega, \tag{2.1}$$

которая является проекцией единицы площади листьев, находящихся в единице объема на высоте z, на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам. Если умножим величину $u_L(z)$ на $G_L(z, r_\odot)$, получим проекцию всей площади листьев в единице объема РП на поверхность, перпендикулярную направлению лучей $r_\odot$. В формуле (2.1) $\cos \widehat{r_\odot r_L}$ имеет вид

$$\cos \widehat{r_\odot r_L} = \cos\theta_\odot \cos\theta_L + \sin\theta_L \sin\theta_\odot \cos(\varphi_\odot - \varphi_L). \tag{2.2}$$

Аналогичное выражение можно записать и для стеблей

$$G_s(z, r_\odot) = \int_{2\pi} g_s(z, r_s) |\cos \widehat{r_\odot r_s}| \, d\Omega. \tag{2.3}$$

Можно показать, что

$$G_s(z, r_\odot) = \frac{1}{\pi} \sin\theta_\odot. \tag{2.4}$$

Функция пропускания прямой радиации внутри РП выражается формулой

$$a_S(z, r_\odot) = \exp[-k_L(z. r_\odot) - k_S(z, \theta_\odot)], \tag{2.5}$$

где

$$k_L(z, r_\odot) = \sec\theta_\odot \int_0^z u_L(z') G_L(z', r_\odot) \, dz', \tag{2.6}$$

$$k_S(z, \theta_\odot) = \frac{1}{\pi} \operatorname{tg}\theta_\odot \int_0^z u_S(z') \, dz' = \frac{1}{\pi} L_S(z) \operatorname{tg}\theta_\odot. \tag{2.7}$$

В формуле (2.7) L_s — относительная площадь стеблей.

Если пространственная ориентация листьев одинакова во всех горизонтальных слоях РП, то $g_L(z, r_L) = g_L(r_L)$ и $G_L(z, r_\odot) = G(r_\odot)$. Учитывая формулы (2.4) и (2.5), получим

$$k_L(z, r_\odot) = L(z) G_L(r_\odot) \sec\theta_\odot = L(z) G_L(r_\odot)/\sin h_\odot, \tag{2.8}$$

$$k_S(z, \theta_\odot) = L_s(z) \frac{\operatorname{tg}\theta_\odot}{\pi} = L_s(z) \frac{\operatorname{ctg} h_\odot}{\pi}. \tag{2.9}$$

Пропускание радиации вертикальными стеблями зависит только от площади стеблей и зенитного расстояния Солнца. Различия в пропускании радиации фитоценозами вызваны разли-

чиями в пространственной ориентации листьев, т. е. определяются функцией $G_L(r_\odot)$.

Рассмотрим функцию $G_L(r_\odot)$ в некоторых частных случаях. При этом для удобства в дальнейшем заменим $\theta_\odot$ высотой Солнца $h_\odot$, так как $h_\odot = \frac{\pi}{2} - \theta_\odot$. Кроме того, предположим, что функция $G(r_\odot)$ не зависит от азимута $\varphi_\odot$, т. е. $G_L(r_\odot) = G_L(h_\odot)$.

1. Все листья в РП расположены горизонтально. Тогда

$$G_L(h_\odot) = \sin h_\odot. \tag{2.10}$$

2. Листья расположены равномерно по всем направлениям (равномерная ориентация):

$$G_L(h_\odot) = 0{,}5. \tag{2.11}$$

3. Листья расположены вертикально и имеют равномерное распределение по азимуту:

$$G_L(h_\odot) = \frac{2}{\pi} \cos h_\odot. \tag{2.12}$$

4. Листья расположены под углом α_L к горизонту и равномерно распределены по азимуту. Для этого случая предложены формулы

$$G_L(\alpha_L, h_\odot) = \cos \alpha_L \sin h_\odot, \text{ если } \alpha_L \leqslant h_\odot \tag{2.13}$$

и

$$G_L(\alpha_L, h_\odot) = \frac{2}{\pi} \sin h_\odot \left[\cos \alpha_L \arcsin(\operatorname{ctg} \alpha_L \operatorname{tg} h_\odot) + \right.$$
$$\left. + \sin \alpha_L \operatorname{ctg} h_\odot \sqrt{1 - \operatorname{ctg}^2 \alpha_L \operatorname{tg}^2 h_\odot}\right], \text{ если } \alpha_L > h_\odot. \tag{2.14}$$

Расчет функции пропускания упрощается, поскольку имеется таблица (табл. 2.1) значений $G_L(\alpha_L, h_\odot)$ в зависимости от α_L и $h_\odot$.

Таблица 2.1

Значения функции $G_L(\alpha_L, h_\odot)$ по данным Рива (по Х. Г. Тоомингу, 1977)

$h_\odot^0$	α_L^0									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	0,111	0,218	0,318	0,409	0,488	0,551	0,598	0,627	0,637
10	0,174	0,171	0,240	0,328	0,412	0,486	0,546	0,590	0,618	0,627
20	0,342	0,337	0,321	0,361	0,421	0,480	0,530	0,567	0,590	0,598
30	0,500	0,492	0,470	0,433	0,442	0,473	0,504	0,530	0,546	0,551
40	0,643	0,633	0,604	0,557	0,492	0,471	0,473	0,480	0,486	0,488
50	0,766	0,754	0,720	0,663	0,587	0,492	0,442	0,421	0,412	0,409
60	0,866	0,853	0,814	0,750	0,663	0,557	0,433	0,361	0,328	0,318
70	0,940	0,925	0,883	0,814	0,720	0,604	0,470	0,321	0,240	0,218
80	0,985	0,970	0,925	0,853	0,754	0,633	0,492	0,337	0,171	0,111
90	1,000	0,985	0,940	0,866	0,766	0,643	0,500	0,342	0,174	0,000

Пропускание прямой радиации достаточно хорошо описывается с учетом только площади листьев $L(z)$ согласно формуле

$$a_S(L, h_\odot) = \exp[-G_L(h_\odot) L/\sin h_\odot]. \quad (2.15)$$

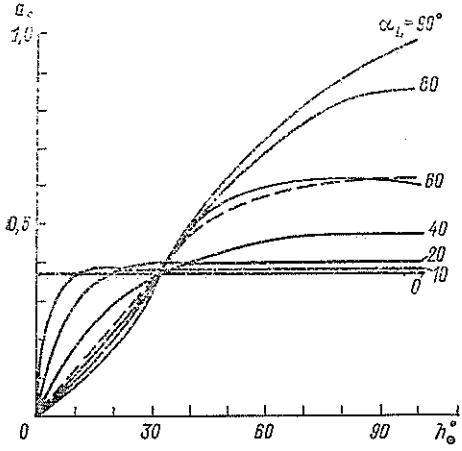


Рис. 2.1. Зависимость функции пропускания прямой ФАР a_S от высоты Солнца $h_\odot$ при различном угле наклона (от горизонтали) листьев (по Х. Г. Тоомингу, 1977).

Пунктирная линия — равномерное распределение листьев; площадь листьев составляет 1 м²/м².

При этом проявляются следующие закономерности (рис. 2.1): 1) наиболее существенная зависимость функции пропускания от высоты Солнца наблюдается в том случае, если все листья в РП

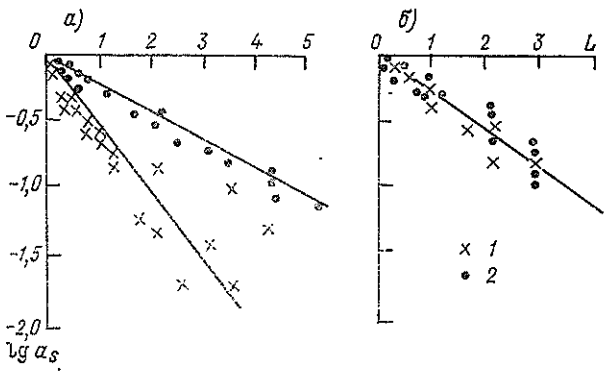


Рис. 2.2. Зависимость логарифма функции пропускания прямой радиации $\lg a_S$ от относительной площади листьев L (по Ю. К. Россу, Х. Г. Тоомингу, 1968).

а) сорго: *1*) $h_\odot = 20°$; *2*) $h_\odot = 60°$; *б*) хлопчатник: *1*) $h_\odot = 25...45°$; *2*) $h_\odot = 45...65°$.

расположены вертикально ($\alpha_L = 90°$); 2) с уменьшением наклона листьев вплоть до горизонтального зависимость функции пропускания от высоты Солнца уменьшается; 3) в РП, где все листья горизонтальны, функция пропускания прямой радиации не зави-

сит от высоты Солнца; 4) в РП, где листья расположены к горизонту под углом менее 40°, существенная зависимость функции пропускания прямой радиации от высоты Солнца наблюдается лишь при низких высотах Солнца; 5) в зоне высот Солнца 30—40° функции пропускания прямой радиации при любой ориентации листьев в РП приближенно равны. При $h_\odot > 35°$ пропускание прямой радиации наибольшее в РП с вертикальными листьями и наименьшее в РП с горизонтальными листьями, а при $h_\odot < 35°$, наоборот, функция пропускания прямой радиации при хаотичном расположении листьев имеет промежуточное значение, которое приближенно соответствует значению функции пропускания в РП, в котором листья расположены под углом $\alpha_L = 60°$.

Согласно экспериментальным данным, экспоненциальный закон для пропускания прямой радиации обоснован (рис. 2.2). Зависимость $\lg a_S$ от относительной площади листьев L для посевов сорго и хлопчатника линейная: для сорго среднее значение $G_L(h_\odot) = 0{,}42$ с достаточной точностью при всех высотах Солнца, для посева хлопчатника получено $G_L(h_\odot) = c_{1S} \sin h_\odot$. Следовательно, функция пропускания не зависит от высоты Солнца. По экспериментальным данным $c_{1S} = 0{,}54 \pm 0{,}1$ в пределах $25° < h_\odot < 65°$.

2.2. Пропускание рассеянной радиации неба растительным покровом

При безоблачном небе роль рассеянной радиации небольшая. При закрытом облаками диске Солнца она становится определяющей. Функция пропускания РП рассеянной радиации определяется интегралом

$$a_D(L, h_\odot) = \frac{1}{D} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} D_0(\theta_\odot, \theta, \varphi) \exp[-G_L(\theta_\odot) L/\cos\theta_\odot] \times$$

$$\times \sin\theta \cos\theta \, d\theta \, d\varphi, \qquad (2.16)$$

где $D_0((\theta, \theta_\odot, \varphi)$ — радиация от неба в направлении (θ, φ).

Обычно предполагается, что небо равномерно яркое и D_0 не зависит от $\theta_\odot$, θ и φ. Тогда для функции пропускания получим следующие выражения:

1) при горизонтальном расположении листьев

$$a_D = \exp(-L), \qquad (2.17)$$

2) при хаотичном расположении листьев

$$a_D = 2E_3(0{,}5L), \qquad (2.18)$$

где $E_3(0{,}5L)$ представляет собой так называемую интегрально-экспоненциальную функцию Гольда, заданную в виде таблицы (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Значения интегрально-экспоненциальных функций $E_2(0{,}5\,L)$ и $E_3(0{,}5\,L)$

L	$E_2\,(0{,}5L)$	$E_3\,(0{,}5L)$	L	$E_2\,(0{,}5L)$	$E_3\,(0{,}5L)$
0,2	0,723	0,416	2,5	0,103	0,079
0,4	0,574	0,352	3,0	0,073	0,057
0,6	0,469	0,300	3,5	0,052	0,041
0,8	0,389	0,257	4,0	0,038	0,030
1,0	0,327	0,222	4,5	0,027	0,022
1,2	0,276	0,192	5,0	0,020	0,016
1,4	0,235	0,166	5,5	0,014	0,012
1,6	0,201	0,144	6,0	0,011	0,009
1,8	0,172	0,126	6,5	0,008	0,007
2,0	0,148	0,110	7,0	0,006	0,005

Таблица 2.3

Значения функции пропускания a_D потока рассеянной радиации неба растительным покровом (по Ю. К. Россу, 1975)

L	Горизонтальная ориентация	Равномерная ориентация					
		изотропное небо	пасмурное небо	ясное небо, $h_\odot^\circ$			
				15	30	60	90
0	1,000	1,000	1,00	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	0,905	0,909	0,91	0,873	0,886	0,905	0,894
0,2	0,819	0,833	0,82	0,773	0,793	0,825	0,808
0,4	0,670	0,704	0,68	0,623	0,648	0,695	0,672
0,6	0,549	0,600	0,56	0,513	0,538	0,592	0,567
1,0	0,368	0,443	0,42	0,360	0,381	0,438	0,414
1,5	0,223	0,308	0,30	0,240	0,254	0,307	0,286
2,0	0,135	0,219	0,21	0,164	0,174	0,218	0,202
3,0	0,050	0,113	0,10	0,080	0,085	0,113	0,103
5,0	0,007	0,033	0,03	0,022	0,023	0,033	0,029

L	Вертикальная ориентация				
	изотропное небо	ясное небо, $h_\odot^\circ$			
		15	30	60	90
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,1	0,911	0,861	0,878	0,906	0,891
0,2	0,841	0,764	0,788	0,835	0,812
0,4	0,725	0,617	0,646	0,718	0,686
0,6	0,696	0,518	0,546	0,631	0,596
1,0	0,504	0,384	0,407	0,502	0,467
1,5	0,393	0,282	0,298	0,393	0,359
2,0	0,314	0,216	0,227	0,316	0,286
3,0	0,213	0,119	0,144	0,218	0,193
5,0	0,117	0,073	0,074	0,123	0,106

3) при вертикальном расположении листьев

$$a_D = 2\int_{\frac{2}{\pi}}^{1} \exp\left(-\frac{2}{\pi} L \frac{\sqrt{1-x^2}}{x}\right) x\,dx, \qquad (2.19)$$

где $x = \cos\theta_\odot$.

Значения a_D в последнем случае находят путем численного интегрирования (табл. 2.3).

Функция пропускания рассеянной радиации a_D с учетом реального распределения рассеянной радиации по небосводу приведена в табл. 2.3. Как видно, пропускание рассеянной радиации максимально при высоте Солнца около 60°. При уменьшении, а также и при увеличении высоты Солнца пропускание рассеянной радиации уменьшается: при $h_\odot = 15°$ функция пропускания составляет 70—90 % величины при $h_\odot = 60°$, а при $h_\odot = 90°$ — около 70 %. Пропускание рассеянной радиации при пасмурном небе примерно такое же, как и при равномерно ясном небе.

2.3. Пропускание суммарной радиации растительным покровом

Пропускание суммарной радиации a_Q растительным покровом определяется закономерностями функций пропускания прямой $a_S(L, h_\odot)$ и рассеянной $a_D(L, h_\odot)$ радиации, нисходящих потоков $a_S^н(L, h_\odot)$ и $a_D^н(L, h_\odot)$ дополнительного радиационного поля, а также структурой облучающего потока, характеризуемой отношением прямой радиации к рассеянной S_0'/D_0.

Функция пропускания для потока суммарной радиации выражается формулой

$$a_Q(L) = \frac{Q(L)}{Q_0} = \frac{(a_S + a_S^н)\frac{S_0'}{D_0} + (a_D + a_D^н)}{1 + S_0'/D_0}. \qquad (2.20)$$

Зависимость $a_Q(L)$ от высоты Солнца несколько слабее, чем зависимость функции пропускания прямой радиации, так как $a_Q(L)$ определяется как средневзвешенная величина $(a_S + a_S^н)$ и $(a_D + a_D^н)$. Доли прямой и рассеянной радиации $a_S^н$, $a_D^н$, рассеиваемые вниз элементами РП, имеют значения при расчете функции пропускания суммарной радиации в близкой инфракрасной области спектра. В области ФАР $a_S^н$ и $a_D^н$ несущественны.

Анализ формулы (2.20) показывает, что зависимость $a_Q(L)$ от соотношения S_0'/D_0 весьма существенна (рис. 2.3). При переменной облачности S_0'/D_0 меняется в широких пределах, что сказывается на значении $a_Q(L)$. При больших высотах Солнца функция пропускания суммарной радиации увеличивается с возрастанием S_0'/D_0, при малых высотах Солнца наблюдается обратная зависимость. При определенной высоте Солнца $a_Q(L)$ не зависит от

S_0'/D_0. Эту высоту можно назвать нейтральной высотой Солнца. Если высота Солнца превышает нейтральную, то $a_S > a_D$, если же ниже, то $a_S < a_D$.

Для РП с хаотичным расположением листьев нейтральная высота Солнца составляет 35—40° (см. рис. 2.3 *а*). Для РП с вертикальной ориентацией листьев нейтральная высота Солнца несколько больше, чем 40—50°.

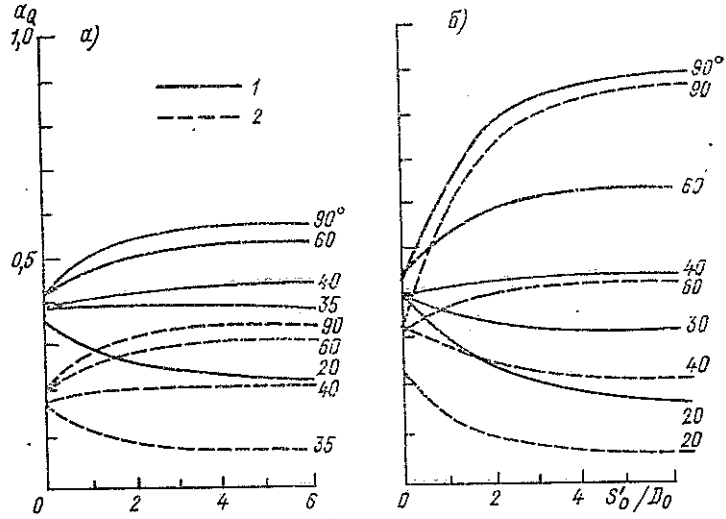


Рис. 2.3. Зависимость функции пропускания суммарной радиации a_Q от отношения S_0'/D_0 и высоты Солнца $h_\odot$ при хаотичном (*а*) и вертикальном (*б*) расположении листьев (по Х. Г. Тоомингу, 1977).

1) $L_0 = 1$, *2*) $L_0 = 2$.

Существенная зависимость $a_Q(L)$ от S_0'/D_0 наблюдается в РП с вертикальными листьями (см. рис. 2.3 *б*). Так, например, при закрытом облаками Солнце $(S_0'/D_0 = 0)$ на глубину $L = 2$ проникает лишь 30 % суммарной радиации. Но как только «появляется» Солнце, функция пропускания увеличивается, и при полностью ясном небе до уровня $L = 2$ проникает уже 90 % падающей на РП радиации.

На основе анализа выражения (2.20) для функции пропускания суммарной радиации, а также обобщения экспериментальных данных за ослаблением радиации в посевах различных сельскохозяйственных культур Х. Г. Тооминг и Ю. К. Росс получили полуэмпирические формулы, описывающие пропускание суммарной КВР в РП. При этом в выражении (2.20) для функций пропускания прямой солнечной радиации a_S, рассеянной радиации неба a_D,

потока дополнительной радиации $a_S^{\text{п}}$ и $a_D^{\text{п}}$ были взяты полуэмпирические формулы.

Для функции пропускания суммарной КВР в РП формула Тооминга — Росса имеет вид:

а) при ясном небе

$$a_Q^{\text{с}} = \frac{S_0'/D_0 \exp\left(-k_S L/\sin h_\odot\right) + a_D\left(L, h_\odot\right)}{1 + S_0'/D_0} + \\ + c_2\left[\exp\left(-c_3 k_S L/\sin h_\odot\right) - \exp\left(-k_S L/\sin h_\odot\right)\right], \qquad (2.21)$$

б) при пасмурном небе

$$a_Q^{\text{п}} = a_D(L, h_\odot) + c_2\left[\exp\left(-c_3 k_S L/\sin 40°\right) - \exp\left(-k_S L/\sin 40°\right)\right], \qquad (2.22)$$

в) интервале $h_\odot$ от 20 до 50°

$$a_Q = (1 - c_2)\exp\left(-k_S L/\sin h_\odot\right) + c_2 \exp\left(-c_3 k_S L/\sin h_\odot\right). \qquad (2.23)$$

Здесь k_S, c_2 и c_3 — эмпирические коэффициенты, определяемые из эксперимента ($k_S = 0{,}5$; $c_2 = 0{,}3$; $c_3 = 0{,}15$); $a_D(L, h_\odot)$ — функция пропускания рассеянной радиации, значения которой с достаточным приближением определяются по табл. 2.3.

Остановимся на этих формулах и их параметрах более подробно. Эмпирический коэффициент k_S характеризует влияние геометрической структуры РП на пропускание радиации, он заменяет трудно определяемую функцию $G(h_\odot)$. Эмпирическая постоянная c_2 определяет долю рассеянной в РП радиации в суммарном потоке, а c_3 характеризует интенсивность рассеяния фитоэлементами и связана с их оптическими свойствами. Формула (2.23) наглядно раскрывает физическую основу полуэмпирической формулы. Суммарную радиацию внутри РП можно рассматривать состоящей из двух частей, различных по характеру ослабления, причем доля $(1 - c_2)$ от суммарной радиации ослабляется по одному экспоненциальному закону, а c_2 — по другому. Первый член характеризует долю суммарной радиации, проникающую до глубины L без взаимодействия с РП, второй член — радиацию, возникающую в вышележащем слое в процессе рассеяния суммарной радиации на фитоэлементах. Изменение функции пропускания суммарной КВР с глубиной в РП, рассчитанных по формулам (2.22) и (2.23), приведен на рис. 2.4 *а*.

Формула, описывающая ослабление суммарной радиации в РП, впервые была предложена Монси и Саэки. Она имеет вид

$$Q(L) = Q_0 \exp(-kL). \qquad (2.24)$$

В этой формуле k определяется из эксперимента.

А. И. Будаговским для функции пропускания суммарной КВР предложена формула вида

$$Q(L) = \frac{Q_0}{1 + k_Q L}, \qquad (2.25)$$

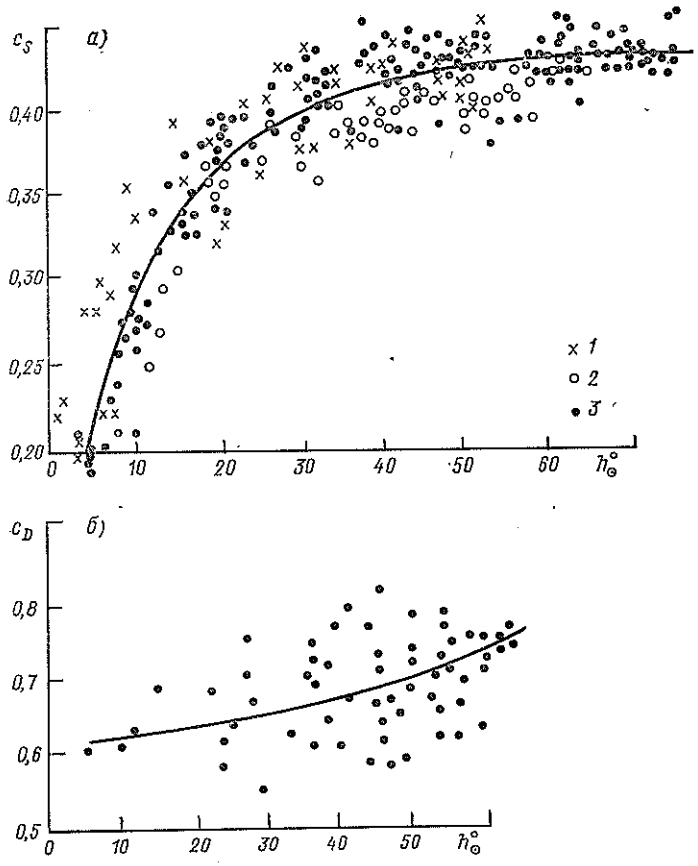


Рис. 2.5. Зависимость переходных коэффициентов ФАР от высоты Солнца.

а) для прямой солнечной радиации (по Х. Г. Тоомингу, Х. И. Нийлиску, 1967): *1* — Ийгева, 1963; *2* — Молдавия, 1964; *3* — Гиссарская долина, 1965;
б) для рассеянной радиации безоблачного неба (по Н. А. Перелету, 1970).

Суммы суммарной ФАР приближенно можно определить по формуле

$$\sum Q_\Phi = 0{,}43 \sum S'_0 + 0{,}57 \sum D_0. \qquad (2.28)$$

Для приближенного расчета суммарной ФАР можно принять $c_Q = 0{,}52$.

2.4. Альбедо растительного покрова

Средние значения альбедо различных типов РП травянистых растений и посевов сельскохозяйственных культур $A_к(L)$ значительно не различаются. Среднее альбедо сомкнутых посевов сельскохозяйственных культур варьирует от 0,16 до 0,26. Альбедо

в области ФАР составляет в среднем 0,02—0,07. Альбедо различных трав и сельскохозяйственных культур увеличивается с уменьшением высоты Солнца (рис. 2.6). Х. Г. Тоомингом установлено, что в большинстве случаев максимум альбедо наблюдается при высоте Солнца около 8—10°. Причина увеличения альбедо РП при малой высоте Солнца заключается в том, что более наклонные солнечные лучи почти не проникают внутрь РП и отраженная от верхней части растений радиация почти полностью уходит вверх. При поднятии Солнца над горизонтом прямая радиация все глубже проникает внутрь РП, освещая расположенные ниже части растений и тем самым уменьшая поток отраженной радиации.

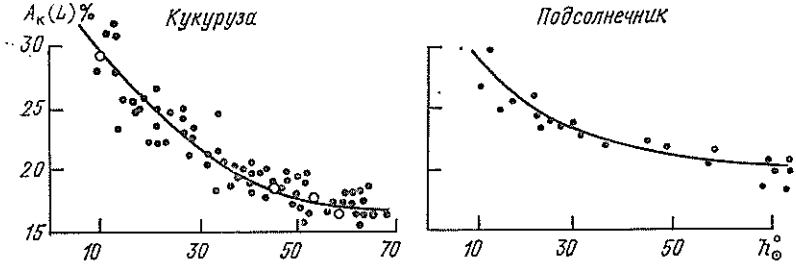


Рис. 2.6. Зависимость альбедо посевов кукурузы и подсолнечника $A_к(L)$ от высоты Солнца $h_⊙$ (по Х. Г. Тоомингу, 1977).

Наибольшие дневные амплитуды альбедо наблюдаются при хорошо развитом сомкнутом РП зерновых, кукурузы, хлопчатника. На полях картофеля, томатов и других культур, имеющих изреженный растительный покров с кустистой структурой, дневной ход альбедо почти не выражен. Х. Г. Тоомингом впервые установлено, что в дневном ходе альбедо РП наблюдается асимметрия относительно полудня. После полудня альбедо на 5—20 % больше дополуденных значений при одной и той же высоте Солнца. Вероятной причиной асимметрии значений альбедо относительно полудня является изменение оптических свойств листьев вследствие суточной динамики концентрации хлорофилла в хлоропластах и их ориентации, а также тургора листьев. Дневной ход альбедо существенно зависит от соотношения S_0'/D_0. Если высота Солнца меньше так называемой нейтральной высоты и мало меняется, то альбедо РП увеличивается с возрастанием отношения S_0'/D_0. Такая картина имеет место утром, когда $A_S(L) > A_D(L)$. При нейтральной высоте Солнца зависимость альбедо от S_0'/D_0 отсутствует. При высотах Солнца больше нейтральной с возрастанием отношения S_0'/D_0 альбедо РП уменьшается. Это наблюдается в полуденные часы, когда $A_S(L) < A_D(L)$.

Изменения альбедо сельскохозяйственных культур в течение вегетационного периода определяются изменениями оптических свойств элементов растений и структуры РП в цикле развития растений. В начальные фазы развития растений основной вклад

в формирование отраженной радиации вносит почва, чему соответствуют минимальные значения альбедо, существенно зависящие от типа почвы и степени ее увлажнения. По мере роста и развития растений почва все более затеняется и после смыкания травостоя дальнейший рост растений не вызывает заметного увеличения альбедо. Как видно из рис. 2.7, с увеличением зеленой массы растений альбедо РП возрастает, особенно у яровой пшеницы. Если в фазу кущения альбедо яровой пшеницы составляет 11 %, то в период колошения она отражает уже 18—19 % падающей суммарной радиации, а во время созревания (в связи с изменением оптических свойств листьев) — до 25 %. После уборки хле-

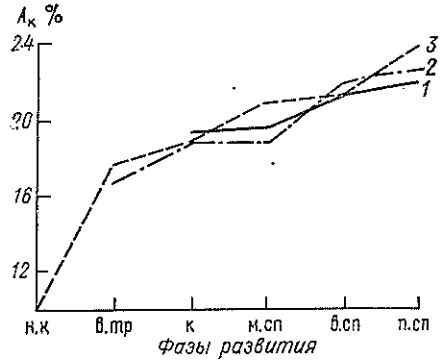


Рис. 2.7. Зависимость альбедо $A_к$ сельскохозяйственных растений от фазы их развития (по Б. М. Гальперину, 1938).

Фазы развития: и. к — начало кущения, в. тр — выход в трубку, к — колошение, м. сп — молочная спелость в. сп — восковая спелость, п. сп — полная спелость; *1* — озимая рожь, *2* — озимая пшеница, *3* — яровая пшеница.

бов альбедо этих полей резко падает до 12—17 % и приближается к альбедо почвы.

Наибольшее значение альбедо растительного покрова сельскохозяйственных культур наблюдаются, как правило, в период колошения, цветения и созревания.

Альбедо посевов кукурузы достигает максимума в период максимального развития листовой поверхности: по данным Н. И. Гойсы — 0,19—0,22 (юг Украины), по данным Х. Г. Тооминга — 0,24—0,26 (Эстония). Наибольшие значения альбедо картофельного поля (0,23—0,26) по данным Ф. А. Муминова отмечаются в период интенсивного клубнеобразования.

Спектральная отражательная способность РП определяется отражательными свойствами почвы и оптическими свойствами фитоэлементов РП.

На основе двухпараметрового представления взаимодействия лучистой энергии с растительным покровом, впервые использованного М. М. Гуревичем (1931), В. И. Рачкуликом и М. В. Ситниковой получена формула позволяющая определить спектральные коэффициенты яркости РП:

$$R_{пр} = \frac{R_п + (R_п - R_р)\,[\exp(-\alpha E m)] - R_р^2 R_п}{1 - R_р R_п + R_р (R_п - R_р)\,[\exp(-\alpha E m)]}, \qquad (2.29)$$

где $R_{пр}$ — спектральный коэффициент яркости (СКЯ) РП; $R_р$ —

СКЯ предельно плотного РП; $R_п$ — СКЯ почвы; α — константа, зависящая от архитектоники РП; $E = (1 - R_p^2)/R_p$; m — масса РП.

Из формулы (2.29) видно, что СКЯ РП зависят от СКЯ почвы и растений, архитектоники РП и массы РП.

Вид и положение кривых СКЯ РП изменяется в зависимости от мощности РП. Как видно из рис. 2.8, кривые СКЯ для различных значений проективного покрытия значительно изменяются. При этом наибольшие изменения СКЯ происходят в ближней инфракрасной области, где они существенно увеличиваются с увеличением площади листовой поверхности, биомассы и проективного

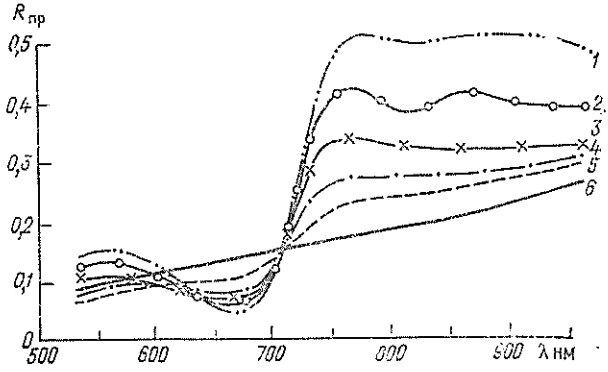


Рис. 2.8. Кривые спектральных коэффициентов яркости посева озимой пшеницы с различным значением проективного покрытия (%) (по А. Д. Клещенко, 1986).

Фаза развития — колошение, почва — обыкновенный чернозем; значения проективного покрытия (%): *1* — 100, *2* — 80, *3* — 60, *4* — 40, *5* — 20; *6* — почва.

покрытия. При относительно небольшом количестве биомассы (проективное покрытие 20 %) различия в ходе кривых СКЯ РП и почвы не столь значительны. Низкие растения не имеют значительной массы и площади листьев и не затеняют больших участков почвы. При этом отражение от почвы является основным фактором, определяющим СКЯ РП.

Изменение СКЯ с изменением растительной массы не одинаково для разных участков спектра. Если при длине волны 670 нм зависимость между СКЯ и надземной биомассой прослеживается слабо, то при длине волны 780 нм эта зависимость четко выражена. С увеличением количества надземной биомассы значения СКЯ возрастают.

Зависимость между СКЯ РП и надземной биомассой не является универсальной. Для каждого вида растительности ее характер определяется величиной α и коэффициентами яркости предельно плотного РП R_p.

Параметр α в формуле (2.29), характеризующий отражательные свойства и структуру РП, мало зависит от коэффициента яркости почвы и для данного вида растительности определяется коэффициентом яркости предельно плотного РП. Значение α растительного покрова для данного участка спектра остается практически неизменным, пока не изменяются структура и отражательные свойства растений. У пшеницы значения $R_р$ и α составляют для области спектра 400—700 нм соответственно 0,020—0,096 и 0,0036—0,0148, для области спектра 750—800 нм соответственно 0,300—0,335 и 0,0342—0,0345.

Для таких культур, как кукуруза, хлопчатник и картофель значения α заметно не изменяются от начальных фаз развития растений до начала массового пожелтения листьев. Для зерновых колосовых α изменяется при переходе от фазы кущения к фазе выхода в трубку и в дальнейшем практически не изменяется до начала цветения.

2.5. Формулы для поглощенной в растительном покрове ФАР

Поглощенная в РП ФАР рассчитывается по формуле

$$П(L, h_\odot) = \frac{\partial Q(L, h_\odot)}{\partial L} - \frac{\partial R_к(L, h_\odot)}{\partial L}. \qquad (2.30)$$

Учитывая формулу (2.26), пренебрегая долей радиации, рассеиваемой элементами РП и предполагая, что $A_S(L) = A_D(L) = A_к(L)$, можно записать

$$П(L, h_\odot) = (1 - A_к)\left(S_0' \frac{\partial a_S}{\partial L} + D_0 \frac{\partial a_D}{\partial L}\right) - \frac{\partial A_к}{\partial L}(a_S S_0' + a_D D_0). \qquad (2.31)$$

В области ФАР $\partial A_к/\partial L \to 0$ и

$$П(L, h_\odot) = (1 - A_к)\left(S_0' \frac{\partial a_S}{\partial L} + D_0 \frac{\partial a_D}{\partial L}\right). \qquad (2.32)$$

Для теоретического расчета $П(L)$ необходимо знать величины $\partial a_S/\partial L$ и $\partial a_D/\partial L$, которые принимают различные значения в зависимости от ориентации листьев

1) при горизонтальной ориентации:

$$\frac{\partial a_S}{\partial L} = \frac{\partial a_D}{\partial L} = \exp(-L); \qquad (2.33)$$

2) при равномерной ориентации:

$$\frac{\partial a_S}{\partial L} = \frac{0{,}5}{\sin h_\odot} \exp(-0{,}5L/\sin h_\odot) \qquad (2.34)$$

и

$$\frac{\partial a_D}{\partial L} = E_2(0{,}5L) \qquad (2.35)$$

(значения $E_2(0{,}5L)$ см. в табл. 2.2);

3) при вертикальной ориентации листьев;

$$\frac{\partial a_S}{\partial L} = \frac{2}{\pi} \operatorname{ctg} h_\odot \exp\left(-\frac{2}{\pi} L \operatorname{ctg} h_\odot\right) \tag{2.36}$$

и

$$\frac{\partial a_D}{\partial L} = \frac{4}{\pi} \int_0^1 \left[\exp\left(-\frac{2}{\pi} L \frac{\sqrt{1-x^2}}{x}\right)\right] \sqrt{1-x^2}\, dx, \tag{2.37}$$

причем $x = \sin h_\odot$. Последнюю величину следует находить путем численного интегрирования.

2.6. *Особенности радиационного баланса растительного покрова*

Радиационный баланс РП $R(L)$ равен разности поглощенной в РП солнечной радиации и длинноволнового эффективного излучения:

$$R(L) = П(L, h_\odot) - I(L), \tag{2.38}$$

где $П(L, h_\odot)$ — количество поглощенной в растительном покрове солнечной радиации; $I(L)$ — эффективное излучение, т. е. разность излучения подстилающей поверхности (поверхности почвы), фитоэлементов РП и противоизлучения атмосферы, поглощенного деятельным слоем.

Рассмотрим на основании экспериментальных исследований особенности радиационного баланса растительного покрова. Дневной ход радиационного баланса и его составляющих — суммарной, отраженной радиации и эффективного излучения — параллелен изменению высоты Солнца в течение дня, при этом наибольшие значения составляющих радиационного баланса наблюдаются в околополуденные часы. Максимальные значения интенсивностей радиационных потоков увеличиваются с уменьшением широты листа в соответствии с увеличением полуденной высоты Солнца. Так, при безоблачном небе интенсивность радиационного баланса в околополуденные часы составляет 0,52—0,59 кВт/м² в Ленинградской области и Эстонии, увеличиваясь до 0,63—0,70 кВт/м² на юге Европейской территории страны и в Средней Азии. В табл. 2.6 приведены значения отношений радиационного баланса $R(L)/Q_0$, отраженной радиации $R_к(L)/Q_0$ и эффективного излучения $I(L)/Q_0$ к суммарной радиации за дневные сроки и весь дневной период (7—17 ч) в целом.

Как видно из таблицы, дневной ход отношений отраженной радиации и эффективного излучения к суммарной радиации обратен дневному ходу абсолютных величин этих потоков радиации. В утренние и вечерние часы относительные величины отраженной радиации и эффективного излучения увеличиваются, в околополуденные часы они минимальны; абсолютные потоки отраженной радиации и эффективного излучения уменьшаются в утренние и вечерние часы.

Таблица 2.6

Отношения составляющих радиационного баланса растительного покрова к падающей на РП суммарной радиации (по данным Н. А. Ефимовой)

Культура и фаза развития	Характеристика	Время наблюдений (среднее солнечное), ч							
		7	9	11	12	13	15	17	7—17
		Ленинградская область; 11, 15, 17 июня 1966 г.							
Озимая рожь, колошение — цветение	$R_к(L)/Q_0$	0,23	0,22	0,21	0,20	0,20	0,22	0,23	0,21
	$I(L)/Q_0$	0,18	0,10	0,10	0,09	0,11	0,23	0,30	0,16
	$R(L)/Q_0$	0,59	0,68	0,69	0,71	0,69	0,55	0,47	0,63
		Каменная Степь; 26 июня 1951 г.							
Овес, цветение	$R_к(L)/Q_0$	0,22	0,17	0,17	0,16	0,16	0,18	0,24	0,17
	$I(L)/Q_0$	0,19	0,16	0,18	0,18	0,18	0,19	0,25	0,20
	$R(L)/Q_0$	0,59	0,67	0,65	0,66	0,66	0,63	0,54	0,63
		Тирасполь; 22—23 июля 1964 г.							
Кукуруза, выметывание метелки	$R_к(L)/Q_0$	0,27	0,19	0,16	0,17	0,17	0,19	0,20	0,18
	$I(L)/Q_0$	0,29	0,19	0,13	0,13	0,16	0,16	0,29	0,18
	$R(L)/Q_0$	0,44	0,62	0,70	0,70	0,67	0,65	0,51	0,64

Таблица 2.7

Дневные (7—17 ч) суммы радиационного баланса $R(L)$, отраженной радиации $R_к(L)$, эффективного излучения $I(L)$ и их отношения к суммарной радиации Q_0 в разные фазы вегетации при малооблачной погоде; яровая пшеница, Ростовская обл., 1953 г. (по данным Н. А. Ефимовой и Н. П. Русина)

Фаза вегетации	Дж/(см²·день)				$\frac{R(L)}{Q_0}$	$\frac{R_к(L)}{Q_0}$	$\frac{I(L)}{Q_0}$
	Q_0	$R(L)$	$R_к(L)$	$I(L)$			
Всходы (6—10 мая)	$2{,}6\cdot10^3$	$1{,}9\cdot10^3$	$0{,}3\cdot10^3$	$0{,}4\cdot10^3$	0,71	0,13	0,16
Кущение (16—20 мая)	$2{,}7\cdot10^3$	$1{,}8\cdot10^3$	$0{,}4\cdot10^3$	$0{,}4\cdot10^3$	0,68	0,17	0,15
Трубкование — колошение (21 мая — 10 июня)	$2{,}8\cdot10^3$	$1{,}8\cdot10^3$	$0{,}5\cdot10^3$	$0{,}5\cdot10^3$	0,64	0,19	0,17
Цветение (11—15 мая)	$2{,}9\cdot10^3$	$1{,}7\cdot10^3$	$0{,}5\cdot10^3$	$0{,}6\cdot10^3$	0,60	0,19	0,21
Молочная, начало восковой спелости (16—22 июня)	$2{,}2\cdot10^3$	$1{,}3\cdot10^3$	$0{,}4\cdot10^3$	$0{,}6\cdot10^3$	0,58	0,17	0,25

Отношение радиационного баланса к суммарной радиации $R(L)/Q_0$ увеличивается в околополуденные часы и уменьшается утром и вечером. Как видно из табл. 2.6, максимальные значения $R(L)/Q_0$ составляют 0,66—0,71. Отношение дневных сумм радиационного баланса к суммарной радиации изменяется в узких пределах (0,63—0,64). Значения отношений дневных величин $R_к(L)Q_0$ и $I(L)/Q_0$ более изменчивы.

По данным Н. А. Ефимовой, отношение дневных сумм радиационного баланса к суммарной радиации $R(L)/Q_0$ для разных

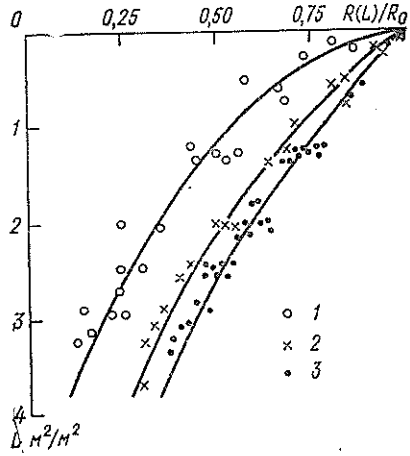


Рис. 2.9. Зависимость относительных величин радиационного баланса РП $R(L)/R_0$ от площади листьев L при различной высоте Солнца (по Н. И. Гойсе, 1983).

1) $h_\odot \leqslant 15°$, *2)* $h_\odot = 45°$, *3)* $h_\odot = 60°$.

видов сельскохозяйственных культур в период их наиболее активной жизнедеятельности является и при ясной и при пасмурной погоде устойчивой величиной, равной 0,64. У зерновых культур в первые фазы развития, когда при достаточном увлажнении почвы величины альбедо и эффективного излучения меньше (табл. 2.7), чем в последующие периоды развития, значения $R(L)/Q_0$ будут больше (0,71), чем в период максимального развития вегетационной массы (0,64).

Как видно из табл. 2.7, в последнюю фазу развития (фазу спелости) вследствие больших величин альбедо и эффективного излучения при малых затратах тепла на транспирацию, связанных со старением растений, уменьшением листовой поверхности и истощением запасов влаги в почве, значения $R(L)/Q_0$ будет меньше (0,58), чем в предшествующий период активной жизнедеятельности растений.

Прямая радиация Солнца в течение большей части дня играет определяющую роль в радиационном балансе РП. Изменение величины $R(L)$ по высоте в РП аналогично вертикальному распределению $S'(L)$, следующему экспоненциальному закону.

Зависимость радиационного баланса РП от относительной площади листьев, характеризующая его распределение в РП, опи-

сывается формулой А. И. Будаговского

$$R(L_z) = R_0 \exp[n(L_z - L_0)], \qquad (2.39)$$

где $R(L_z)$ и R_0 — значения радиационного баланса на уровне z и над РП; L_0 и L_z — соответственно площадь всех листьев РП и листьев, находящихся ниже уровня z; n — коэффициент, характеризующий скорость убывания радиационного баланса внутри РП. Коэффициент n одинаков для различных сельскохозяйственных культур и изменяется в зависимости от высоты Солнца:

$h_\odot$	10	20	30	40	50	60	70
n	0,97	0,54	0,40	0,34	0,30	0,29	0,29

У нижней границы листьев, т. е. при $L_z = 0$ $R(L_z) = R_0 \exp(-nL_0)$, а у поверхности растительного покрова при $L_z = L_0$, $R(L_z) = R_0$.

Как видно из рис. 2.9, с глубиной РП значения радиационного баланса уменьшаются и это уменьшение более значительно при меньших ($h_\odot \leqslant 15°$) высотах Солнца.

По данным Н. И. Гойсы, переход радиационного баланса через нуль на всех уровнях РП происходит практически в одно и то же время, соответствующее $h_\odot \approx 11\ldots 12°$.

Раздел II
ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Глава 3
ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

3.1. Тепловой баланс растительного покрова и его составляющие

Тепловой режим РП формируется под влиянием результирующего притока тепла, определяемого с помощью уравнения теплового баланса. Будем рассматривать характеристики РП, осредненные по горизонтали, и считать процессы и тепло- и влагообмена в РП квазистационарными. Соответственно этому уравнение теплового баланса в РП можно записать в виде

$$\frac{dR(L)}{dz} = l\frac{dE(L)}{dz} + \frac{dP(L)}{dz}, \tag{3.1}$$

где $R(L)$ — радиационный баланс РП; l — скрытая теплота парообразования; $P(L)$ и $E(L)$ — турбулентные потоки соответственно тепла и влаги в межлистном пространстве РП.

Интегрируя формулу (3.1) по z от $z=0$ (поверхность почвы), получим следующее уравнение:

$$R(L) = lE(l) + P(L) + R_{\text{п}} - P_{\text{п}} - lE_{\text{п}}. \tag{3.2}$$

где $R_{\text{п}}$, $P_{\text{п}}$, $E_{\text{п}}$ — соответственно радиационный баланс, турбулентный теплообмен и влагообмен у поверхности почвы в РП при $z=0$.

Сравнение трех последних членов уравнения (3.2) с известным уравнением теплового баланса поверхности суши показывает, что

$$R_{\text{п}} - P_{\text{п}} - lE_{\text{п}} = B_{\text{п}}. \tag{3.3}$$

Таким образом, уравнение (3.3) характеризует поток тепла в почву под РП.

Следовательно, уравнение (3.2) можно записать в виде

$$R(L) = lE(L) + P(L) + B_{\text{п}}. \tag{3.4}$$

Уравнение (3.4) представляет собой записанное в общем виде *уравнение теплового баланса РП*. При этом радиационный баланс РП $R(L)$ считается положительным, если он характеризует приход тепла к РП, а другие составляющие (потоки) считаются положительными, если они характеризуют расход тепла. В РП какое-то

количество тепла может быть израсходовано или выделено в результате биохимических процессов, происходящих в растении или почве. Но эта составляющая теплового баланса весьма мала. При биохимических процессах наибольшее количество энергии расходуется на фотосинтез, однако при этом расход энергии не превышает 2 % от радиационного баланса, что лежит в пределах точности измерений всех составляющих теплового баланса. Поэтому расход тепла на биохимические процессы при изучении теплового баланса РП не рассматривается.

3.2. Суточный и вегетационный ход составляющих теплового баланса РП по экспериментальным данным

Суточный ход радиационного баланса и потока тепла в почву РП определяется в основном условиями облачности; в зависимости от изменения этих составляющих изменяются затраты тепла на испарение и поток тепла в воздух. На рис. 3.1 представлен суточный ход составляющих теплового баланса РП, полученный в усло-

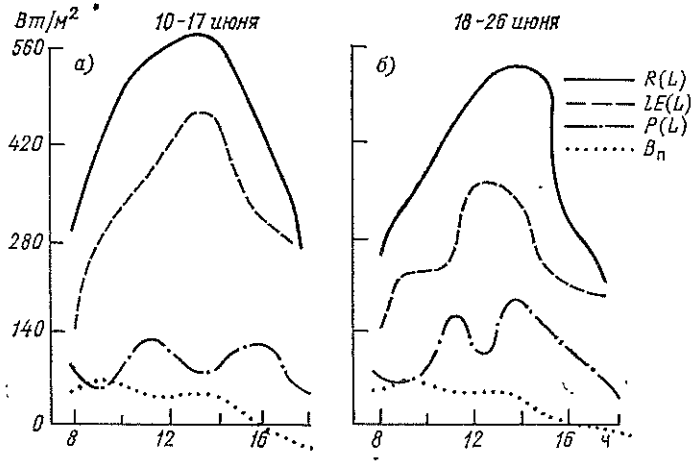


Рис. 3.1. Суточный ход составляющих теплового баланса РП при разных типах погодных условий; озимая рожь, ст. Белогорка, 1966 г. (по Н. В. Ефимовой, 1968).

а) теплая малооблачная погода; *б*) жаркая погода с переменной облачностью; $R(L)$ — радиационный баланс, $lE(L)$ — затраты тепла на испарение, $P(L)$ — турбулентный теплообмен, $B_п$ — поток тепла через поверхность почвы.

виях теплой малооблачной погоды (рис. 3.1 *а*) и жаркой погоды с переменной облачностью (рис. 3.1 *б*). Как видно из рис. 3.1, ход кривой затрат тепла на испарение следует за ходом радиационного баланса РП; отличие хода кривой турбулентного теплообмена для указанных погодных условий заключается в наличии полуденной депрессии в связи с резким возрастанием величин $lE(L)$. Тепловой поток через поверхность почвы имеет суточный ход с мак-

симумом в предполуденные часы. Послеполуденный переход через нуль наступает в 16—17 ч, в утренние часы теплообмен в почве меняет знак к 4—5 ч.

Под влиянием орошения существенно меняется динамика составляющих теплового баланса. Наибольшему изменению подвергаются турбулентный поток теплоты $P(L)$ и затраты тепла на испарение $lE(L)$. Поток теплоты в почву $B_п$ под РП меняется мало. Этот поток составляет 3—5 % радиационного баланса.

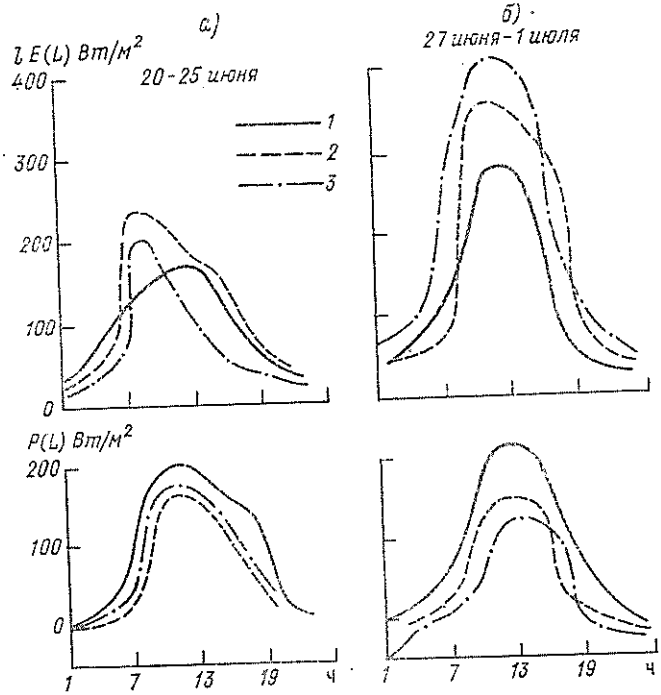


Рис. 3.2. Суточный ход затрат тепла на испарение $lE(L)$ и турбулентного теплообмена $P(L)$ перед поливом (*а*) и после полива (*б*); кукуруза (фаза — 10—12-й лист, высота растений 40 см), Украина, 1965 г. (по Н. И. Гойсе, Р. Н. Олейнику, А. Д. Рогаченко, 1983).

1 — неорошаемое поле; *2* — поле, орошаемое по бороздам; *3* — поле, орошаемое дождеванием.

На рис. 3.2 приведен пример осредненного суточного хода величин $P(L)$ и $lE(L)$ для орошаемых по бороздам и дождеванием и для неорошаемых полей. Из рисунка видно, что до полива суточный ход потоков $P(L)$ и $lE(L)$ практически одинаков на всех трех полях. Поскольку в приведенных случаях острого дефицита почвенной влаги не наблюдалось, суточный ход $P(L)$ и $lE(L)$ следует за температурой воздуха. После поливов на орошаемых

полях резко возрастают затраты тепла на испарение $lE(L)$ и одновременно снижается турбулентный теплообмен $P(L)$. При этом отчетливо вырисовывается отличие в потоках на орошаемых и неорошаемых полях. Важным является и то обстоятельство, что после поливов существенно увеличивается промежуток времени (ночью, утром и вечером), в течение которого поток $P(L)$ становится отрицательным. Это приводит к тому, что суточное значение $P(L)$ приближается к нулю.

Расход тепла на испарение (транспирацию) зависит не только от энергетических ресурсов и запасов влаги в почве, но и от фазы развития растений. По данным Н. И. Ефимовой (1968), в фазы колошения и цветения затрата тепла на испарение составляет 70—80 % радиационного баланса. В последующие периоды при переходе растений озимой пшеницы и озимой ржи в фазы налива зерна и молочной спелости площадь фотосинтезирующей поверхности листьев резко уменьшается и при продолжающемся дефиците влаги в почве затраты тепла на испарение составляют 50—60 % радиационного баланса.

Несколько иное соотношение составляющих теплового баланса наблюдается у пропашных культур. По данным Ф. А. Муминова (1964), суточные суммы составляющих теплового баланса картофельного поля меняются от фазы к фазе также вполне закономерно в соответствии с наличием критического периода у этой культуры во время репродуктивного развития (табл. 3.1).

Расход воды на транспирацию у картофеля в начальный период жизни мал и резко увеличивается в репродуктивный период, превышая в 1,5—2 раза испарение с поверхности почвы. При до-

Таблица 3.1

Суточные суммы составляющих теплового баланса (в % от $R(L)$), транспирации $E_т$ и испарения с поверхности почвы (в % от суммарного испарения E) на картофельном поле в среднем по периодам вегетации (по Ф. А. Муминову, 1964)

Составляющие теплового баланса	Весенняя посадка			Летняя посадка			
	16—14 V; от всходов до начала накопления клубней	20 V — 20 VI; накопление вегетативной массы и урожая клубней	28—30 VI; продолжение накопления клубней и прекращение прироста вегетативной массы	11—16 VII; от посадки до всхода	21 VII — 16 VIII; от всходов до начала накопления клубней, рост вегетативной массы	30 VIII — 25 IX; продолжение накопления вегетативной массы и урожая клубней	8—15 X; от заморозка до уборки картофеля
$P(L)/R(L)$	48	4	—16	42	18	—4	16
$lE(L)/R(L)$	36	79	107	37	66	88	67
$B_п/R(L)$	16	17	9	21	16	16	17
$E_т/E$	39	42	68	5	12	63	54
$E_п/E$	61	58	32	95	88	37	46

статочной влажности почвы это вызывает рост суммарного испарения и соответствующее ему распределение составляющих теплового баланса по фазам развития, а именно резкое увеличение затрат тепла на суммарное испарение в период формирования урожая. Некоторое снижение транспирации и затрат тепла на суммарное испарение для картофеля летней посадки в период после первого заморозка объясняется повреждением некоторых частей растения заморозком и частичным отмиранием ботвы. Поток тепла в почву при весенней и летней посадке в течение вегетационного периода меняется мало. Некоторое уменьшение потока тепла в почву к концу вегетации связано с уменьшением градиентов температуры почвы вследствие значительного затенения ее

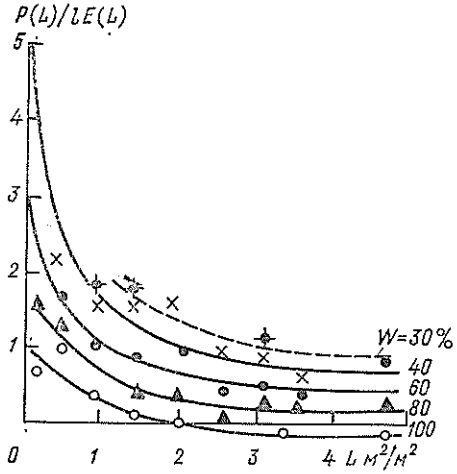


Рис. 3.3. Зависимость отношения $P(L)/lE(L)$ от относительной площади листьев L и запасов продуктивной влаги W (% ПВ) в метровом слое почвы (по В. В. Бибик, 1979).

поверхности в связи с ростом зеленой массы растений. Аналогичная картина изменения характеристик составляющих теплового баланса за период вегетации наблюдается и у других пропашных культур.

В качестве характеристики структуры теплового баланса РП используются соотношения между отдельными составляющими: $R(L)$, $lE(L)$, $P(L)$, $B_п$. Доля турбулентного теплообмена $P(L)$ в радиационном балансе РП (отношение $P(L)/R(L)$) тем больше, чем ниже запасы влаги в почве (при заданных радиационных условиях) и чем выше приход солнечной радиации при неизменных запасах влаги в почве.

Основными параметрами, определяющими изменчивость $P(L)/lE(L)$ (отношение Боуэна), являются состояние РП и условия влагообеспеченности. На рис. 3.3 представлена зависимость $P(L)/lE(L)$ от относительной площади листьев L при разных значениях W. Как видно из рис. 3.3, наиболее существенное влияние площади листьев на $P(L)/lE(L)$ наблюдается в начальные периоды развития РП при возрастании L до 1,5. Дальнейшее увели-

чение L заметного влияния на отношение $P(L)/lE(L)$ не оказывает. Отмеченный характер влияния РП на $P(L)/lE(L)$ определяется не только увеличением площади испаряющей поверхности, но и тем, что растения по мере роста и развития корневой системы включают во влагооборот все более мощные слои почвы. По мере роста L диапазон изменения $P(L)/lE(L)$ при любом увлажнении уменьшается. Так, при $L \leqslant 0{,}2$ увеличение W от 40 до 100 % сопровождается уменьшением $P(L)/lE(L)$ от 4,4 до 0,9; при $L \geqslant 1{,}0$ и таком же изменении W отношение $P(L)/lE(L)$ уменьшается от 1,5 до 0,2, а при $L \geqslant 3{,}0$ — от 0,6 до 0,05.

При высоком увлажнении ($W = 80$ %) наблюдаются близкие к нулю и отрицательные значения $P(L)/lE(L)$. Это означает, что имеет место отрицательный турбулентный приток тепла к подстилающей поверхности. Такие условия («оазисный эффект») на увлажненном поле могут возникать на фоне высоких температур, увеличения дефицита влажности воздуха и скорости ветра. При отсутствии или слабом развитии РП ($L < 1{,}0$) независимо от степени увлажнения почвы турбулентный теплообмен положителен.

3.3. Температура почвы под растительным покровом

В почве естественного сложения первопричиной процесса теплообмена является наблюдающийся всегда и повсеместно вертикальный температурный перепад, меняющий знак от дня к ночи. Благодаря этому возникает процесс теплопроводности, обусловливающий обмен теплом внутри почвы между различными глубинами.

Теплообмен в почве осуществляется следующими механизмами: теплопроводностью вдоль отдельной частицы — элемента твердого скелета материала; передачей тепла благодаря теплопроводности от одной частицы к соседней в местах их непосредственного контакта; молекулярной теплопроводностью в среде, заполняющей промежутки между частицами; теплопередачей на границе твердых частиц со средой; излучением от частицы к частице; конвекцией газа и влаги, содержащихся между частицами.

Поток тепла в почву $B_п$ через единицу поперечного сечения ее в единицу времени описывается известным уравнением

$$B_п = -\lambda \frac{\partial T_п}{\partial z}, \tag{3.5}$$

где λ — *коэффициент теплопроводности*, Вт/(м·К); $T_п$ — температура почвы; z — вертикальная координата, направленная вниз.

Поскольку перенос тепла под воздействием температурного градиента связан не только с теплопроводностью, но, как указано выше, и с другими механизмами, величину λ также называют *коэффициентом эффективной теплопроводности.*

Уравнение (3.5) можно использовать для вычислений в тех случаях, когда известно распределение температуры почвы по глубине. Если же температурное поле неизвестно, то необходимо при-

влечение дополнительных зависимостей. В качестве такой зависимости используется уравнение, выражающее условия баланса тепла в бесконечно малом объеме почвы (так называемое уравнение неразрывности):

$$\rho_{\text{п}} c_{\text{п}} \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial t} = -\frac{\partial B_{\text{п}}}{\partial z}, \tag{3.6}$$

где $\rho_{\text{п}}$ — плотность почвы, кг/м^3; $c_{\text{п}}$ — удельная теплоемкость почвы, кДж/(кг·К).

Левая часть уравнения (3.6) выражает изменение теплосодержания почвы во времени, а правая — приращение потока тепла по глубине.

Подставив (3.5) в уравнение (3.6), получим известное *уравнение теплопроводности почвы*:

$$\rho_{\text{п}} c_{\text{п}} \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial z}\right). \tag{3.7}$$

Произведение $\rho_{\text{п}} c_{\text{п}}$ представляет собой *объемную теплоемкость почвы* c^* (кДж/(м^3·К)).

При постоянных по глубине значениях λ, $\rho_{\text{п}}$ и $c_{\text{п}}$ уравнение (3.7) удобнее записывать в виде

$$K_{\text{т}} \frac{\partial^2 T_{\text{п}}}{\partial z^2} = \frac{\partial T_{\text{п}}}{\partial t}. \tag{3.8}$$

Здесь $K_{\text{т}} = \lambda / c^*$ — *коэффициент температуропроводности почвы*; единицы измерения $K_{\text{т}}$ — м^2/с.

Значения указанных выше теплофизических характеристик зависят от свойств и состояния почвы — влажности, плотности и механического состава, которые изменяются по глубине (табл. 3.2).

Теплопроводность почвенных минералов составляет 2,9 Вт/(м·К), органического вещества почвы — 0,25 Вт/(м·К),

Таблица 3.2

Теплофизические характеристики основных компонентов почв (по де Фризу, 1968)

Компонент	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Плотность кг/м^3	Объемная теплоемкость, кДж/(м^3·К)	Теплопроводность Вт/(м·К)	Температуропроводность, м^2/с
Кварц	0,74	$2{,}65 \cdot 10^3$	$2{,}0 \cdot 10^3$	8,8	$4{,}4 \cdot 10^{-3}$
Большинство почвенных минералов (в среднем)	0,80 0,80	$2{,}65 \cdot 10^3$	$2{,}1 \cdot 10^3$	2,9	$1{,}4 \cdot 10^{-3}$
Органическое вещество почвы (приближенные значения)	2,50	$1{,}1 \cdot 10^3$	$2{,}7 \cdot 10^3$	0,25	$0{,}08 \cdot 10^{-3}$
Вода	4,20	$1{,}0 \cdot 10^3$	$4{,}2 \cdot 10^3$	0,6	$0{,}16 \cdot 10^{-3}$
Воздух, 20 °С	1	1,2	1,2	0,025	$21 \cdot 10^{-3}$

почвенного воздуха — 0,025 Вт/(м·К), воды — 0,6 Вт/(м·К); влажные почвы обладают большей теплопроводностью, чем сухие.

По мере увлажнения почвы, т. е. замещения воздуха водой, теплопроводность почвы λ увеличивается, однако не пропорционально влажности. При увеличении влажности почвы от 2 до 8 % теплопроводность резко повышается (рис. 3.4 *а*), при последующем же увеличении влажности почвы рост теплопроводности ослабевает. Это объясняется тем, что при малой влажности различия между теплопроводностью воды и почвенных частиц большие; при

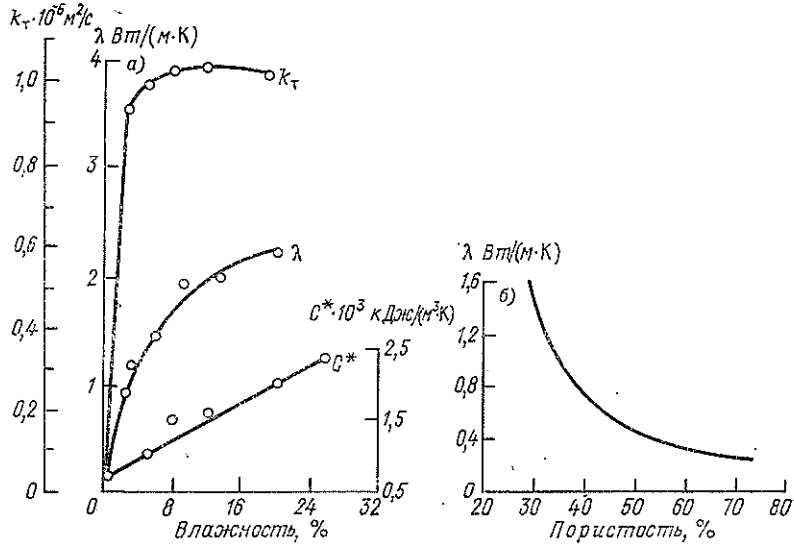


Рис. 3.4. Зависимость теплофизических характеристик почвы от влажности (*а*) и пористости (*б*) почвы (по А. Ф. Чудновскому, 1948 и В. З. Богомолову, 1948).

значительном увлажнении почвы теплопроводность ее постепенно приближается к теплопроводности воды.

С увеличением пористости теплопроводность почвы уменьшается (рис. 3.4 *б*).

Объемная теплоемкость почвы[1] зависит от ее влажности, содержания в ней воздуха и от пористости. Так как теплоемкость воды ($4{,}2 \cdot 10^3$ кДж/(м³·К) в 2 раза больше теплоемкости твердых минеральных частей почвы ($2{,}1 \cdot 10^3$ кДж·м$^{-3}$·К$^{-1}$), то объемная теплоемкость почвы c^* увеличивается с повышением ее влажности (см. рис. 3.4 *а*), при этом чем больше пористость, тем больше различия. Увеличение воздуха в почве уменьшает ее теплоемкость.

Коэффициент температуропроводности зависит от влажности почвы и содержания в ней воздуха. Температуропроводность воз-

[1] Для органического вещества она равна $2{,}7 \cdot 10^3$ кДж/(м³·К).

духа значительно больше, чем воды (сравни $21 \cdot 10^{-3}$ м^2/с и $0{,}16 \cdot 10^{-3}$ м^2/с). При малых значениях влажности почвы коэффициент температуропроводности $k_т$ растет (см. рис. 3.4 *а*), затем по мере увеличения влажности рост замедляется. Это связано с тем, что изменение температуропроводности является результатом совместного изменения теплопроводности и теплоемкости. Объемная теплоемкость возрастает одновременно с увеличением влажности. Теплопроводность при малой влажности растет; при сильном увлажнении ее рост замедляется. Вследствие этого на первых этапах увлажнения рост теплопроводности почвы происходит более интенсивно, чем рост теплоемкости, а, следовательно, температуропроводность возрастает. При дальнейшем увеличении влажности почвы рост теплопроводности относительно замедляется, в результате чего температуропроводность уменьшается (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Объемная теплоемкость c* (Дж/м³·К), коэффициент теплопроводности λ (Вт/(м·К)) и коэффициент температуропроводности $k_т$ (м²/с) генетических горизонтов выщелоченного чернозема при различной степени увлажнения (по А. Д. Воронину, 1986)

Теплофизическая характеристика	Абсолютно сухая почва	Максимальная гигроскопическая влажность	Влажность устойчивого завядания	Влажность разрыва капиллярной связи	Наименьшая влагоемкость	Полная влагоемкость
			Горизонт $A_{пах}$			
$c^* \cdot 10^6$	0,904	1,210	1,343	1,741	2,083	3,420
λ	0,352	0,585	0,714	1,259	1,294	1,306
$K_т \cdot 10^{-6}$	0,390	0,484	0,532	0,723	0,621	0,382
			Горизонт В			
$c^* \cdot 10^6$	1,300	1,552	1,627	1,983	2,252	4,281
λ	0,473	0,582	0,664	1,055	1,331	1,336
$K_т \cdot 10^{-6}$	0,364	0,375	0,408	0,532	0,591	0,312
			Горизонт С			
$c^* \cdot 10^6$	1,582	1,834	1,928	2,326	2,655	4,810
λ	0,500	0,708	0,812	1,233	1,423	1,438
$K_т \cdot 10^{-6}$	0,316	0,386	0,421	0,530	0,536	0,299

На основе экспериментальных данных для большинства типов почв установлены (А. Ф. Чудновский, Д. А. Куртенер, 1979) эмпирические зависимости для расчета теплофизических характеристик:

$$\lambda = K_т c^*, \tag{3.9}$$

$$K_т = \left[m_1 (W - m_4)^2 + 10^{-3} m_2 \rho_п + m_3\right] \cdot 10^{-7}, \tag{3.10}$$

$$c^* = (c_п + c_{вод} 0{,}01 W)\, \rho_п. \tag{3.11}$$

Здесь W — влажность почвы, %; $c_п$ — удельная теплоемкость абсолютно сухой почвы, кДж/(кг·К) (табл. 3.4); $c_{вод}$ — теплоемкость

Таблица 3.4

Значения удельной теплоемкости абсолютно сухой почвы при положительной температуре (по Д. А. Куртенеру, А. Ф. Чудновскому, 1979)

Почва	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Почва	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)
Обыкновенный чернозем	1,05	Суглинок	0,96
Супесь	0,84	Торф	2,18
Песок	0,75	Каштановые	0,84

Таблица 3.5

Эмпирические коэффициенты в формуле (3.11) для разных типов почв (по данным Е. А. Иконникова, 1935)

Тип почвы	m_1	m_2	m_3	m_4
Обыкновенный чернозем	—0,013	3,1	1,21	20
Темно-каштановая	—0,017	2,2	1,90	18
Серозем	—0,0062	2,7	—0,20	18
Южный чернозем	—0,0104	2,4	0,68	20
Дерново-глееватая, подзолистая	—0,020	3,1	1,40	20

Таблица 3.6

Суточный ход потока тепла в почву (Вт/м²) (по данным И. С. Гаприндашвили, 1970)

Тип участка	Время, ч						
	7	9	11	13	15	17	19
Оголенный участок	0	55,76	97,58	111,52	111,52	83,64	13,94
Участок с растениями (виноград)	—6,27	28,58	64,82	75,97	45,31	—4,88	—3,97

Тип участка	Время, ч					
	21	23	1	3	5	7
Оголенный участок	—27,88	—27,88	—27,88	—27,88	—27,88	0
Участок с растениями (виноград)	—24,40	—35,55	—29,97	—29,97	24,40	—6,27

воды, $c_{вод} = 4{,}19$ кДж/(кг·К). Единицы измерения теплофизических характеристик, определенных по формулам (3.10) и (3.11): $K_т$ — м²/с, λ — Вт/(м·К), c^* — кДж/(м³·К). Коэффициенты m_i ($i = 1, \ldots, 4$) зависят от типа почв. Для разных типов почв их значения приведены в табл. 3.5.

Тепловые потоки в почве изменяются под влиянием растений. Данные расчета суточного хода теплового потока в почву (табл. 3.6) показывают, что теплообменные процессы на участке с сельскохозяйственной культурой протекают менее интенсивно, чем на оголенном участке. При этом одним из главных факторов является густота посадки растений, определяющая степень разви-

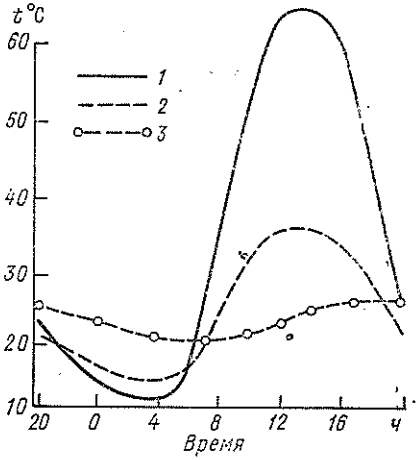


Рис. 3.5. Суточный ход температуры почвы; 11—12 июля, Узбекистан (по Ф. А. Муминову, 1963).

1 — пашня (0 см), *2* — картофельное поле (0 см), *3* — картофельное поле (10 см).

тия растительного покрова. Суточная амплитуда сокращается, весь тепловой режим на почве с растениями становится более сглаженным, хотя все особенности суточного хода сохраняются такими же, как и на оголенной почве: максимум в дневные часы, переход через нуль дважды в сутки — утром и вечером.

Днем РП уменьшает количество теплоты, поступающей в почву, благодаря меньшему проникновению солнечных лучей к поверхности почвы; температура почвы, покрытой растительностью, ниже, чем температура оголенной почвы (рис. 3.5). Как видно из рис. 3.5, растения уменьшают температуру почвы в часы максимальной солнечной радиации. Например, для приведенного на рис. 3.5 случая эта разность составляет свыше 15 °С. В ночные и утренние часы наблюдается обратное явление: температура оголенной почвы ниже, чем температура под травостоем, что обусловлено беспрепятственной потерей тепла путем излучения с поверхности почвы, не покрытой растительностью.

Заметно снижается суточная амплитуда. Если на поверхности пашни (см. рис. 3.5) она достигает 63 °С, то на картофельном поле суточная амплитуда составляет 29 °С. Таким образом, растительность сглаживает резкие вариации температурного режима почвы.

Эта закономерность проявляется в ослабленном виде и на глубине почвы. Так, на глубине 10 см снижение температуры почвы в результате влияния РП отчетливо прослеживается как на максимальной температуре почвы, так и на ее суточной амплитуде (см. рис. 3.5).

Зимой на температуру почвы оказывают влияние два основных фактора — температура воздуха и снежный покров. Поверхность снежного покрова обладает большой отражательной и излучательной способностью. Радиационный баланс поверхности снега отрицателен.

Термоизолирующие свойства снежного покрова связаны с его плотностью, мощностью и отражательной способностью. Они объясняются его малой теплопроводностью. Температура поверхности снежного покрова обычно ниже температуры приземного слоя воздуха, а также температуры поверхности оголенной почвы. Температура почвы под снегом всегда выше температуры почвы, не покрытой снегом.

Глава 4

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА

4.1. Теплообмен в растительном покрове

Рассмотрим теплообмен для элементарного слоя dz внутри растительного покрова (С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский, 1975). При этом будем исходить из следующих предпосылок:

1) растительный покров состоит из однородного в горизонтальном направлении растительного ансамбля, характеристики которого с высотой изменяются по непрерывным ограниченным зависимостям;

2) основным механизмом теплопередачи в межлистном пространстве является турбулентная диффузия;

3) теплопроводностью вдоль стеблей, корней и листьев растений пренебрегаем как величиной второго порядка малости;

4) растительный ансамбль рассматривается как система, состоящая из изолированных элементов, вертикальное распределение которых соответствует распределению биомассы.

Запишем уравнение теплового баланса за время dt для элементарного слоя dz внутри растительного покрова:

$$dq_{\text{ис}} + dq_{\lambda} - dq_{\text{в}} - dq_{\omega} = 0, \qquad (4.1)$$

где $dq_{\text{в}}$ — изменение теплосодержания воздуха в межлистном пространстве за время dt; dq_{ω} — изменение теплосодержания биомассы за время dt; $dq_{\text{ис}}$ — тепловыделение источников тепла (стоков) за время dt; dq_{λ} — теплопоступление за счет турбулентной

диффузии за время dt. В зависимости от времени суток и условий эти составляющие могут иметь и обратный знак.

Составляющие этого уравнения $dq_в$, $dq_ω$ и $dq_λ$ можно представить в виде

$$dq_в = c_в \frac{\partial T_в}{\partial t} dz\, dt, \tag{4.2}$$

$$dq_ω = c_ω M(z, t) \frac{\partial T_ω}{\partial t} dz\, dt, \tag{4.3}$$

$$dq_λ = c_в \frac{\partial}{\partial z} \left[k_т(z, t) \frac{\partial T_в}{\partial z} \right] dz\, dt. \tag{4.4}$$

Здесь M — распределение биомассы по высоте растительного покрова; $c_в$ — объемная теплоемкость воздуха; $c_ω$ — объемная теплоемкость биомассы; $k_т$ — коэффициент турбулентного обмена теплом в межлистном пространстве; $T_в$ — температура воздуха; $T_ω$ — температура биомассы.

Мощность источников (стоков) тепла $q_{ис}$ можно оценить как

$$dq_{ис} = [П(z, t) - I(z, t) - lE_L(z, t)]\, dz\, dt, \tag{4.5}$$

где $П$ — функция, описывающая распределение поглощенной в РП солнечной радиации; I — функция, описывающая распределение потока тепловой радиации внутри растительного покрова; E_L — функция, описывающая интенсивность транспирации внутри растительного покрова.

Подставляя (4.2) — (4.5) в (4.1), нетрудно получить

$$c_в \frac{\partial T_в}{\partial t} + c_ω M(z, t) \frac{\partial T_ω}{\partial t} = c_в \frac{\partial}{\partial z} k_т(z, t) \frac{\partial T_в}{\partial z} + \\ + П(z, t) - I(z, t) - lE_L(z, t). \tag{4.6}$$

Уравнение (4.6) описывает теплообмен внутри растительного покрова. При $z > h_0$ (h_0 — высота растительного покрова) функции $П$, I, M, E — равны нулю и (4.6) переходит в известное уравнение турбулентной диффузии

$$\frac{\partial T_в}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_т(z, t) \frac{\partial T_в}{\partial z}. \tag{4.7}$$

Объединим уравнения (4.6) и (4.7) и запишем их в виде одного дифференциального уравнения. Обозначим $\theta = T_ω - T_в$ и подставим в (4.6) вместо $T_ω$ сумму $T_в + \theta$.

Тогда с учетом (4.7) можно получить уравнение турбулентной диффузии в РП

$$c(z, t) \frac{\partial T_в}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_т(z, t) \frac{\partial T_в}{\partial z} \pm F(z, t), \tag{4.8}$$

где

$$F(z, t) = \begin{cases} [\Pi(z, t) - I(z, t) - lE_L(z, t) - \gamma(z, t)]\, c_b^{-1}, & z_0 < z < h_0 \\ 0, & h_0 < z \leqslant H_1 \end{cases} \tag{4.9}$$

$$c(z, t) = \begin{cases} 1 + \dfrac{c_\omega}{c_в} M(z, t), & z_0 < z < h_0 \\ 1, & h_0 < z \leqslant H_1, \end{cases} \tag{4.10}$$

$$\gamma(z, t) = c_\omega M(z, t) \frac{\partial\theta(z, t)}{\partial t}. \tag{4.11}$$

Здесь H_1 — граница перехода от буферной зоны к внешней среде системы почва — растение — атмосфера.

Остановимся кратко на характере функции $\gamma(z, t)$. В общем случае разность между температурой биомассы и воздуха θ зависит от характера растительного покрова и метеорологических условий. Анализ экспериментальных данных показывает, что скорость изменения величины θ во времени, как правило, не велика. Это позволяет при расчете рассматривать $\partial\theta/\partial t$ как малый параметр, величина которого предварительно оценивается по характеру растительного покрова и метеорологическому режиму.

Решение уравнения (4.8) при надлежащем выборе краевых условий и правильном описании функций $k_т(z, t)$, $\Pi(z, t)$, $I(z, t)$, $lE_L(z, t)$, $\gamma(z, t)$ служит универсальным способом описания теплового режима РП. Идентификация этих функций требует дать количественную характеристику радиационного, водного и турбулентного режимов РП, а для корректного задания краевых условий на нижней границе РП требуется, кроме того, решать сопряженную задачу теплового и водного режима почвы.

4.2. Температура воздуха в растительном покрове

Сложность воздействия растений на термический режим приземного слоя воздуха заключается в его многосторонности. Так, неравномерное затенение почвы растениями создает неоднородные радиационное и термическое поле под посевами. Транспирация растений и ее изменчивость во времени в значительной мере определяют температуру воздуха в межлистном пространстве. Кроме того, процесс формирования термического режима посева сильно усложняется инерционностью теплообмена, которая непостоянна во времени и зависит как от состояния окружающей среды, так и от строения РП.

Влияние РП на термический режим воздуха может оцениваться (Н. И. Гойса, Р. Н. Олейник, А. Д. Рогаченко, 1983) путем сравнения данных о температуре воздуха на поле с аналогичными данными на метеоплощадке на уровне *слоя вытеснения* или *второй деятельной поверхности* (по Б. А. Айзенштату, 1953) $\Delta T_{zв}$:

$$\Delta T_{zв} = T_{zв,\,м} - T_{zв,\,п}, \tag{4.12}$$

где $T_{zв,м}$ и $T_{zв,п}$ — температура воздуха на метеоплощадке и на поле на уровне слоя вытеснения $h_{zв}$.

Как видно из рис. 4.1, значения $\Delta T_{zв}$ могут быть как положительными, так и отрицательными и определяются степенью развития посева. При малой фитомассе температура воздуха на метеоплощадке на высоте $h_{zв}$ ниже температуры воздуха на такой же высоте в посеве. Максимального значения это различие достигает в 13 ч и составляет 1,2 °С. С ростом фитомассы температура воз-

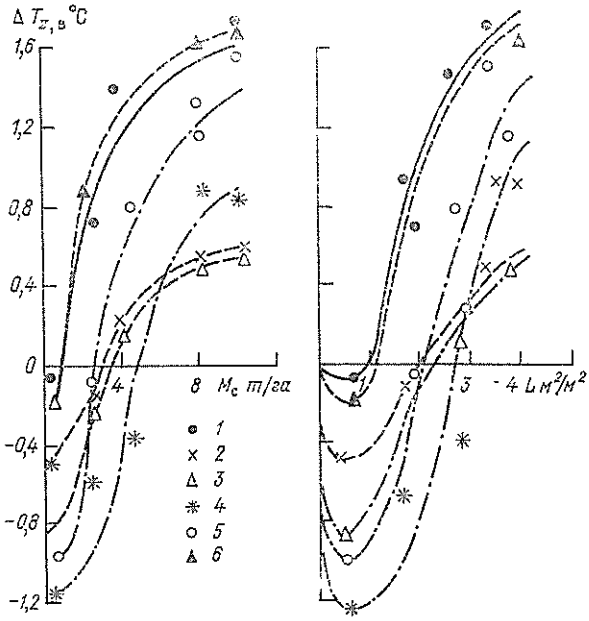


Рис. 4.1. Зависимость изменения разности температур воздуха на метеоплощадке и в поле на уровне слоя вытеснения $\Delta T_{zв}$ от надземной сухой фитомассы M_c и относительной площади листовой поверхности L (по В. В. Бибик, 1975).

1 — 1 ч, *2* — 7 ч, *3* — 10 ч, *4* — 13 ч, *5* — 16 ч, *6* — 19 ч.

духа на поле становится ниже, чем на метеоплощадке ($\Delta T_{zв} > > 0$ °С).

На рис. 4.1 отчетливо видны особенности суточного хода $\Delta T_{zв}$. При этом следует отметить некоторое различие в зависимости этого показателя термического режима от надземной сухой фитомассы M_c и площади листьев L. Если в период вегетационного роста эти зависимости подобны друг другу, то с наступлением периода репродуктивного роста характер связи меняется. Так, при увеличении M_c свыше 8 т/га величина $\Delta T_{zв}$ практически не меняется, в то же время с ростом L отмечается ее непрерывное увеличение. Причиной этого является то, что во вторую половину

вегетации, т. е. в период формирования репродуктивных органов, нарушается равнозначность этих двух показателей продуктивности кукурузы.

Вторая особенность, отчетливо прослеживаемая на рис. 4.1, — переход $T_{zв}$ через нуль. Для каждого срока этот переход зависит от величин $M_с$ и L. Ночью и вечером переход наступает при малой фитомассе. В 7, 10 и 16 ч переход через нуль наблюдается при $M_с \approx 2{,}5\ldots 3{,}5$ т/га и $L \approx 2{,}2\ldots 2{,}6$. В околополуденное время этот переход осуществляется только в хорошо развитом посеве при $M_с > 4{,}0$ т/га и $L > 2{,}7$.

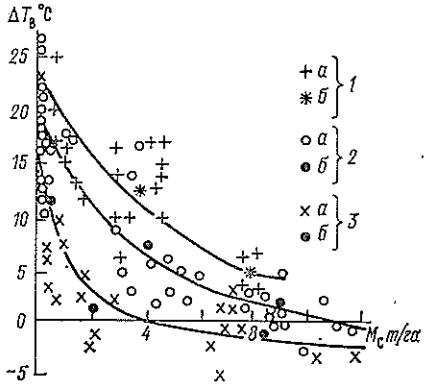


Рис. 4.2. Зависимость скачка температуры почва — воздух $\Delta T_в$ от надземной сухой фитомассы $M_с$ в 13 ч при Q=767... 837 Вт/м² и различной влажности почвы в слое 0—20 см (по Н. И. Гойсе, Р. Н. Олейнику, А. Д. Рогаченко, 1983).

1) W = 30 мм, *2*) W = 45 мм, W = 60 мм; *а* — результаты единичных измерений, *б*) значения $\Delta T_в$, осредненные по интервалам фитомассы.

Для характеристики температурного поля приземного слоя воздуха часто используется так называемый *скачок температуры почва — воздух* $\Delta T_в$ (по М. И. Будыко, 1956):

$$\Delta T_в = T_п - T_{2,0}, \qquad (4.13)$$

где $T_п$ и $T_{2,0}$ — температура поверхности почвы и температура воздуха на высоте 2,0 м. Естественно, что этот показатель термического режима является довольно грубым и далеко не исчерпывающим всей сложности строения температурного поля в приземном слое. Однако этим показателем определяется направленность процессов теплообмена в приземном слое.

Зависимость скачка температуры почва — воздух $\Delta T_в$ от надземной сухой фитомассы $M_с$ в 13 ч при потоках суммарной солнечной радиации Q = 0,767... 0,837 кВт/м² и различной влажности почвы в слое 0—20 см приведена на рис. 4.2. Как видно из рис. 4.2, при увеличении сухой надземной фитомассы РП (увеличение мощности РП) значительно снижается скачок температуры почва — воздух. Это снижение тем значительнее, чем больше запасы влаги в слое почвы 0—20 см. Так, при РП с количеством фитомассы 4 т/га значения $\Delta T_в$ при влажности почвы W_{0-20}, равной 30, 45 и 60 мм, составляют соответственно 10, 5,5 и 0 °С.

Данные рис. 4.2 показывают, что в развитом посеве при $M_с > 4$ т/га наблюдаются отрицательные значения $\Delta T_в$ при влажности почвы W_{0-20} = 60 мм.

Абсолютные значения разности скачков колеблются в слаборазвитом посеве от —1,2 до 4,7 °С, в хорошо развитом посеве от —2,2 до 23,2 °С.

Отметим особенности формирования термического режима посевов различных сельскохозяйственных культур (Ф. А. Муминов, 1963). Как видно из рис. 4.3, температура воздуха днем на высоте 20, 50 и 150 см на вспаханном поле (пашня) выше, а на люцерновом ниже, чем на кукурузном и картофельном полях. Более высокая температура воздуха на пашне обусловлена сильным нагревом почвы, более низкая температура на люцерновом поле объяс-

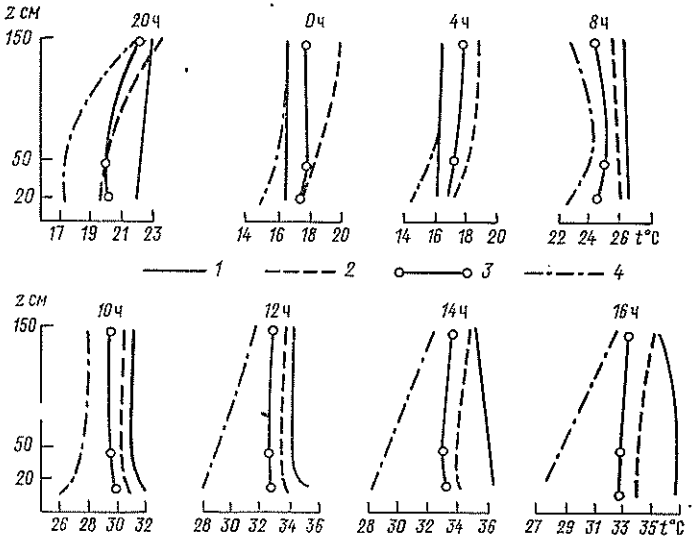


Рис. 4.3. Распределение температуры воздуха по высоте; июль, Средняя Азия (по Ф. А. Муминову, 1963).

1 — пашня, *2* — картофельное поле, *3* — кукурузное поле, *4* — люцерновое поле.

няется интенсивным испарением с почвы и транспирацией растений. Ночью наблюдается несколько иное соотношение температур. На картофельном и люцерновом полях температура воздуха примерно на 1 °С выше, чем на пашне. Наиболее низкая температура, как и днем, наблюдается на люцерновом поле.

Характер распределения температуры воздуха по высоте на сравниваемых участках существенно различен (см. рис. 4.3). Днем на пашне температура убывает с высотой при наличии больших сверхадиабатических градиентов в слое до 50 см, ночью наблюдается инверсия температур, более выраженная в слое 20—50 см.

На картофельном поле ход температуры воздуха в дневные часы характеризуется сравнительно малым убыванием в слое 20—50 см и незначительным повышением в слое 50—150 см. Ночью на картофельном поле наблюдается инверсия температуры.

На кукурузном поле в дневные и ночные часы температура воздуха изменяется с высотой незначительно. На люцерновом поле температура воздуха с высотой, в дневные и ночные часы достаточно быстро увеличивается. Над люцерновым полем формируется инверсия температуры, которая сохраняется в течение суток. Наибольшего развития инверсия достигает в дневной период (12—16 ч), а также вечером в слое 50—150 см. Причина круглосуточной инверсии над люцерновым полем — значительные затраты тепла на испарение и транспирацию.

Анализ данных рис. 4.3 позволяет сделать следующие выводы. В течение суток температура воздуха на люцерновом поле ниже, чем на других участках. Днем, особенно после полудня, различия в температуре воздуха весьма велики: на высоте 20 см они достигают 10 °С для участков пашня — люцерновое поле. Наибольшая разность наблюдается в вечерние часы на всех высотах. Так, в слое 20—50 см разность достигает 8—11 °С между пашней и люцерновым полем, 4—7 °С между пашней и кукурузным полем; на высоте 150 см разность составляет соответственно 3,6, 2,7 и 0,5 °С.

Смещение максимальных разностей на вечерние часы можно объяснить следующим образом: ночью и утром разности температур невелики; после восхода Солнца с увеличением испарения на полях картофеля, кукурузы и люцерны разности непрерывно возрастают, что связано с более быстрым ростом температуры на пашне при незначительных затратах тепла на испарение. После полудня температура на пашне и на других участках начинает убывать вследствие уменьшения притока лучистой энергии. Однако благодаря тому, что испарение на картофельном, кукурузном и люцерновом полях еще достаточно велико, температура убывает быстрее, чем на пашне, и разности продолжают возрастать до 16—19 °С. После 19 ч в связи с резким уменьшением испарения на картофельном, кукурузном и люцерновом полях разности температур начинают быстро убывать.

4.3. Суточный ход теплового баланса листа. Уравнение энергетического баланса листа

Уравнение энергетического баланса листа по существу выражает закон сохранения энергии единицы поверхности листа и записывается (З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Росс, 1980) в виде

$$\varkappa_Q Q_L + I_A - I_L - H_L - lE_L = 0, \qquad (4.14)$$

где $\varkappa_Q$ — коэффициент поглощения листом падающей на лист суммарной коротковолновой радиации Q_L; I_A — противоизлучение атмосферы; I_L — собственное излучение листа; в уравнении (4.14) оно учитывается только для верхней стороны листа, поскольку излучение его нижней стороны практически компенсируется излучением почвы.

Лучистая энергия, поглощенная листом, слагается в основном из прямой и рассеянной солнечной радиации и противоизлучения атмосферы.

Энергетические потери листа, учитываемые в уравнении теплового баланса (4.14), происходят за счет собственного излучения его верхней поверхности I_L, конвекции H_L и транспирации lE_L. Роль каждой из этих составляющих не равнозначна в разное время дня и при различном водоснабжении растений.

По данным, приведенным в табл. 4.1, можно судить о том, как распределяется между составляющими теплового баланса листа падающая на него суммарная радиация Солнца в различное время дня. Прежде всего сравнение данных для 1- и 10-го после увлажнения дней показывает, что это распределение зависит от водоснабжения растений.

Таблица 4.1

Распределение (%) поглощенной листом солнечной радиации Π_L между отдельными составляющими теплового баланса листа (по данным В. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Росса, 1980)

Время суток, ч	1-й день			10-й день		
	$\frac{I_L - I_A}{\Pi_L}$	$\frac{H_L}{\Pi_L}$	$\frac{lE_L}{\Pi_L}$	$\frac{I_L - I_A}{\Pi_L}$	$\frac{H_L}{\Pi_L}$	$\frac{lE_L}{\Pi_L}$
6—7	52	22	26	54	39	7
7—8	41	35	24	41	53	6
8—9	33	44	23	34	61	5
9—10	30	48	22	31	65	4
10—11	27	51	22	28	68	4
11—12	26	51	23	27	69	4
12—13	27	48	25	28	68	4
13—14	28	45	27	29	67	4
14—15	32	37	31	38	63	4
15—16	36	28	36	38	57	5
16—17	44	14	42	46	48	6

Так, при хорошем водоснабжении в середине 1-го дня около половины поглощенной листом энергии расходуется на конвективный обмен с воздухом. Остальная часть распределяется почти поровну между эффективным излучением и затратами тепла на транспирацию. Утром большая часть поглощенной энергии идет на эффективное излучение листа, во второй половине дня возрастает роль транспирации, что в данном случае обусловлено дневным ходом температуры воздуха.

В условиях острого недостатка влаги (10-й день) интенсивность транспирации сильно подавлена и расход тепла на нее ничтожно мал. Поскольку эффективное излучение листа на 10-й день мало отличается от излучения в 1-й день (оно лишь немного увеличено из-за перегрева листа), то большая часть поглощенной листом в середине дня энергии расходуется на конвективный теплообмен. Только утром и вечером роль конвективного теплообмена H_L уменьшается.

4.4. Разность температур листа и воздуха

Изменение падающей на лист солнечной радиации вызывает изменение всех составляющих его теплового баланса. Поглощение радиации влечет за собой большее повышение температуры листа t_l, чем температуры воздуха $t_в$, а это в свою очередь обусловливает увеличение теплового излучения листа, его конвективного теплообмена с окружающей средой, а также интенсивности транспирации. На транспирацию влияет ряд других факторов, таких, как относительная влажность воздуха $h_в$ и увлажнение почвы ψ_s,

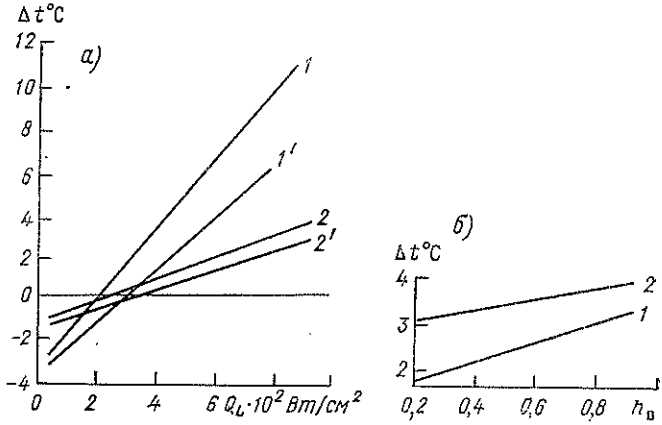


Рис. 4.4.

а) Зависимость разности температуры листа и воздуха Δt от падающей на лист суммарной солнечной радиации Q_L (по З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Россу, 1980).
1, *2* — при $E_L = 0$, $t_в = 20$ °С; *1'*, *2'* — для первой половины стандартного ясного дня при $\psi_S = -0{,}1 \cdot 10^5$ Па; *1* и *1'* при $u = 0{,}5$ м/с, *2* и *2'* при $u = 5$ м/с.
б) Зависимость разности температуры листа и воздуха Δt от относительной влажности воздуха $h_в$ при $Q_L = 0{,}084$ Вт/см², $t_в = 20$ °С, $u = 5$ м/с (по З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, С. К. Россу, 1980),
1 — при $\psi_S = -0{,}1 \cdot 10^5$ Па, *2* — $\psi_S = -8{,}0 \cdot 10^5$ Па.

а конвективный теплообмен зависит от скорости ветра. Таким образом, в результате динамического взаимодействия всех энергетических потоков устанавливается некоторая определенная для данных условий температура листа. Она может быть ниже, равна или выше температуры воздуха в зависимости от ряда внешних факторов. Рассмотрим влияние этих факторов на разность температур листа и воздуха (по данным З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Росса, 1980).

Прежде всего сравним между собой два варианта зависимостей разности температур листа и воздуха Δt от падающей на лист солнечной радиации Q_L при различной скорости ветра u (рис. 4.4 *а*). Первый вариант касается листа с полностью закры-

тыми устьицами. Здесь Δt рассчитано по уравнению теплового баланса листа при $E_L=0$ и $t_в=20$ °С, дающего линейную зависимость Δt от Q_L (кривые *1* и *2*). Положение точки $\Delta t = 0$ на оси Q_L определяется температурой и влажностью воздуха, поэтому оно совпадает для всех значений скорости ветра.

У нетранспирирующего листа величина Δt изменяется в интервале температур от —3 до 12 °С при $u=0{,}5$ м/с (кривая *1*). С увеличением скорости ветра этот интервал заметно снижается (кривая *2*).

Во втором случае (кривые *1′* и *2′*) значения Δt рассчитаны для транспирирующего в условиях реального солнечного дня листа при хорошем влагообеспечении $\psi_s = -0{,}1 \cdot 10^5$ Па.

Рано утром лист транспирирует слабо и значения Δt мало отличаются от полученных в первом варианте. Однако к полудню эта разница достигает 30—40 %. Таким образом, кривые *1* и *1′*, *2* и *2′* определяют пределы, в которых могут изменяться разности температур листа и воздуха при различной скорости ветра в зависимости от водоснабжения растения.

Отклонение кривых *1′* и *2′* от линейности обусловлено в основном изменением метеорологических условий в течение дня. При постоянной температуре и влажности $\Delta t(Q)$ остается практически линейной, за исключением тех случаев, когда значения Q_L очень малы, тогда начинает заметно сказываться реакция устьиц на радиацию.

Увеличению влажности воздуха сопутствует увеличение температуры листа (рис. 4.4 *б*). Зависимость Δt от $h_в$ весьма близка к линейной, причем наклон кривых уменьшается с понижением водного потенциала почвы.

Повышение температуры воздуха $t_в$ влечет за собой и повышение температуры листа.

Влияние скорости ветра на тепловой баланс листа осуществляется двумя путями. Во-первых, с увеличением скорости ветра улучшается конвективный теплообмен между листом и окружающей средой; во-вторых, изменяется интенсивность транспирации. Выше отмечалось, что температура листа может быть либо ниже, либо выше температуры воздуха и что это зависит от падающей на лист радиации. Отсюда ясно, что характер хода Δt с изменением скорости ветра зависит от режима солнечной радиации. При высоких значениях радиации ($Q_L = 0{,}084$ Вт/см^2) и отсутствии ветра наблюдается значительный перегрев листьев (около 10—15 °С) и усиление конвективного теплообмена с воздухом; увеличение скорости ветра вначале сильно понижает температуру листьев, а затем начиная со скорости ветра $u = 2$ м/с действие ветра на Δt ослабевает.

При низких значениях радиации ($Q_L = 0{,}014$ Вт/см^2) температура листьев несколько ниже температуры воздуха при безветрии, при некотором увеличении скорости ветра она немного повышается, но начиная со скорости ветра $u = 1{,}0 \ldots 2{,}0$ м/с влияние скорости ветра через транспирацию и конвективный

теплообмен взаимно компенсируется и величина Δt практически перестает зависеть от скорости ветра.

Согласно экспериментальным данным Ю. И. Чиркова (1969), температура освещенного листа может превышать температуру воздуха на 5—7 °С. Столь значительная разница обычно наблюдается при температуре воздуха выше 25—29 °С и безветрии. Температура подсыхающих листьев при значительном снижении тургора может достигать 38—40 °С, на 8—10 °С превышая температуру окружающего воздуха. В большинстве случаев температура незатененных листьев в зависимости от их ориентации на 2—4 °С выше, чем воздуха.

Раздел III

ВОДНЫЙ РЕЖИМ СИСТЕМЫ ПОЧВА – РАСТЕНИЕ – АТМОСФЕРА

Глава 5

ПЕРЕДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ В ПОЧВЕ

5.1. Состав и водные свойства почв

Состав почв. В состав почв входят четыре фазы: твердая, жидкая, газообразная и живая. *Твердая фаза* состоит из следующих веществ: 1) первичные обломочные минералы — кварц, плагиоклазы, пироксены, лимонит и др.; 2) вторичные глинистые минералы слоистые — каолинит, иллит, вермикулит, монтмориллонит — и неслоистые — гидрослюды, аргиллит и др.; 3) гели гидратов окислов алюминия, железа и кремнекислоты (в кислых почвах); 4) гумусовые вещества (гуминовые кислоты, фульвокислоты); 5) неразложившиеся отмершие растительные и животные остатки. *Жидкая фаза* представлена почвенной водой с растворенным в ней веществом в форме коллоидов, молекул и ионов; *газообразная фаза* — воздухом, содержащим кислород в количестве больше 18 %, азот — около 79 %, углекислоту — до 3 %, пары воды и другие компоненты; *живая фаза* включает в себя микроорганизмы, червей, насекомых, моллюсков, позвоночных животных, обитающих в почве (грызунов, кротов, сусликов и др.).

Высокая дисперсность твердой фазы обусловливает образование больших поверхностей раздела между твердой, жидкой, газообразной и живой фазами.

Удельная поверхность почв. Степень раздробленности почвенной массы, или ее *дисперсность*, можно характеризовать размерами почвенных частиц и величинами их поверхности и объема. Различают два вида дисперсности почвенной массы: первичную и структурную. Под *первичной дисперсностью* понимают распределение первичных почвенных частиц по размерам, или механический состав почв.

Первичные механические частицы при определенных условиях могут слипаться, склеиваться, свертываться (коагулировать) и образовывать вторичные частицы, или агрегаты. Распределение агрегатов по их размерам называют *вторичной*, или *структурной дисперсностью*, или *агрегатным составом почв*.

Мерой поверхности почвенных частиц является величина, называемая *удельной поверхностью*. Эта величина определяется как

площадь суммарной поверхности дисперсного материала, приходящаяся на единицу массы или объема почвы; единицы измерения — $см^2/г$, $см^2/см^3$.

При соприкосновении почвенных частиц и агрегатов образуется система пор, в которых размещается почвенная влага. *Почвенная пористость* представляет собой совокупность пустот различных форм и размеров, соединяющихся между собой в разных направлениях проходами, более узкими, нежели поперечники самих пустот. Она слагается из пор, имеющихся между отдельными элементарными частицами почвы, и из пор внутри агрегатов (внутриагрегатная порозность) и между ними (межагрегатная порозность).

Соотношения между объемами и массами твердой, жидкой и газовой фаз почвы определяют физические условия проявления почвенного плодородия. Идеальные условия складываются, когда объем твердой фазы почвы составляет 50 %, а жидкой и газовой — по 25 %.

Соотношения между объемами и массами почвенных составляющих позволяют определить основные параметры, характеризующие физические свойства почвы.

Масса твердой фазы почв m_s в единице объема твердой фазы V_s характеризует *плотность твердой фазы почвы* ρ_s:

$$\rho_s = m_s/V_s. \tag{5.1}$$

Единицы измерения плотности в системе СИ — килограмм на кубический метр ($кг/м^3$) или грамм на кубический сантиметр ($г/см^3$).

Подобно плотности твердой фазы почвы определяют плотность жидкой фазы ρ_l и плотность газовой фазы ρ_a.

Масса твердой фазы почвы m_s в единице общего объема почвы, т. е. объема твердой части и пор вместе V_t, характеризует *плотность сложения сухой почвы* ρ_b:

$$\rho_b = m_s/V_t. \tag{5.2}$$

Иногда плотность сложения сухой почвы неудачно называют «объемной массой». Этот термин возник в результате автоматической замены понятия «вес» на понятие «масса». Раньше плотность сложения сухой почвы называли объемным весом или удельным весом скелета почвы.

Очевидно, что ρ_b всегда меньше, чем ρ_s, и если поры составляют половину объема, то и ρ_b составит половину от ρ_s.

Плотность сложения сухой почвы зависит от структуры почвы, т. е. ее рыхлости или уплотненности, от процессов набухания и сжатия, связанных с влажностью почвы. Однако даже в очень уплотненных почвах плотность сложения сухой почвы остается заметно ниже плотности твердой фазы почвы, так как частицы никогда не упаковываются совершенно плотно и всегда остаются поры.

Общая масса сырой почвы m_t в единице общего объема почвы V_t характеризует *общую плотность почвы* ρ_t или плотность сырой почвы:

$$\rho_t = m_t/V_t = \frac{m_s + m_l}{V_s + V_a + V_l}, \tag{5.3}$$

где m_l — масса жидкой фазы; V_a — объем пор; V_l — объем жидкой фазы. Общая плотность почвы значительно сильнее зависит от влажности по сравнению с плотностью сложения сухой почвы.

В некоторых случаях в качестве показателя степени рыхлости или плотности почвы удобно использовать удельный объем сухой почвы $\overline{V}_b$, т. е. объем единицы массы сухой почвы:

$$\overline{V}_b = V_t/m_s = 1/\rho_b. \tag{5.4}$$

Отношение объема пор V_f к общему объему почвы V_t называют *общей пористостью почвы* ε:

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t}. \tag{5.5}$$

Подставив в (5.5) вместо V_t и V_s их значения (5.1) и (5.2), получим

$$\varepsilon = \frac{m_s/\rho_b - m_s/\rho_s}{m_s/\rho_b} = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}. \tag{5.6}$$

Общую пористость выражают либо в долях, как это следует из (5.5), либо в процентах, умножив (5.5) на 100.

Отношение объема пор, занятых воздухом ($V_f - V_l$) к общему объему пор V_f называют *пористостью аэрации (воздухоносной порозностью)* ε_a:

$$\varepsilon_a = \frac{V_f - V_l}{V_l}. \tag{5.5а}$$

Аналогичным образом можно вывести *коэффициент пористости* e — отношение объема пор V_f к объему твердой фазы V_s, а не к общему объему почвы:

$$e = \frac{V_f}{V_s} = \frac{V_t - V_s}{V_s} = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_b}. \tag{5.7}$$

Преимущество этого показателя перед предыдущим (ε) состоит в том, что с изменением объема пор изменяется только числитель, в то время как при расчете пористости изменяются и числитель, и знаменатель. Обычно величина e изменяется от 0,3 до 2.

Отношение массы жидкой фазы m_l, основную часть которой составляет вода, к массе твердой фазы почвы m_s характеризует *массовую влажность почвы* W:

$$W = m_l/m_s, \tag{5.8}$$

которую часто называют весовой влажностью. Массовую влажность иногда выражают в долях, но чаще в процентах, умножая (5.8) на 100.

Отношение объема жидкой фазы V_l к общему объему почвы V_t называют *объемной влажностью почвы* θ и выражают как в процентах, так и в долях:

$$\theta = V_l/V_t. \tag{5.9}$$

Использование объемной влажности по сравнению с массовой в некоторых случаях удобнее, поскольку непосредственно применяется в расчетах потоков воды, количеств добавленной в почву воды при орошении или дожде и удаленной из почвы при испарении, транспирации или дренаже.

Объемная влажность связана с массовой следующими соотношениями:

$$\theta = \frac{W\rho_b}{\rho_l} = W\rho_b, \tag{5.10}$$

так как $\rho_l \approx 1$.

Это соотношение получается путем замены в (5.9) V_l и V_t на их значения, выведенные аналогично (5.3) и (5.4):

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} = \frac{m_l}{\rho_l} \cdot \frac{\rho_b}{m_s} = \frac{W\rho_b}{\rho_l}.$$

Аналогично можно по объемной влажности определить массовую:

$$W = \theta\rho_l/\rho_b. \tag{5.11}$$

Во многих случаях бывает полезным выразить влажность в абсолютных величинах, в виде *запасов влаги*, удобнее всего в миллиметрах водного слоя, так как получающиеся при этом величины легко сопоставить с количеством осадков:

$$W_{(мм)} = \frac{W\rho_b h}{10}, \tag{5.12}$$

где h — толщина данного слоя почвы, см; обозначения ρ_b и W те же, что и в (5.10). Умножив (5.12) на 10, получим запас воды в м³/га, широко используемый в мелиоративной практике:

$$W\ (м^3/га) = W\rho_b h. \tag{5.13}$$

Свойства почвенной влаги. Поведение влаги в почве определяется не только размерами и формой почвенных пор, но и свойствами самой воды. Молекулы воды не являются энергетически нейтральными. Они представляют собой диполи с отрицательным зарядом (ионы O^-) на одном конце и положительным (ионы H^+) на другом (рис. 5.1). Диполи воды могут притягиваться ионами вследствие взаимного притяжения электрических зарядов ионов к полюсам гидролей. Это явление называется *гидратацией ионов* и выражается в конечном счете в образовании гидратной оболочки вокруг ионов, состоящей из притянутых ионами молекул воды.

Учитывая различные размеры ионов, можно заранее предвидеть, что величина гидратных оболочек у разных ионов различна.

Гидратация ионов имеет большое значение в процессах передвижения влаги и поглощения ее растением, поскольку почвенная влага всегда является раствором, а не чистой водой.

То, что почвенная влага находится в раздробленном состоянии, что она как бы вкраплена в поры разных размеров и форм, в том числе и в мельчайшие из них, соизмеримые с величиной молекул, что она имеет огромную поверхность раздела и не является чистой водой, а содержит в себе целый ряд как положительных, так и отрицательных ионов, обусловливает неоднородность физических

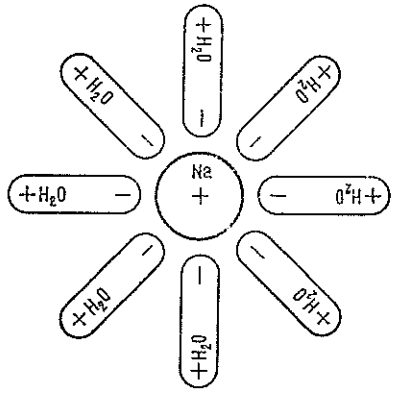


Рис. 5.1. Гидратированный ион натрия, окруженный дипольными молекулами воды (по С. А. Веригo, Л. А. Разумовой, 1973).

и химических свойств содержащейся в почве влаги и резкое отличие этих свойств от свойств воды в массе.

Соответственно механизму удержания выделяют три различные по физическим и химическим свойствам категории почвенной воды: связанную, капиллярную и гравитационную.

Связанная вода. Связанная вода удерживается адсорбционными силами (химическими и ван-дер-ваальсовскими) на поверхности почвенных частиц. Адсорбционные силы зависят в основном от электрических свойств поверхности почвенных частиц и почвенного раствора. Благодаря огромной поверхности частиц почва адсорбирует значительное количество воды. Этот процесс происходит экзотермически, со значительным выделением тепла, что является основным доказательством адсорбированного (связанного) состояния воды. Тепло, выделяющееся при соприкосновении сухой почвы (высушенной при 105 °С) с водой, называется *теплотой смачивания почвы.*

Так как каждая молекула адсорбированной воды связана с поверхностью почвенной частицы мощным силовым полем (менее $-50 \cdot 10^5$ Па), то по своим свойствам адсорбированная вода близка к твердому телу. Она носит название *прочносвязанной воды* и может передвигаться только переходя в пар. Плотность ее выше единицы. Наибольшая плотность соответствует первым порциям сорбированной воды. Каждая последующая порция сорбирован-

ной воды имеет все меньшую и меньшую плотность. Средняя плотность сорбированной воды для различных почв колеблется в пределах 1,1—1,5 г/см^3.

Прочносвязанная вода замерзает при температуре —4 °С и ниже. При охлаждении до —78 °С в почве еще остается некоторое количество незамерзшей воды. Прочносвязанная вода имеет удельную теплоемкость, равную единице, и лишена электропроводности. Она неподвижна и не растворяет электролитов и других веществ, растворяющихся в свободной воде. При связывании этой воды выделяется энергия в виде теплоты смачивания.

По мере удаления от адсорбирующей поверхности почвенных частиц свойства связанной воды меняются, энергия связи падает пропорционально величине $1/r^3$ (r — удаление от поверхности частицы). Более внешние слои удерживаются меньшей силой, чем внутренние, и поэтому имеют более рыхлое строение. Этот вид почвенной влаги носит название *рыхлосвязанной*. Рыхлосвязанная вода покрывает частицы почвы слоем, лежащим над слоем прочносвязанной воды. Она образуется вследствие вторичной ориентации дипольных молекул воды сверх адсорбированной воды, а также за счет гидратации в различной степени диссоциированных ионов и удерживается силами, значительно меньшими, чем прочносвязанная. По своим свойствам рыхлосвязанная вода меньше отличается от обыкновенной воды. В почвенных порах она незаметно переходит в свободную воду, которая удерживается в почве разностью поверхностных давлений, создаваемой поверхностями раздела вода—воздух различной кривизны.

Образование рыхлосвязанной воды начинается за счет парообразной влаги, а затем усиливается при сорбции жидкой влаги. По-видимому, рыхлосвязанная вода является жидкой влагой с повышенной вязкостью и может передвигаться в виде пленки. При некоторых условиях внутренние ее слои приобретают свойства упругого твердого тела. Рыхлосвязанная вода характеризуется силами сцепления с почвой от $-10 \cdot 10^5$ до $-50 \cdot 10^5$ Па. Она имеет пониженную растворяющую способность, пониженную температуру замерзания (от —1,5 до —4,0 °С) и обладает пониженной подвижностью.

Толщина слоя прочно- и рыхлосвязанной воды, подобно размеру поверхности раздела вода—почва, недоступна непосредственному измерению. Ее можно представить себе только как величину, получаемую от деления объема связанной воды на активную поверхность. Данные о толщине слоя связанной воды весьма разноречивы. Однако можно считать установленным, что с уменьшением размеров частиц уменьшается толщина слоя связанной воды и что на углах и ребрах она больше, чем на плоских гранях.

Капиллярная вода. Капиллярная вода удерживается в почве за счет разности поверхностных давлений, создаваемых поверхностями раздела вода—воздух различной кривизны. Капиллярные силы определяются главным образом геометрией пор и свойствами почвенного раствора.

На поверхности раздела вода — твердое тело, т. е. в случае соприкосновения воды с частицами почвы, равнодействующая сил сцепления может быть направлена или вовнутрь твердого тела (смачивание), или вовнутрь жидкости (тело не смачивается жидкостью). В первом случае сила сцепления между твердым телом и жидкостью больше сил сцепления, присущих самой жидкости, во втором случае — наоборот. Так как для равновесия жидкости необходимо, чтобы в каждой точке поверхности сила, действующая на ее молекулы, была нормальна к этой поверхности, то сама поверхность жидкости оказывается при смачивании вогнутой, при несмачивании — выпуклой. В соответствии с количеством молекул, лежащих под горизонтальной поверхностью, давление пленки на выпуклой поверхности больше, а на вогнутой меньше, чем на горизонтальной.

На вогнутой поверхности

$$P_i = P_0 - \alpha\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \tag{5.14}$$

на выпуклой

$$P_i = P_0 + \alpha\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \tag{5.15}$$

где P_i — давление при данной кривизне поверхности; P_0 — поверхностное давление жидкости при плоской поверхности (нормальное давление); α — поверхностное натяжение; R_1, R_2 — главные радиусы кривизны поверхности.

Поскольку в случае вогнутой поверхности давление меньше, чем при плоской поверхности, т. е. меньше нормального, которое для удобства сравнения принято за нуль, то давление при вогнутой поверхности всегда имеет отрицательный знак.

Почва является смачивающимся телом, поэтому капиллярная влага в почве всегда имеет вогнутую поверхность и всегда находится под отрицательным давлением. Величина его определяется поверхностным натяжением воды (при 20 °С оно равно —7,25 Па) и радиусом кривизны, зависящим от размеров и формы пор, т. е. в конечном счете от дисперсности и структуры почвы. Чем меньше размеры почвенных частиц и, следовательно, чем меньше количество включенной между ними почвенной влаги, тем больше поверхность жидкости в сравнении с ее массой, тем большую роль играют менисковые силы по сравнению с силой тяжести. При большой раздробленности воды в почве сила тяжести ничтожно мала по сравнению с менисковыми силами.

Для того чтобы создать представление о распределении и поведении капиллярной воды в почве, ввиду сложности их изучения обращаются к модели идеальной почвы.

В идеальной почве при наличии очень малого количества воды возникают изолированные ее скопления в точках контакта частиц. Вокруг точки соприкосновения образуется водное тело, представляющее собой двояковогнутую линзу, боковая поверхность которой выпукло-вогнутая. Кривизна вогнутой поверхности всегда

больше, чем выпуклой, и следовательно, поверхностное давление в таком изолированном скоплении воды, соответственно формуле Лапласа, всегда меньше нормального. Этим и обусловливается удержание ее около стыка почвенных частиц. Такие отдельные скопления воды называют *манжетами*, а всю совокупность воды, находящейся в почве в виде манжет, — *стыковой* (рис. 5.2), или *пендулярной водой.*

Так как связь между отдельными манжетами и передача гидростатического давления отсутствуют, стыковая вода не может передвигаться в капельножидком состоянии. Передвижение ее возможно главным образом при переходе в пар и лишь в очень

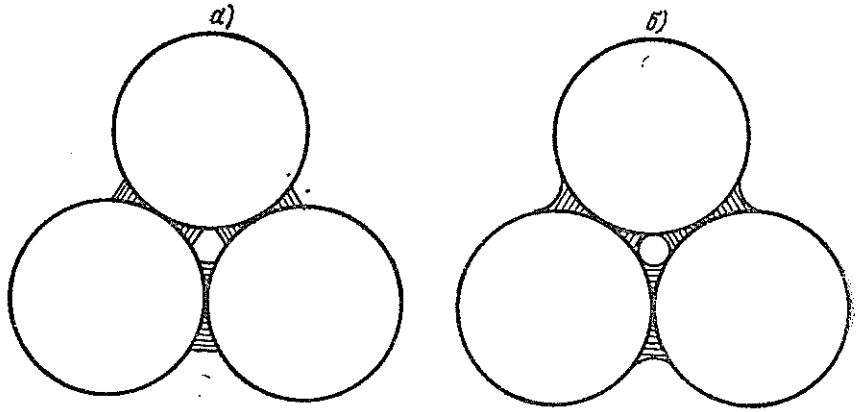


Рис. 5.2. Возникновение (*а*) и смыкание (*б*) манжет стыковой воды между шарообразными частицами (по С. А. Вериго, Л. А. Разумовой, 1973).

малой степени — при пленочном движении рыхлосвязанной воды. Таким образом, ее можно считать практически неподвижной водой. Судя по силе удержания стыковой воды почвой, замерзание ее должно происходить при температуре ниже —1,5 °С.

С увеличением содержания воды в почве манжеты растут. Когда радиус манжет становится равным 0,155 R (R — радиус почвенных частиц), края отдельных манжет в самых узких сечениях пор соприкасаются. В этот момент общий объем воды, составляющий манжеты, невелик и равен 18,3 % общего объема пор при кубической упаковке и 22,6 % объема пор при гексагональной упаковке. Одновременно с этим в почве продолжает существовать система сплошь связанных воздушных промежутков (см. рис. 5.2). Такое состояние влаги в почве принято называть *фуникулярным.* При нем возможна передача гидростатического давления, а следовательно, и переход воды в жидком состоянии из одной точки в другую. Вместе с тем сохраняется свободное передвижение воздуха в почвенной массе. Из-за крайне узких водяных путей передвижение влаги при фуникулярном ее состоянии, однако, очень затруднено.

При дальнейшем увеличении влажности вода сплошным слоем покрывает частицы почвы, оставляя в порах свободные просветы и образуя пленку, выпуклую наружу на всех почвенных частицах и вогнутую внутрь в точках их соприкосновения (вода открытых капилляров). Постепенное утолщение пленки приводит к тому, что поры сплошь заполняются водой. Пленка совсем закрывает перехваты между почвенными частицами, так что воздух в виде сферических пузырьков (защемленный воздух) может остаться лишь в наиболее широких сечениях. Такое состояние влаги, когда она образует сплошное тело, а воздух или отсутствует, или находится в изолированных скоплениях, называется *капиллярным состоянием*. Передвижение воздуха в порах прекращается, отрицательное давление приближается к нулю, и почва переходит в состояние капиллярного насыщения (вода закрытых капилляров). Вода удерживается в почве силой около $-0{,}5 \cdot 10^5$ Па и меньше, а замерзает при температуре около 0 °С.

Гравитационная вода. При отсутствии отрицательного давления вся дополнительно поступающая в почву влага, подчиняясь силе тяжести, просачивается вниз. В соответствии с действующей на нее силой она называется гравитационной водой. Гравитационная вода находится в почве в некапиллярных порах и может быть обнаружена либо в процессе просачивания, либо в виде скоплений на водоупорах. Гравитационная вода непосредственно не связана с частицами почвы и по своим свойствам практически не отличается от свободной воды в массе.

Твердая вода — лед. При понижении температуры почвы до —0 °С и ниже начинается переход почвенной влаги из жидкого состояния в лед и происходит резкое изменение свойств почвенной влаги: она приобретает свойства твердого тела. Вначале кристаллизуется влага в крупных порах почвы. В этих условиях переход почвенной воды в лед происходит при температуре, близкой к 0 °С. По мере замерзания в почве остается все меньше и меньше свободной воды, концентрация почвенного раствора увеличивается, и остающаяся влага замерзает при все более низкой температуре.

Основные физические свойства льда: силы сцепления порядка десятков тысяч атмосфер (при очень низких температурах), плотность меньше 1, теплоемкость около 0,5. Электросопротивление почвы при переходе из талого в мерзлое состояние возрастает от 1000—7000 ом до десятков и даже сотен тысяч ом.

Парообразная влага. В природных условиях неотъемлемой составной частью всякой почвы является парообразная влага. Она легко образуется из всех других категорий почвенной влаги даже при самом малом количестве ее в почве. Водяной пар занимает все свободные от воды и льда почвенные поры. Он почти всегда и везде (исключая пустыню) является насыщенным паром, так как время и поверхность соприкосновения его с почвенной влагой практически не ограничены.

5.2. *Потенциалы почвенной влаги*

Для оценки подвижности почвенной влаги и ее доступности растениям недостаточно сведений о количестве воды в почве. Необходимо также характеризовать энергетическое состояние почвенной влаги. Именно такая оценка даст представление о величине сил, удерживающих и движущих воду в почве, и позволяет измерить исходные параметры, входящие в уравнения для расчета передвижения воды в почве и в системе почва—растение—атмосфера.

Для характеристики энергетического состояния воды используют один из термодинамических потенциалов — *химический потенциал* μ или *парциальную свободную энергию Гиббса.* Поскольку абсолютные значения многих термодинамических функций неопределимы, находят их относительные значения, отсчитываемые от некоторого условного уровня сравнения.

Потенциал воды в почве представляет собой разность между свободными энергиями воды в почве и воды в стандартном состоянии (в резервуаре с чистой водой при стандартном давлении P_0, температуре T_0 и расположенном на высоте h_0)

$$\psi = \mu - \mu_0, \tag{5.16}$$

где μ — абсолютное значение потенциала воды в почве; μ_0 — потенциал воды в стандартном состоянии.

Количество работы на единицу массы чистой воды (например, в джоулях на килограмм), которую необходимо совершить для переноса единичного количества воды от его положения в почве к некоторому эталонному состоянию, называется *суммарным потенциалом почвенной влаги* ψ_t. Значение суммарного потенциала [1] определяется следующими факторами:

1) гравитационным полем, 2) влиянием растворенных солей, 3) влиянием твердой фазы (включая поглощенные ионы); 4) давлением газообразной фазы почвы.

В качестве эталонного или стандартного состояния обычно выбирается резервуар чистой несвязанной воды при заданной температуре (часто 25 °С), атмосферном давлении и на эталонной высоте h_0.

Суммарный потенциал почвенной влаги ψ_t можно разделить на следующие составляющие:

1) *гравитационный потенциал* ψ_g, характеризующий положение рассматриваемой точки в гравитационном поле относительно произвольно выбранной точки отсчета или стандартной высоты;

2) *осмотический потенциал* $\psi_{осм}$, характеризующий силы сцепления между растворенными частицами (обычно ионами) и молекулами воды;

3) *потенциал давления (тензиометрический потенциал)* ψ_P.

[1] В ненасыщенных почвах эта величина обычно отрицательна, в насыщенных — положительна.

Последняя величина объединяет силы взаимодействия твердой поверхности почвы и воды, силы сцепления между молекулами воды и силы, образующиеся за счет давления в газообразной фазе почвы. Этот комбинированный потенциал можно измерить тензиометром.

Суммарный потенциал и осмотический потенциал можно измерить или рассчитать по показаниям психрометров и (или) датчиков засоленности. Потенциал давления также можно разделить на несколько компонентов: пневматический, каркасный, потенциал, создаваемый наносами, и потенциал смачивания.

Потенциал давления, осмотический и гравитационный потенциалы применяют в следующих комбинациях.

Сумма всех трех потенциалов дает полный потенциал:

$$\psi_t = \psi_P + \psi_g + \psi_{осм}. \qquad (5.17)$$

Гидравлический потенциал Φ выражается суммой двух потенциалов:

$$\Phi = \psi_P + \psi_g. \qquad (5.18)$$

В качестве основного выражения потенциала принимают энергию на единицу массы (ψ_m) в джоулях на килограмм (Дж/кг) в системе СИ. Однако в некоторых случаях удобнее потенциал выражать как энергию на единицу объема (ψ_V). Это выражение дает размерность давления (сила на единицу площади). В системе СИ давление принято выражать в паскалях (Па — кг/(с^2·м)).

Так как вода практически несжимаемая жидкость, то ее плотность почти не зависит от потенциала. Поэтому имеется прямая пропорциональность между выражением потенциала как энергии на единицу массы и ее выражением как энергии на единицу объема. Наконец, потенциал воды можно выразить как энергию на единицу веса (гидравлический напор) ψ_F. Все, что можно выразить в единицах гидростатического давления, можно выразить в значениях эквивалентного напора воды, который представляет собой высоту жидкой колонны, соответствующую данному давлению (единица измерения в системе Си — метр (м)).

Потенциал давления ψ_P почвенной влаги зависит от влажности почвы. Эта зависимость тесно связана с минералогическим и химическим составом элементарных почвенных частиц, с удельной поверхностью почвы, с ее гранулометрическим микроагрегатным и агрегатным составом.

Кривая, характеризующая зависимость тензиометрического потенциала воды от влажности почвы, имеет большое значение для определения физических свойств почв, так как она связывает (рис. 5.3) два основных показателя жидкой фазы почвы: содержание воды в почве с ее энергетическим состоянием, обусловленным структурой, строением и составом твердой фазы почвы. Эта зависимость получила название *основной гидрофизической характеристики (ОГХ) почвы* (А. М. Глобус, 1969).

Как видно из рис. 5.3, при одинаковой влажности W вода в суглинистой почве имеет гораздо более низкий потенциал ψ_P, чем в песчаной. При этом если для песчаной почвы значения кривой ОГХ резко возрастают (убывают по абсолютной величине, так как $\psi_P < 0$) уже при небольшом увеличении влажности, то для суглинистых почв зависимость потенциала почвенной влаги от влажности почвы носит более постепенный характер. Существует много попыток формализовать эту зависимость (А. М. Глобус, 1987).

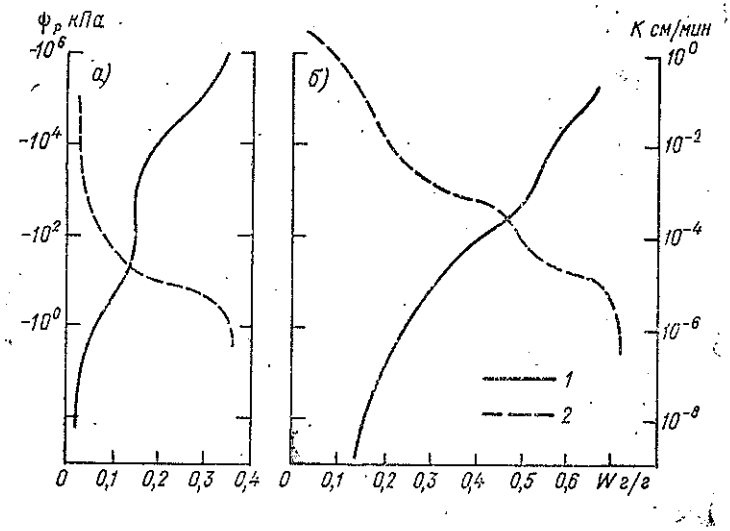


Рис. 5.3. Зависимость потенциала почвенной влаги ψ_P и гидравлической проводимости K от влажности почвы W для песчаной почвы (*а*) и чернозема обыкновенного тяжелосуглинистого (по А. Д. Воронину, 1986).

1 — гидравлическая проводимость, *2* — основная гидрофизическая характеристика.

Для расчета потенциала давления почвенной влаги ψ_P в диапазоне от влажности устойчивого завядания до полной влагоемкости почвы О. Д. Сиротенко (1981) предложил эмпирическую формулу:

$$\psi_{P_i} = 1{,}5 \cdot 10^5 \exp\left(-7{,}76 \frac{W_i - W_i^{\text{вз}}}{W_i^{\text{пв}} - W_i^{\text{вз}}}\right), \qquad (5.19)$$

где ψ_{P_i} — потенциал почвенной влаги i-го слоя почвы, Па; W_i — влажность почвы, мм; $W_i^{\text{вз}}$ — влажность устойчивого завядания, мм; $W_i^{\text{пв}}$ — полная влагоемкость, мм.

Понятия полного и гидравлического потенциалов будут в дальнейшем использованы при обсуждении движения воды в почве. Вода в почве перемещается силой, которая определяется величи-

ной и направлением градиента соответствующей комбинации потенциалов. Для воды, перемещающейся в почве в жидком виде, такая сила равна градиенту гидравлического потенциала.

5.3. Механизмы передвижения влаги в почве

Передвижение влаги в почве подчиняется основному закону переноса массы и энергии, согласно которому плотность потока q (т. е. объем субстанции V, переносимый через единицу площади поперечного сечения A в единицу времени t) пропорциональна градиенту движущих сил:

$$\frac{V}{At} = q = -K \operatorname{grad} \Phi, \tag{5.20}$$

где K — коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств проводящей среды и проводимой субстанции; $\operatorname{grad} \Phi$ — градиент гидравлического потенциала, т. е. та движущая сила, под влиянием которой и движется вода. Знак минус в уравнении (5.20) означает, что движение совершается в направлении, противоположном тому, в котором возрастает потенциал.

Единица плотности потока та же, что и для скорости ($м^3/м^2 \cdot с$-м/с), но применительно к передвижению почвенной влаги предпочитают применять термин «плотность потока» (или просто «поток»), поскольку термин «скорость» по отношению к почвенной влаге недостаточно ясен. Дело в том, что почвенные поры имеют различную форму, ширину и направление и поэтому действительная скорость в почве очень изменчива. Например, в более широких порах вода проходит значительно быстрее, чем в узких. В центре капилляра или в пленке на некотором расстоянии от поверхности частиц влага движется быстрее, чем у поверхности частиц. То есть нельзя говорить о какой-то единой скорости течения влаги и, вероятно, правильнее говорить о средней скорости. Однако даже средняя скорость течения жидкости в почве отличается от потока в том смысле, в котором он определен выше. В действительности поток воды в почве не проходит по всей площади поперечного сечения A, так как часть площади занята почвенными частицами, а проходит только в той части, которая представлена порами, открытыми для течения. Так как реальная площадь, через которую проходит поток, меньше A, то действительная средняя скорость течения жидкости значительно больше, чем поток q. Кроме того, действительная длина пути, проходимая определенным объемом жидкости, значительно больше длины колонки l из-за извилистой природы пор, в которых перемещается почвенная влага. Извилистость можно определить как среднее отношение пути, действительно пройденного водой к кажущемуся или прямому пути, т. е. к длине почвенного образца. Таким образом, извилистость — безразмерный геометрический параметр, который, хотя его и трудно точно измерить, всегда больше 1. В случае полного заполнения пор влагой (при $\theta = \varepsilon$), т. е. в *насыщенных*

влагой почвах, происходит фильтрация воды через почву под влиянием градиента положительного потенциала давления.

При переходе к *ненасыщенным влагой почвам* (при $\theta < \varepsilon$) картина передвижения влаги усложняется. В области капиллярно-гравитационной влаги происходит передвижение жидкой воды в виде сплошного капиллярного потока. При понижении содержания влаги ниже наименьшей влагоемкости происходит передвижение жидкой воды в пленочно-капиллярном виде. При влажности почвы ниже влажности в области между пленочной рыхлосвязанной и пленочной капиллярной водой пленочный механизм передвижения жидкой влаги сопровождается пародиффузионным. И наконец, в области прочносвязанной адсорбционной влаги происходит преимущественно пародиффузионный перенос воды в почве.

5.4. Движение влаги в насыщенной влагой почве

В этом случае движущей силой является градиент гидравлического потенциала Φ, представляющего собой, согласно уравнению (5.18), сумму положительного потенциала давления ψ_P и гравитационного потенциала ψ_g. Следовательно, плотность потока q между точками 2 и 1, гидравлический потенциал которых соответственно Φ_2 и Φ_1, а расстояние между ними $l_{2,1}$ можно представить в следующем виде:

$$q = -K \cdot \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{l_{21}}. \qquad (5.21)$$

При обсуждении движения воды в почве потенциал Φ удобнее выражать в виде потенциала на единицу веса Φ_w, который имеет размерность длины и эквивалентен гидравлическому напору H. Таким образом,

$$\Phi_w = H = h + z, \qquad (5.22)$$

где h — напор давления (эквивалентный P или ψ_P); z — высота над соответствующим уровнем воды, взятым за исходный.

При стационарном (установившемся во времени и пространстве) движении влаги через вертикальную колонку почвы (рис. 5.4) высотой l, верхняя часть которой затоплена слоем воды с постоянным напором h, а дно помещено в резервуар с постоянным уровнем, гидравлический напор H_2 на границе поступления воды ($z = l$) равен $H_2 = h + l$, а на границе вытекания воды из колонки ($z = 0$) гидравлический напор H_1 равен нулю, так как и гравитационный напор z и напор давления h равны нулю (см. рис. 5.4). Следовательно,

$$\Delta H = H_2 - H_1 = h + l,$$

а

$$q = -K\frac{\Delta H}{l} = -K\left(\frac{h+l}{l}\right). \qquad (5.23)$$

Падение напора на единицу расстояния в направлении движения $((h+1)/l)$ называют *гидравлическим градиентом.* Следовательно, поток пропорционален гидравлическому градиенту. Коэффициент пропорциональности K называют *гидравлической проводимостью.* Прямолинейную зависимость между потоком и гидравлическим градиентом называют *законом Дарси*, по фамилии французского инженера, установившего ее при изучении движения воды через песчаные фильтры. Закон Дарси представляет собой частный случай общего закона переноса массы и энергии.

Гидравлическая проводимость — отношение плотности потока к гидравлическому градиенту и представляет собой наклон кривой, связывающей плотность потока с гидравлическим градиентом.

При размерности потока LT^{-1} (длина в единицу времени) единица гидравлической проводимости будет зависеть от размерности движущих сил градиента потенциала). Если потенциал представлен работой на единицу веса, т. е. размерностью длины, то гидравлический градиент h/l, будучи отношением длины к длине, — величина безразмерная. Следовательно, размерность гидравлической проводимости будет такой же, как и размерность потока LT^{-1} в системе СИ (м/с) или в других удобных для применения кратных величинах.

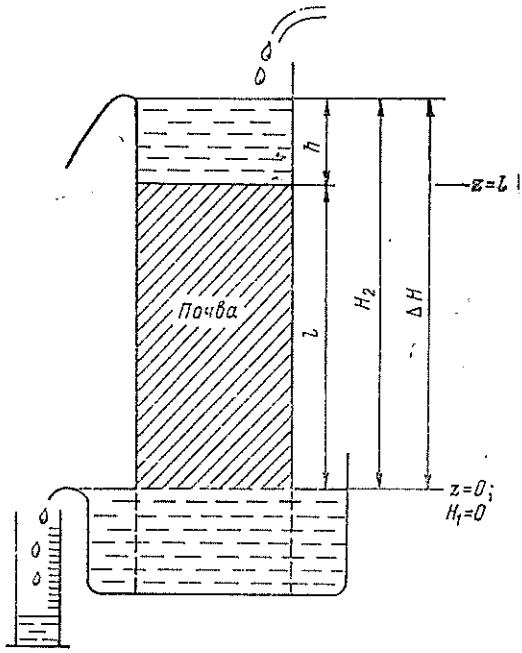


Рис. 5.4. Стационарное движение влаги через вертикальную колонку почвы (по А. Д. Воронину, 1986).

В тех случаях, когда градиент потенциала выражен в виде изменения давления на единицу длины, то гидравлическая проводимость будет иметь размерность $M^{-1}L^3T$ (здесь M — масса), или в системе СИ — м²/(Па·с).

В насыщенных влагой почвах при $W = W_{max}$ с устойчивой структурой гидравлическая проводимость принимает максимальное значение, называемое *коэффициентом фильтрации.* Порядок коэффициента фильтрации в песчаных почвах 10^{-3}—10^{-2} см/с[1], супесчаных — 10^{-4}—10^{-3} см/с, суглинистых — 10^{-5}—10^{-4} см/с, глинистых — меньше 10^{-5} см/с.

Очевидно, что гидравлическая проводимость зависит не только от гранулометрического состава, но и структуры почвы. Она выше в высокопористых, хорошо агрегированных почвах и ниже в связанных и плотных. Гидравлическая проводимость зависит также не только от общей пористости, но прежде всего от размера проводящих пор. Например, песчаные почвы с крупными порами имеют значительно бо́льшую проводимость, чем глинистые почвы с узкими порами, несмотря на то, что общая пористость глинистых почв часто бывает больше, чем песчаных.

5.5. Движение влаги в ненасыщенной влагой почве

Особенности движения влаги в ненасыщенной водой почве. Движение воды в ненасыщенной влагой почве подчиняется основному закону переноса массы и подобно течению воды в насыщенных почвах вызывается движущей силой, возникающей в результате градиента потенциала. Оно происходит в направлении понижения потенциала, а скорость течения пропорциональна градиенту потенциала и зависит от геометрии порового пространства, в котором происходит перемещение воды. Различие этих двух механизмов движения воды в почве состоит в том, что в насыщенной почве движущей силой является градиент положительного потенциала, в случае же движения в ненасыщенной почве — градиент отрицательного потенциала. Потенциал давления почвенной влаги обусловлен взаимодействием воды с поверхностью почвенных частиц и капиллярными силами. Вода стремится переместиться из мест, где толщина пленок, покрывающих частицы почвы, толще и кривизна менисков меньше, в места, где толщина пленок меньше, а кривизна больше. Другими словами, вода спонтанно перемещается в почве из мест, где потенциал давления выше, в места, где он ниже.

Кроме того, в ненасыщенных почвах появляется новый дополнительный механизм переноса воды в виде пара. При высокой влажности и отсутствии градиента температуры его роль, очевидно, невелика. По мере уменьшения влажности его значение возрастает и при влажности ниже влажности области перехода между пленочной рыхлосвязанной и пленочной капиллярной водой, при которой происходит слияние менисков и заполнение пор между частицами, пародиффузионный механизм переноса воды становится равным пленочному, а в области прочносвязанной воды этот механизм преобладает. Поэтому в поверхностном слое, где почва иссушена и подвержена сильным температурным градиентам, перенос пара становится преобладающим механизмом перемещения воды.

Движущая сила достигает максимальной величины в зоне фронта смачивания, т. е. там, где вода вступает в контакт с сухой почвой и продвигается вперед. Здесь градиент потенциала достигает нескольких сотен и даже тысяч килопаскалей на сантиметр. Такой градиент обусловливает движущую силу в несколько тысяч раз

бóльшую, чем гравитационные силы, однако скорость движения воды в этой зоне небольшая из-за низкой гидравлической проводимости.

Очевидно, наиболее важное различие между движением воды в насыщенных и ненасыщенных почвах заключается в гидравлической проводимости. В насыщенных почвах все поры заполнены водой, так что неразрывность и, следовательно, проводимость в них максимальна. По мере уменьшения влажности часть пор освобождается от воды и заполняется воздухом, поэтому доля проводящих пор в площади поперечного сечения почвы сокращается. При удалении воды прежде всего освобождаются крупные поры, которые имеют наибольшую проводимость, а остающаяся вода течет в более мелких порах. С потерей воды возрастает извилистость путей движения воды. В песчаных почвах, имеющих большую гидравлическую проводимость в насыщенном водой состоянии, при понижении влажности быстро наступает такое состояние, когда вода остается только в манжетах в точках контактов между частицами, образуя таким образом практически не связанные участки воды, в результате чего проводимость резко падает (см. рис. 5.3).

При насыщении наибольшую проводимость имеют те почвы, в которых крупные и непрерывные поры составляют большинство всего объема порового пространства; наименьшая проводимость отмечается в почвах, состоящих из мелких пор. Хорошо известно, что песчаные почвы проводят воду быстрее, чем глинистые. Однако в ненасыщенных почвах наблюдается противоположная картина. В почвах с крупными порами вода быстро удаляется и по мере развития всасывания они становятся практически не проводящими, что приводит к резкому понижению первоначально высокой проводимости. В почвах с преобладанием мелких пор большинство из них остаются заполненными и проводят воду даже при достаточно низком потенциале, так что гидравлическая проводимость резко не понижается и в действительности может остаться более высокой, чем в почвах с крупными порами при одном и том же потенциале воды.

А. И. Будаговским (1955) предложена следующая зависимость гидравлической проводимости от насыщенности:

$$K_i = K_{0i}\left(\frac{\theta_i - \theta_i^{\text{вз}}}{\theta_i^{\text{пв}} - \theta_i^{\text{вз}}}\right)^F, \qquad (5.24)$$

где K_i — гидравлическая проводимость i-го слоя почвы, см/с; K_{0i} — коэффициент фильтрации, см/с; F — параметр, равный по различным оценкам 3,5—4.

Общее уравнение движения воды в ненасыщенной почве. Движение воды в ненасыщенной почве сопровождается изменением влажности, в результате чего вода может накапливаться в каком-то бесконечно малом элементарном объеме почвы или расходоваться из него. Поэтому плотность потока воды, входящей в этот

объем, $q_w^{вх}$ не равна плотности потока воды, выходящего из него, $q_w^{вых}$. Разность между плотностями входящего и выходящего потоков и создает запас воды θ в рассматриваемом элементарном объеме почвы. Следовательно, скорость изменения содержания воды в этом объеме $\partial\theta/\partial t$ можно определить по разности потоков, выразив ее как изменение плотности потока по направлению движения воды $\partial q_w/\partial l$. Скорость изменения содержания воды в бесконечно малом элементарном объеме почвы равна разности между потоками воды, входящей в этот объем и выходящей из него, плюс любые источники и стоки жидкой воды, находящейся в этом элементарном объеме почвы. Эта формулировка получила название *закона сохранения массы*, поскольку устанавливает, что вода не теряется из данного элементарного объема и не нарушается ее неразрывность. Для одновременного течения воды в почве этот закон математически можно выразить следующим уравнением:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_w}{\partial l} \pm S_\theta, \tag{5.25}$$

где θ — объемная влажность; t — время; q_w — плотность потока; l — расстояние; S_θ — источнико-стоковый член. Это уравнение называют *уравнением неразрывности.*

Для определения величины q_w приближенно можно воспользоваться уравнением Дарси (5.21), которое применительно к движению воды в ненасыщенной почве будет иметь следующий вид:

$$q_w = -K\frac{\partial\Phi}{\partial l}. \tag{5.26}$$

Подставим в уравнение (5.25) вместо q_w его значение из (5.26). Тогда получим

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial l}\left(K\cdot\frac{\partial\Phi}{\partial l}\right) \pm S_\theta. \tag{5.27}$$

Это и есть общее уравнение потока влаги в почве (А. А. Роде, 1965).

Рассмотрим движение воды в вертикальном направлении. Согласно (5.18), $\Phi = \psi_P + \psi_g$. При определенном выборе единиц измерения (в см водн. ст.) гравитационная составляющая полного потенциала равна по абсолютной величине z, так что $\Phi = \psi_P + z$. Исходя из этого уравнения (5.27) примет вид

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K\cdot\frac{\partial\psi_P}{\partial z} \pm K\right) \pm S_\theta, \tag{5.28}$$

причем знак плюс перед параметром K относится к нисходящему движению, а знак минус — к восходящему.

В уравнение (5.28) входит как θ, так и ψ_P. Второй член в круглых скобках в уравнении (5.28) можно записать в виде

$$\frac{\partial\psi_P}{\partial z} = \frac{\partial\psi_P}{\partial\theta}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial z}. \tag{5.29}$$

Подставляя значение $\partial\psi_P/\partial z$ из уравнения (5.29) в уравнение (5.28), получим

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{\partial\psi_P}{\partial\theta}\frac{\partial\theta}{\partial z} \pm K\right) \pm S_0. \tag{5.30}$$

В этом уравнении величины K и $\partial\psi_P/\partial\theta$ отражают свойства почвы и зависят от ее влажности. Следовательно, и их произведение

$$D_\theta = K\frac{\partial\psi_P}{\partial\theta} \tag{5.31}$$

также зависит от влажности. Величина D_θ называется *коэффициентом гидравлической диффузии*; ее единица — метр квадратный на секунду ($м^2/с$).

Введя величину D_θ в уравнение (5.30), получим уравнение диффузии вертикального потока почвенной влаги

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D_\theta\frac{\partial\theta}{\partial z} \pm K\right) \pm S_0. \tag{5.32}$$

Решение уравнения (5.32) при определенных начальных и граничных условиях представляет собой функцию $\theta(z, t)$, которая служит развернутым описанием динамики влажности почвенного профиля с течением времени.

5.6. Движение парообразной воды в почве

Несмотря на то что в некоторых случаях движение паров воды в почве может происходить путем переноса массы, например, когда вихри ветра вызывают общее движение почвенного воздуха и смеси паров в поверхностном слое почвы, в основном их движение осуществляется путем диффузии — процесса, в котором различные компоненты смеси перемещаются независимо и иногда в противоположных направлениях в зависимости от разности концентраций (или парциальных давлений) от одного места к другому.

Пары воды всегда присутствуют в газовой фазе не насыщенной водой почвы, и их диффузия всегда происходит при разнице давления паров в почвенном профиле.

Уравнение диффузии паров воды имеет следующий вид:

$$q_v = -D_v\frac{\partial\rho_v}{\partial x}, \tag{5.33}$$

где q_v — плотность потока пара, $г/(см^2\cdot с)$; ρ_v — плотность паров (или концентрация) в газовой фазе, $г/см^3$; D_v — коэффициент диффузии паров воды, $см^2/с$; D_v в почве ниже, чем в атмосфере ($D_v \approx$ $\approx 0{,}2$), из-за ограниченного объема и извилистости пор (Currie, 1961).

Рассматривая жидкую воду в почве как источник и сток парообразной воды и полагая, что изменения содержания жидкой воды во времени значительно больше изменений плотности пара, Джексон (Jackson, 1964) вывел уравнение

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial l}\left[D_v\frac{\partial\rho_v}{\partial\theta}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial l}\right]\pm S_\theta, \qquad (5.34)$$

которое описывает нестационарный перенос паров в зависимости от содержания жидкой воды θ (объемная влажность).

Для одновременного переноса жидкой воды и парообразной воды используется уравнение

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial l}\left[\left(D_v\frac{\partial\rho_v}{\partial\theta}+D_\theta\right)\frac{\partial\theta}{\partial l}\right]\pm S_\theta, \qquad (5.35)$$

где D_θ — коэффициент гидравлической диффузии.

Приведенные выше уравнения рассматривают диффузию паров воды в изотермических условиях, полагая, что как вязкое течение в жидкой фазе, так и диффузия паров вызваны поверхностными силами почвенных частиц и капиллярностью. Существенное влияние на давление паров воды в почве оказывают растворенные в воде вещества.

При постоянной температуре разница давления паров, которое может быть развито в незасоленных почвах, очень мала. Например, изменение капиллярно-сорбционного потенциала от —0 до —10 000 кПа сопровождается изменением давления паров всего лишь от 2,33 до 2,18 кПа. Разница между ними составляет только 0,15 кПа. Поэтому полагают, что в обычных полевых условиях почвенный воздух почти всегда насыщен парами воды. Однако при наличии разности температур разность давления паров может быть значительной. Например, при изменении температуры всего на 1 °С (от 19 до 20 °С) давление паров увеличивается приблизительно на 0,15 кПа, т. е. на такую же величину, как и при изменении потенциала воды на 10 000 кПа.

В диапазоне преобладающих в полевых условиях температур изменение давления насыщенных паров колеблется в следующих пределах:

Температура, °С . . .	0	20	30	50
Давление паров, кПа .	0,6091	2,3384	4,2451	7,4214

Пары воды перемещаются от теплых к холодным частям почвы. Поскольку днем поверхность почвы теплее, а ночью холоднее, чем глубже лежащие соли, то движение паров днем направлено вниз, а ночью вверх. Температурные градиенты могут также вызывать перемещение жидкой воды путем влияния на поверхностное натяжение.

Глава 6

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ В ПОЧВЕ

6.1. Агрогидрологические свойства почвы

Изучение взаимодействия воды с почвой, механизмов движения влаги и освоения ее растением приводит к заключению, что при изменении влажности почвы наблюдаются некоторые узловые точки, в которых поведение, свойства воды и доступность ее для растений резко меняются. При этом в почвах, различных по механическому составу, структуре, порозности и т. п. эти точки соответствуют разному количеству содержащейся в них влаги. Узловые точки, в которых резко меняются свойства и доступность для растений почвенной влаги называются *агрогидрологическими свойствами почвы.*

Наиболее широко используются следующие агрогидрологические свойства почвы: недоступная влага, влажность устойчивого завядания, влажность разрыва капилляров, наименьшая влагоемкость, капиллярная влагоемкость, полная влагоемкость.

Недоступная влага. Это влага, удерживаемая в почве силами, большими осмотического давления клеточного сока корневых мочек и волосков; она не может быть отнята растением полностью из почвы даже в момент полного увядания растения. Следовательно, абсолютным пределом доступной растениям почвенной влаги является влажность почвы в момент полного увядания растений — потери тургора не только надземной частью, но и всасывающими клетками корней. У культурных растений в этих условиях обезвоживание надземной части, начинающей увядать значительно раньше корней, так велико, что в результате необратимых процессов изменения структуры плазмы растение гибнет. Остающуюся в этот момент в почве влагу называют *недоступной влагой.* Предел освоения растением почвенной влаги практически соответствует количеству прочносвязанной воды.

Количество воды, сорбируемое почвой при относительной влажности воздуха, близкой к его насыщению (около 100 %), называется *максимальной гигроскопичностью почвы* (МГ). Максимальная гигроскопичность почвы определяется ее удельной поверхностью: чем больше удельная поверхность почвы, тем больше ее максимальная гигроскопичность.

Как видно из данных табл. 6.1, максимальная гигроскопичность разных типов почв очень различна. В минеральных почвах она колеблется от десятых долей процента (песчаные почвы) до 10—15 % (глинистые почвы). Максимальная гигроскопичность органических (торфяных) почв составляет 30—40 % и выше.

На основе зависимости потенциала почвенной влаги от влажности различных типов почв пределом доступности влаги для растений в первом приближении можно считать потенциал около

Таблица 6.1

Максимальная гигроскопичность различных типов почв над 10 %-ной серной кислотой (в % массы абсолютно сухой почвы) (по С. А. Вериго, Л. А. Разумовой, 1973)

Песок	0,5—1,0
Супесь	1,0—3,0
Суглинок	
легкий	3,0—5,0
средний	4,0—7,0
тяжелый	6,0—9,0
Глина	9,0—15,0
Торф низинного болота	30,0—40,0

$-50 \cdot 10^5$ Па (по некоторым данным она принимается равной $-30 \cdot 10^5$ Па).

Влажность устойчивого завядания (ВЗ). Поглощение растением влаги из почвы ограничивается, с одной стороны, сосущей силой их корневых мочек и волосков, с другой — общим напряжением и подвижностью почвенной влаги. Оно тесно связано с работой, требующейся для извлечения влаги из почвы. Сосущая сила корней большинства сельскохозяйственных растений в соответствии с осмотическим давлением в период их роста колеблется от $-5 \cdot 10^5$ до $-10 \cdot 10^5$ Па.

Недостаток поступления влаги сначала вызывает лишь уменьшение содержания воды в растении, в дальнейшем же приводит и к потере тургора. Влажность почвы, при которой тургор растений не восстанавливается даже в воздухе, близком к насыщению водяными парами, называется *влажностью устойчивого завядания (коэффициентом завядания)*. Влажность устойчивого завядания выражается в процентах массы абсолютно сухой почвы. При этой влажности вследствие увядания у растений прекращается накопление растительной массы, а значит, и урожая. Хотя растения могут извлекать почвенную влагу и до влажности, меньшей, чем влажность устойчивого завядания, до предела недоступной влаги, однако при таком увлажнении они уже не могут нормально функционировать и накапливать урожай. Поэтому влажность устойчивого завядания считается важнейшим агрогидрологическим свойством почвы.

Устойчивое завядание сельскохозяйственных растений наблюдается при потенциале почвенной влаги от $-10 \cdot 10^5$ до $-20 \cdot 10^5$ Па и чаще всего соответствует $-15 \cdot 10^5$ Па.

Влажность устойчивого завядания различных почв весьма различна: чем мелкоземистее и богаче гумусом почва, тем она выше. Влажность устойчивого завядания примерно соответствует всему количеству имеющейся в данной почве связанной воды, т. е. сумме прочно- и рыхлосвязанной воды (табл. 6.2).

Из данных табл. 6.2 следует, что влажность устойчивого завядания для песков не превышает 1,5 %, для суглинков она колеблется от 4 до 12 %, на глинистых почвах достигает 20 %, а на органических превышает 50 % массы абсолютно сухой почвы.

Таблица 6.2

Влажность устойчивого завядания (в % массы абсолютно сухой почвы) для различных типов почв по данным гидрометстанций (по С. А. Вериго, Л. А. Разумовой, 1973)

Песок	0,5—1,5
Супесь	1,5—4,0
Суглинок	
легкий	3,5—7,0
средний	5,0—7,0
тяжелый	8,0—12,0
Глина	12,0—20,0
Торф низинного болота	40,0—50,0

Вследствие приведенных выше огромных различий в коэффициентах завядания для оценки условий водоснабжения сельскохозяйственных культур, произрастающих на разных почвах, сопоставимой можно считать лишь влагу, имеющуюся в них сверх влажности устойчивого завядания. Так как накопление растительной массы и формирование урожая (продукции) осуществляется лишь за счет этой влаги (сверх коэффициента завядания), ее принято называть *продуктивной влагой.*

Количество продуктивной влаги вычисляется по разности между всей имеющейся в почве влагой и количеством ее, соответствующим коэффициенту завядания. Таким образом, влажность устойчивого завядания приравнивается к нулю. Естественно, что эта нулевая точка должна быть определена для каждой почвы и глубины, для которых определяется влажность.

Влагоемкость почв. Способность почв удерживать в себе влагу ограничена ее свойствами, условиями залегания и глубиной залегания грунтовых вод. Максимальное количество влаги, которое способна удерживать в себе почва в полевых условиях, называется ее *влагоемкостью.* В полевых условиях в зависимости от глубины залегания водного зеркала в почве различают полную, капиллярную и наименьшую влагоемкость.

Полная влагоемкость (ПВ). Количество воды, содержащееся в почве в момент, когда зеркало грунтовых вод достигает поверхности почвы и все почвенные поры заняты водой, называется *полной влагоемкостью* (ПВ).

Капиллярная влагоемкость (КВ). С момента, когда уровень грунтовых вод отрывается от поверхности почвы и опускается все ниже и ниже вглубь, часть почвенной влаги, подчиняясь ускорению свободного падения, из некапиллярных пор просачивается вниз. В результате в слое почвы, лежащем выше уровня грунтовых вод, остается лишь капиллярная вода, удерживаемая менисковыми силами. Высота столба этой воды, согласно формуле Жюрена, равна $0{,}15/r$ (r — радиус капилляра). По мере снижения уровня грунтовых вод будет опоражниваться все большее количество пор, и вода будет оставаться в более мелких порах. В конце концов при достаточно глубоком залегании уровня грунтовых вод в верхних слоях почвы в основном останется лишь

влага открытых капилляров. Описанный слой повышенной влажности, т. е. слой капиллярного увлажнения, который принято называть *капиллярной зоной*, движется, таким образом, соответственно перемещению уровня грунтовых вод. Причем мощность капиллярной зоны (ее высота) для одной и той же почвы практически постоянная и определяется водоподъемной способностью почвы. Количество почвенной влаги, содержащейся в капиллярной зоне, на различных высотах от уровня грунтовых вод различно. Наибольшее ее количество содержится в слое почвы, непосредственно примыкающем к зеркалу грунтовых вод.

Наибольшее количество влаги, которое может удержать в себе весь слой почвы, расположенный над зеркалом грунтовых или почвенно-грунтовых вод, называется *капиллярной влагоемкостью почвы.*

Наименьшая влагоемкость (НВ) — наибольшее возможное содержание подвешенной влаги в данном слое почвы в ее естественном сложении при отсутствии слоистости и подпирающего действия грунтовых вод, после стекания всей гравитационной влаги. В условиях неглубокого залегания зеркала грунтовых вод наименьшей влагоемкости соответствует влажность на верхней границе капиллярной зоны. Содержанию воды при наименьшей влагоемкости соответствует водный потенциал $-0{,}15 \cdot 10^5$ Па (по некоторым данным эта величина равна $-0{,}33 \cdot 10^5$ Па).

Влажность разрыва капиллярной связи (ВРК) — это влажность почвы, лежащая в интервале между наименьшей влагоемкостью и влажностью завядания, при которой подвижность влаги в процессе снижения влажности почвы, и, следовательно, влагопроводности, резко уменьшается. Часто числовое значение влажности разрыва капиллярной связи близко к полусумме значений наименьшей влагоемкости и влажности устойчивого завядания, в среднем 50—60 % НВ. Влажность разрыва капиллярной связи является критической точкой, которая делит доступную растению влагу на две категории: 1) влагу легкодоступную, способную самопроизвольно и быстро передвигаться в жидком виде из всего смоченного слоя одновременно к зоне испарения и зоне корневого иссушения (интервал от наименьшей влагоемкости до влажности разрыва капиллярной связи); 2) влагу, не способную заметно передвигаться в жидком виде (интервал от влажности разрыва капиллярной связи до влажности устойчивого завядания) и труднодоступную для растений.

6.2. Запасы продуктивной влаги в почве

Для оценки условий произрастания и формирования урожая сельскохозяйственных культур учет влажности почвы производится в течение всего вегетационного периода. Наблюдения ведутся во всем корнеобитаемом слое дифференцировано по глубине, так как ввиду ограниченной подвижности почвенной влаги могут создаваться существенные различия влажности почвы по

ее вертикальному профилю. Вследствие этого определения влажности почвы носят характер массовых полевых измерений.

Имеются прямые и косвенные методы полевых определений влажности почвы. Прямыми методами непосредственно измеряется количество имеющейся в почве воды. Косвенными методами влажность почвы учитывается путем определения изменений тех или иных физических свойств почвы, зависящих от степени ее увлажнения.

Прямым, наиболее старым, ставшим уже классическим методом полевых определений влажности почвы является метод сушки образцов почвы. Он принят в качестве эталона для оценки применимости других методов. В его основу положено определение количества воды, имеющейся в почве, путем высушивания образцов, вынутых из почвы.

Косвенные методы, считающиеся в настоящее время перспективными и совершенствующиеся, по принципам, положенным в их основу, могут быть подразделены на три группы, основанные: а) на электросопротивлении (омический метод), б) на капиллярном натяжении почвенной влаги (тензиометрический метод) и в) на способности почвенной влаги ослаблять проходящие через почву гамма-лучи или превращать быстрые нейтроны в медленные (нейтронный метод).

Количество продуктивной влаги, или ее запасы, принято выражать в миллиметрах толщины водяного слоя. В таком виде они легко сопоставимы с данными по осадкам и испарению. Вычисление запасов продуктивной влаги производится по формуле

$$W = 0{,}1\rho_в h\,(u - k), \qquad (6.1)$$

где W — запасы продуктивной влаги, мм; $\rho_в$ — плотность сложения сухой почвы, г/см^3; h — мощность слоя почвы, см; u — влажность, % абсолютно сухой почвы; k — влажность устойчивого завядания, % абсолютно сухой почвы; 0,1 — коэффициент для перевода в миллиметры водяного слоя.

По методике, принятой на сети гидрометеорологических станций, запасы подсчитываются для каждого 10-сантиметрового слоя почвы и в самом верхнем слое 0—5 см. Запасы влаги в слое любой большей мощности получаются простым суммированием запасов входящих в него 10-сантиметровых слоев.

Расчет запасов продуктивной влаги в почве удобно производить в специально разработанных для этого формах таблиц. Эти таблицы составляются отдельно для каждой культуры и охватывают период с момента уборки предшествующей культуры до момента уборки культуры, произрастающей на этом наблюдательном участке в данном году.

На основе данных итоговой таблицы обычно строится график (рис. 6.1), на котором запасы продуктивной влаги представляются в миллиметрах по 10-сантиметровым слоям в виде цифр и изоплет, отображающих влажность всей толщи почвы, в которой она определялась с момента уборки предшествующей культуры до

момента уборки культуры, произрастающей на данном участке в данном году. Поскольку на влажность почвы в холодный период года существенное влияние оказывает промерзание почвы, то на этом же графике наносятся данные наблюдений (в виде изоплет) за глубиной промерзания и оттаивания почвы и некоторые другие сопутствующие наблюдения. В зимний период наносятся данные наблюдений за высотой снежного покрова, в вегетационный — за фазами развития растений. Такая обработка материалов

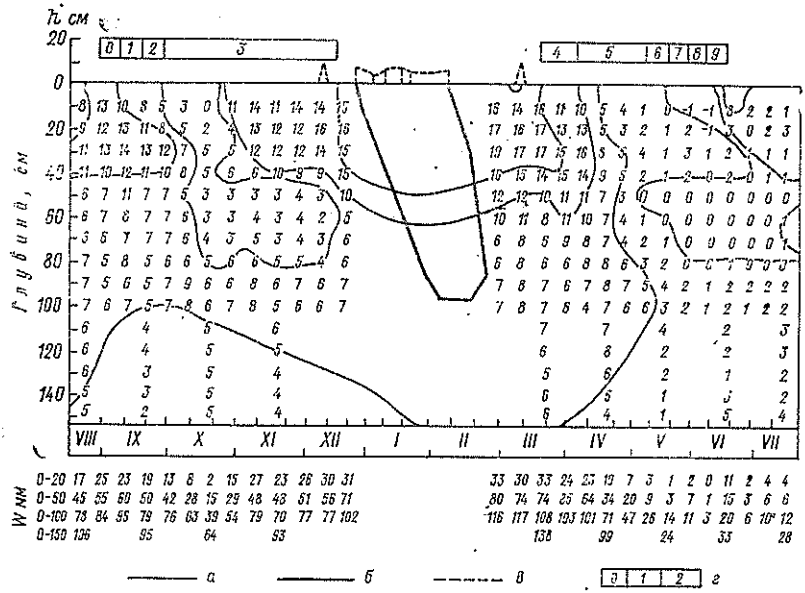


Рис. 6.1. Комплексный график запасов продуктивной влаги в слое почвы W и промерзания почвы под озимой пшеницей в 1949-50 г.; агрометстанция Херсон (по С. А. Вериго, Л. А. Разумовой, 1973).

а — изоплеты запасов продуктивной влаги в 10-сантиметровых слоях почвы; *б* — глубина промерзания почвы, см; *в* — высота снежного покрова, см; *г* — межфазные периоды: 0 — посев — всходы, *1* — всходы — 3-й лист, *2* — 3-й лист — кущение, *3* — кущение — прекращение вегетации, *4* — возобновление вегетации — выход в трубку, *5* — выход в трубку — колошение, *6* — колошение — цветение, *7* — цветение — молочная спелость, *8* — молочная спелость — восковая спелость, *9* — восковая спелость — полная спелость.

наблюдения за влажностью почвы облегчает использование их для научных обобщений и при оперативном агрометеорологическом обслуживании сельскохозяйственного производства.

Необходимые для расчета запасов продуктивной влаги в почве агрогидрологические свойства почвы (плотность сложения и влажность устойчивого завядания) определяются на тех же полях и тех же глубинах, для которых определяется влажность почвы.

Для различных почв, главным образом в зависимости от их механического состава и гумификации, количество непродуктивной влаги весьма различно. В метровом слое дерново-подзолистых почв оно колеблется от 20 до 200 мм (соотношение 1 : 10), а чер-

ноземных — от 80 до 180 мм (соотношение 1 : 2,2). Эти различия определяются в основном влажностью устойчивого завядания. Влияние плотности сложения на количество непродуктивной влаги в почве хотя и существенно, но намного меньше.

Плотность сложения подпахотных горизонтов минеральных почв в зависимости от оструктуренности и количества имеющегося в них органического вещества колеблется от 1,0 до 1,8 г/см^3. Плотность сложения пахотного слоя, который, кроме указанных факторов, в значительной степени зависит еще от характера рыхления и времени обработки, колеблется от 0,8 до 1,5 г/см^3. Плотность сложения торфяных почв значительно ниже минеральных. Она зависит от степени минерализации; на слабоминерализованных почвах она составляет 0,10—0,15 г/см^3.

Наименьшая влагоемкость почвы изменяется также в значительных пределах. Например, в пахотном слое почвы она составляет: для суглинистых почв 40—50 мм, супесчаных 30—40 мм, песчаных 20—30 мм, а в метровом соответственно 170—190, 150—170 и 80—120 мм.

6.3. Водный баланс почвы

Совокупность всех величин прихода влаги в корнеобитаемый слой почвы и расхода из него называется *водным балансом* этого слоя почвы. Водный баланс можно составить за любой отрезок времени: календарный год, отдельные сезоны, за период вегетации в целом или за тот или иной отрезок вегетационного периода.

Мощность корнеобитаемого слоя для большинства зерновых культур составляет 1—1,5 м, для сеяных трав, например, для люцерны, нередко превышает 2—3 м, для древесных же пород достигает даже 5 м и более. Наиболее активная часть корневой системы почти всех основных полевых культур размещается в первом верхнем метре, а в начальные фазы жизни растений ограничивается лишь 20- или 50-сантиметровым слоем. В связи со сказанным водный баланс в зависимости от поставленной цели составляется для слоев почвы различной мощности. Изменение запасов влаги в почве за период, для которого подсчитывается баланс, является итогом баланса, его сальдо.

Применительно к нуждам сельского хозяйства итог баланса выражается в миллиметрах продуктивной влаги.

Основной приходной статьей водного баланса $\Theta_{пр}$ является сумма осадков, достигших поверхности почвы $\Theta_{ос}$, а при орошении плюс еще и количество воды, поданной на поверхность почвы $\Theta_{ор}$. Однако не все количество воды может поглощаться почвой; часть ее стекает по поверхности (поверхностный сток $\Theta_{пс}$), другая часть может уходить с внутрипочвенным стоком ($\Theta_{вс}$), и наконец часть ее может фильтроваться в грунтовые воды ($\Theta_{шн}$). В некоторых случаях в учитываемую толщу почвы определенное количество воды может поступать из грунтовых вод ($\Theta_{гр}$) или из атмосферы в виде пара, конденсирующегося в почве ($\Theta_{к}$). Часть воды может посту-

пать из соседней почвенной толщи ($\Theta_{вп}$) и, наконец, на поверхность учитываемой территории может притекать дополнительное количество воды ($\Theta_{пп}$). Основными расходными статьями являются количество воды, испаряемой из почвы ($\Theta_{исп}$) и транспирируемой с листовой поверхности растений $\Theta_{тр}$.

Таким образом, если начальный запас воды в почве был $W_н$, а конечный $W_к$, то уравнение полного водного баланса почвы примет следующий вид:

$$W_к - W_н = [(\Theta_{ос} + \Theta_{ор}) + \Theta_{гр} + \Theta_{пп} + \Theta_{вп} + \Theta_к] - [(\Theta_{исп} + \Theta_{тр}) + \Theta_{пс} + \Theta_{вс} + \Theta_{ин}]. \quad (6.2)$$

Для случая плоской поверхности, когда нет ни притока воды на данную территорию, ни оттока с нее, когда отсутствует также внутрипочвенный приток или отток и нет подтока из грунтовых вод при условии, что вся вода поглотилась почвой, а капиллярная конденсация незначительна, уравнение (6.2) примет следующий вид:

$$W_к - W_н = (\Theta_{ос} + \Theta_{ор}) - (\Theta_{исп} + \Theta_т) \quad (6.3)$$

или

$$\Delta W = \Theta_{пр} - E,$$

где

$$\Theta_{пр} = \Theta_{ос} + \Theta_{ор}, \quad E = \Theta_{исп} + \Theta_т, \quad (6.4)$$

E — суммарное испарение.

Сумма осадков $\Theta_{ос}$, достигающих поверхности почвы, зависит от степени ее покрытия, плотности и структуры растительного покрова, размеров и смачиваемости листовых пластинок, их числа и распределения по площади и высоте, а также от интенсивности, частоты и продолжительности дождей (поскольку при выпадении на сухую поверхность растений каждый раз на ее смачивание тратится новое количество влаги).

Осадки, достигшие поверхности почвы, впитываются ею и одновременно в соответствии с малейшими неровностями поля перераспределяются и передвигаются по его поверхности. Величина поверхностного притока влаги $\Theta_{пп}$ в заданную точку будет равна разности суммы осадков, достигших поверхности почвы, и количества влаги, впитанной почвой за время пути, т. е. будет определяться суммой осадков, их интенсивностью, водопроницаемостью почвы, рельефом и микрорельефом поля, шероховатостью его поверхности. Пополнение же количества влаги в заданной точке за счет поверхностного притока будет равно разности поверхностного притока $\Theta_{пп}$ и оттока влаги $\Theta_{пс}$ в этой точке.

Процесс прохождения влаги через поверхность называется *впитыванием влаги в почву*, или *поглощением влаги почвой*. Впитывание является первой стадией процесса инфильтрации, второй стадией которого является просачивание, или фильтрация, т. е. дальнейшее передвижение и перераспределение впитывавшейся в почву влаги ($\Theta_{пп}$).

Важнейшее значение для скорости впитывания воды имеет порозность поверхностного слоя. Начальная скорость впитывания на окультуренных почвах достигает 78 мм/ч, а на неокультуренных — всего лишь 36 мм/ч. В большинстве случаев скорость инфильтрации не превышает 15 мм/ч, а при дождях низкой интенсивности вся вода впитывается в почву.

В тех случаях, когда просочившаяся в почву вода попадает на водонепроницаемый слой и передвигается внутри почвы соответственно его уклону ($\Theta_{вс}$), пополнение запасов влаги отдельных участков поля может происходить и за счет внутрипочвенного притока.

В районах с высоким залеганием почвенно-грунтовых вод, где капиллярная зона достигает почвенной толщи, существенным источником пополнения запасов корнеобитаемого слоя является капиллярная подача влаги из грунтовых вод ($\Theta_{гр}$). Пополнение корнеобитаемого слоя влагой путем подачи ее снизу может происходить только в тех случаях, когда глубина залегания водного зеркала от нижней границы корнеобитаемого слоя не превышает для супесчаных почв 0,5—1,0 м, для легкосуглинистых 1,0—1,5 м и для тяжелосуглинистых 3,0—5,0 м. Поскольку скорость капиллярного движения воды зависит от близости водного зеркала и размеров активных пор почвы, пополнение запасов в одной и той же почве осуществляется тем быстрее, чем выше залегают грунтовые воды.

Дополнительным источником поступления влаги в почву является конденсация водяного пара из атмосферы ($\Theta_к$).

Увлажнение корнеобитаемого слоя почвы путем конденсации пара, передвигающегося из глубоко лежащих подстилающих слоев грунта, по условиям температурного режима возможно лишь в холодный период, когда температура корнеобитаемого слоя ниже температуры подстилающих слоев.

Обогащение почвы влагой путем адсорбции ее из воздуха возможно только в тех случаях, когда влажность почвы ниже максимальной гигроскопичности (этот процесс аналогичен насыщению почвы при определении максимальной гигроскопичности). С падением температуры в соответствии с увеличением относительной влажности воздуха и адсорбционной способности почвы наблюдается поглощение влаги почвой из воздуха. Этот источник пополнения почвы влагой может быть практически значимым только в условиях резкой континентальности климата и высокой воздухопроницаемости почв, т. е. в пустынях и полупустынях.

Даже в тех случаях, когда почва недонасыщена, вода, поступающая на поверхность почвы, будет передвигаться в соответствии с ее рельефом. Вода, не успевшая просочиться за время пути в почву, уходит в виде поверхностного стока $\Theta_{пс}$. Часть просочившейся воды может уйти в виде внутрипочвенного стока $\Theta_{вп}$ по водоупорным или слабоводопроницаемым почвенным слоям в соответствии с внутрипочвенным рельефом. Внутрипочвенный сток с сельскохозяйственных полей весной происходит в основном по

границе оттаивающего слоя, в теплую же часть года — по границе глинистых слоев и подпахотной подошве.

Поверхностный сток с сельскохозяйственных полей для основной части земледельческой зоны, характеризующейся равнинным рельефом, очень мал.

В зимний период в районах с устойчивой зимой, несмотря на оттепели и, казалось бы, сильное таяние снега, стока обычно не наблюдается. Талая вода замерзает под снегом между неровностями и образует ледяную корку. Таким образом, она включается во влагозапасы снежного покрова, а следовательно, и в весенние талые воды.

Весной повсеместно часть талых вод уносится поверхностным стоком. Количество этих потерь на сток колеблется от года к году в весьма широких пределах, от 1 до 98 % водного запаса талых вод. Чаще всего причины таких различий — степень недонасыщенности почв влагой, глубина и характер их промерзания, а также наличие и характер ледяной корки.

Количество продуктивной влаги, удерживаемой различными почвами при насыщении их до полной влагоемкости, колеблется в пахотном слое от 70 до 100 мм, в метровом — от 200 до 440 мм.

При насыщении до наименьшей влагоемкости структурных почв черноземной зоны в пахотном горизонте содержится 40—50 мм, а в метровом — 170—180 мм продуктивной влаги.

При насыщении дерново-подзолистых почв до максимальной капиллярной влагоемкости количество влаги в пахотном горизонте колеблется в узких пределах, от 60 до 70 мм. Влагосодержание же метрового слоя при этом увлажнении весьма различно. На суглинистых почвах оно составляет 160—190 мм, на супесях превышает 330 мм в основном за счет влаги слоя почвы 50—100 см.

При глубоком залегании грунтовых вод на однородных почвах в корнеобитаемом слое может удерживаться лишь количество воды, не превышающее недостаток ее насыщения (дефицит), равный разности запасов влаги при наименьшей влагоемкости и запасов влаги, имеющихся в почве ко времени выпадения осадков или снеготаяния. Остальное количество поступившей воды просочится и уйдет из корнеобитаемого слоя.

В тех случаях, когда грунтовые воды залегают неглубоко и капиллярная зона достигает корнеобитаемого слоя, возможное количество аккумулируемой воды в корнеобитаемом слое определяется не только характером почвы, но и глубиной залегания грунтовых вод и будет меняться во времени в соответствии с изменением их уровня.

Обогащение корнеобитаемого слоя до его полной влагоемкости возможно лишь в тех редких случаях, когда зеркало грунтовых вод выходит на поверхность и вода заполняет все поры почвы.

Расход запасов влаги, аккумулированных в корнеобитаемом слое, в основном происходит за счет испарения $\Theta_{исп}$ и транспира-

ции $\Theta_т$. Количество испарившейся воды принято выражать в миллиметрах слоя за сутки.

Испарение — это процесс перехода воды в парообразное состояние, обусловливающий непосредственные потери влаги с поверхности почвы, воды или через транспирацию растений. Подробно испарение рассматривается в главе 7.

6.4. Формирование запасов почвенной влаги в холодный период

В холодный период года из водного баланса исключаются такие значимые составляющие, как расход влаги на транспирацию, а в преобладающую часть этого периода, когда почва укрыта снегом, и расход влаги на испарение с почвы. На первое место выступает изменение запасов влаги путем внутрипочвенного передвижения под влиянием кристаллизации в процессе промерзания и накопления запасов за счет осадков и талых вод.

Решающими факторами внутрипочвенного передвижения влаги зимой являются градиенты температуры в промерзающей почве, степень ее увлажнения и глубина залегания почвенно-грунтовых вод.

Согласно Л. А. Разумовой, выделяются три типа изменения запасов влаги в процессе промерзания почвы зимой: 1) значительное накопление влаги, 2) незначительное накопление влаги, 3) переходный тип.

Тип значительного накопления влаги свойствен районам с высокой влажностью почвы в осенний период и неглубоким залеганием почвенно-грунтовых вод. В таких районах в период с устойчивым промерзанием и устойчивым залеганием снежного покрова, когда проникновение воды в почву сверху исключено, запасы влаги в верхнем замерзающем слое возрастают. При этом слой почвы с высокой водонасыщенностью по мере углубления фронта промерзания все более и более увеличивается. Это видно на примере, представленном на рис. 6.2, где показана динамика запасов продуктивной влаги на ст. Белогорка по данным характерного для влажных лет 1935-36 г.

В этот год вследствие обильных дождей уже осенью почва была избыточно увлажнена, временами зеркало грунтовых вод выходило на дневную поверхность и часть озимого поля была под водой (гидроизоплеты круто опускаются вниз). Затем избыточная вода сошла. В октябре произошло первое неустойчивое промерзание почвы, вызвавшее заметное подтягивание влаги из нижних слоев вверх, вследствие чего запасы верхнего 10-сантиметрового слоя поднялись почти до полной влагоемкости почвы. Начавшееся после некоторого перерыва следующее, уже устойчивое, промерзание сопровождалось значительно большим увеличением влажности промерзающих слоев почвы. В отдельные периоды запасы воды достигали 75—85 мм на каждый слой почвы толщиной 10 см, т. е. почти в два раза превышали полную влагоемкость верхнего

10-сантиметрового слоя. Вблизи фронта промерзания скопление воды было несколько меньшим, но все же лишь немного отличалось от полной влагоемкости соответствующих слоев. Глубже 40 см, где почва не промерзала, запасы влаги с наступлением зимы изменились мало, но, что характерно, все время держались выше максимальной капиллярной влагоемкости. Таким образом,

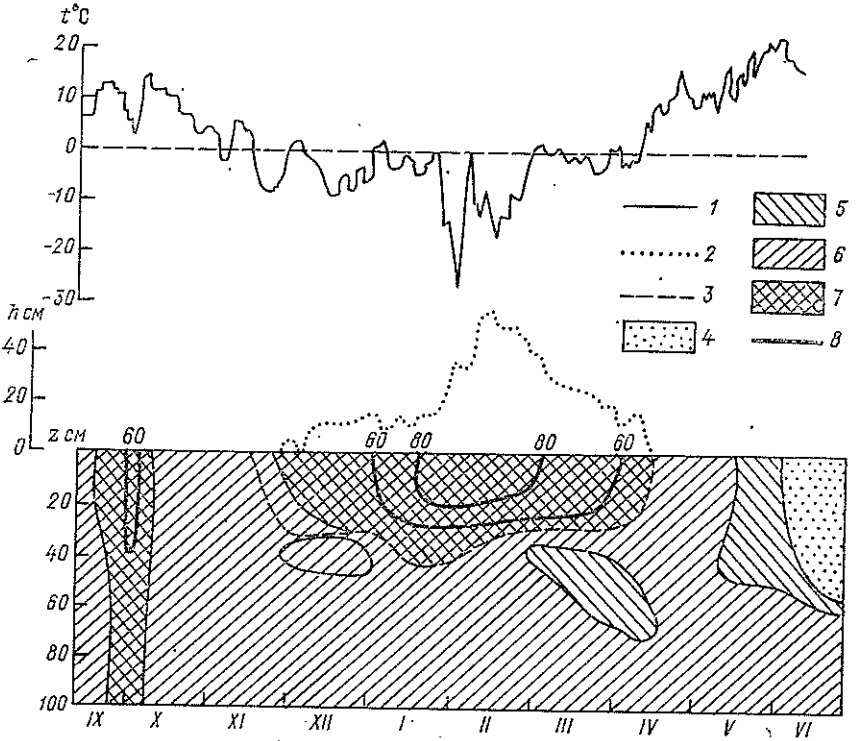


Рис. 6.2. Запасы влаги в почве зимой 1935-36 г. под озимой рожью; агрометстанция Белогорка, Ленинградской обл. (по С. А. Вериго, Л. А. Разумовой, 1973).

1 — средняя суточная температура воздуха, °С; *2* — высота снежного покрова, см; *3* — глубина промерзания почвы, см; *4, . . ., 7* — запасы влаги (мм) в пределах: *4* — влажность завядания — наименьшая влагоемкость почвы, *5* — наименьшая влагоемкость — максимальная капиллярная влагоемкость почвы, *6* — максимальная капиллярная влагоемкость — полная влагоемкость почвы, *7* — выше полной влагоемкости почвы; *8* — изоплеты запасов влаги в 10-сантиметровом слое почвы.

можно сделать вывод, что подтягиваемая к фронту промерзания из этих нижних слоев почвы влага все время пополнялась за счет грунтовых вод, что привело к избыточному ее скоплению в верхних слоях почвы без иссушения нижних.

В результате увлажнение отдельных слоев почвенного профиля в период максимального накопления влаги в 1935-36 г. оказалось следующим. В слое почвы 0—20 см, соответствующем полностью промерзшему аккумулятивному горизонту, имелось 175 мм про-

дуктивной влаги, что составляет 280 % максимальной капиллярной и 120 % полной влагоемкости этого горизонта почвы. В слое 0—40 см, включающем горизонты A_1, A_2 и В и промерзшем почти на глубину 40 см, имелось 310 мм продуктивной влаги, что составляет 240 % максимальной капиллярной и 170 % полной влагоемкости. В слое 50—100 см, в совершенно непромерзшем горизонте С, влаги оказалось 75 мм, т. е. 120 % максимальной капиллярной влагоемкости и лишь 64 % полной влагоемкости этого слоя. Запасы влаги в слое 100 см в целом в этот сильно переувлажненный с осени год в период зимнего промерзания были равны 385 мм, что составило 200 % запасов продуктивной влаги, соответствующих максимальной капиллярной и 127 % полной влагоемкости.

Совсем иная картина зимнего накопления влаги наблюдается в районах, где почвенно-грунтовые воды залегают глубоко и где осенью запасы продуктивной влаги в корнеобитаемом слое бывают ниже наименьшей влагоемкости, т. е. там, где перед замерзанием почвы легкоподвижная влага практически отсутствует. Так, по данным ст. Безенчук (Куйбышевская обл.), увеличение запасов влаги в метровом слое почвы за зиму составляет около 10—14 мм, а в отдельных 10-сантиметровых слоях не превышает 2—3 мм.

Отмеченные для района ст. Безенчук особенности мерзлотного процесса свойственны той части степной зоны Европейской территории СССР, где почвы отличаются значительным недонасыщением влагой с осени, а климат характеризуется устойчивой зимой.

Третий, переходный, тип зимнего накопления влаги свойствен зоне глубокого залегания грунтовых вод и неустойчивой зимы. Для этой зоны характерны сильные оттепели с частым сходом снежного покрова, а иногда и полным оттаиванием почвы зимой.

Основным фактором, определяющим увеличение запасов почвенной влаги в течение зимы, является проникновение талых вод в почву. Наряду с этим в верхних слоях почвы некоторое значение может иметь и миграция влаги, причем она, как и в других районах, находится в зависимости от степени увлажнения почвы, т. е. от наличия в ней того или иного количества легкоподвижной влаги.

Например, по осредненным данным, в районе Синельниково за период промерзания в верхнем 20-сантиметровом слое почвы озимого поля, который уже осенью насыщен до наименьшей влагоемкости, запасы влаги увеличиваются на 12 мм и достигают 140 % этой величины. В метровом слое, запасы влаги которого осенью составляют 85 % НВ, они за зиму увеличиваются на 14 мм, в результате чего достигают наименьшей влагоемкости.

6.5. Изменение запасов продуктивной влаги в теплый период

Одним из важнейших агрогидрологических процессов начала теплого периода является снеготаяние и освобождение полей от снежного покрова. Время обнажения почвы от снега, а следова-

тельно, и начало оттаивания почвы с ее поверхности, поглощение почвой талых вод и расходование почвенной влаги на испарение зависят от погоды, запасов влаги в снеге, экспозиции и крутизны склонов.

В ранний весенний период расходы на транспирацию практически отсутствуют: поля, поступающие под яровые, еще не засеяны, а озимые только начинают отрастать. Поэтому влага из корнеобитаемого слоя почвы расходуется за счет испарения с поверхности и просачивания под действием силы тяжести в нижележащие слои. Пока просачивающиеся талые воды опираются на водонепроницаемый мерзлый слой, потери на испарение с поверхности почвы очень велики, но они пополняются капиллярным поднятием, поэтому почва значительно переувлажнена. С исчезновением мерзлой подошвы в районах сильного увлажнения и высокого уровня почвенно-грунтовых вод подпертая мерзлой прослойкой вода уходит вглубь. В районах же ненасыщенных почв по мере оттаивания избыток воды в верхних слоях почвы расходуется на насыщение нижележащих слабоувлажненных слоев, капиллярное поднятие ослабляется и становится недостаточным для того, чтобы компенсировать потерю влаги на испарение: почва начинает подсыхать сверху.

С началом вегетации сельскохозяйственных культур на расходах влаги из почвы начинает сказываться степень углубления и характер развития корневой системы и состояния надземной массы растений. В зоне высокого уровня грунтовых вод одновременно с этим происходит значительное изменение запасов почвенной влаги вследствие углубления верхней границы капиллярной зоны. Все это вместе взятое приводит к тому, что скорость расходования почвенной влаги в течение периода вегетации растений сильно меняется, причем в каждой зоне по-своему.

В районах сильного увлажнения и высокого уровня почвенно-грунтовых вод максимальное уменьшение запасов влаги наблюдается в начале вегетационного периода в основном вследствие изменения запасов влаги в верхнем 50-сантиметровом слое в связи с опусканием капиллярной зоны. В этой зоне за период вегетации озимых культур расходы влаги из слоя 0—50 см почти в три раза превышают расходы из слоя 50—100 см, за период же вегетации ранних яровых они превышают их почти в семь раз. Такое же соотношение расходов влаги из верхних и нижних слоев присуще и районам избыточного увлажнения с выходом почвенно-грунтовых вод в корнеобитаемый слой.

В районах глубокого залегания грунтовых вод, где капиллярный подток отсутствует, наибольшее количество влаги расходуется путем транспирации. Расходы достигают максимальных значений в репродуктивный период, особенно в период выхода в трубку — цветения, когда корневая система и надземная масса растений достигают максимальной мощности. В противоположность зоне высокого увлажнения здесь во вторую половину вегетационного периода расходы влаги из слоя 50—100 см в связи с про-

никновением туда корней растений равны либо даже несколько превышают расходы влаги из верхнего 50-сантиметрового слоя.

Связь динамики запасов продуктивной влаги в почве с видом и состоянием произрастающей культуры особенно ярко проявляется в районах глубокого залегания почвенно-грунтовых вод, где она не маскируется капиллярной подачей воды снизу. Согласно многолетним данным (рис. 6.3), в зоне полного весеннего промачивания и глубокого залегания грунтовых вод (ст. Синельково) в начале вегетационного периода, пока не начались расходы влаги на транспирацию, запасы влаги под всеми культурами и на чистом пару одинаковы и составляют 160—165 мм. В дальнейшем

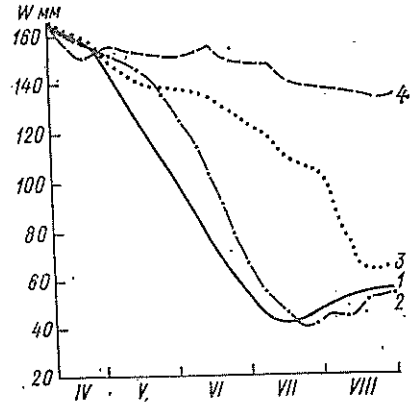


Рис. 6.3. Средние многолетние запасы продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под различными культурами в зоне полного весеннего промачивания и глубокого залегания почвенно-грунтовых вод (по С. А. Вериго, Л. А. Разумовой, 1973).

1 — озимая пшеница, *2* — яровая пшеница, *3* — кукуруза, *4* — черный пар.

в связи с ростом культур они все более и более различаются. Так, к концу мая под озимыми, которые в это время находятся уже в фазе цветения и успевают израсходовать большее количество влаги на транспирацию, запасы составляют 90 мм; под ранними яровыми (пшеница), только вступившими в фазу трубки, они равны 115 мм; под поздними яровыми (кукуруза), находящимися еще только в фазе всходов, запасы влаги равны 135 мм, а на пару — 140 мм.

К концу июня, когда и ранние яровые успевают израсходовать большое количество влаги на транспирацию, различия в запасах влаги между озимыми и ранними яровыми несколько сглаживаются, но зато возрастают различия между озимыми и поздними яровыми, только что вступившими в период максимального роста, а следовательно, и в период максимальных расходов влаги на транспирацию. В это время запасы влаги составляют под озимыми 43 мм, под ранними яровыми 55 мм и поздними яровыми 118 мм. На чистом же пару они равны 139 мм, т. е. остаются на том же уровне, что и месяц назад.

В начале июля в связи с созреванием озимой пшеницы и резким уменьшением расходов влаги на транспирацию запасы влаги

на озимом поле начинают медленно увеличиваться. Через 10—15 дней в силу этих же причин происходит перегиб кривой влажности на поле с яровой пшеницей. Под кукурузой в соответствии со временем созревания затухание расходов влаги происходит почти на 2 месяца позже, чем под озимой пшеницей, и на 1,5 месяца позже по сравнению с яровой.

В результате отмеченных процессов к концу августа запасы влаги под различными культурами различаются всего лишь на 5 мм и составляют 54—59 мм. На паровом же поле и в этот период года они остаются высокими (132 мм). Снижение запасов влаги на пару за весь теплый период года составляет около 30 мм и происходит в основном за счет подсыхания верхних слоев почвы, а также некоторого снижения его влагоемкости вследствие сезонного повышения температуры почвы.

В позднеосенний период в связи с понижением температуры и малыми расходами на испарение запасы влаги продолжают постепенно расти как на зяблевых полях, так и на бывших парах, занятых теперь озимыми посевами. Такая закономерность в соотношении динамики запасов продуктивной влаги в почве под различными культурами в теплый период наблюдается для всей зоны черноземных почв, характеризующейся глубоким залеганием почвенно-грунтовых вод.

В зоне дерново-подзолистых почв, характеризующейся подъемом капиллярной зоны в корнеобитаемый слой и наличием верховодок, различия в запасах продуктивной влаги под отдельными культурами невелики. Они начинают проявляться лишь летом, в период максимального роста сельскохозяйственных культур.

Осенью в связи с прекращением роста и созреванием большинства культур расходы влаги на транспирацию резко снижаются, а после уборки культур прекращаются совсем. Расходы влаги на транспирацию вновь посеянных озимых культур также невелики, поскольку культуры находятся еще в начальных фазах развития.

Невелики осенью и расходы влаги на испарение с поверхности почвы, так как в этот период температура понижается, повышается относительная влажность воздуха и на большей части территории подвижная влага в почве отсутствует. Внутрипочвенное передвижение влаги в связи с охлаждением поверхностных слоев почвы осенью принимает обратое направление: влага идет вверх. В результате выпадающие осадки не только компенсируют расходы почвенной влаги, но повсеместно пополняют ее запасы в верхних слоях почвы, а в зоне сильного увлажнения и высокого стояния почвенно-грунтовых вод также и в нижних горизонтах вследствие подъема уровня грунтовых вод.

Динамика запасов почвенной влаги в любой точке в первую очередь зависит от количества и распределения во времени выпадающих осадков, а также от температурного режима.

6.6. Типы годового хода запасов продуктивной влаги в почве

На основе многолетних массовых наблюдений за влажностью почвы в различных почвенно-климатических зонах, закономерностей формирования запасов влаги в почве и зависимостей скорости расходования почвенной влаги от условий погоды выделены четыре основных типа годового хода запасов продуктивной влаги.

Тип обводнения (рис. 6.4, кривая *1*) свойствен районам с высоким уровнем залегания грунтовых вод, где в момент их максимального уровня водное зеркало входит в почвенную толщу, а иногда даже достигает поверхности почвы. Верхняя граница

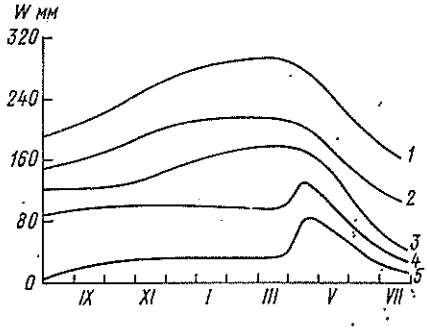


Рис. 6.4. Типы годового хода запасов продуктивной влаги (мм) в метровом слое почвы под озимыми культурами, посеянными по чистому пару (по С. А. Веригo, Л. А. Разумовой, 1973).

Типы: *1* — обводнения; *2* — капиллярного увлажнения; *3* — полного весеннего промачивания; *4* — слабого весеннего промачивания, засушливые районы; *5* — то же, сильно засушливые районы.

капиллярной зоны отрывается от поверхности лишь на 2—3 летних месяца и даже на супесчаных почвах не уходит глубже 50 см. В связи с этим в корнеобитаемом слое почвы в течение года имеется большое количество легкоподвижной влаги.

Зимой в мерзлом слое почвы идет огромное накопление влаги за счет подтягивания легкоподвижной влаги из грунтовых вод. По многолетним данным, средний годовой максимум запасов продуктивной влаги приближается к 300 мм, он наблюдается в конце зимы и нередко превышает полную влагоемкость почвы. Весной с оттаиванием почвы избыток влаги сбрасывается. Весенние запасы становятся равными влагоемкости почвы при данном уровне залегания грунтовых вод и составляют около 250 мм (слой 0—100 см).

В теплый период до тех пор, пока верхняя граница капиллярной зоны не оторвется от дневной поверхности, потери на испарение и транспирацию компенсируются капиллярным поднятием и запасы влаги изменяются очень медленно. Как только капиллярная зона начнет углубляться соответственно изменению влагоемкости почвы, потери влаги резко возрастут вследствие передвижения ее вниз под влиянием ускорения свободного падения.

Годовой минимум запасов влаги в верхнем слое почвы (0—50 см) опускается ниже его наименьшей влагоемкости, в более глубоком слое (50—100 см) он соответствует влагосодержанию капиллярной зоны. Во всем метровом слое даже супесчаных

почв годовой минимум не опускается ниже 150 мм продуктивной влаги.

Тип капиллярного увлажнения (рис. 6.4, кривая *2*) наблюдается в районах, где грунтовые воды достигают корнеобитаемого слоя почвы лишь в моменты наивысшего стояния, а верхняя граница капиллярной зоны в подавляющем большинстве случаев в течение года залегает в корнеобитаемом слое и лишь в отдельные моменты выходит на дневную поверхность.

Зимний режим и годовой максимум запасов влаги районов капиллярного увлажнения близки к таковым в районах обводнения.

Максимум запасов влаги в теплую часть года лежит между капиллярной и наименьшей влагоемкостью почвы. По многолетним данным, на суглинистых почвах в среднем он превышает 200 мм, на супесчаных — 150 мм. Годовой минимум запасов продуктивной влаги в метровом слое суглинистых почв несколько больше 100 мм, супесчаных — несколько меньше 100 мм. Возможность капиллярного передвижения влаги в этих районах исключается в течение 2—2,5 летних месяцев на суглинистых почвах лишь в верхних слоях, на супесчаных — во всей метровой толще.

Тип полного весеннего промачивания (рис. 6.4, кривая *3*) свойствен районам глубокого залегания грунтовых вод, где капиллярная зона не достигает корнеобитаемого слоя. Годовой максимум запасов продуктивной влаги здесь наблюдается весной. Он равен наименьшей влагоемкости почв и в метровом слое суглинистых почв составляет 170—180 мм, а на мощных черноземах — 200 мм.

Годовой минимум запасов продуктивной влаги наблюдается к концу вегетации и, по средним многолетним данным, колеблется в пределах 50—100 мм, в отдельные годы он может опускаться даже до нуля. Легкоподвижная влага закрытых капилляров имеется лишь весной над мерзлым слоем почвы, несущим водное зеркало просачивающихся талых вод.

Тип слабого весеннего промачивания (рис. 6.4, кривые *4* и *5*) характерен для засушливых районов с глубоким залеганием грунтовых вод. Годовой максимум запасов продуктивной влаги в корнеобитаемом слое почвы здесь также наблюдается весной. Но даже в это время, по средним многолетним данным, запасы влаги метрового слоя почвы значительно ниже его наименьшей влагоемкости, в наиболее засушливых районах они составляют всего лишь 50—70 мм. Глубина промачивания почвы в отдельные годы не превышает 50 см.

Годовой минимум запасов влаги наблюдается осенью, нередко он падает до нуля. В течение всего года, исключая короткий период снеготаяния, почва здесь лишена легкоподвижной влаги. Передвижение ее по почвенному профилю происходит в основном путем гидратации и в парообразном виде. В зимний период, в условиях устойчивого промерзания, внутрипочвенные передвижки влаги не играют существенной роли: мерзлые слои сохраняют свою влажность в течение всей зимы практически постоянной.

Глава 7

ИСПАРЕНИЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ОСАДКИ

7.1. Закономерности тепло- и влагообмена испаряющей поверхности с приземным воздухом

В приземном слое воздуха турбулентный поток тепла и влаги определяется зависимостями

$$P = -\rho_a c_p k \frac{\partial T}{\partial z}, \tag{7.1}$$

$$E = -\rho_a k \frac{\partial q}{dz}, \tag{7.2}$$

где ρ_a — плотность воздуха; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; T — температура воздуха; q — массовая доля водяного пара; k — коэффициент турбулентности, который в целях упрощения решений принимается одинаковым как для потока тепла, так и для потока влаги.

При безразличной температурной стратификации изменение коэффициента турбулентности k по высоте z описывается формулой

$$k(z) = \frac{\varkappa u_1 z}{\ln\left(\frac{z_1}{z_{00}}\right)}. \tag{7.3}$$

Здесь $\varkappa$ — постоянная Кармана, обычно принимается равной 0,38; u_1 — скорость ветра на высоте z_1; z_{00} — высота подслоя шероховатости.

Реальная атмосфера температурно неоднородна, и для нее отклонения от безразличной стратификации являются не исключением, а правилом. При этом возникают архимедовы силы и закономерности обмена существенно усложняются. Для учета влияния температурной стратификации на турбулентный обмен советские и зарубежные исследователи предложили ряд теоретических схем и эмпирических зависимостей, основанных на принятии различных гипотез (Д. Л. Лайхтман, 1944; М. И. Будыко, 1946; Тимофеев, 1951; А. Р. Константинов, 1952; Сеттон, 1958 и др.).

Поскольку в приземном слое воздуха величины P и E практически не изменяются по высоте, то после интегрирования уравнения (7.1) и последующих преобразований найдем

$$P = \frac{1}{\int\limits_0^{z_2} \frac{dz}{k(z)}} \rho_a c_p (T_0 - T_2). \tag{7.4}$$

Здесь T_0 и T_2 — температура воздуха соответственно у поверхности почвы ($z = 0$) и на высоте z_2. Последнюю в большинстве случаев удобно принять равой 2 м, поскольку на этой высоте ведутся стандартные метеорологические наблюдения. Аналогичное выражение можно получить и для потока влаги E, интегрируя (7.2).

Обозначим

$$\frac{1}{\int_0^{z_2} \frac{dz}{k(z)}} = D, \tag{7.5}$$

где D — коэффициент скорости обмена.

Теперь (7.4) можно переписать в виде

$$P = \rho_a c_p D (T_0 - T_2). \tag{7.6}$$

Аналогичное выражение получим и для потока влаги:

$$E = \rho_a D (q_0 - q_2). \tag{7.7}$$

Здесь q_0 и q_2 — массовая доля водяного пара соответственно у поверхности почвы ($z = 0$) и на высоте $z = z_2$.

А. Г. Бройдо (1957) предложил формулу для расчета коэффициента скорости обмена $D_п$ между испаряющей поверхностью и высотой 2 м:

$$D_п = 0{,}27 u_1 \left(1 + 0{,}13 \frac{\Delta T}{u_1^2}\right), \tag{7.8}$$

где u_1 — скорость ветра (м/с) на высоте 1 м; Δt — разность температуры поверхности почвы и температуры воздуха на высоте 2 м.

7.2. Испарение воды почвой

Еще в 1904 г. П. С. Коссович дал качественную схему *процесса испарения* воды почвой. Основные положения ее сохраняют свое значение до настоящего времени. Они сводятся к тому, что этот процесс можно подразделить на три характерные стадии. (Испарение воды растительным покровом — транспирация — рассматривается в главе 12.)

На первой стадии испарение равно *испаряемости*[1]. На второй стадии испарение определяется главным образом скоростью притока воды к поверхности почвы и в меньшей степени уменьшением влагосодержания в ее верхних пересохших слоях. Третья стадия наступает при практически прекратившемся восходящем

[1] Испаряемостью называют потенциально возможное испарение с увлажненной поверхности почвы или поверхности воды при существующих метеорологических условиях.

движении жидкой влаги из более глубоких горизонтов и характеризуется постепенным просыханием верхних слоев почвы.

Первая стадия испарения наблюдается после выпадения осадков или поливов и, как правило, сравнительно кратковременна, за исключением случаев, когда испаряемость невелика или грунтовые воды залегают неглубоко.

На второй стадии, как правило, расходуется наибольшее количество воды.

Теоретически схема испарения воды почвой была разработана М. И. Будыко (1948). Он исходил из предположения, что при снижении влажности почвы у ее поверхности образуется просохший слой. Парообразование происходит на его нижней границе. Для определения скорости движения водяного пара через просохший слой М. И. Будыко использует уравнение

$$E = \frac{\rho_a A_m}{z_п}(q_п - q_0). \tag{7.9}$$

Здесь E — поток водяного пара, проходящий через просохший слой, равный по условию испарению; ρ_a — плотность воздуха; A_m — коэффициент молекулярной диффузии водяного пара в почве; $z_п$ — толщина просохшего слоя почвы; $q_п$ — массовая доля водяного пара на нижней границе просохшего слоя почвы; q_0 — массовая доля водяного пара у поверхности почвы. Для определения потока тепла в воздухе от поверхности почвы до высоты z_2 М. И. Будыко использует уравнение (7.6), раскрывая значение входящего в него коэффициента $D_п$ на основе одной из гипотез о граничных условиях обмена у поверхности почвы. Следовательно, можно записать

$$E = \rho_a D_п (q_0 - q_2), \tag{7.10}$$

где $D_п$ — коэффициент скорости обмена между поверхностью почвы и высотой z; q_2 — массовая доля водяного пара на высоте z_2.

Исключая из (7.9) и (7.10) q_0, найдем

$$E = \frac{\rho_a D_п A_m}{A_m + D_п z_п}(q_п - q_2). \tag{7.11}$$

Поскольку испарение в схеме, принятой М. И. Будыко, происходит только благодаря увеличению толщины просохшего слоя, то он принимает

$$E = (W_н - W_2)\frac{dz_п}{dt}. \tag{7.12}$$

Здесь $W_н$ — начальная влажность почвы, которую М. И. Будыко принимает равной максимальной молекулярной влагоемкости (по Лебедеву); W_2 — гигроскопическая влажность в просохшем слое.

Далее М. И. Будыко полагает, что значение выражения $\rho_a D_п (q_п - q_2)$ равно «скорости испарения со свободной водной поверхности в данных условиях» (М. И. Будыко, 1948). Принимая

это предположение и исключая E из (7.11) и (7.12), он приходит к уравнению

$$\frac{dz_п}{dt} = \frac{E_0}{W_н - W_2} \frac{1}{1 + \frac{D_п}{A_m} z_п}, \tag{7.13}$$

где E_0 — скорость испарения со свободной водной поверхности. После интегрирования (7.13) и последующих преобразований М. И. Будыко получает формулу

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 + \frac{2D_п E_0 t}{(W_н - W_2) A_m}}}. \tag{7.14}$$

Экспериментальные данные об испарении воды почвой и суммарном испарении. Под *суммарным испарением* понимается транспирация, испарение с почвы и испарение влаги, задержанной растительным покровом при выпадении осадков.

В течение суток отношения испарения воды почвой и транспирации к суммарному испарению существенно изменяются. Днем, особенно в утренние часы, отношение транспирации к суммарному испарению имеет наибольшие значения; к полудню оно убывает. К моменту захода Солнца транспирация прекращается. В противоположность этому наименьшие значения отношения испарения воды почвой под пологом растений к суммарному испарению наблюдаются утром, к полудню это отношение возрастает. В послеполуденное время величина отношения больше, чем в предполуденное.

Составляющие суммарного испарения в течение вегетационного периода значительно изменяются. В начале вегетации, когда испаряющая листовая поверхность еще невелика, испарение с поверхности почвы больше, чем с поверхности растений. При более мощном травостое испарение с поверхности почвы значительно меньше, чем испарение с поверхности растений, что связано в основном со значительным затенением почвы растениями и с ослаблением вертикального обмена в среде растений.

На рис. 7.1 приведены графики хода интенсивности суммарного испарения с целины и озимой пшеницы на почвенно-испарительной площадке за два наиболее характерных года: влажный (1958 г.) и засушливый (1957 г.). По метеорологическим условиям эти годы были близки, но по режиму влажности почвы и осадкам резко различались. Например, во второй половине мая 1957 г. запасы влаги под озимой пшеницей составляли 20 мм, а в 1958 г. — 150—170 мм. Соответственно этому средние суточные значения суммарного испарения в засушливом 1957 г. за весь период вегетации были значительно меньше, чем во влажном 1958 г. Суммарное испарение за весь период вегетации (март—июнь) в 1957 г. оказалось, как и средняя влажность почвы, примерно в два раза меньше, чем в 1958 г. Максимальное суммарное испарение в 1957 г. составило 4—5 мм, а в 1958 г. — 6—10 мм.

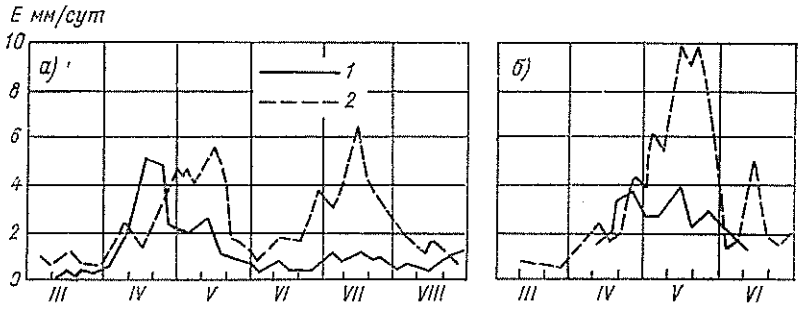


Рис. 7.1. Интенсивность суммарного испарения E (мм/сут) при естественном увлажнении с различных угодий (по С. И. Харченко, 1975).

а — целина, *б* — озимая пшеница; *1* — 1957 г., *2* — 1958 г.

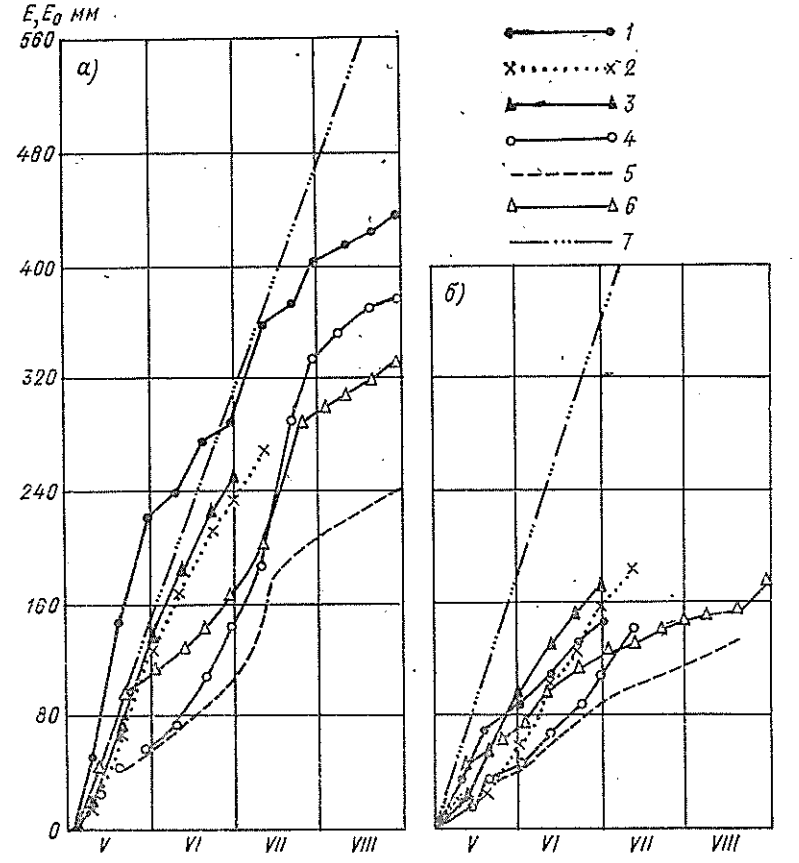


Рис. 7.2. Интегральные кривые суммарного испарения E и испаряемости E_0 (по С. И. Харченко, 1975).

а — 1958 г., *б* — 1963 г.; *1* — суммарное испарение с озимой пшеницы; *2* — то же с яровой пшеницы; *3* — то же с ячменя, *4* — то же с кукурузы, *5* — то же с пара, *6* — то же с целины; *7* — испаряемость.

Аналогичная картина наблюдалась и для других сельскохозяйственных культур и в другие годы. Колебания суммарного испарения наиболее заметны при анализе интенсивности испарения. Для засушливых лет интенсивность испарения в 1,5—2 раза меньше, чем для влажных.

На рис. 7.2 представлены интегральные кривые суммарного испарения с различных сельскохозяйственных культур и угодий и испаряемость за влажный (1958 г.) и сухой (1963 г.) по условиям увлажнения годы. Во влажный год нарастание испарения с сельскохозяйственных культур и целины близко к нарастанию испаряемости. В конце мая на целине был произведен покос, поэтому интенсивность испарения резко уменьшилась. Для кукурузы, вегетация которой начинается со второй декады июня, отмечалось отставание в нарастании испарения, так как до этого испарение происходило почти с оголенной поверхности, поэтому испарение с пара близко к испарению с поля, засеянного кукурузой. После появления всходов кукурузы интенсивность испарения с этого поля равна испаряемости. На конец июня разность между интегральными значениями испаряемости и испарения с озимой пшеницы равна 30 мм, с ячменя и яровой пшеницы — 80—90 мм, с кукурузы — 180 мм. В июле и августе особенно заметным становится отставание испарения на паровом поле.

В сухой год интегральное значение испаряемости существенно превышает испарение с сельскохозяйственных культур, целины и пара, что указывает на большую роль увлажнения почвы в формировании испарения; на конец июня разница между интегральными значениями испаряемости и испарения, например, для ячменя, яровой и озимой пшеницы составляет 180—210 мм, для кукурузы — 240 мм.

Таким образом, в засушливые годы, несмотря на большие энергетические ресурсы, интенсивность испарения ниже, чем в годы с высоким увлажнением почвы. Во влажные годы, несмотря на снижение энергетических ресурсов, интенсивность испарения из-за высоких влагозапасов оказалась значительно выше, чем в сухие годы.

7.3. Влажность воздуха в растительном покрове

Формирование профиля влажности воздуха в растительном покрове — чрезвычайно сложное и динамичное явление, складывающееся при совместном действии атмосферных осадков, физического испарения или конденсации, транспирации растений и парообразного переноса влаги под влиянием градиентов влажности, температуры, скорости ветра и других факторов. Очевидно, ведущим фактором формирования режима увлажненности выступают атмосферные осадки, но их экологическое значение существенно трансформируется под влиянием радиации, температуры, скорости ветра, свойств растительности и почвы.

Исчерпывающее описание режима увлажненности внутренней

атмосферы растительного покрова дает дифференциальное уравнение турбулентной диффузии водяного пара (С. В. Нерпин, А. Ф. Чудновский, 1975):

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k_w(z, t)\frac{\partial q}{\partial z}\right) - S_w(z, t), \tag{7.15}$$

где

$$S_w(z, t) = \begin{cases} E_0(z, t) + E_{tr}(z, t), & 0 \leqslant z \leqslant h_0, \\ 0, & h_0 < z \leqslant H_1, \end{cases} \tag{7.16}$$

E_0 — интенсивность физического испарения (конденсации), E_{tr} — интенсивность транспирации, k_w — коэффициент турбулентного обмена для водяного пара.

Применение этого уравнения связано с необходимостью формулировки граничных условий на нижней ($z = 0$) и верхней ($z = H_1$) границах системы почва—растение—атмосфера и трудностями идентификации входящих в него функций k_w, E_0 и E_{tr}, которые существенно зависят также от массовой доли водяного пара q в растительном покрове и других метеофакторов и свойств растительности. Например, интенсивность транспирации на высоте z в момент времени t зависит от интенсивности радиации, скорости ветра, температуры воздуха и листьев, влажности воздуха и листьев (точнее, от разности потенциала влаги между листом и воздухом), от плотности листовой поверхности на данной высоте и ряда других факторов (более детально эти вопросы рассматриваются в главе 12).

Рассмотрим режим влажности воздуха в травостое озимой ржи по экспериментальным данным Н. А. Ефимовой (1968). В соответствии с выделенными типами погоды было произведено осреднение материала наблюдений в дневные, утренние и вечерние часы для периодов с прохладной малооблачной (10—17 июня), жаркой и малооблачной (18—26 июня) и теплой облачной (28 июня — 8 июля) погодой в 1966 г.

На рис. 7.3 представлены вертикальные профили давления водяного пара в дневные часы по наблюдениям на поле озимой ржи. Вне зависимости от типа погодных условий отмечается плавное изменение влажности воздуха с высотой в слое растительного покрова. При этом самые высокие значения влажности воздуха отмечаются вблизи поверхности почвы. Градиенты влажности воздуха закономерно изменяются в зависимости от типа погодных условий и фаз развития растений. Так, по наблюдениям на поле озимой ржи в 1966 г. в первый период — при прохладной солнечной погоде — в фазу колошения при наиболее интенсивном росте и развитии растений и достаточном увлажнении почвы градиенты влажности воздуха велики, что объясняется большими затратами тепла на транспирацию. В период жаркой засушливой погоды в фазы цветения и начала налива зерна при значительном уменьшении запасов влаги в почве транспирация уменьшается, вследствие чего уменьшаются градиенты влажности воздуха.

Такой плавный, близкий к линейному, характер изменения влажности воздуха с высотой обусловлен соответствующим распределением элементов растительного покрова в единице объема, занимаемой этими растениями. Характерной особенностью травостоя озимой ржи в фазы колошения, цветения и налива зерна является равномерное уменьшение с высотой площади поверхности листьев и стеблей, причем наибольшая площадь листьев и стеблей располагается на уровне нижней трети высоты растений. Таким образом, структура посева, а именно распределение поверхности

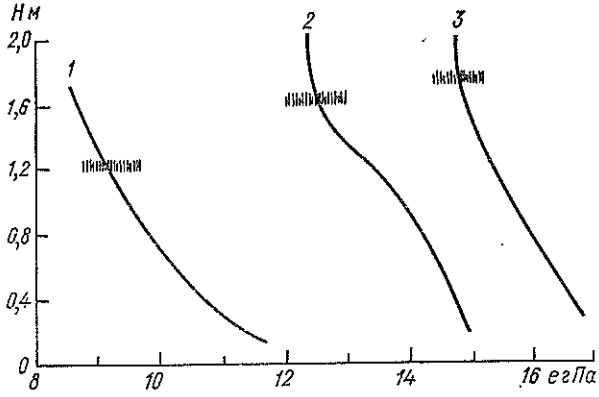


Рис. 7.3. Вертикальные профили давления водяного пара на поле озимой ржи в дневные часы (11—15 ч), осредненные за различные периоды (по Н. А. Ефимовой, 1968).

Периоды: *1*) 10—17 июня, *2*) 18—26 июня, *3*) 28 июня — 8 июля.

листьев и стеблей по вертикали, в значительной степени определяет режим влажности воздуха в травостое сельскохозяйственных культур.

Рассмотрим влажность воздуха на полях с различными сельскохозяйственными культурами, т. е. на картофельном поле весенней посадки с густотой стояния растений 70 × 70 см, кукурузном и люцерновом полях и на пашне.

Картофель, кукуруза и люцерна являются поливными культурами, но характер их травостоя существенно различен. Это вместе с особенностями транспирации растений и создает своеобразный режим влажности воздуха в среде растений, резко отличающийся от режима влажности на пашне. На орошаемых полях картофеля, кукурузы и люцерны имеет место интенсивное испарение как непосредственно с увлажненной поверхности почвы, так и с более глубоких слоев почвы путем транспирации растений; на пашне в летний период верхний слой почвы иссушен (влажность близка к нулю), поэтому влажность воздуха здесь определяется в основном общим влагосодержанием воздушной массы.

Ход давления водяного пара в течение суток на картофельном, кукурузном и люцерновом полях, как это видно из рис. 7.4, существенно отличается от хода давления водяного пара на пашне. На пашне при незначительных изменениях давления водяного пара по высоте изменения в суточном ходе достаточно велики и вызваны перераспределением водяного пара при развитом турбулентном обмене.

Минимум давления водяного пара составляет около 10 гПа. Амплитуда суточных колебаний давления водяного пара на пашне относительно невелика и очень мало меняется с высотой. Средне-

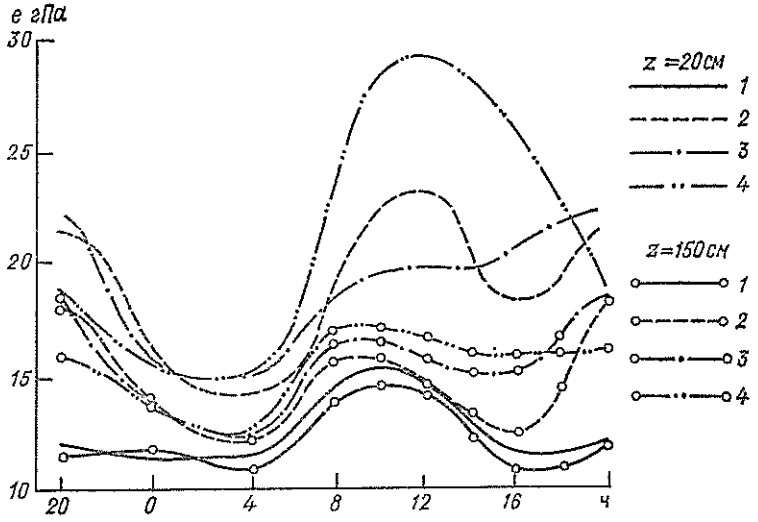


Рис. 7.4. Суточный ход давления водяного пара e, осредненный за период 8—26 июля 1955 г. на высотах 20 и 150 см (по Ф. А. Муминову, 1963).

1 — пашня, *2* — картофельное поле, *3* — кукурузное поле, *4* — люцерновое поле.

суточное давление водяного пара на пашне составляет около 12 гПа.

Суточный ход давления водяного пара на картофельном, кукурузном и люцерновом полях выражен очень четко. На картофельном поле в суточном ходе давления водяного пара наблюдаются два максимума и два минимума. На кукурузном поле на высоте 150 см дневной минимум выражен очень слабо за счет малого турбулентного обмена. На высоте 20 см на кукурузном и люцерновом полях дневной минимум почти не обнаруживается, что, по-видимому, объясняется ничтожным вертикальным обменом воздуха, находящегося в среде растений, с выше лежащими слоями. Суточные амплитуды давления водяного пара на картофельном,

кукурузном и люцерновом полях велики и уменьшаются с высотой; на высоте 1,5 м они в два раза и более превышают амплитуды на пашне.

7.4. Взаимодействие выпадающих частиц осадков с растительным покровом

При выпадении капель дождя на почву, покрытую растительностью, часть их непосредственно достигает поверхности почвы, часть осаждается на элементы растений в виде пленки воды или отдельных капель, часть влаги стекает по стеблям и листьям растений. Происходит последовательное перемещение влаги с верхних уровней на нижние, разбрызгивание капель при ударе об элементы подстилающей поверхности, образование новых капель в определенных местах растений (И. В. Литвинов, 1987).

Процесс перехвата выпадающих осадков можно разбить на три фазы: 1) перехват осадков растениями до полного их насыщения влагой; 2) достижение растениями состояния насыщения и переход к состоянию динамического равновесия; 3) испарение влаги с поверхности стеблей и листьев после окончания осадков. Количество влаги, определяющее насыщение, зависит от суммарной площади поверхности листьев и стеблей растений. Для характеристики растений с точки зрения их способности перехватывать осадки предложен безразмерный параметр $K=\frac{L'}{S}$ — относительный коэффициент перехвата, который представляет собой отношение площади ортогональной проекции всего лиственного покрова растений L' над некоторой поверхностью к размеру этой площади S. Количество перехваченных осадков зависит от количества зеленой массы на единицу поверхности почвы, покрытой растительным покровом (P_0 г/см^2) (И. Игнатовичене, 1977). Для отдельного дождя количество захваченной влаги, или высота слоя воды $W_п$ (мм) связано с величиной P_0 соотношением

$$W_п = 2{,}8P_0. \qquad (7.17)$$

Осаждение влаги на растения происходит в основном в виде пленки воды. Рассчитанная по данным захвата растениями влаги средняя толщина пленки воды на элементах растений составляет 0,12 мм.

Количество перехваченной насыщающей влаги зависит от вида растений, фазы их развития и густоты посадки (табл. 7.1). Перехват осадков зерновыми культурами в период всходы — кущение мал, но резко возрастает в период выхода в трубку. Максимальный перехват наблюдается в период молочной спелости. По этим данным средний перехват осадков зерновыми культурами за один дождь составляет 1,0—1,8 мм.

При выпадении осадков на травяную и луговую растительность в среднем в дневные часы количество задержанных осадков в светлое время суток больше, чем в темное. Это обусловлено

Таблица 7.1

Средний перехват растительным покровом осадков за один дождь ($W_п$) в зависимости от вида растений и фазы их развития (по А. Г. Булавко, 1968)

Вид культуры	Период наблюдения	$W_п$ мм
Рожь озимая	1 мая — колошение	0,16
	Колошение — уборка	0,68
Ячмень	Всходы — колошение	0,19
Пшеница яровая	Колошение — уборка	0,90
Картофель	Всходы — сомкнутость ботвы	0,42
	Сомкнутость ботвы — уборка	1,11
Травы многолетние	1 мая — смыкание травостоя	0,83
	Смыкание травостоя — 1-й укос	1,28
	1-й укос — 31 октября	0,99
Кукуруза	Всходы — смыкание травостоя	0,44
	Смыкание травостоя — уборка	1,24

различием скоростей испарения осевшей на растения влаги. Так, при почти одинаковых суммах осадков ночью и днем (48 и 52 % соответственно) ночью задерживается 45 % осадков, а днем — 65 %.

При анализе влияния осадков на испарение прежде всего следует обратить внимание на два важных фактора. Во-первых, осадки, перехваченные растительной массой, распределяются по

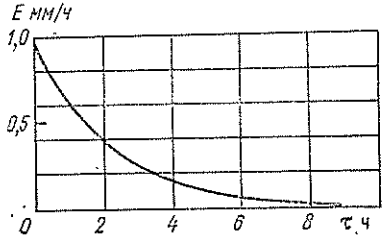


Рис. 7.5. Испарение осадков, задержанных растительным покровом, при достаточном увлажнении почвы (по А. И. Будаговскому, 1964).

ее поверхности неравномерно. Наряду с относительно равномерным смачиванием всей поверхности растений обычно наблюдается более значительное скопление влаги на отдельных листьях. Во-вторых интенсивность испарения задержанной влаги с различных частей растения неодинакова и зависит от их положения в растительном покрове. В результате непосредственно после окончания дождя испарение перехваченной влаги равно испаряемости с поверхности растительной массы $E_{то}$, а далее убывает, стремясь к нулю (рис. 7.5). Эта зависимость аппроксимирована экспоненциальной функцией (А. И. Будаговский, 1964):

$$E_э = E_{то} e^{-\alpha_э t}. \qquad (7.18)$$

Здесь $E_з$ — испарение задержанных осадков, $E_{то}$ — испаряемость с поверхности растительной массы, $\alpha_з$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость убывания испарения задержанных осадков, t — время после окончания дождя.

7.5. Методы расчета суммарного испарения

Метод водного баланса. Уравнение водного баланса вертикальной колонки суши, проходящей от ее поверхности до глубин, на которых прекращается влагообмен, имеет вид

$$\theta_{ос} = E + \theta_{пс} + \theta_{вл}, \tag{7.19}$$

где $\theta_{ос}$ — осадки, E — испарение, $\theta_{пс}$ — поверхностный сток, $\theta_{вл}$ — влагообмен поверхности суши с нижележащими слоями.

Представим член $\theta_{вл}$, характеризующий влагообмен поверхности суши с нижележащими слоями в уравнении (7.19), в виде

$$\theta_{вл} = (W_к - W_н) + \theta_{ин} + \theta_{вс} - \theta_{гр}, \tag{7.20}$$

где $(W_к - W_н)$ — изменение влагосодержания вертикальной колонки суши за рассматриваемый период, $\theta_{ин}$ — инфильтрация, $\theta_{вс}$ — внутрипочвенный сток, $\theta_{гр}$ — подток влаги из грунтовых вод. Тогда

$$\theta_{ос} = E + \theta_{пс} + (W_к - W_н) + \theta_{ин} + \theta_{вс} - \theta_{гр}. \tag{7.21}$$

В тех случаях, когда $\theta_{ин}$, $\theta_{вс}$ и $\theta_{тр}$ можно пренебречь, уравнение водного баланса (7.21) будет иметь вид

$$E = \theta_{ос} - \theta_{пс} + (W_н - W_к). \tag{7.22}$$

Наиболее точно уравнение (7.22) выполняется для летнего периода в зоне недостаточного увлажнения, где летом сток практически отсутствует и член $(W_н - W_к)$ представляет собой по существу изменение влагозапасов верхнего метрового слоя почвы. В целом же трудоемкость измерения влагозапасов почвогрунтов и большая неравномерность распределения почвенной влаги по территории ограничивают возможность использования уравнения водного баланса для расчетов испарения за интервалы времени меньше года.

Метод турбулентной диффузии. Метод основан на определении турбулентной диффузии водяного пара, обусловливающей вертикальный влагообмен между подстилающей поверхностью и атмосферой. Скорость испарения E в приземном слое воздуха над однородной подстилающей поверхностью при этом выражается уравнением

$$E = -\rho k \, \partial q / \partial z, \tag{7.23}$$

где q — массовая доля водяного пара, ρ — плотность воздуха, k — коэффициент турбулентности, z — высота над подстилающей поверхностью, $\partial q/\partial z$ — вертикальный градиент массовой доли во-

дяного пара. После интегрирования уравнения (7.23) по z получим уравнение

$$E = \rho k_1 \frac{q_{z_1} - q_{z_2}}{\ln (z_2/z_1)}, \tag{7.24}$$

где k_1 — коэффициент турбулентности на единичной высоте, z_1 и z_2 — высоты измерения влажности q в приземном слое.

Таким образом, для определения испарения методом турбулентной диффузии необходимы измерения влажности воздуха на двух высотах и знание коэффициента турбулентности, который обычно определяется на основании градиентных измерений скорости ветра и температуры воздуха.

Метод теплового баланса. Этот метод основан на совместном решении уравнения теплового баланса

$$R_0 = lE + P_0 + B_п \tag{7.25}$$

и уравнений для определения испарения (7.24) и турбулентного теплообмена P_0 между подстилающей поверхностью и атмосферой:

$$P_0 = \rho c_p k_1 \frac{T_1 - T_2}{\ln (z_2/z_1)}, \tag{7.26}$$

где c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, T_1 и T_2 — температуры воздуха на высотах z_1 и z_2; остальные обозначения прежние.

В этом случае выражение для определения испарения приобретает вид

$$lE = \frac{R_0 - B_п}{1 + \frac{c_p}{l} \frac{T_1 - T_2}{q_1 - q_2}}, \tag{7.27}$$

где l — удельная теплота парообразования. Преимуществом формулы (7.27) перед формулой (7.24) является отсутствие в (7.27) коэффициента турбулентности, определение которого связано со значительными трудностями. Для определения испарения по формуле (7.27), кроме градиентов температуры $(T_1 - T_2)$ и влажности воздуха $(q_1 - q_2)$, необходимо знать радиационный баланс R_0 и теплообмен между подстилающей поверхностью и нижележащими слоями почвы $B_п$.

Уравнение связи. Многие исследователи уже давно обнаружили тесную связь между тепловым и водным режимом отдельных территорий, наблюдаемую в природе. Наиболее удачное количественное выражение этой связи было предложено Э. М. Ольдекопом (1911) в виде

$$E = E_0 \operatorname{th} (\theta_{oc}/E_0), \tag{7.28}$$

где, как и ранее, E — испарение, θ_{oc} — осадки, E_0 — максимально возможная величина испарения при данных метеорологических условиях (испаряемость), th — гиперболический тангенс.

Ольдекоп проанализировал также эмпирическую формулу Шрейбера (Schreiber, 1904), построенную по экспериментальным данным еще ранее, и показал, что входящий в эту формулу параметр должен соответствовать испаряемости. Таким образом, была получена формула Шрейбера — Ольдекопа, которую можно представить в виде

$$E = \theta_{oc}\left(1 - e^{-E_0/\theta_{oc}}\right). \tag{7.29}$$

На основании анализа экспериментального материала М. И. Будыко обнаружил зависимость среднего многолетнего испарения от количества осадков и радиационного баланса. С увеличением осадков и притока радиационного тепла испарение возрастает. Отношение E_0/θ_{oc} оказалось возможным заменить выражением $R_0/l\theta_{oc}$, представляющим собой отношение радиационного баланса увлажненной поверхности R_0 к затрате тепла на испарение выпавших осадков $l\theta_{oc}$.

В соответствии с этим формулы (7.28) и (7.29) Будыко представил в виде

$$E = \frac{R_0}{l}\,\mathrm{th}\left(\frac{l\theta_{oc}}{R_0}\right), \tag{7.30}$$

$$E = \theta_{oc}\left(1 - e^{-R_0/l\theta_{oc}}\right) \tag{7.31}$$

и предложил новое уравнение связи

$$E = \sqrt{\frac{R_0\theta_{oc}}{l}\left(1 - e^{-R_0/l\theta_{oc}}\right)\mathrm{th}\left(\frac{l\theta_{oc}}{R_0}\right)}. \tag{7.32}$$

На основании данных лизиметрических наблюдений Тюрк (1958) предложил эмпирические формулы для определения испарения за короткие промежутки времени с оголенной почвы и с почвы, покрытой растительностью. Формула для определения суммарного испарения (мм/декада) представлена им в виде

$$E = \frac{\theta_{oc} + \Delta W + v}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\theta_{oc} + \Delta W}{E_{max}} + \dfrac{v}{2E_{max}}\right)^2}}, \tag{7.33}$$

где θ_{oc} — осадки за декаду; ΔW — изменение влагосодержания оголенной почвы за декаду; v — «фактор растительности», зависящий от прироста сухой массы растений, дефицита влажности почвы и др.; E_{max} — характеристика максимального декадного испарения с оголенной почвы, определяемая в зависимости от средней декадной температуры воздуха t и суммарной солнечной радиации Q:

$$E_{max} = \frac{1}{16}(t + 2)\sqrt{Q} \quad \text{при } t > 2\,^{\circ}\mathrm{C},$$

$$E_{max} = 0 \quad \text{при } t \leqslant 2\,^{\circ}\mathrm{C}.$$

Довольно широкое распространение получил метод определения месячного испарения по температуре и влажности воздуха, предложенный А. Р. Константиновым (1960). Были построены корреляционные графики связи суточных сумм испарения, определенных методом турбулентной диффузии, и средних суточных значений температуры и влажности воздуха (с поправками на суточный и годовой ход).

Формула Б. В. Полякова (1947) имеет следующий вид:

$$E = aW + bt^n + \theta_{oc}(1 - \eta), \tag{7.34}$$

где W — средняя влажность почвы за расчетный период; θ_{oc} — осадки; t — температура воздуха, °С; η — коэффициент стока; n — показатель степени; a, b — коэффициенты.

В дальнейшем метод Полякова был усовершенствован А. С. Конторщиковым.

Комплексные методы. Комплексные методы расчета испарения с поверхности суши основываются на использовании уравнения водного баланса с привлечением отдельных элементов уравнения теплового баланса (главным образом при определении максимально возможного испарения). К таким методам относятся расчетные схемы Альбрехта (Albrecht, 1949), Торнтвайта (Thornthwaite, 1949), Пенмана (Penman, 1949).

В нашей стране методики, основанные на совместном анализе уравнений теплового и водного баланса, разработаны рядом авторов: М. И. Будыко (1955), С. И. Харченко (1960), М. И. Будыко, Зубенок (1961), Зубенок (1966). В этих работах рассматриваются две стадии испарения с почвы: первая соответствует критически или оптимально увлажненной почве, испарение с которой равно испаряемости, а вторая — недостаточно увлажненной почве с влажностью ниже критической.

Используя линейную зависимость интенсивности испарения с почвы от активных запасов влаги, М. И. Будыко предложил следующую расчетную схему:

$$E = E_0 \text{ при } \frac{W_1 + W_2}{2} \geqslant W_0, \tag{7.35}$$

$$E = E_0 \frac{W_1 + W_2}{2W_0} \text{ при } \frac{W_1 + W_2}{2} < W_0. \tag{7.36}$$

Здесь E и E_0 — месячные суммы испарения и испаряемости, $\frac{W_1 + W_2}{2}$ — среднее за месяц количество продуктивных запасов влаги в метровом слое почвы, W_1 и W_2 — продуктивные запасы влаги в метровом слое почвы соответственно в начале и конце месяца, W_0 — критические продуктивные запасы влаги в метровом слое почвы, при которых и выше которых испарение E равно испаряемости E_0.

Продуктивные запасы влаги W_2 в конце месяца вычисляются по формулам

$$W_2 = \frac{c}{a} \text{ при } \frac{W_1 + W_2}{2} < W_0, \tag{7.37}$$

$$W_2 = W_1 + \theta_{oc} - \theta_{nc} - E_0 \text{ при } \frac{W_1 + W_2}{2} \geqslant W_0, \tag{7.38}$$

где

$$c = W_1 b + \theta_{oc} - \theta_{nc}, \quad b = 1 - \frac{E_0}{2W_0}, \quad a = 1 + \frac{E_0}{2W_0},$$

θ_{oc} и θ_{nc} — средние многолетние месячные суммы осадков и стока.

Раздел IV
ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И РЕЖИМ CO_2 В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ

Глава 8
ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ

8.1. Аэродинамические параметры растительного покрова

Большие площади, покрытые растительностью, оказывают определенное аэродинамическое сопротивление воздушному потоку, как и всякая другая подстилающая поверхность (рис. 8.1).

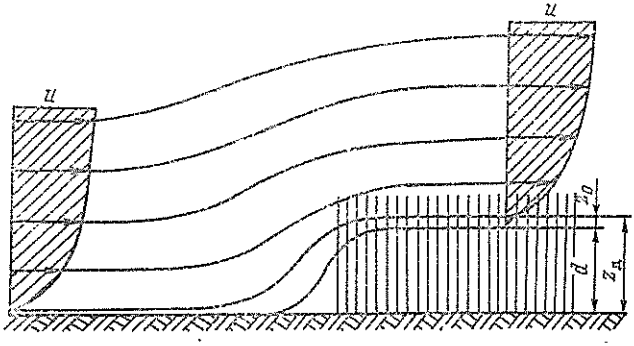


Рис. 8.1. Схема набегания воздушного потока на густой и высокий травостой (по А. Р. Константинову, 1968).

d — слой вытеснения, z_0 — слой шероховатости, $z_д$ — деятельный слой (для скорости ветра u).

Это динамическое взаимодействие обычно характеризуется так называемым *коэффициентом сопротивления*:

$$c_D(z) = \frac{u_*^2}{\bar{u}^2(z)}, \tag{8.1}$$

где $\bar{u}$ — средняя скорость ветра, u_* — динамическая скорость, определяемая выражением

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}, \tag{8.2}$$

в котором τ — вертикальный турбулентный поток количества

движения (напряжение турбулентного трения), определяемый кросскорреляцией пульсации вертикальной компоненты скорости ветра w' с пульсациями горизонтальной u' (продольной) компоненты скорости воздушного потока:

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{w'u'}. \tag{8.2а}$$

Если на достаточном удалении по вертикали от элементов препятствий выполняется логарифмический закон, то используя соотношение

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\varkappa} \ln \frac{z}{z_0}, \tag{8.3}$$

получим

$$C_D(z) = \left(\frac{\varkappa}{\ln \frac{z}{z_0}} \right)^2. \tag{8.4}$$

Здесь $\varkappa$ — постоянная Кармана.

В уравнении (8.3) параметр шероховатости z_0 подстилающей поверхности является характеристикой аэродинамического сопротивления этой поверхности воздушному потоку.

Вблизи неровностей подстилающей поверхности также выполняется логарифмический закон, но высоту z следует отсчитывать от некоторого уровня d. Уровень, где средняя скорость ветра равна нулю, при этом как бы приподнимается над подстилающей поверхностью, а воздушный поток как бы «вытесняется» неровностями (см. рис. 8.1). Такие названные А. Р. Константиновым (1952) *«слои вытеснения»* имеются, вообще говоря, над любой шероховатой поверхностью, но в расчетных формулах они учитываются только тогда, когда высоты, на которых определяется средняя скорость ветра, делаются соизмеримыми с толщиной этих слоев. Это, в частности, видно и из формулы

$$\bar{u} = \frac{u_*}{\varkappa} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad \text{при } z \geqslant d + z_0. \tag{8.5}$$

Если $z \gg d$, то равенство (8.5) переходит в обычный логарифмический закон: $\bar{u} = \frac{u_*}{\varkappa} \ln \frac{z}{z_0}$.

В атмосферном приземном слое это сказывается обычно при определении профилей метеорологических величин над развитым растительным покровом и особенно существенно, когда высота элементов неровностей весьма велика.

Аэродинамические параметры растительности — коэффициент сопротивления, толщина слоя вытеснения, параметр шероховатости — являются функциями высоты, плотности элементов растительного покрова (параметры дисперсности) и скорости ветра.

На рис. 8.2 приведена зависимость толщины слоя вытеснения для различных видов растительности (от травяного покрова высотой 0,2 м до тропических лесов со средней высотой деревьев

$h_0 = 50$ м. Сплошная линия на этом рисунке аппроксимируется аналитической зависимостью вида

$$\lg d = 1{,}07 \lg h_0 - 0{,}22, \tag{8.6}$$

где d и h_0 в метрах.

Сравнительно небольшой разброс точек относительно прямой свидетельствует о том, что густота различных типов растительных сообществ, которая может характеризоваться, например, отношением r/h_0 (r — среднее расстояние между элементами растительности) в естественных условиях изменяется незначительно, т. е. обычно диапазон густоты произрастания растений неширок, близок к оптимальным для данных условий.

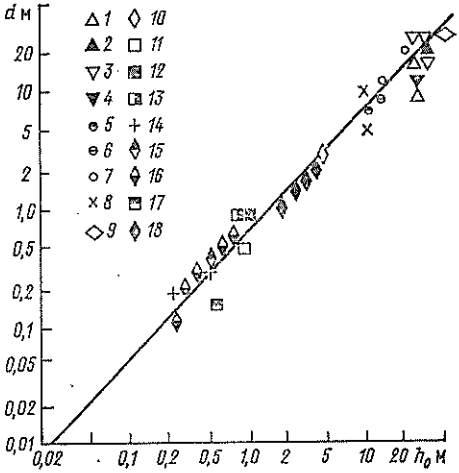


Рис. 8.2. Зависимость толщины слоя вытеснения d от высоты растительности h_0 (по А. С. Дубову, Л. П. Быковой, С. В. Маруничу, 1968).

1, 2, 3, 4 — ель, *5* — лиственница, *6, 7* — сосна, *8* — осина и береза, *9* — тропический лес, *10* — цитрусовые, *11, 17* — трава, *12* — бобовые, *13* — рис, *14* — овес, *15* — пшеница, *16* — люцерна, *18* — кукуруза.

Существует целый ряд других эмпирических формул, связывающих толщину слоя вытеснения d с высотой растительности. Стенхилл (1969) на основании обработки литературных и собственных данных по 19 видам сельскохозяйственных культур, получил формулу, близкую к выражению (8.6):

$$\lg \frac{d}{h_0} = -0{,}154, \tag{8.7}$$

а Коуэн (1968) использовал соотношение

$$d/h_0 = 0{,}64. \tag{8.8}$$

Толщина слоя вытеснения зависит также от вида растительности, характера листвы, распределения плотности листвы по высоте и др. Так, для зерновых культур толщина слоя вытеснения составляет в среднем $^2/_3$ высоты травостоя, для люцерны — $^3/_4$ высоты травостоя, для хлопчатника — более $^4/_5$ высоты хлопчатника.

От высоты неровностей зависит и другая аэродинамическая характеристика подстилающей поверхности — параметр шероховатости z_0. Обычно этот параметр связывают с высотой препятствий.

Том (1968) высказал предположение, что параметр шероховатости и толщина слоя вытеснения связаны между собой. По

данным наблюдений он получил следующее выражение:

$$z_0 = 0{,}36\,(h_0 - d). \tag{8.9}$$

Параметр шероховатости z_0 зависит от густоты стояния и от вида растительности, а в лиственных лесах и от времени года.

Многие исследователи считают, что и параметр шероховатости и толщина слоя вытеснения являются функциями скорости ветра. Шероховатость травяного покрова уменьшается с ростом скорости ветра. Данные о зависимости z_0 от скорости ветра приведены в табл. 8.1. Такая зависимость, очевидно, имеет место только

Таблица 8.1

Зависимость шероховатости травяного покрова от скорости ветра (по Пристли, 1964)

Тип травяного покрова	Скорость ветра на высоте 2 м, м/с	Параметр шероховатости, см
Скошенная трава высотой 4,5 см	2	2,4
	6—8	1,7
Трава высотой 60—70 см	1,5	9,0
	3,5	6,1
	6,2	3,7

в случае такой «мягкой» растительности, как трава или молодые побеги. Для достаточно «жесткой» растительности (например, хвойный лес) значительное прогибание стеблей не может иметь места, а небольшое раскачивание крон не сможет заметным образом уменьшить шероховатость. В этом случае при увеличении скорости ветра воздушный поток проникает глубже в толщу растительности, преодолевая сопротивление ее элементов. Средняя скорость потока при этом обращается в нуль на большем расстоянии вниз от вершин крон. Этот эффект приводит к уменьшению толщины слоя вытеснения, увеличению высоты препятствий над этим слоем и, следовательно, к увеличению параметра шероховатости.

Аналогичная зависимость была обнаружена и для такой довольно жесткой растительности, как кукуруза. Параметр шероховатости меняется для кукурузы от 0,2 до 4,2 см при изменении скорости воздушного потока от 3 до 6 м/с.

Изменение параметра шероховатости должно повлечь за собой и изменение коэффициента сопротивления. Для условий нейтральной термической стратификации этот коэффициент рассчитывается по найденным значениям z_0 и d с помощью соотношения:

$$c_D = \left[\frac{\varkappa}{\ln \dfrac{z-d}{z_0}}\right]^2. \tag{8.10}$$

А. Р. Константиновым с сотрудниками исследовалась толщина слоя вытеснения и шероховатости над кукурузным полем. На

рис. 8.3 приведен график связи высоты слоя вытеснения d и высоты кукурузы h_0, построенный по данным градиентных наблюдений.

Изменение верхней границы слоя вытеснения идет в основном параллельно изменению высоты кукурузы. Начиная с фазы 19—20-го листа, когда смыкается травостой и на единицу площади поля приходится значительно больше растительной массы, чем ранее, разница между высотой растений и верхней границей слоя вытеснения уменьшается. В дальнейшем, в фазе выметывания султана и позже, когда листья подсыхают и часть стебля, на котором расположена метелка, оголяется, оттеснение воздушного потока травостоем кукурузы становится относительно меньшим, чем в предыдущие фазы. Параметр шероховатости z_0 возрастает в течение периода вегетации: от 2 см в фазу 5-го—6-го листа до 4—5 см в фазу 15-го — 16-го листа и до 8—10 см в фазу молочно-восковой спелости.

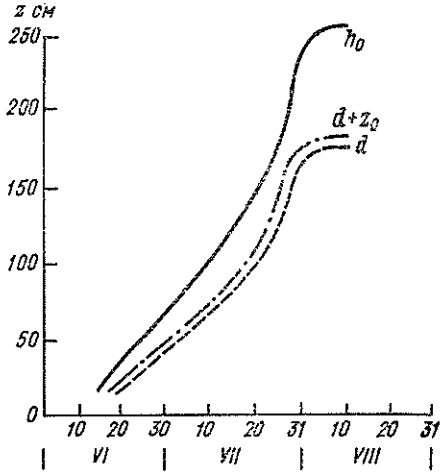


Рис. 8.3. Изменение во времени высоты травостоя h_0 слоя вытеснения d и общего слоя вытеснения и слоя шероховатости $d + z_0$ кукурузного поля (по А. Р. Константинову, 1968).

8.2. Уравнения, описывающие турбулентный режим в растительном покрове

Слой воздуха с расположенными внутри него случайно распределенными препятствиями (элементами растительности) рассматривается как непрерывная сплошная среда, для описания которой могут быть использованы обычные уравнения гидромеханики. Подобный подход был успешно использован при численном моделировании радиационных процессов в растительном покрове, когда совокупность листьев и ветвей, случайно распределенных в воздушном объеме, стилизовалась в виде мутной среды, оптические характеристики которой зависят от плотности листвы, ее радиационных свойств и пр. (главы 1 и 2).

Для описания динамики введенной в рассмотрение модельной среды обычные уравнения для пограничного слоя атмосферы должны быть определенным образом модифицированы. Такая модификация обусловлена появлением сил сопротивления препятствий воздушному потоку. Строго говоря эти силы действуют

только на поверхности препятствий, но, согласно принятому подходу, мы будем полагать, что они являются объемными и могут быть соответствующим образом включены в уравнения. Таким образом, процессы в реальной растительности со случайным распределением поверхностных сил по всему рассматриваемому объему будут моделироваться процессами в среде с непрерывно распределенными теперь уже объемными силами сопротивления.

Тогда в соответствии со сказанным уравнение движения для этой модельной среды для стационарных и горизонтально однородных условий запишется в виде

$$d\tau/dz = F_1, \tag{8.11}$$

где F_1 — сила сопротивления, описывающая динамическое взаимодействие воздуха с элементами растительности.

Для условий воздушной среды вне зоны препятствий сила F_1 обращается в нуль, а соотношение (8.11) превращается в известное уравнение для приземного слоя — слоя постоянных по высоте турбулентных потоков.

Как обычно, силу сопротивления, действующую на объем Δv, представим пропорциональной плотности движущегося воздуха ρ, квадрату его средней скорости $\bar{u}$ и элементу площади обтекаемого препятствия Δs:

$$F = \Delta v F_1 = c_d \rho \bar{u}^2 \Delta s. \tag{8.12}$$

На единицу объема будет тогда действовать сила

$$F_1 = \rho c_d s \bar{u}^2, \tag{8.13}$$

а уравнение движения (8.11) перепишется в виде

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\tau}{dz} = c_d s \bar{u}^2, \tag{8.14}$$

где $s = \Delta s/\Delta v$ — так называемая *удельная плотность поверхности* — величина, имеющая размерность L^{-1} и характеризующая площадь поверхности элементов растительности (листьев, ветвей и др.), приходящуюся на единицу объема.

Как видно из уравнения (8.14), влияние растительности на формирование напряжения турбулентного трения характеризуется двумя параметрами: *коэффициентом аэродинамического сопротивления c_d и удельной плотностью поверхности s*. Остановимся несколько подробнее на этих параметрах.

Удельная плотность поверхности растительного покрова определяется с помощью специальных фитометрических измерений (см. главу 1).

Рассмотрим коэффициент аэродинамического сопротивления c_d. После интегрирования уравнения (8.14) по вертикали (изменением плотности воздуха с высотой, как обычно, пренебрегаем) и учета малости турбулентного напряжения трения у поверхности земли по сравнению с напряжением трения у верхней границы

растительности ($\tau_0 \ll \tau_h$), получим следующее равенство:

$$c_d = \frac{\tau_h}{\rho \int_0^h s(z)\, \bar{u}^2(z)\, dz}. \qquad (8.15)$$

По этому соотношению обычно рассчитывается коэффициент сопротивления, осредненный по всей толще слоя растительности. Для таких расчетов надо располагать данными о величине τ_h, которая определяется либо по профилям средней скорости и температуры над растительностью, либо так называемым прямым методом — по записям пульсаций компонент скорости ветра равенство (8.2а). Подынтегральное выражение определяется по профилям $s(z)$ и $\bar{u}(z)$ внутри растительного покрова, полученным с помощью специальных измерений.

Величина c_d является функцией числа Рейнольдса, степени жесткости листьев и ветвей, геометрических размеров и форм отдельных элементов растений и расстояний между ними, степени продуваемости растительного покрова и др. Ввиду сложности постановки экспериментов по определению коэффициентов сопротивления, сведения о значениях этого параметра пока еще немногочисленны, но все же некоторые оценки и сопоставления сделаны.

В табл. 8.2 приведены значения величин h_0, c_d и s для различных типов поверхности.

Таблица 8.2

Аэродинамические характеристики различных типов покровов (по А. С. Дубову, Л. П. Быковой, С. В. Марунич, 1978)

Тип покрова	Характеристики покрова		
	$h_в$ м	s 1/м	c_d
Мелколистные древесные породы	8—11	1,2	0,02
Сосна	16	1,2	0,03
Кукуруза	2—3	3—6	0,17
Бобовые культуры	1,2	7	0,05
Искусственный покров из вертикально поставленных жестких цилиндров	0,14	10	0,5

При изучении турбулентных процессов часто используют сходство хаотического движения воздушных вихрей с молекулярным движением. В соответствии с этим вводятся понятия *коэффициентов турбулентной вязкости* k, *турбулентной теплопроводности* $k_т$ и *турбулентной диффузии* k_q по аналогии с соответствующими молекулярными характеристиками.

В рамках подобной стилизации турбулентные потоки выражаются через вертикальные градиенты средних значений переносимых субстанций, например,

$$\frac{\tau}{\rho} = k\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}, \quad \frac{E}{\rho} = -k_q\frac{\partial \bar{q}}{\partial z}, \quad \frac{Q}{\rho} = -k_b\frac{\partial \bar{b}}{\partial z}, \tag{8.16}$$

где $\bar{b} = \dfrac{\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2}}{2}$ — кинетическая энергия турбулентных пульсаций; Q — вертикальный турбулентный поток этой энергии; k_b — коэффициент турбулентного обмена для этой энергии; u', v', w' — пульсации компонент скорости ветра по осям x, y, z.

Уравнение (8.11) используется обычно в несколько модифицированном виде. Если выразить касательное напряжение трения через вертикальный градиент средней скорости ветра согласно (8.16), то равенство (8.11) перепишется в виде

$$\frac{d}{dz}k\frac{du}{\partial z} = c_d s\bar{u}^2. \tag{8.17}$$

Уравнение (8.17) является уравнением переноса импульса (или количества движения) в растительном покрове с граничными условиями

$$u|_{z=z_0} = 0, \tag{8.18}$$

$$k\frac{du}{dz}\Big|_{z=H_1} = u_*^2. \tag{8.19}$$

Уровень z_0 в (8.18), на котором скорость осредненного движения воздуха принимается равной нулю, соответствует средней высоте шероховатости поверхности земли ($z_0 \ll h_0$; h_0 — высота растительного покрова). Второе условие (8.19) выражает известный в физике приземного слоя факт постоянства потоков импульса $k\dfrac{du}{dz}$, тепла P и влаги E над растительным покровом. (Здесь H_1 — высота, на которой уже не сказывается влияние растительности на набегающий поток.) Обычно высоту H_1 считают равной $2—4h_0$, что приблизительно соответствует уровню расположения приборов в метеобудке.

Для расчета коэффициента турбулентного обмена количества движения k привлекается гипотеза локальной и изотропной турбулентности Колмогорова. Суть этой гипотезы заключается в предположении о том, что такие характеристики турбулентности, как k и ε (скорость диссипации кинетической энергии турбулентности в тепловую зависят только от двух масштабных величин: $l_т$ — длины пути перемешивания (масштаб турбулентности — аналог турбулентного пути перемешивания Прандтля) и b — кинетической энергии турбулентных пульсаций (интенсивность турбулентности). Используются два соотношения, предложенные Колмогоровым, связывающие:

1) коэффициент турбулентного обмена k с масштабом турбулентности $l_т$ и кинетической энергией пульсаций b

$$k = l_т \sqrt{b}, \tag{8.20}$$

2) скорость диссипации в тепло ε с кинетической энергией пульсаций b и масштабом турбулентности $l_т$

$$\varepsilon = \frac{b^{3/2}}{C_0 l_т}, \tag{8.21}$$

где C_0 — эмпирический коэффициент.

Турбулентность в растительном покрове характеризуется масштабом (турбулентности), зависящим от размера ячейки межлистного пространства, который тем меньше, чем больше густота растительности — его удельная листовая поверхность s (Г. В. Менжулин, 1970).

Масштаб турбулентности $l_т$ в растительном покрове формируется под влиянием двух процессов — чисто турбулентного обмена в межлистном пространстве и взаимодействия воздушного потока с элементами растительности.

Исходя из этого Г. В. Менжулиным (1970) предложена формула

$$\frac{1}{l_т} = \frac{1}{l_{л-з}} + \frac{s}{a}, \tag{8.22}$$

где a — параметр дисперсности растительности; $l_{л-з}$ — масштаб турбулентности по Лайхтману — Зилитинкевичу, представляемый в виде

$$l_{л-з} = \varkappa \frac{\psi}{\partial\psi/\partial z}, \tag{8.23}$$

где $\psi = b/k$.

Таким образом, уравнение (8.22) выражает известную гипотезу о структуре турбулентного течения в приземном слое, введение же Менжулиным отношения s/a в правую часть (8.22) позволяет учесть конечный масштаб турбулентности $l_т$, определяемый размерами ячеек, свободных от листьев внутри посева и характеризующих его архитектоническое значение.

Для определения баланса средней плотности кинетической энергии пульсационного движения (баланс турбулентной энергии) в межлистном пространстве растительного покрова Г. В. Менжулиным (1970) предложено уравнение

$$k\left(\frac{du}{dz}\right)^2 + c_d s \bar{u}^3 - \frac{g}{T} k_т \frac{dT}{dz} - 0{,}61 \frac{g}{\rho} k_q \frac{dq}{dz} = \varepsilon - \frac{d}{dz} k_b \frac{db}{dz}, \tag{8.24}$$

где g — ускорение свободного падения.

Нижнее граничное условие для уравнения (8.24) соответствует отсутствию потока турбулентной энергии в почву:

$$k_b \frac{db}{dz}\bigg|_{z=z_0} = 0. \tag{8.25}$$

Аналогично записывается верхнее граничное условие ($z = H_1$) для нейтральной температурной стратификации в воздухе:

$$k_b \frac{db}{dz}\Big|_{z=H_1} = 0. \tag{8.26}$$

В уравнении (8.24) турбулизация потока обусловлена вертикальной неоднородностью ветра $\left(\text{слагаемое } k\left(\frac{du}{dz}\right)^2\right)$ и присутствием в потоке элементов растительности, дополнительно турбулизующих поток. Слагаемое $c_d s \bar{u}^3$ характеризует мощность трансформации среднего движения в вихревое в предположении, что вся работа силы сопротивления составляющих посев фитоэлементов идет на дополнительную турбулизацию основного потока. В уравнении (8.24) учитывается дополнительный источник генерации вихревой энергии за счет работы архимедовых сил при вертикальных неоднородностях полей температуры и влажности воздуха в межлистном пространстве. Эти эффекты описываются двумя последними членами левой части уравнения (8.24).

Особенностью рассмотренных выше уравнений, описывающих баланс импульса основного движения турбулентного потока (8.17) и баланс турбулентной энергии (8.24) в межлистном пространстве растительного покрова, отличающей их от обычно применяемых в физике приземного слоя уравнений движения и баланса турбулентной энергии, является включение в них слагаемых $c_d s \bar{u}^2$ и $c_d s \bar{u}^3$. Эти слагаемые описывают диссипацию импульса основного движения и дополнительную турбулизацию потока в межлистном пространстве растительного покрова. Как уже ранее отмечалось, уравнение, описывающее изменение масштаба турбулентности в растительном покрове (8.22), отличается от применяемого в физике приземного слоя уравнения для масштаба турбулентности, включением в него слагаемого, учитывающего взаимодействие воздушного потока с фитоэлементами.

Экспериментальные формулы. Хотя вид профилей коэффициента турбулентности и скорости ветра зависит от вертикального профиля плотности фитомассы, функции $k(z)$ и $u(z)$ часто представляются в экспоненциальной форме (У. Х. Братсерт, 1985):

$$k(z) = k(h_0) \exp\left[-a_m\left(1 - \frac{z}{h_0}\right)\right], \tag{8.27}$$

$$\bar{u}(z) = \bar{u}(h_0) \exp\left[-a_w\left(1 - \frac{z}{h_0}\right)\right], \tag{8.28}$$

где h_0 — высота растительного покрова, a_m и a_w — параметры затухания, значения которых соотносятся с высотой слоя вытеснения d следующим образом.

$$a_w = \frac{A_k h_0}{(h_0 - d)}, \tag{8.29}$$

где A_k — постоянная величина, близкая к единице.

Значения a_w возрастают по мере роста растений с увеличением плотности РП (Иноэ, Учиджима, 1979):

Высота РП (кукуруза), см	50	140	225	277
a_w	1,6	2,0	2,6	3,0

Для плотного РП значение a_w может быть принято равным 3. Параметр затухания a_m рассчитывается по формуле

$$a_m = (2a_d - a_w), \tag{8.30}$$

где a_d — параметр, равный 2.

Значения $k(h_0)$ находятся по выражению

$$k(h_0) = \varkappa u_* (h_0 - d). \tag{8.31}$$

Скорость ветра на верхней границе РП $\bar{u}(h_0)$ получается путем подстановки $z = h_0$ в формуле (8.5).

Для расчета коэффициента турбулентности предложена (Д. Грант, 1975) также формула

$$k(L) = 0{,}7^L, \tag{8.32}$$

где L — относительная площадь листьев РП.

8.3. Турбулентный режим в растительном покрове

Расчетные данные. На основе описанных в 8.2 уравнений для турбулентного режима межлистного пространства растительного покрова выполнены расчеты характеристик турбулентности при заданных аэродинамических характеристиках и архитектонике посева, скорости ветра над посевом (Г. В. Менжулин, 1970; А. П. Бойко, 1977 и др.).

На рис. 8.4 представлены полученные Г. В. Менжулиным (1970) расчетные вертикальные профили характеристик турбу-

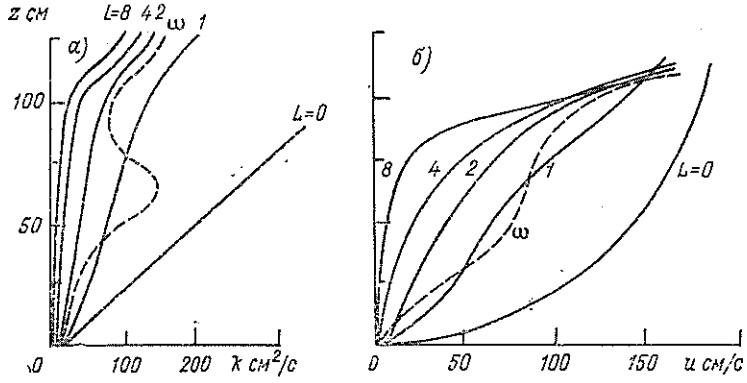


Рис. 8.4. Вертикальные профили коэффициента турбулентности k (*а*) и скорости ветра u (*б*) в растительном покрове с различной относительной площадью листьев L и в двухъярусном растительном покрове ω (по Г. В. Менжулину, 1970).

лентности в межлистном пространстве растительности с различной относительной площадью листьев L при $\bar{s}$, независимом от z, и в случае двухъярусного покрова, когда в средней части растительности высотой 1 м расположен слой толщиной 30 см, свободный от растительности (кривые ω). Удельная деятельная поверхность первого и второго ярусов в этом расчете постоянна по высоте в пределах яруса и равна 0,06 $см^{-1}$.

Как видно из рис. 8.4, все величины, характеризующие развитость основного потока, уменьшаются по мере углубления в растительность, причем затухание характеристик потока тем сильнее, чем гуще растительность. Наблюдается также уменьшение коэффициента турбулентности на верхней границе растительности, пропорциональное увеличению площади листьев РП. Расчетные профили интенсивности турбулентности имеют максимумы у верхней границы растительности, связанные с включением дополнительного члена в уравнение баланса вихревой энергии. Действие дополнительного потока энергии должно более всего сказаться на интенсивности турбулентности именно у верхней границы растительности, где турбулентность больше, чем в нижележащих слоях, из-за больших значений скорости $\bar{u}$. Происходит также диффузия вихревой энергии из области интенсивного вихреобразования (верхние уровни в покрове) в слой воздуха, непосредственно примыкающий к верхней границе растительности.

Профили скорости ветра в нижнем метровом слое при наличии растительности деформируются таким образом, что их кривизна становится положительной (в отличие от логарифмического профиля в приземном слое, когда $\frac{\overline{d^2u}}{dz^2} < 0$). При больших значениях площади листьев РП вертикальные распределения скорости близки к экспонентам, показатели которых пропорциональны L. Наблюдается также обращение в нуль скорости направленного переноса при $L \to \infty$ на верхней границе растительного покрова.

Вертикальное распределение исследуемых характеристик в случае двухъярусной растительности (кривые ω на рис. 8.4) существенно отличается от соответствующих профилей для однородного по высоте покрова. Наблюдается значительное влияние среднего, свободного от растений, слоя на их ход. Это влияние проявляется в появлении максимума на кривой распределения коэффициента турбулентности. Показательно, что скорость ветра в среднем слое меняется с высотой медленнее, чем в слоях, занятых растительностью.

По данным А. П. Бойко (1979), на верхней границе посева любой высоты при равной удельной поверхности и при постоянных значениях c_d и a ветер практически одинаков (табл. 8.3). Коэффициент турбулентности (табл. 8.4) увеличивается с ростом h_0 и уменьшением s. С другой стороны, в редких невысоких посевах перемешивание воздуха сильнее, а в плотных высоких — слабее,

Таблица 8.3

Рассчитанные значения скорости ветра (см/с) на верхней границе посева (по А. П. Бойко, 1979)

Высота посева, см	Удельная деятельная поверхность фитомассы, $см^{-1}$										
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
30	32,8	27,5	24,6	22,6	21,1	19,9	19,0	18,1	17,4	16,8	16,3
40	38,2	29,4	25,5	23,1	21,4	20,1	19,0	18,1	17,3	16,7	16,1
50	42,3	30,4	25,9	23,3	21,4	20,0	18,9	18,0	17,2	16,5	16,0
60	45,7	30,9	26,1	23,3	21,4	19,9	18,8	17,8	17,1	16,4	15,9
70	48,6	31,3	26,3	23,3	21,3	19,8	18,7	17,7	17,0	16,3	15,8
80	51,1	31,6	26,3	23,3	21,3	19,8	18,6	17,7	16,9	16,3	15,7
90	53,3	31,9	26,4	23,3	21,2	19,7	18,6	17,6	16,9	16,3	15,7
100	55,3	32,1	26,5	23,3	21,2	19,7	18,5	17,6	16,9	16,2	15,7
110	57,1	32,3	26,5	23,3	21,2	19,7	18,5	17,6	16,9	16,2	15,7
120	58,7	32,5	26,6	23,3	21,2	19,6	18,5	17,6	16,9	16,2	15,7

Таблица 8.4

Рассчитанные значения коэффициента турбулентности ($см^2/с$) на верхней границе растительности (по А. П. Бойко, 1979)

Высота посева, см	Удельная деятельная поверхность фитомассы, $см^{-1}$										
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
30	91	103	106	105	103	100	97	94	90	87	84
40	121	151	154	151	146	139	132	125	119	112	106
50	151	205	206	198	187	176	163	152	142	132	123
60	181	262	259	244	226	208	190	175	160	147	136
70	211	323	312	288	262	237	214	193	175	159	145
80	241	386	365	330	295	262	233	208	186	167	151
90	271	450	418	371	325	284	249	220	195	174	156
100	301	517	470	408	352	303	263	229	202	179	159
110	331	584	520	444	376	320	274	237	207	182	162
120	361	653	569	477	398	334	284	243	211	185	164

чем при отсутствии растительности. Это следует из сравнения k при $s = 0$ и при $s \neq 0$.

Экспериментальные данные. По данным Ф. А. Муминова (1963), круглосуточные наблюдения за скоростью ветра в приземном слое позволяют охарактеризовать некоторые особенности суточного хода ветра в растительном покрове.

Особенности суточного хода скорости ветра более четко выявляются при анализе осредненных данных. Поэтому для характеристики суточных изменений скорости ветра были использованы

три суточные серии, полученные в период вегетации картофеля весенней посадки: 13—14 мая, 17—18 и 29—30 июня. Для летней посадки использованы четыре суточные серии, проведенные 11—12 июля, 4—5 августа, 2—3 и 24—25 сентября.

На рис. 8.5 и в табл. 8.5 приведен суточный ход скорости ветра для высот 0,5; 1; 2,5 и 7,5 м на картофельном поле в среднем за период вегетации весенней и летней посадок.

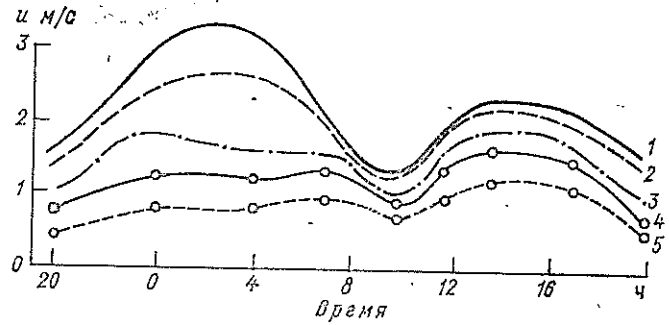


Рис. 8.5. Суточный ход осредненной за период вегетации скорости ветра на картофельном поле летней посадки (по Ф. А. Муминову, 1963).

Высота: *1*) 7,5 м; *2*) 5 м; *3*) 2 м; *4*) 1 м; *5*) 0,5 м.

Суточный ход скорости ветра характеризуется весьма слабыми скоростями в утренние и вечерние часы и усилением ветра в ночное и дневное время. Заметное ослабление ветра начинается днем в 8—9 ч и кончается в 12—13 ч, вечером оно наблюдается с 18—19 до 20—21 ч.

Максимальная скорость ветра на всех высотах за период вегетации весенней посадки наблюдалась днем, тогда как за период вегетации летней посадки максимальная скорость ветра на

Таблица 8.5

Среднечасовая скорость ветра (м/с) на картофельном поле в слое 0,5—7,5 м; 1955 г. (по Ф. А. Муминову, 1963)

Время, ч	Весенняя посадка					Летняя посадка				
	Высота, м									
	0,5	1	2	5	7,5	0,5	1	2	5	7,5
20	0,3	0,5	0,7	1,0	1,2	0,4	0,7	1,0	1,4	1,5
0	0,7	1,0	1,4	2,1	2,4	0,8	1,2	1,7	2,4	2,9
4	0,8	1,1	1,5	2,3	2,7	0,8	1,2	1,7	2,6	3,2
7	0,9	1,4	1,8	2,4	2,6	0,9	1,3	1,6	2,0	2,2
10	1,0	1,4	1,7	2,1	2,2	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3
12	1,0	1,3	1,6	1,9	2,0	0,9	1,4	1,6	1,9	2,0
14	1,4	1,8	2,2	2,6	2,8	1,2	1,6	1,9	2,2	2,3
17	1,2	1,6	2,0	2,5	2,6	1,6	1,5	1,7	2,0	2,2

высотах 5 и 7,5 м наблюдалась ночью, а на высотах 0,5; 1 и 2 м — днем (см. табл. 8.5). Однако максимальные значения скорости ветра невелики. Так, на высоте 1 м среднечасовая скорость не превышала 1,7—1,8 м/с, а на высоте 7,5 м — 2,8—3,2 м/с. В отдельные дни скорость ветра на высоте 7,5 м достигала 7,3 м/с, а на высоте 1 м — 4,8 м/с (30 августа 12 ч).

Средняя суточная амплитуда скорости ветра на высоте 0,5 м равна 1,1—0,9 м/с; с высотой она возрастает, достигая 1,6—1,9 м/с на высоте 7,5 м.

Параметр шероховатости z_0, осредненный для случаев с одинаковой высотой растений, характеризуется следующим образом: при высоте растений 25 см $z_0 = 2{,}0$ см, при высоте 40 см $z_0 = 5{,}7$ см, при высоте 55 см $z_0 = 8{,}9$ см. Таким образом, параметр шероховатости z_0 растет с увеличением высоты растений.

Суточный ход коэффициента турбулентности характеризуется хорошо выраженным дневным максимумом (0,17—0,19 м^2/с) и весьма низкими значениями ночью.

Глава 9

УГЛЕКИСЛОТНЫЙ РЕЖИМ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ВОЗДУШНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВЫ

9.1. Уравнение плотности потока турбулентного переноса CO_2 в растительном покрове

По сравнению с азотом, кислородом и парами воды, которые в сумме составляют основную массу атмосферы, углекислый газ, современная концентрация которого на уровне моря колеблется около 0,6 г/м^3 (т. е. 335 см^3/м^3 = 335 ppm), относится к микрокомпонентам атмосферы. Несмотря на это, биологическое значение CO_2 исключительно велико, так как он является важнейшим звеном биологического круговорота углерода, необходимого для поддержания всех форм жизни.

Чтобы разобраться в основах прихода и расхода углекислого газа в системе растение—почва—приземный воздух, рассмотрим уравнение баланса потоков углекислого газа в слое растительного покрова, которое можно записать в виде

$$F_a = F_x + F_к + F_м - Ф_б, \qquad (9.1)$$

где F_a — поток CO_2 над растительным покровом, F_x — дыхание надземной части посева, $F_к$ — дыхание корней, $F_м$ — выделения почвенных микроорганизмов, $Ф_б$ — суммарный (брутто) фотосинтез.

Поскольку $F_к + F_м = F_п$ есть поток CO_2 из почвы, а $Ф_б - F_x - F_к = Ф_н$ — чистый (нетто) фотосинтез, уравнение (9.1)

можно переписать в виде

$$F_a = -F_к + F_п - Ф_н, \tag{9.2}$$

или

$$F_a = \alpha F_п - Ф_н. \tag{9.3}$$

Так как составляющие почвенного потока углекислого газа непосредственно не могут быть определены порознь, величина корневого дыхания $F_к$ учитывается с помощью поправочного коэффициента α (по литературным данным он варьирует в среднем от 0,70 до 0,95 в зависимости от типа почв, растительности и стадии развития посева).

Вертикальный поток углекислого газа в приземном слое воздуха, как и любой другой консервативной субстанции, определяется механизмом турбулентной диффузии и, следовательно, выражая концентрацию углекислого газа $C_a(z, t)$ в абсолютных единицах (например, г/м^3), а коэффициент турбулентного обмена k_{CO_2} в м^2/с, уравнение для плотности потока турбулентного переноса CO_2 в растительном покрове можно записать в виде

$$F_a = -k_{CO_2}(z, t)\frac{dC_a}{\partial z}, \tag{9.4}$$

где F_a — средний поток CO_2.

Как известно, с увеличением скорости ветра коэффициент турбулентного обмена k_{CO_2} возрастает, вследствие чего усиливается и турбулентный газообмен, который способствует выравниванию разницы концентрации углекислоты в растительном покрове.

Динамика CO_2 в системе почва—растение—атмосферный воздух описывается уравнением турбулентной диффузии с учетом газообмена растений:

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[k_{CO_2}(z, t)\frac{\partial C_a}{\partial z}\right] - S_{CO_2}(z, t), \tag{9.5}$$

$$S_{CO_2}(z, t) = \begin{cases} Ф_б(z, t) - F_х, & 0 \leqslant z \leqslant h_0, \\ 0, & h_0 < z \leqslant H_1, \end{cases} \tag{9.6}$$

где через $Ф_б(z, t)$ и $F_х(z, t)$ обозначены скорости поглощения CO_2 при фотосинтезе (суммарный фотосинтез) и его выделения при дыхании (суммарное дыхание) надземной части посева. Краевые условия для уравнения (9.5) обычно формулируются путем задания функции $C_a(t)$, описывающей временной ход концентрации CO_2 на верхней границе системы почва—растение—атмосфера при $z = H_1$:

$$C_a(z, t)|_{z=H_1} = F_a(t) \tag{9.7}$$

и задания функции $F_п(t)$

$$-k_{CO_2}(z, t)\frac{\partial C_a}{\partial z}\Big|_{z=0_+} = F_п(t), \tag{9.8}$$

описывающей интенсивность потока CO_2 между почвой и атмосферой при $z = 0$.

9.2. Профиль концентрации CO_2 в растительном покрове

Типичный суточный ход концентрации CO_2 над посевом и в растительном покрове, полученный по экспериментальным данным (Ю. Е. Гиршович, К. И. Кобак, 1968), представлен на рис. 9.1. Измерения концентрации CO_2 в воздухе на четырех вы-

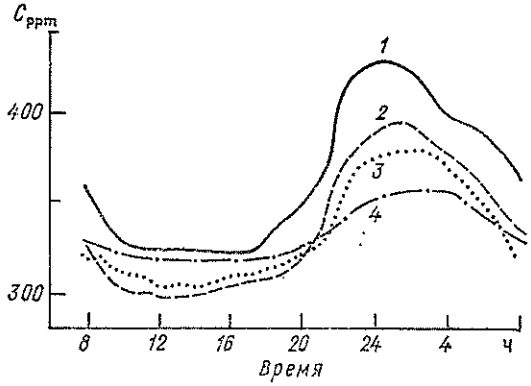


Рис. 9.1. Суточный ход абсолютной концентрации CO_2 на различной высоте; озимая рожь (по Ю. Е. Гиршовичу, К. И. Кобаку, 1968).

1 — поверхность почвы, *2* — высота 90 см, *3* — 110 см, *4* — 200 см.

сотах позволили получить суточный ход на всех уровнях. На высоте 1 м над посевом концентрация CO_2 изменяется в основном от 320 до 360—370 ppm, днем она уменьшается, а ночью увели-

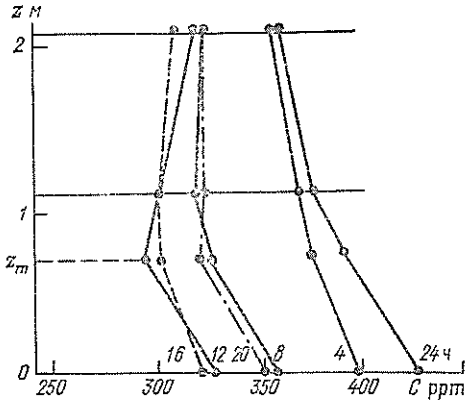


Рис. 9.2. Вертикальные профили концентрации CO_2; озимая рожь (по Ю. Е. Гиршовичу, К. И. Кобаку, 1968).

чивается. У поверхности почвы суточные колебания концентрации CO_2 больше (325—420 ppm), но имеют тот же временно́й ход.

Вертикальный профиль концентрации CO_2 (рис. 9.2) в дневные часы имеет характерный минимум внутри растительного покрова. Недостаточное количество точек измерения по высоте посева не позволило установить точную высоту этого перегиба (Z_m) для

каждого интервала осреднения, однако следует указать на важность этого уровня профиля. Очевидно, что уровень, который соответствует минимуму концентрации CO_2 внутри растительного покрова, делит весь посев на две области, отличающиеся источником снабжения углекислого газа. Нижняя область ассимилирует CO_2, продуцируемый почвой, верхняя — из слоя воздуха над посевом.

К концу июня, когда рост практически прекращается и уменьшается интенсивность фотосинтеза, вертикальный профиль выражен слабо.

По данным Учиджимы (1970), обнаруживается хорошо выраженная миграция уровня минимальной концентрации CO_2 (точки z_m) в зависимости от изменения положения уровня максимума удельной поверхности листьев по мере роста растительности (для зерновых посевов). Дневная динамика этой величины выражена функцией коротковолновой радиации

$$z_m \approx h_0 \exp[-0{,}59Q(h_0)], \tag{9.9}$$

где h_0 — средняя высота посева.

При $Q(h_0) \to 0$ $z_m \to h_0$, а при $Q(h_0) \approx 700...840$ Вт/м^2 $z_m \approx \approx 0{,}5h_0$, т. е. уровень с минимальной концентрацией CO_2 может перемещаться внутрь посева на уровень $\approx 0{,}5\ h_0$.

9.3. Суточный ход потоков CO_2 в посевах

Рассмотрим закономерности суточного хода потоков CO_2 на примере наблюдений, выполненных Ю. Е. Гершовичем, А. Кобаком (1968). Эти наблюдения подтвердили наличие четко выраженного суточного хода атмосферного потока CO_2. Максимальные значения приходятся на 12—15 ч (в соответствии с максимальной интенсивностью солнечной радиации). В отдельные дни около 14 ч отмечалось уменьшение атмосферного потока CO_2, что, очевидно, является следствием полуденной депрессии фотосинтеза. На рис. 9.3 *а* представлены кривые суточной динамики атмосферного потока CO_2.

Наиболее интенсивные полуденные потоки CO_2 имели место в период с 10 по 20 июня и достигали 13—14 г/(м^2·ч). К концу наблюдений они составляли 4—5 г/(м^2·ч). В ночные часы максимальные атмосферные потоки CO_2 наблюдаются в 22—23 ч; они достигают 6—7 г/(м^2·ч) в период с 14 по 20 июня и с 1 по 7 июля и уменьшаются до 2—3 г/(м^2·ч) 21—29 июня. Максимум ночного атмосферного потока в 22—23 ч соответствует наибольшему почвенному потоку CO_2 в эти часы (ср. с рис. 9.3 *б*).

Суммарный поток CO_2 из атмосферы в течение светового дня достигает 70—80 г/м^2 в период наиболее активного роста посева (10—20 июня) и уменьшается до 15—18 г/м^2 к концу наблюдений (1—7 июля), когда рост растений практически прекратился. Для последнего периода, когда проводились круглосуточные определения потока CO_2 из почвы, разность между атмосферным и поч-

венным потоками в ночные часы дает величину дыхания наземной части посева в пределах 12—15 г/(м²·ночь), что составляет 40—50 % количества CO_2, ассимилированного посевом в течение светового дня. Если для остальных периодов потока углекислоты, то для дыхания посева будут получены значения 5—10 г/(м²·ночь), что составляет 5—10 % фотосинтеза для периода 10—20 июня и 10—40 % для периода 20—30 июня.

Поток CO_2 из почвы. Интенсивность почвенного потока CO_2 имеет характерный суточный ход. Суточный ход почвенного потока CO_2 представлен на рис. 9.3 *б*. В дневные часы, соответствующие активному фотосинтезу, почвенный поток уменьшается, а в предвечерние увеличивается, достигая максимума в 21—23 ч.

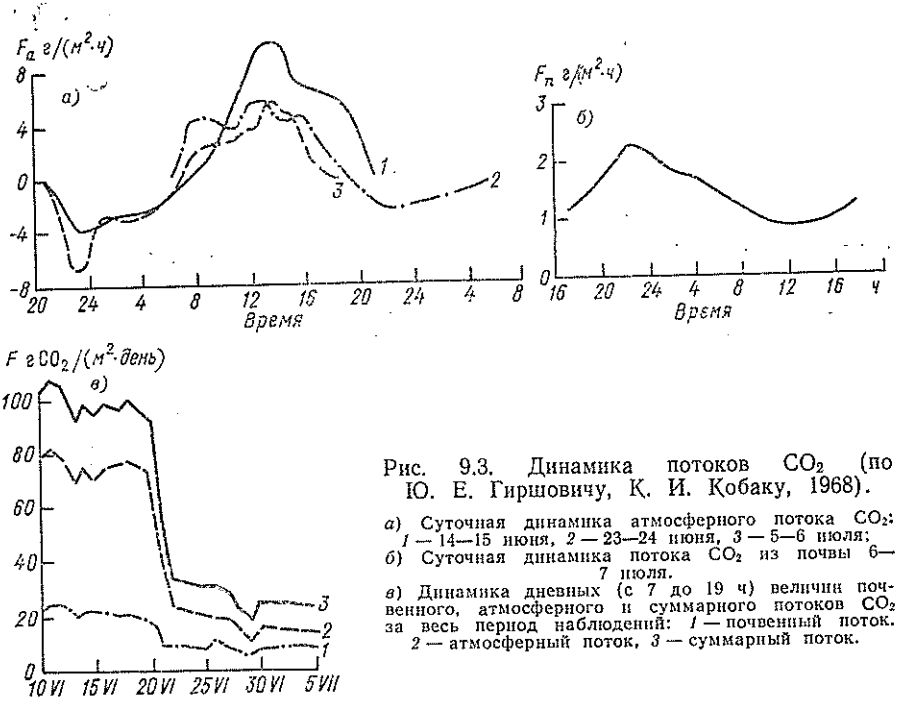


Рис. 9.3. Динамика потоков CO_2 (по Ю. Е. Гиршовичу, К. И. Кобаку, 1968).

а) Суточная динамика атмосферного потока CO_2: *1* — 14—15 июня, *2* — 23—24 июня, *3* — 5—6 июля;
б) Суточная динамика потока CO_2 из почвы 6—7 июля.
в) Динамика дневных (с 7 до 19 ч) величин почвенного, атмосферного и суммарного потоков CO_2 за весь период наблюдений: *1* — почвенный поток. *2* — атмосферный поток, *3* — суммарный поток.

Такой ход интенсивности выделения CO_2 из почвы совпадает с ходом температуры в почве на глубине 20—25 см. В часы максимальной интенсивности поток углекислого газа из почвы увеличивается в 2—2,5 раза по сравнению с полуденными часами, соответствующими минимальной интенсивности.

Дневной поток CO_2 из почвы (от 7 до 19 ч) составлял 30—40 % суммарной продуктивности углекислоты.

Суммарный поток углекислоты. На рис. 9.3 *в* показана динамика дневных величин (с 7 до 19 ч) почвенного, атмосферного и суммарного потоков CO_2 в течение всего периода наблюдений.

Наиболее интенсивные потоки CO_2 из почвы имеют место с 10 по 20 июня. Между 20 и 30 июня интенсивность почвенного потока значительно уменьшается, несмотря на увеличение максимальных суточных температур в жизнедеятельном слое почвы в эти дни. Это объясняется уменьшением влажности почвы (с 15,8 % 11 июня до 6,3 % 27 июня на глубине 20 см и с 15 до 6,2 % соответственно на глубине 10 см), что приводит к снижению микробиологической активности почвы. В период с 30 июня по 7 июля почвенный поток вновь несколько возрастает в связи с увеличением влажности почвы (прошли дожди).

Атмосферный и суммарный потоки CO_2 имеют максимальные величины во вторую десятидневку июня, соответствующую наиболее интенсивному росту растений (со 100 до 160 см). После 20 июня наблюдается их резкое уменьшение. В конце месяца зафиксированы следующие минимальные значения: атмосферный поток 10,6 г/(м²·день) и суммарный 17 г/(м²·день). С 1 по 5 июля потоки незначительно увеличиваются, но и в этот период атмосферный поток не превышает 15 г/(м²·день), а суммарный — 25 г/(м²·день).

9.4. Диффузионный перенос газов в почве

Обмен газами между почвой и атмосферой может происходить посредством двух различных механизмов: конвекции и диффузии. Последняя является основным механизмом. В основе каждого из этих процессов лежит рассмотренный ранее основной закон переноса массы и энергии, т. е. скорость переноса или поток газа пропорционален движущей силе.

В случае конвекции движущей силой является градиент полного давления газа, что приводит к перемещению всей массы воздуха из зоны с более высоким давлением в зону с более низким. В случае же диффузии движущей силой является градиент парциального давления (или концентраций) какого-либо компонента воздуха.

Диффузионный перенос газов в почве происходит частично в газовой фазе и частично в жидкой. Диффузия через заполненные воздухом поры поддерживает обмен газами между атмосферой и почвой, в то время как диффузия через водные пленки различной толщины непосредственно обеспечивает снабжение кислородом гидратированных живых тканей корней растений и удаление из них углекислоты.

Для обоих участков пути диффузионный процесс можно описать законом Фика

$$q_d = -D\frac{dC}{dx}, \qquad (9.10)$$

где q_d — диффузионный поток воздуха (масса, диффундирующая через единицу площади за единицу времени), D — коэффициент диффузии (имеющий размерность площади на время), C — кон-

центрация (масса диффундирующей субстанции в единице объема); x — расстояние, dC/dx — градиент концентрации.

Прежде всего рассмотрим участок пути диффузии газов в воздушной фазе.

Очевидно, что коэффициент диффузии газов в почве D_s будет меньше коэффициента их диффузии в воздухе D_0, так как почвенные частицы понижают площадь эффективного поперечного сечения, доступную для диффузии газов. В почве эта площадь равна площади, занятой воздухом: Это то же самое, что и занятая воздухом порозность, т. е. порозность аэрации ε_a. К тому же частицы препятствуют переносу газов еще и тем, что изменяют пути их течения в извилистой и плохо связанной системе и, следовательно, оказывают сопротивление, оцениваемое коэффициентом b. Таким образом, отношение $D_s/D_0 = b\varepsilon_a$.

Пенман (1940) нашел, что отношение $D_s/D_0 = 0{,}66\varepsilon_a$. Здесь 0,66 — коэффициент извилистости, предполагающий, что кажущийся путь составляет около $^2/_3$ длины реального среднего пути диффузии в почве.

Миллингтон (1959) предложил формулу

$$\frac{D_s}{D_0} = \left(\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon}\right)^2 \varepsilon_a^{4/3}, \tag{9.11}$$

где ε — общая пористость.

Эти расхождения были объяснены де Фризом (1950), показавшим на основе теории, что зависимость между эффективным коэффициентом диффузии и порозностью аэрации должна быть криволинейной, обусловленной геометрией распределения пор по размерам, и поэтому нет оснований полагать, что она будет одной и той же для различных почв и содержаний воздуха при различном содержании воды.

Установив изменчивую природу D_s, вернемся к математическому формулированию процессов диффузии.

Принимая во внимание нестационарные условия, снова обратимся к принципу неразрывности

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial q_d}{\partial x}, \tag{9.12}$$

устанавливающему, что интенсивность изменения концентрации C во времени выравнивается скоростью изменения диффузионного потока с расстоянием. Предполагается, что диффундирующая субстанция сохраняется повсюду. Однако по мере того как O_2 и CO_2 диффундирует через почву, O_2 поглощается, CO_2 продуцируется аэробной биологической деятельностью вдоль пути диффузии.

Для того чтобы учесть эти количества, добавляемые к диффундирующей субстанции или вычитаемой из нее в единицу времени, к правой части уравнения неразрывности (9.12) следует добавить выражение $\pm S$, в котором плюс означает приращение интенсивности (источник), а минус — уменьшение интенсивности (сток)

для рассматриваемой субстанции (в нашем случае либо для O_2, либо для CO_2).

Соответственно

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_d}{\partial x}\right) \pm S(x, t). \qquad (9.13)$$

Выражение $S(x, t)$ означает, что источник—сток есть функция пространства и времени. Далее, подставляя уравнение $q_d = -D\frac{dC}{dx}$ в уравнение (9.13) и рассматривая только вертикальное направление z (глубина), получим

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D_s \frac{\partial C}{\partial z}\right) \pm S(z, t). \qquad (9.14)$$

Можно ожидать, что в агрегированных почвах происходит довольно быстрая диффузия в межагрегатных порах, которые быстро дренируются после дождя или полива и образуют сеть непрерывных, заполненных воздухом пустот. Однако внутриагрегатные поры могут оставаться почти насыщенными в течение длительного времени и ограничивать таким образом внутреннюю аэрацию агрегатов.

Центры крупных плотных агрегатов могут быть анаэробными даже в том случае, когда крупные поры по их периферии хорошо аэрированы. Таким образом, даже в хорошо аэрируемых почвах могут встречаться области анаэробиозиса.

Теперь рассмотрим диффузию газов в жидкой фазе. Конечный отрезок пути диффузии O_2 к тканям корней и CO_2 от них происходит через жидкую фазу, т. е. через водные пленки и оболочки, окружающие корни. В этом случае в уравнении (9.14) следует использовать коэффициент диффузии для растворенной диффундирующей в воде субстанции D_w. Несмотря на то что эта стадия диффузии протекает на очень коротком расстоянии (водные пленки даже самые толстые могут быть толщиной всего лишь в несколько миллиметров), она может оказаться лимитирующей, поскольку диффузия O_2 в воде составляет только около 0,0001 ее величины в воздухе. Коэффициенты диффузии O_2 и CO_2 составляют соответственно в воде $2{,}60 \cdot 10^{-9}$ и $2{,}04 \cdot 10^{-9}$ м^2/с, в воздухе — $2{,}26 \cdot 10^{-5}$ и $11{,}81 \cdot 10^{-5}$ м^2/с.

9.5. Воздушный режим почвы

Изменения интенсивности дыхания почв, связанные главным образом с дыханием корней растений, жизнедеятельностью микроорганизмов, биохимическими реакциями и т. п., интенсивность газообмена между почвой и атмосферой, скорость перемещения газов по профилю обусловливают изменение содержания основных компонентов почвенного воздуха — кислорода и углекислого газа — как в пространстве по профилю почвы, так и во времени, т. е. создают воздушный режим почв.

Почвенный воздух по сравнению с надпочвенным сильно обогащен углекислым газом. Если в последней среде он составляет стандартную цифру 0,03 %, то в первой это содержание колеблется в зависимости от состояния и свойств почвы более чем на порядок, а именно от 0,74 до 9,74 %. В основном увеличение CO_2 происходит за счет резкого уменьшения доли кислорода. Вместо стандартной доли кислорода 20,94 %, содержащегося в приземной атмосфере, в почвенном воздухе в зависимости от разных причин количество его колеблется от 20,03 до 10,35 %. Этот процесс особенно ярко выражен в унавоженных почвах при интенсивных биологических процессах, происходящих в них, и при повышенной влажности этих почв. Естественно, что возрастание содержания CO_2 происходит за счет убыли содержания кислорода. Данные табл. 9.1 подтверждают этот простой закон изменения

Таблица 9.1

Содержание O_2 и CO_2 в почвенном воздухе (%) (по С. В. Нерпину, А. Ф. Чудновскому, 1975)

Глубина, см	O_2		CO_2		
	влажный период, X—I	сухой период, II—V	влажный период, X—I	начало сухого периода, II	конец сухого периода, IV—V
10	13,7	20,6	6,5	1,0	0,5
25	12,7	19,8	8,5	2,1	1,2
45	12,2	18,8	9,7	4,3	2,1
90	7,6	17,3	10,0	6,7	3,7
120	7,8	16,4	9,6	8,5	5,1

газосодержания почвенного воздуха, в силу которого постоянное потребление кислорода идет параллельно с процессом образования углекислоты.

В действительности реальные процессы протекают значительно сложнее. Постоянное потребление кислорода, идущего на процессы химического и биохимического окисления, частично восполняется поступлением кислорода из атмосферы, а продуцируемые количества углекислоты также частично уравновешиваются непрерывным отводом ее в атмосферу, поглощением корнями растений и т. д. Таким образом, в почве наблюдаются прямо противоположные явления: с одной стороны, нарушение равновесия составляющих, свойственное нормальной атмосфере, с другой — восстановление этого равновесия. На фоне этого равновесия имеет место интересующий нас эффект выделения углекислоты и поглощения кислорода почвенным воздухом. Приведем несколько конкретных цифр, характеризующих масштаб этого эффекта.

При росте грибов за сутки выделяется от 276 до 1874 $см^3$ CO_2 на 1 г сухой массы; $2 \cdot 10^6$ растений пшеницы выделяют на каждый гектар 48—96 кг CO_2/сут; 10^5 растений горчицы в период цвете-

ния — 50 кг CO_2/сут. На каждом гектаре хлопчатника за сутки выделяется 42—50 кг CO_2.

По интенсивности продуцирования углекислоты сельскохозяйственные культуры располагаются в следующем порядке: люпин, картофель, овес, озимая рожь, озимая пшеница, ячмень.

В этом процессе взаимосвязаны: дыхание корней, которое зависит от массы корней и надземной части растения, интенсивность их роста, внешние условия, агробиологическая деятельность почв, микроорганическая деятельность почв.

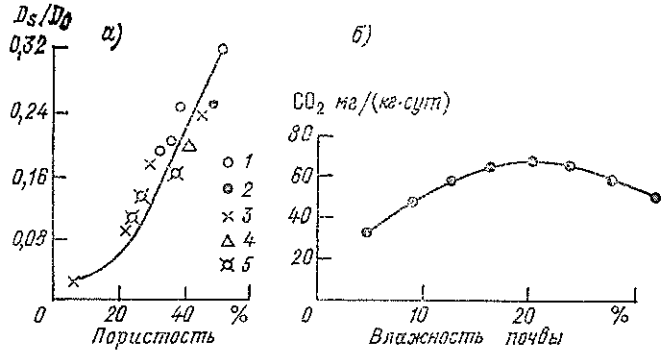


Рис. 9.4. Зависимости отношения D_s/D_0 от пористости почвы (%) при различной плотности ρ (*а*) и количества выделяемой из почвы углекислоты от влажности почвы (% массы) (*б*) (по Л. Н. Абросимову, И. Б. Ревуту, 1972).

1) ρ = 1,1 г/см³, *2*) ρ = 1,2 г/см³, *3*) ρ = 1,3 г/см³, *4*) ρ = 1,4 г/см³, *5*) ρ = 1,5 г/см³.

На рис. 9.4 *а* дается опытная кривая возрастания коэффициента диффузии (вернее, отношение коэффициентов диффузии в почве к коэффициенту самодиффузии в атмосфере D_s/D_0) от пористости почвы (%) для конкретной супесчаной почвы. Какой бы плотности ни была данная почва (в пределах 1,1—1,5 г/см³), коэффициент увеличивается весьма сильно (иногда в три раза) при росте пористости во всем интервале возможных изменений.

По данным Л. Н. Абросимова, И. Б. Ревута (1972) изменение влажности почвы дает весьма высокий процент увеличения пористости почвы и ведет к интенсификации производства в почве концентрации CO_2. На рис. 9.4 *б* приводится ход выделения углекислоты с изменением влажности. При этом устанавливается некоторый оптимум выделения CO_2 при определенной влажности, лежащий в пределах 16—24 % для исследованной супесчаной слабоподзолистой почвы.

Раздел V

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ВАЖНЕЙШИЕ ПРОЦЕССЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАСТЕНИЙ

Глава 10

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ОНТОГЕНЕЗ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

10.1. Общая характеристика онтогенеза высших растений

Под *онтогенезом* (индивидуальным развитием или *жизненным циклом*) понимают жизнь растения с момента появления оплодотворенной яйцеклетки (зиготы) или возникновения зачаточной почки, дающей начало органам вегетативного размножения, до естественной смерти растительного организма.

Нормальный онтогенез у большинства видов высших растений складывается из двух основных периодов: вегетативного и генеративного. Первый период — формирование корней, стеблей, листьев — вегетативных органов, или так называемой *вегетативной сферы растения*, выполняющей важнейшие функции питания, дыхания, водоснабжения, синтеза и передвижения веществ в организме, и второй период — формирование генеративных органов (размножения) — соцветий, цветков, плодов и семян — *генеративной сферы*. Однако такое разделение жизненного цикла относительно, так как формирование каждого органа, в том числе и всех вегетативных, тесно связано не только с ростом, но и с развитием генеративных органов и растения в целом.

Жизненный цикл многих видов растений включает также период «покоя», когда рост и органообразовательные процессы резко замедляются или почти приостанавливаются из-за неблагоприятных условий вегетации (низкие температуры, засухи и др.). Длительность периода покоя бывает разной — от нескольких недель до многих месяцев.

По общей продолжительности жизненного цикла все высшие растения делятся на однолетние, двулетние и многолетние.

При этом однолетние растения принято относить к следующим группам: а) эфемеры — растения, весь онтогенез которых завершается в течение нескольких весенних месяцев; обычно это растения пустынь и полупустынь, использующие для своего развития и роста зимние и ранневесенние осадки; б) однолетние яровые растения, вегетация которых начинается весной или летом и завершается в это же лето или осенью; в) однолетние озимые формы, продолжительность жизни которых не превышает одного

года, но вегетация растений начинается осенью и завершается плодоношением летом или осенью следующего года.

У двулетних растений на первом году жизни обычно образуются вегетативные органы, на втором году идут процессы цветения и плодоношения, после чего растения отмирают.

Многолетние растения характеризуются самой различной продолжительностью жизненного цикла: от нескольких месяцев — эфемероиды (травянистые растения) до многих столетий (дуб, липа) и даже тысячелетий (секвойя, мамонтовое дерево и др.).

Кроме того, растения делятся на две большие группы: однократно плодоносящие — монокарпики и многократно плодоносящие — поликарпики. У монокарпических растений после плодоношения наступает отмирание материнского организма. У поликарпических растений плодоношение не ведет к полному отмиранию материнского организма, поэтому цветение и плодоношение у них повторяется в течение ряда лет.

К группе монокарпических растений относятся однолетние (эфемеры, яровые и озимые сельскохозяйственные зерновые культуры), большинство двулетников, а также некоторые виды многолетних растений: различные виды бамбука, некоторые виды пальм, мексиканская агава, виды рода ферула. К числу поликарпических растений относится бóльшая часть кустарников (например, смородина, малина, шиповник, таволга, бузина, жимолость, сирень и др.), плодовые деревья (яблоня, слива, вишня, груша и др.), древесные породы (дуб, липа, клен, ясень, ива и др.), комнатные декоративные растения (бегония, герань, примула и др.), многолетние травянистые растения (люцерна, эспарцет, клевер, тимофеевка луговая, костер, овсяница и др.).

Поликарпические многократно плодоносящие растения различаются также по сроку наступления первого плодоношения: растения, цветущие на первом году жизни, например, тимофеевка луговая; зацветающие на втором году — многолетний люпин и др.; растения, зацветающие на третьем году — многие виды ягодных кустарников; растения, плодоносящие на 8—11-м году жизни — ряд сортов яблонь, груш; растения, переходящие к массовому цветению на 25—30-м году жизни — липа, клен и др., либо на 40—60-м году жизни — дуб и ряд других лесных пород.

Долговечность многих поликарпических видов растений исчисляется столетиями и даже тысячелетиями. Так, мамонтовое дерево (секвойя) живет до 5000 лет; кипарис, кедр ливанский, тисс — до 3000 лет; каштан — до 2000 лет; дуб, ель, липа, сибирский кедр — свыше 1000 лет; тополь, бук, сосна, орех грецкий — от 300 до 600 лет; яблоня, груша, черешня — от 100 до 400 лет и более.

Даже среди многолетних травянистых злаков, наряду с такими, как райграс, тимофеевка, ежа, жизненный цикл которых исчисляется от 3 до 7, реже до 10 лет, имеется ряд видов, например, щучка и белоус, у которых продолжительность жизни исчисляется десятилетиями. Причем недолголетние злаки быстро раз-

виваются и начинают плодоносить уже на первом и втором году жизни, а долголетние развиваются медленно и начинают цвести и плодоносить лишь на 5—8-м году жизни.

Границы между монокарпическими и поликарпическими формами в жизненном цикле растений в известной степени условны.

10.2. Фенологические фазы развития роста растений, возрастные периоды их жизненного цикла

В процессе развития растения претерпевают ряд внешних изменений: прорастание семян, появление всходов, рост стебля, образование органов цветения, формирование плодов. Наблюдения за прохождением жизненного цикла позволили А. И. Воейкову и П. И. Броунову уже в конце XIX в. наряду с основными периодами вегетативного и генеративного развития выделить ряд фаз развития и роста растений, которые получили название *фенологических фаз развития*. Каждая фенологическая фаза характеризуется появлением ряда внешних морфологических признаков или новых органов.

Советскими фенологами (А. И. Руденко, А. А. Шиголев и др.) разработана методика определения фенологических фаз для многих культурных растений.

У хлебных злаков (пшеница, овес, рожь и др.) отмечаются следующие фенологические фазы: 1) прорастание семян, 2) всходы, 3) появление 3-го листа, 4) кущение (ветвление) из подземных узлов стебля, 5) выход в трубку (стеблевание, начало роста стебля главного побега), 6) колошение (выметывание), 7) цветение, 8) молочная спелость, 9) восковая спелость, 10) полная спелость.

У однолетних травянистых растений (подсолнечник, гречиха, конопля и др.) различают следующие фазы: 1) прорастание семян, 2) всходы, 3) появление первой пары настоящих листьев, 4) ветвление стебля, 5) стеблевание, 6) образование соцветий, 7) цветение, 8) образование плодов (зеленая спелость семян), 9) созревание семян (полная спелость).

У сои, гороха, кормовых бобов, вики, фасоли, люпина и других бобовых с момента начала формирования плодов отмечаются фазы зеленых, сизых и бурых бобиков. У томатов также определяются отдельные фазы созревания плодов: зеленые плоды, бланжевая спелость, полная спелость, переспелые плоды. У бахчевых культур определяется так называемая съемная спелость. У капусты на первом году жизни определяют фазы всходов, 1-го настоящего листа, 3-го настоящего листа, начала завивания кочана, технической спелости.

У плодовых культур (яблоня и др.) отмечают следующие фазы: 1) набухание почек, 2) распускание цветочных и листовых почек, 3) развертывание первых листьев, 4) образование соцветий, 5) цветение, 6) завязывание плодов, 7) созревание плодов, 8) осеннее расцвечивание листьев, 9) листопад.

При наблюдениях за корнеплодами в первый год жизни (свекла сахарная, кормовая, брюква, морковь и др.) отмечаются фазы всходов, появления 1-й, 2-й и 3-й пары настоящих листьев, начала роста корнеплода. На второй год жизни корнеплодов отмечаются фазы появления розетки, стеблевания, появления боковых побегов, цветения, начала созревания, уборочной спелости.

Таким образом, фенологические фазы характеризуют не только изменение морфологических признаков растений, но они зачастую связаны с детальной характеристикой хозяйственно важных признаков культурных растений. Изучение фаз развития и роста растений, сроков наступления отдельных фаз у разных видов растений в разных географических условиях и определение их продолжительности составляет предмет отдельной дисциплины сельскохозяйственной метеорологии — *фенологии.*

В онтогенезе растений происходит ряд закономерных изменений в их строении в связи с возрастными периодами их жизни. Поэтому наряду с фенологическими фазами и этапами органогенеза следует различать также и возрастные периоды.

Процессы старения, зависящие от фактора времени в индивидуальной жизни растения, являются наиболее общими. Все явления и процессы в жизни растения протекают во времени, имеют определенную продолжительность, свое начало и свой конец, т. е. претерпевают возрастные изменения. Протопласт, ядро, органоиды клетки, ткани, органы, физиологические процессы и в целом весь растительный организм подвержены возрастным изменениям.

При нормальных условиях существования и развития особи возрастные изменения проходят синхронно с ее развитием; их практически трудно отделить от стадийных и органообразовательных процессов. При неблагоприятных условиях для развития растений синхронность этих процессов нарушается. В этом случае стадийные и органообразовательные процессы задерживаются, а процессы старения продолжаются и даже могут ускоряться. Поэтому возрастная периодизация жизненного цикла, в частности, многолетних поликарпических растений проводится по морфофизиологическим признакам, в связи с развитием.

Таким образом, возрастные изменения отражают не только определенное морфофизиологическое состояние самой особи, но и состояние тех процессов, которые связаны непосредственно с воспроизведением новых индивидуумов. Следовательно, они отражают общие биологические закономерности жизни не только особи, но и вида.

Жизненный путь индивидуума у семенных растений начинается с прорастания семян. Поэтому первый возрастной период часто определяется как период, или состояние, проростка растения. При этом, в отличие от следующего возрастного периода, проростки наряду с автотрофным питанием используют и запасы питательных веществ семени. Состояние проростков характеризуется тем, что все органы (корни, листья, зачаточный стебель) являются зародышевыми органами, образовавшимися за счет веществ ма-

теринского организма и семени. Длительность периода проростка у однолетних растений выражается несколькими днями, реже несколькими неделями, у многолетних занимает не более одного вегетационного периода, а чаще, как и у однолетних растений, длится несколько дней.

Продолжительность периода прорастания находится в зависимости от степени дифференциации почки и в целом зародыша в семени, которая у разных видов различна.

Вторым возрастным периодом является ювенильный период. Он характеризуется формированием вегетативных органов — листьев, стеблей, корней. В этот период наиболее четко в онтогенезе проявляются признаки, свойственные предковым формам. Морфологически в этот период все органы обычно резко отличаются от взрослых растений по своему строению и расположению.

Ювенильный период зачастую называют также виргинильным (девственным), отмечая тем самым неподготовленность растения к плодоношению.

Длительность ювенильного периода варьирует от нескольких недель у однолетних травянистых растений до нескольких лет у ряда многолетних трав и особенно древесных пород.

Третий возрастной период — половозрелость или зрелость растений — характеризуется формированием органов размножения, начиная от образования цветковых бугорков в зачаточном соцветии, дифференциации археспориальных клеток в тканях пыльника и семяпочки (материнских клеток микро- и макроспор) и кончая образованием зиготы.

С затуханием процессов, связанных с плодоношением и отмиранием основных вегетативных органов растения, начинается следующий, последний возрастной период онтогенеза растений — старение, завершающийся отмиранием растения.

У поликарпических многолетних форм процесс старения имеет ряд особенностей по сравнению с однолетними, так как отдельные побеги могут стареть и отмирать, а в организме в целом продолжаются процессы роста и развития новых побегов (за счет своих запасов и спящих почек).

10.3. Этапы органогенеза в онтогенезе высших растений

Фенологическими наблюдениями регистрируются основные фазы развития и роста растений, однако они не отражают всех сложных органообразовательных процессов, протекающих в межфазные периоды. Весь процесс органогенеза растений проходит этапами на базе определенных стадий развития и поэтому, установив, на какой стадии проходит тот или иной этап органогенеза, можно затем по состоянию этапов органогенеза со сравнительно высокой степенью достоверности судить об обратном, т. е. на какой стадии развития находится растение.

При всей специфичности формообразовательных процессов, свойственных каждому виду, роду и семейству растений, суще-

ствуют закономерности и последовательность органогенеза побегов и соцветий, общие для всех высших растений.

Ф. М. Куперман установила XII основных этапов органогенеза, общих для всех видов покрытосеменных растений (рис. 10.1). На I—II этапах органогенеза формируется вегетативная сфера побега.

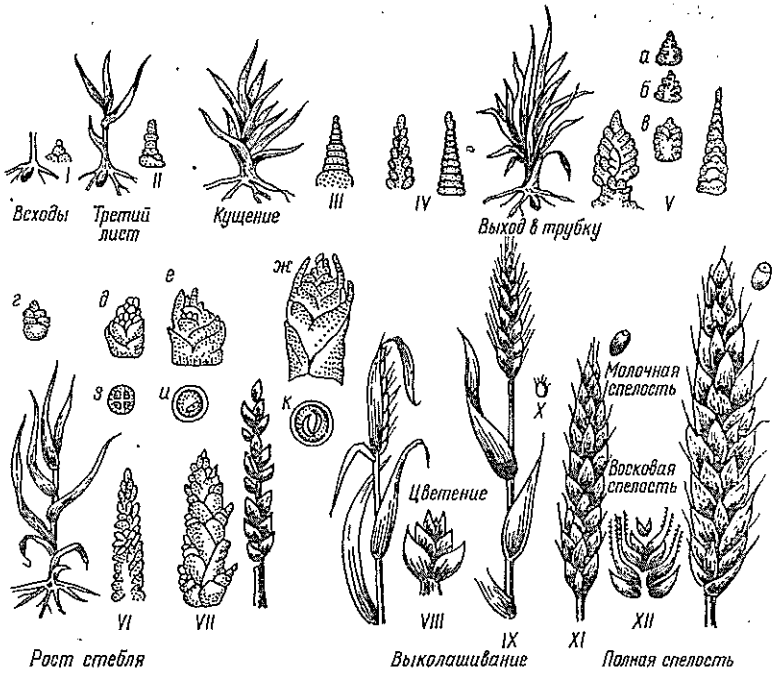


Рис. 10.1. Фазы развития и этапы (I—XII) органогенеза пшеницы (по Ф. М. Куперман, Е. И. Ржановой, 1963).

I — недифференцированный конус нарастания; II — дифференциация зачаточного стебля на узлы и междоузлия (начало формирования зачатков стеблевых листьев); III — сегментация верхней части конуса нарастания и формирование зачаточных кроющих листьев (брактей); IV — начало формирования колосковых бугорков; V — формирование цветков; VI — формирование пыльников (микроспорогенез) и пестика (мегаспорогенез); VII — формирование половых клеток (гаметогенез), рост в длину члеников колосового стержня, покровных органов колосков и цветков; VIII — выколашивание; IX — цветение, оплодотворение, образование зиготы (зиготогенез); X — формирование зерновки; XI — молочная спелость (накопление питательных веществ); XII — восковая спелость (перевод питательных веществ в запасные) и созревание семян; *а, б, в, г, д, е, ж* — последовательное формирование колоска; *з, и, к* — последовательное формирование пыльцы.

I *этап органогенеза.* У большинства сельскохозяйственных растений проходит в межфазный период прорастание семян — появление всходов. У многолетних поликарпических растений пазушные почки, из которых развиваются побеги второго, третьего и последующих порядков, также начинают свое развитие с I этапа. При этом в конусе нарастания происходит анатомическая диф-

ференциация первичной меристемы на основные ткани будущего стебля и листьев.

У основания конуса нарастания хорошо различаются зародышевые листья. Так, например, у яровой и озимой пшеницы имеется 3—5 зародышевых листьев, у кукурузы — 5—7, у подсолнечника — от 3 до 7 в зависимости от скороспелости сорта. На этом этапе конусы нарастания не только разных сортов, но и разных видов растений внешне очень сходны и различаются чаще размерами и степенью выпуклости первичного бугорка зачаточного стебля.

II *этап органогенеза.* Вслед за появлением всходов растения переходят во II этап органогенеза. Этот этап у большинства растений проходит в межфазный период всходы — выход в трубку или начало стеблевания, а у многолетних растений совпадает с процессом внутрипочечной дифференциации верхушечной и пазушных почек.

II этап органогенеза характеризуется дифференциацией конуса нарастания на узлы и укороченные междоузлия зачаточного стебля, а также формированием листовых зачатков. У многих видов растений предопределяется не только число узлов и междоузлий взрослого побега, но степень и характер кущения злаков и ветвления стебля у двудольных растений. У растений с незавершенным ростом побега (например, у многих видов бобовых и тыквенных растений) на II этапе длительно идут процессы дифференциации узлов и междоузлий стебля.

Число узлов и листьев стебля метамеров, закладывающихся на II этапе органогенеза, определяется видовыми (сортовыми) наследственными особенностями растений и условиями их развития в этот период. При благоприятных условиях погоды число метамеров стебля является типичным для каждого сорта или разновидности.

У большинства зерновых культур фаза выхода в трубку сопровождается переходом побега к III этапу органогенеза и почти сразу переходом к IV этапу.

На III и IV этапах органогенеза происходит дифференциация оси соцветия.

III *этап органогенеза.* Вытягивание и «сегментация» конуса нарастания — зачаточной оси соцветия. Чем благоприятнее условия для ростовых процессов на III этапе, тем больше формируется зачаточных члеников колоса, метелки, корзинки и тем длиннее будет колос, больше початок, шире диаметр корзинки подсолнечника. Так как III этап проходит быстро, то наблюдения за сегментацией конуса нарастания проводятся обычно без детального подсчета изменения числа сегментов.

IV *этап органогенеза.* Формирование так называемых лопастей соцветия, зачаточных веточек соцветия или колосковых бугорков у злаков.

Таким образом, на III и IV этапах органогенеза, которые у большинства растений проходят еще в начале выхода в трубку

или в начале стеблевания, уже предопределяются возможные величины соцветия, колоса, метелки, початка, корзинки и зонтика. Завершается IV этап органогенеза образованием цветковых недифференцированных бугорков (цветочной меристемы). Число цветковых бугорков в соцветии может продолжать нарастать на V этапе.

На V и VI этапах органогенеза формируются цветки и генеративные органы, археспорий, микроспоры (материнские клетки пыльцы) и макроспоры (зародышевые мешки).

V *этап органогенеза* характеризуется дифференциацией основных органов цветка. Вначале у большинства видов растений образуются зачатки покровных органов — чашечки и венчика и собственно генеративных органов — тычиночных и пестичных бугорков. В конце V этапа в них можно различить образование первичного археспория, затем наблюдается дальнейшая дифференциация клеток вторичного археспория.

VI *этап органогенеза*: Осуществляются процессы образования материнских клеток пыльцы (микроспор и микроспороцитов) и зародышевого мешка (макроспор и макроспороцитов). Этот этап характеризуется также началом усиленного роста покровных органов цветка.

На VII и VIII этапах органогенеза обычно завершается формирование гамет (половых клеток растения — пыльцы и яйцевого аппарата зародышевого мешка). Цветок способен к осуществлению основной функции — оплодотворению.

VII *этап органогенеза.* Происходит формирование мужского и женского гаметофита. Пыльцевые зерна значительно увеличиваются в размерах. Одновременно продолжается усиленный рост зародышевого мешка. Наблюдаются высокие темпы роста покровных органов цветка, защищающих на этом этапе генеративные органы, причем венчик растет быстрее, чем чашечка. Усиленно разрастаются вегетативные органы соцветия — членики колоса, веточки метелки, головка клевера, цветоложе корзинки; вытягиваются тычиночные нити, растет столбик пестика, увеличивается размер завязи.

VIII *этап органогенеза.* Завершаются процессы гаметогенеза и формирования полового аппарата растений — пыльцы и яйцеклетки. На этом этапе происходят формирование видимой части фазы бутонизации, выход венчика за пределы чашечки, усиленный рост междоузлия, несущего соцветие и цветоноса. Отмечаются фазы колошения (выметывания метелки) у пшеницы, ржи, ячменя и многолетних злаков, а также появления нитевидных столбиков из обертки початка у кукурузы (цветение).

IX *этап органозенеза.* Цветение оплодотворение и образование зиготы. Процессы цветения у цветковых растений, различаясь по своей продолжительности, способам опыления, типам оплодотворения, в конечном счете ведут к образованию зиготы.

X *этап органогенеза.* Усиленный рост плода, зародыша и эндосперма семени. На этом этапе очень рано начинается деление

зиготы, образование зародыша и заполнение клетками эндосперма зародышевого мешка.

На X *этапе органогенеза* зародыш начинает дифференцироваться на осевые органы и семядоли. Установлено, что к концу X этапа органогенеза семена многих видов растений (пшеницы, ржи, хлопчатника и др.) являются жизнеспособными; их можно проращивать на питательных средах, и при соблюдении определенных условий всхожесть семян достигает 90—100 %. В это время у зародыша хорошо различимы зародышевый корень с корневым чехликом и почка с несколькими зародышевыми листочками. Число и форма их определяются видовыми (сортовыми) особенностями семян.

На XI—XII этапах органогенеза завершается формирование плода и семян, идут процессы накопления питательных веществ и превращение их в запасные, специфические для каждого семейства , рода, вида (сорта).

XI *этап органогенеза.* Этот этап характеризуется ростом плодов в диаметре, резким изменением строения стенок завязи и накоплением питательных веществ. На этом этапе, когда в плодах и семенах накапливается большое количество воды, они достигают своего максимального размера: при этом в семенах в соответствии с их видовой и сортовой спецификой идет ряд сложных биохимических процессов. В то же время с завершением морфологической дифференциации их рост (плода, семени и зародыша) как в длину, так и в ширину резко замедляется.

XII *этап органогенеза* — созревание семян. Этот этап характеризуется превращением питательных веществ в запасные, резким обезвоживанием семян, переходом зародыша семени у некоторых видов в состояние временного вынужденного (у многих видов глубокого, органического) покоя. При этом от специфики запасных питательных веществ, накопленных в семенах, зависят не только видовые, но и сортовые особенности роста проростков на ранних этапах органогенеза. Эти особенности у огромного большинства видов растений оказывают влияние на рост растений на более поздних этапах. У некоторых крупносеменных видов растений дифференциация органов цветка (вплоть до VI этапа) может осуществляться при выращивании растений в темноте за счет запасных веществ семени (при условии нормального формирования материнского растения на XI—XII этапах). У большинства видов растений XII этап завершается полной спелостью семян.

Продолжительность этапов органогенеза, интенсивность органообразования и амплитуда варьирования продолжительности каждого этапа определяется ходом наследственной информации вида (сорта) и степенью оптимизации ведущих факторов, к которым адаптировано растение.

Такова общая характеристика основных этапов органогенеза большинства однолетних культур сельскохозяйственных растений.

У многолетних, поликарпических травянистых и древесных растений побеги разных лет жизни, так же, как и побеги разных

порядков на одном и том же растении, могут быть одновременно на разных этапах органогенеза. В то же время как одни побеги только еще закладываются в почке и находятся на I—II этапах органогенеза и из них затем вырастают ростовые побеги, много лет пребывающие на II этапе в вегетирующем состоянии, репродуктивные побеги быстро развиваются и достигают XII этапа органогенеза. Поэтому у многолетних растений принято различать систему побегов, а о состоянии развития растения в целом — судить по побегам, достигшим наиболее высокого уровня развития (этапов органогенеза).

Глава 11

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ РАСТЕНИЙ

11.1. Условия существования растений. Экологические факторы

Среда — одно из основных экологических понятий; под ним подразумевается комплекс природных тел и явлений, с которыми организм находится в прямых или косвенных взаимоотношениях. В научной литературе существует большое разнообразие производных этого слова в зависимости от смысловых акцентов и степени конкретизации понятия. Широко употребляется термин *внешняя среда*, определяемая как совокупность сил и явлений природы, ее вещество и пространство, любая деятельность человека, находящиеся вне рассматриваемого объекта или субъекта и необязательно непосредственно контактирующие с ним. Понятие *окружающая среда* идентично предыдущему, но подразумевает непосредственный контакт с объектами или субъектами. Различают также *природную среду* (совокупность естественных и измененных деятельностью человека факторов живой и неживой природы, проявляющих эффект воздействия на организмы), *среду абиотическую* (все силы и явления природы, происхождение которых прямо не связано с жизнедеятельностью ныне живущих организмов) и *среду биотическую* (силы и явления природы, обязанные своим происхождением жизнедеятельности ныне живущих организмов).

Существует и более конкретное пространственное понимание среды как непосредственного окружения организма — это *среда обитания*. Она включает в себя совокупность абиотических и биотических факторов отдельного организма или биоценоза в целом, влияющих на их рост и развитие, т. е. это часть природы, непосредственно окружающая данные живые организмы, все то, среди чего они живут. В земных условиях существуют четыре типа среды обитания для живых организмов: 1) водная, 2) наземная

(воздушная), 3) почвенная, 4) тело другого организма, используемое паразитами и полупаразитами.

Понятие «среда» не тождественно понятию «условия существования». *Условия существования* представляют собой сумму жизненно необходимых факторов среды, без которых живые организмы не могут существовать. Те элементы среды обитания либо условия, которые для конкретных видов или их сообществ небезразличны и вызывают у них приспособительные реакции, являются по отношению к организмам экологическими факторами (свет, вода, тепло, воздух, окружающие организмы и т. п.).

Экологические факторы делятся на *внешние (экзогенные)* и *внутренние (эндогенные)* по отношению к данной экосистеме. К внешним относятся факторы, действие которых в той или иной степени определяют изменения, происходящие в экосистеме, но сами они практически не испытывают ее обратного воздействия. Таковыми являются солнечная радиация, интенсивность атмосферных осадков, атмосферное давление, скорость ветра, скорость течения и т. д. В отличие от внешних внутренние факторы соотносятся со свойствами самой экосистемы (или отдельных ее компонентов) и в действительности образуют ее состав. К внутренним факторам относятся численность и биомасса популяций, запасы различных веществ, характеристики приземного слоя воздуха, водной или почвенной массы и т. д.

Второй распространенный классификационный принцип — это деление факторов на биотические и абиотические. К первым относятся разнообразные переменные, характеризующие свойства живого вещества, а ко вторым — переменные, характеризующие свойства неживых компонентов экосистемы и ее внешней среды.

В экологической литературе широко используется классификация факторов в основном по отличительным свойствам экосистемы и внешней среды, специфическое влияние которых они характеризуют. Например, среди экзогенных различают метеорологические, агрометеорологические, климатические, геологические, гидрологические, миграционные (биогеографические), антропогенные факторы, а среди эндогенных — микрометеорологические (называемые также микро- или биоклиматическими), почвенные (эдафические), водные (относящиеся к водной массе) и биотические (характеризующие свойства растений, животных и микроорганизмов).

Среди экологических факторов особая роль принадлежит суммативным (аддитивным) факторам, характеризующим численность, биомассу или плотность популяций организмов, а также запасы или концентрацию различных форм вещества и энергии, временные изменения которых подчиняются законам сохранения. Эти факторы называются *ресурсами.* (Например, говорят о ресурсах тепла, влаги, органического и минерального питания и т. д.). В отличие от них такие факторы, как интенсивность и спектральный состав радиации, уровень шума, окислительно-восстановительный потенциал, скорость ветра или течения, размер

и форма пищи и т. д., которые также сильно влияют на организмы, не относятся к категории ресурсов, так как к ним неприменимы законы сохранения.

Число всевозможных экологических факторов представляется потенциально неограниченным. Однако по степени воздействия на организмы они далеко не равнозначны, вследствие чего в экосистемах разного типа некоторые факторы выделяются как наиболее существенные, или императивные. В наземных экосистемах из числа экзогенных факторов к ним, как правило, относятся интенсивность солнечной радиации, температура и влажность воздуха, интенсивность атмосферных осадков, скорость ветра, скорость заноса спор, семян и других зародышей или притока взрослых особей разных видов из других экосистем, а также всевозможные формы антропогенного воздействия. Эндогенные императивные факторы в наземных экосистемах представлены следующими свойствами:

1) микрометеорологическими — освещенность, температура и влажность приземного слоя воздуха, содержание в нем O_2 и CO_2;

2) почвенными — температура, влажность, аэрация почвы, физико-механические свойства, химический состав, содержание гумуса, доступность элементов минерального питания, окислительно-восстановительный потенциал;

3) биотическими — плотность популяций разных видов, их возрастной и половой состав, морфологические, физиологические и поведенческие характеристики.

Каждый экологический фактор можно представить математической переменной, принимающей значения на некоторой шкале. Экологические факторы ранжируются по силе их относительного воздействия на организм, популяцию, сообщество. Если значение первого по силе воздействия фактора измеряется переменной x_1, второго — переменной x_2, ..., n-го — переменной x_n и т. д., то весь комплекс экологических факторов представляется последовательностью $(x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots)$. Для характеристики множеств всевозможных комплексов экологических факторов, получающихся при различных значениях каждого из них, вводится понятие пространства экологических факторов, или, другими словами, экологического пространства.

Пространством экологических факторов назовем евклидово пространство, координаты которого сопоставлены ранжированным экологическим фактором. Для обозначения экологического пространства используем запись вида

$$\mathrm{E} = \{(x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots)\}, \qquad (11.1)$$

означающую, что множество E состоит из всевозможных последовательностей вида $(x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots)$.

Таким образом, каждой конкретной комбинации значений экологических факторов $x_1 = x_1^*$, $x_2 = x_2^*$, ..., $x_n = x_n^*$, ... соответствует точка экологического пространства E с координатами $(x_1^*, x_2^*, \ldots, x_n^*, \ldots)$.

11.2. Закон оптимума, лимитирующие факторы и взаимодействие факторов среды

Для количественной характеристики воздействия экологических факторов на показатели жизнедеятельности растений и животных, такие, как скорость роста, развития, плодовитость, продолжительность жизни, смертность, питание, метаболизм, двигательная активность и т. д. (пусть они нумеруются индексом $k = 1, \ldots, m$), вводится понятие о функциях отклика. Значения, принимаемые показателем с номером k на определенной шкале при

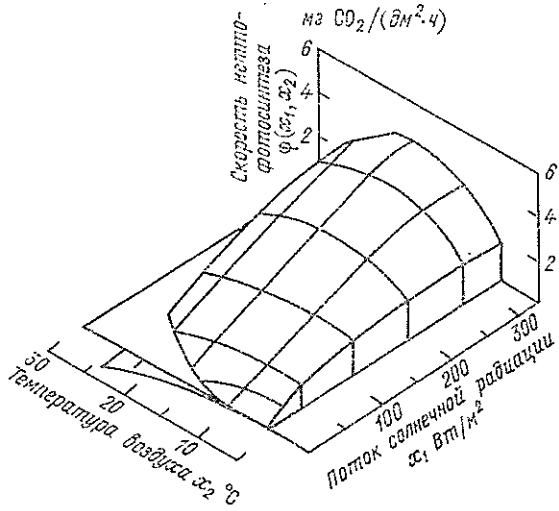


Рис. 11.1. Функция отклика $\varphi(x_1, x_2)$ скорости нетто-фотосинтеза вереска (*Calluna vulgaris*) на интенсивность солнечной радиации x_1 и температуру воздуха x_2 (Grace, Marks, 1971).

варьировании экологических факторов, как правило, ограничены снизу и сверху. Обозначим через $I^k = [\underline{C}_k, \bar{C}_k]$ отрезок на шкале измерений, ограниченный минимально $\underline{C}_k$ и максимально $\bar{C}_k$ возможным значением k-го показателя.

Функцией отклика k-го показателя на совокупность экологических факторов $(x_1, x_2, \ldots, x_n, \ldots)$ называется функция φ^k, отображающая экологическое пространство E на шкалу I^k:

$$\varphi^k: \mathrm{E} \to I^k, \tag{11.2}$$

которая каждой точке $(x_1, \ldots, x_n, \ldots)$ пространства E сопоставляет число $\varphi^k[x_1, \ldots, x_n, \ldots)$ на шкале I^k.

Например, обозначив через φ_k скорость нетто-фотосинтеза листьев вереска (*Calluna vulgaris*) у основного продуцента в экосистемах вересковых болот Великобритании — и обратившись к рис. 11.1, где изображена поверхность отклика величины φ^k на

интенсивность солнечной радиации (фактор x_1) и температуру воздуха (фактор x_2), мы видим, что при небольших значениях солнечной радиации (менее 50 Вт/м²) и высоких температурах воздуха (25—30 °С) нетто-фотосинтез отрицателен (—2 мг CO_2/(дм²·ч)). Максимальный нетто-фотосинтез (5 мг CO_2/(дм²·ч)) наблюдается при значениях солнечной радиации около 300 Вт/м² и температурах воздуха 15—20 °С. Таким образом, областью значений функции $\varphi^k(x_1, x_2)$ является интервал $I_k = [-2, 5]$ мг CO_2/(дм²·ч).

Для каждой допустимой комбинации радиации и температуры (x_1, x_2) функция $\varphi^k(x_1, x_2)$ показывает соответствующее этому сочетанию факторов значение скорости нетто-фотосинтеза.

Хотя число экологических факторов потенциально неограничено и, следовательно, бесконечны размерность экологического пространства **E** и число аргументов функции отклика $\varphi^k(x_1, x_2, \ldots)$, в действительности удается выделить конечное число факторов (обозначим его через n), с помощью которых можно объяснить заданную часть от полного варьирования функции отклика. Например, первые три фактора могут объяснить 80 % общего варьирования показателя φ^k, первые 5 факторов — 95 %, первые 10—99 % и т. д. Остальные, не вошедшие в число указанных факторов, не оказывают определяющего воздействия на изучаемый показатель. Их влияние можно рассматривать как некоторый экологический шум, накладывающийся на действие императивных факторов.

Это позволяет от пространства E с бесконечным числом измерений перейти к его n-мерному подпространству E_n и рассматривать сужение функции отклика φ^k на это подпространство:

$$\hat{\varphi}^k\colon E_n \to I^k. \tag{11.3}$$

При этом значения функций φ^k и $\hat{\varphi}^k$ связаны соотношением

$$\varphi^k(x_1, \ldots, x_n, x_{n+1}, \ldots) = \hat{\varphi}^k(x_1, \ldots, x_n) + E_{n+1}, \tag{11.4}$$

где E_{n+1} — случайный «экологический шум», вносящий незначительные возмущения в действие императивных факторов. Поэтому при анализе реальных ситуаций следует рассматривать только функции от n переменных, считая, что вклад n факторов достаточно велик, чтобы определить условия существования особей рассматриваемой популяции.

В типичных случаях график частной функции отклика на изменение фактора x_i $(i=1, \ldots, n)$ имеет форму выпуклой кривой, монотонно возрастающей от минимального значения фактора x_i (нижний предел *толерантности*[1]) до максимального (или плато максимальных значений) при оптимальных значениях факторов x_i^0 и монотонно убывающей, с приближением x_i к максимальному значению $\bar{x}_i$ (верхний предел толерантности).

[1] Способность организмов выносить отклонения факторов среды от оптимальных для них условий.

Диапазон действия (или *зона толерантности*) экологического фактора ограничен соответствующими крайними пороговыми значениями (точки минимума и максимума) данного фактора, при которых возможно существование организма (рис. 11.2). Точка на оси абсцисс, соответствующая наилучшим показателям жизнедеятельности организма, означает оптимальное значение фактора — это точка оптимума. Обычно определить оптимальное значение фактора с достаточной точностью трудно, в связи с чем принято говорить о зоне оптимума или в более широком значении — зоне комфорта. Точки оптимума, минимума и максимума составляют три основные точки, определяющие возможность реакции организма на данный фактор. Крайние участки кривой, выражающие состояние угнетения при недостатке или избытке фактора, называют зонами минимума и максимума; им соответствуют минимальные и максимальные значения фактора. Вблизи критических точек лежат сублетальные значения фактора, а за пределами зоны толерантности — летальные.

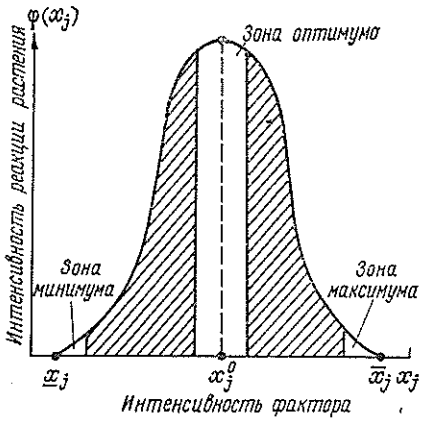


Рис. 11.2. Схема действия экологического фактора на растение (по К. М. Ситнику, А. В. Брайону, А. В. Городецкому, 1987).

$\underline{x}_j$ — точка минимума, x_j^0 — точка оптимума, $\overline{x}_j$ — точка максимума.

Условия среды, в которых какой-либо фактор (или совокупность факторов) выходит за пределы зоны комфорта и оказывает угнетающее действие, в экологии часто называют *экстремальными* (крайними, граничными, трудными). Это выражение характеризует не только экологические ситуации, обусловленные критическими значениями температуры, солености, света, влажности и т. п., но и такие местообитания, где условия близки к пределам возможности существования организма (полярные зоны, высокогорья, пустыни и т. п.).

Рассмотренные выше закономерности воздействия экологических факторов на живые организмы и характер ответных реакций последних известны в литературе как *закон оптимума.*

Необходимо подчеркнуть, что ширина интервала толерантности, положение на нем точки оптимума, а также форма и масштаб функции отклика для данного фактора могут значительно изменяться в зависимости от значений, принимаемых другими факторами (случай взаимодействия). При этом можно выделить два взаимосвязанных вопроса:

1) какой из факторов имеет бóльшее относительное влияние

на изменение функции отклика $\varphi\ (x_1, \ldots, x_n)$ при данной комбинации экологических факторов $(x_1^{(1)}, \ldots, x_n^{(1)})$?

2) сохраняется ли относительная важность факторов при переходе к другим точкам пространства экологических факторов, достаточно отличным от данной точки $(x_1^{(1)}, \ldots, x_n^{(1)})$, например к точке $(x_1^{(2)}, \ldots, x_n^{(2)})$?

Ответ на первый вопрос впервые был дан Ю. Либихом (1840), сформулировавшим применительно к компонентам минерального питания растений *закон минимума*, согласно которому величина урожая определяется количеством в почве того из элементов питания, потребность в котором удовлетворена меньше всего, иными словами, данный элемент находится в минимуме. Ф. Блекман (1905) обобщил этот закон для совокупности всех экологических факторов, влияющих на жизнь растений, и назвал его *законом лимитирующих факторов*.

Ограничивающее значение имеют не только те факторы, которые находятся в минимуме. Существование организма может определяться не минимальным значением, а, наоборот, избытком любого из факторов (например, таких факторов, как тепло, свет, вода). Впервые представление о лимитирующем влиянии максимального значения фактора наравне с минимальным было высказано В. Шелфордом (1913), который сформулировал *закон толерантности*. Согласно этому закону, существование вида определяется как недостатком, так и избытком любого из ряда экологических факторов, имеющих уровень, близкий к пределу толерантности (переносимости) данного организма. В связи с этим все факторы, уровень которых приближается к пределам выносливости организма или превышает ее, называются *лимитирующими факторами*.

Лимитирующим будем считать такой фактор, по которому для достижения заданного (достаточно малого) относительного изменения функции отклика требуется минимальное относительное изменение этого фактора. Выберем достаточно малое положительное число δ. Для каждого j-того фактора $(j = 1, \ldots, n)$ рассмотрим величину

$$\Delta\varphi_j = \varphi(x_1^{(1)}, \ldots, x_j^{(1)} + \delta/2x_j^{(1)}, \ldots, x_n^{(1)}) - \varphi(x_1^{(1)}, \ldots, x_j^{(1)} - \delta/2x_j^{(1)}, \ldots, x_n^{(1)}). \quad (11.5)$$

Тогда в точке $(x_1^{(1)}; \ldots, x_{(n)}^{(1)})$ лимитирующим будет фактор x_l, которому соответствует максимальное по абсолютной величине приращение функции отклика $\Delta\varphi_j$:

$$|\Delta\varphi_l| = \max_{l=1, \ldots n} \{|\Delta\varphi_j|\}, \quad 1 \leqslant l \leqslant n. \quad (11.6)$$

Разработка второго вопроса связана с именем А. Митчерлиха и его последователя Б. Бауле. Изучая влияние физических (осве-

щенность, температура и влажность почвы и др.) и химических (содержание элементов минерального питания, кислотность и т. д.) факторов на урожайность сельскохозяйственных культур в условиях Восточной Пруссии, А. Митчерлих (1909) установил закон физиологических взаимосвязей, который был позднее переименован Б. Бауле (1918) в *закон совместного действия факторов.* Закон выражался в том, что величина урожая φ зависела не только от какого-нибудь одного (пусть даже лимитирующего) фактора, но от всей совокупности факторов одновременно, т. е.

$$\varphi_k = \varphi(x_1, \ldots, x_n).$$

На рис. 11.3 представлены графики частных функций отклика урожая зерновых в зависимости от общего запаса азота в почве x_i = (азот почвы + азот удобрений).

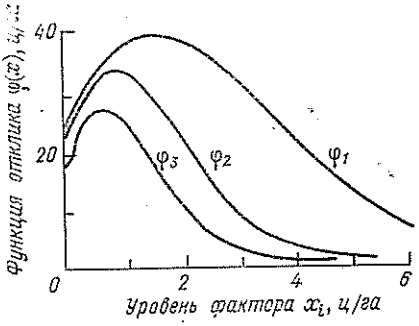


Рис. 11.3. Зависимость относительной урожайности пшеницы φ_1, овса φ_2 и ржи φ_3 от обеспеченности почвы азотом x_i (Mitscherlich, 1948).

Исходя из разработок Митчерлиха и пренебрегая отрицательным действием повышенных концентраций удобрений, Бауле предложил выражение, описывающее зависимость функции отклика φ от всей совокупности экологических факторов одновременно:

$$\varphi(x_1, \ldots, x_n) = A_{\max}(1 - 10^{-c_1 x_1}) \cdot \ldots \cdot (1 - 10^{-c_n x_n}), \quad (11.7)$$

где $A_{\max}$ — максимальный урожай зерна пшеницы, возможный при оптимальных условиях.

Для коэффициентов c_i, которые были названы коэффициентами действия соответствующих факторов, Митчерлих приводит оценки (табл. 11.1), полученные на основе многолетних опытов.

В дальнейшем стало очевидным, что формула Митчерлиха — Бауле (11.7) описывает лишь один сравнительно узкий класс функций отклика, монотонно и с насыщением возрастающих по каждому из факторов. Значение этой формулы состоит в том, что она стала первым математическим выражением явления взаимодействия факторов.

Экологические факторы внешней среды воздействуют на живой организм одновременно и совместно, причем действие одного из них в определенной мере зависит от количественного выражения других факторов. Эта закономерность получила название

Таблица 11.1

Коэффициенты действия изученных факторов (по Митчерлиху, 1948)

Номер	Фактор x_i	Коэффициент действия c_i
1	Солнечная радиация	2,0 на единицу полной солнечной радиации
2	Температура почвы	0,01 на 1 °С
3	Атмосферные осадки	0,003 на 1 мм осадков
4	Азот	0,122 на 1 ц N/га
5	Фосфор	0,6 на 1 ц P_2O_5/га
6	Калий	0,4 на 1 ц K_2O/га
7	Магний	2,0 на 1 ц MgO/га
8	Сера	15,0 на 1 ц SO_4/га

взаимодействия экологических факторов. Иногда недостаток одного фактора частично компенсируется усилием другого; явление частичной взаимозаменяемости действия экологических факторов называется *эффектом компенсации.* Например, в пустынях недостаток осадков восполняется повышенной относительной влажностью воздуха в ночное время; в Арктике продолжительный световой день летом компенсирует недостаток тепла.

Но ни один из необходимых организму экологических факторов не может быть полностью заменен другим. Фототрофные растения не могут произрастать без света даже при самых оптимальных режимах температуры или питания. Поэтому, если значение хотя бы одного из необходимых экологических факторов выходит за пределы диапазона толерантности (ниже минимума или выше максимума), то существование организма становится невозможным.

В комплексном действии среды значение отдельных экологических факторов неравноценно. Среди них выделяют ведущие (главные) и второстепенные (сопутствующие, фоновые). Ведущими являются те факторы, которые необходимы для жизнедеятельности организма. Для разных видов требуются обычно различные ведущие факторы, даже если организмы живут в одном месте. Наряду с этим в разные периоды органогенеза наблюдается смена ведущих факторов, что особенно характерно для растительных организмов.

11.3. Температурные пределы жизни растений. Суммы температур

Достаточное количество тепла является основной предпосылкой для жизни растений. Для каждого отдельного этапа жизненного цикла существуют определенные температурные границы и некоторый оптимум, после перехода через который интенсивность процессов жизнедеятельности снижается. С гармоничным взаимодействием всех этих процессов и с нарушениями их коор-

динации, возникающими при слишком низкой или слишком высокой температуре, связаны характерные для каждого вида и каждой фазы развития температурные пределы, которые, однако, не являются константами, а могут сдвигаться в пределах генетически зафиксированной нормы реакции в результате приспособления к условиям среды. Наземные листостебельные растения растут, как правило, в широком температурном диапазоне — они эвритермны. Их жизненный интервал в активном состоянии простирается в большинстве случаев от —5 до примерно 55 °С, т. е. охватывает 60 °С, причем между 5 и 40 °С эти растения продуктивны.

Установлены определенные границы функционирования и температурные потребности различных видов растений.

Температурные границы жизни. Это самые низкие и самые высокие температуры, которые выдерживает данное растение. При этом надо различать латентные[1] и летальные границы. После перехода через латентную границу активные жизненные процессы обратимо снижаются до минимального уровня и протоплазма клеток впадает в тепловое или холодовое оцепенение. При достижении летальной границы возникают необратимые повреждения и жизнь прекращается (рис. 11.4).

Температурный диапазон для достаточного баланса веществ и оптимум для фотосинтеза и дыхания. Температурные пределы для фотосинтетического усвоения углерода у большинства растений в состоянии активной вегетации всего лишь примерно на 5 °С уже, чем интервал между холодовым повреждением и гибелью листьев от перегрева (см. рис. 11.4). Некоторые C_4-растения могут поглощать CO_2 даже в крайних участках своего жизненного диапазона. В отличие от этого оптимальный температурный диапазон для нетто-фотосинтеза и прироста сухого вещества у большинства видов не шире 10—15 °С. Быстрый рост побегов также возможен лишь при температурах в пределах 10—20 °С, однако температурный оптимум для этого процесса лежит, как правило, несколько выше, чем оптимум для нетто-фотосинтеза. Для роста побегов растений умеренной зоны наиболее благоприятна температура от 15 до 25 °С, а для растений тропиков и субтропиков — от 30 до 40 °С. Рост побегов большинства растений умеренной зоны начинается уже при температуре на несколько градусов выше нуля, а у тропических растений — только при 12—15 °С. У растений холодных областей, раноцветущих видов и горных растений процесс фотосинтеза отмечается уже при температуре около 0 °С (В. Лархер, 1978).

Температурные границы для роста корней в длину в большинстве случаев очень широки. Древесные растения умеренной зоны имеют нижний предел между 2 и 5 °С; поэтому не удивительно, что корни начинают расти еще до распускания почек и что их рост

[1] Латентная граница — скрытая (внешне не проявляющаяся) граница физиологической реакции.

продолжается до поздней осени. Растения теплых стран предъявляют более высокие требования. Температурные пределы для роста могут значительно изменяться в зависимости от температурной адаптации, фазы развития, сезона и времени суток. В чередовании дневной и ночной температур проявляется суточная ритмичность температуры (*термопериодизм*). Растения континентальных областей, для которых характерен четкий суточный ход температуры,

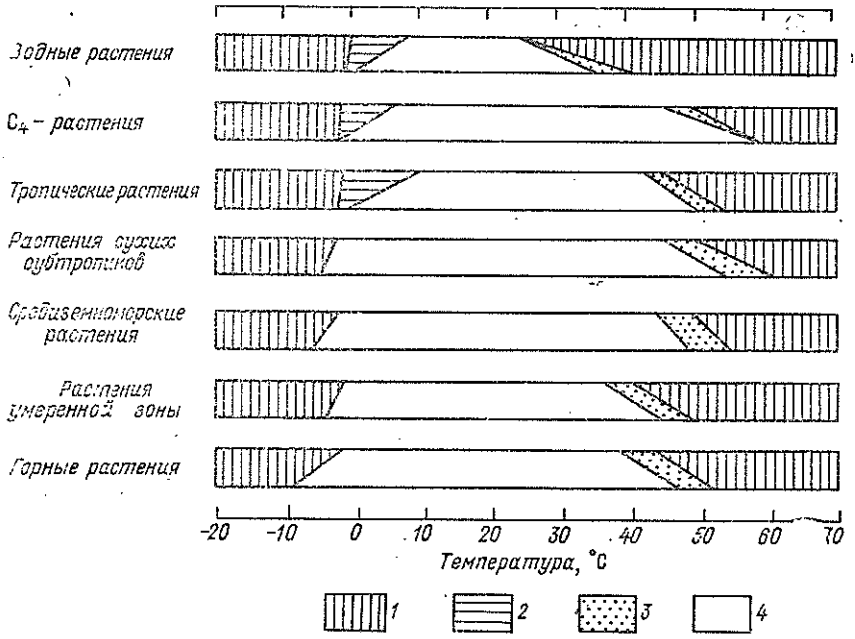


Рис. 11.4. Температурные границы жизни и нетто-фотосинтеза растений в состоянии активной вегетации (Wagner, 1975).

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.

развиваются лучше, если ночью на 10—15 °С холоднее, чем днем. Большинство растений умеренной зоны лучше развиваются при разности температур дня и ночи 5—10 °С, тропические растения — при еще меньшей разности (около 3 °С).

Температурные границы и потребность в тепле для репродуктивных процессов. Для сохранения популяции и расселения вида недостаточно того, чтобы отдельные растения переживали экстремальные ситуации и более или менее длительно вегетировали; необходимы также соответствующие условия для образования цветков, созревания и прорастания семян. Семена тропических

растений наибольший процент прорастания дают при температуре от 15 до 30 °С, семена растений умеренной зоны — от 8 до 25 °С, семена горных растений — от 5 до 30 °С. Скорость прорастания увеличивается с повышением температуры.

Процесс цветения начинается и проходит только в узком температурном интервале, а для развития и распускания цветков благоприятны уже иные температуры. Озимые однолетние и двулетние растения нуждаются для нормального цветения в холодном времени года (это относится и к почкам многих плодовых деревьев). Например, цветение персика наступает только в том случае, если почки в течение нескольких недель подвергались воздействию температур в пределах —3... 13 °С; наиболее оптимальная температура от 3 до 5 °С (яровизация). Если холодный период слишком короткий, или прерывается повышением температуры воздуха выше 15 °С, то цветение отсутствует.

Для созревания плодов и семян требуется больше тепла, чем для окончания роста побегов и корней.

Изучая приспособление растений к термическому режиму, принято различать: 1) характерную температурную кривую развития; 2) определенный уровень температур, в пределах которого идет развитие растений; 3) общую сумму тепла, необходимого для всего периода вегетации в связи с его длительностью.

По отношению к температурной кривой развития растения делятся на несколько групп.

К первой группе относятся все растения тропического происхождения, развивающиеся в условиях ровного хода температуры и предъявляющие во все периоды своего развития почти одинаковые требования к температуре. Ко второй группе — зимующие двулетние и озимые растения, развивающиеся в умеренном поясе при понижающейся температуре осенью, но заканчивающие вегетацию при повышающихся температурах весной и летом. В субтропическом поясе эти растения проходят часть своего развития в холодную половину года, так как они требуют относительно низких температур перед формированием органов плодоношения. К третьей группе относятся яровые растения умеренных и субтропических широт, которые начинают вегетировать при низких температурах, но для прохождения последующих этапов развития требуют более высоких температур. Эти растения сформировались либо в странах умеренного пояса, где имеется только летний период вегетации, либо в высокогорных районах субтропической зоны.

По уровню температур начала и конца активной вегетации почти все растения умеренных и субтропических широт можно разделить на четыре группы. К первой группе относятся растения, малотребовательные к теплу и начинающие вегетировать при температуре около 5 °С (зимующие злаки, многолетние травы, плодовые деревья), ко второй — растения, требующие умеренного тепла и вегетирующие при температуре выше 10 °С (яровые хлеба и др.), к третьей — теплолюбивые растения, произрастающие при температуре выше 15 °С, — требовательные к теплу растения умеренного

пояса и растения летнего периода субтропического пояса (хлопчатник, рис и др.), к четвертой — весьма теплолюбивые растения, активно развивающиеся при температуре выше 20 °С, — растения тропического пояса (сахарный тростник, финиковая пальма и др.).

Растения характеризуются определенными биологическими минимумами, максимумами и оптимумами температуры. При температурах выше максимума или ниже минимума для данного этапа (стадии) развитие либо сильно замедляется, что приводит к ряду аномалий, либо прекращается (табл. 11.2).

Таблица 11.2

Характеристика растений полевой культуры в отношении требований к теплу в разные периоды вегетации (биологический минимум температуры, °С) (по В. Н. Степанову, 1948)

Культура	Появление всходов и формирование вегетативных органов	Формирование органов плодоношения	Культура	Появление всходов и формирование вегетативных органов	Формирование органов плодоношения
Зерновые хлеба			*Зернобобовые*		
Пшеница яровая	4—5 °С	10—12 °С	Чечевица	4—5 °С	12—15 °С
Ячмень	4—5	10—12	Люпин	5—6	8—10
Овес	4—5	10—12	Соя	10—11	15—18
Просо	10—11	12—15	Фасоль	12—13	15—18
Кукуруза	10—13	12—15	*Масличные и прядильные*		
Сорго	12—13	15—18			
Рис	14—15	18—20	Рапс яровой	2—3	8—10
Гречиха	7—8	10—12	Подсолнечник	7—8	12—15
Зерновые бобовые			Лен масличный	5—6	10—12
			Лен-долгунец	5—6	10—12
Вика	4—5	10—12	Конопля	2—3	10—12
Горох	4—5	8—10	Хлопчатник	14—15	15—20

Показателем потребности растений в тепле при прочих относительно равных условиях может служить и *сумма средних суточных температур* за весь вегетационный период и за отдельные периоды (фазы, этапы). Она является интегральным показателем — произведением продолжительности вегетационного периода и средней температуры за период. Способ суммирования средних суточных температур периода вегетации был введен Реомюром (1734). Позднее Буссенго предложил исчислять не средние суточные температуры выше 0 °С, а биологически активные, которые могут действовать на растения, т. е. температуры выше определенного биологического минимума.

Для определения теплообеспеченности культуры используют суммы активных и эффективных температур. *Сумма активных температур* — средняя суточная температура воздуха или почвы после ее перехода через биологический минимум, установленный

для определенного периода развития растения. *Сумма эффективных температур* — средняя суточная температура воздуха или почвы, уменьшенная на величину биологического минимума, установленного для определенного периода развития растения. Так как биологический минимум у разных растений, а порой и сортов одного и того же вида различен, то и эффективная температура при одной и той же средней суточной температуре воздуха различна для разных культур. Растение развивается только в том случае, если средняя суточная температура превышает его биологический минимум. Правда, в ранневесенний период бывают случаи, когда дневные положительные температуры способствуют развитию растений несмотря на то, что средняя суточная температура ниже биологического нуля за счет ночного выхолаживания. В этих случаях необходимо рассчитывать эффективную температуру по данным срочных наблюдений и полученную сумму делить на количество сроков, в которые температура воздуха была выше биологического минимума для данного растения.

Исследованиями Ю. И. Чиркова (1986) установлена некоторая изменчивость сумм эффективных температур межфазных периодов в зависимости от уровня температуры воздуха. Обнаружено, что при возрастании средних суточных температур до 18—20 °С и дальнейшем их увеличении суммы эффективных температур также начинают возрастать. Это объясняется тем, что скорость развития растений возрастает пропорционально повышению температуры среды лишь в пределах от биологического минимума температуры до средней суточной температуры 10—20 °С (для многих культур умеренного пояса), а при дальнейшем повышении температуры развитие растений уже не ускоряется, оно может даже замедлиться. Температуры, не ускоряющие развитие растений, были названы *балластными*.

Если эффективные температуры суммируются при средней суточной температуре воздуха выше 20 °С, то суммы эффективных температур возрастают за счет балластных температур. Поэтому при расчете сумм эффективных температур, характеризующих потребность растений в тепле, необходимо вводить поправку на балластные температуры, т. е. учитывать, наряду с нижним пределом эффективной температуры развития растений, также и ее верхний предел.

Суммы активных и эффективных температур имеют экологическое значение, так как выражают связь растения со средой обитания.

Для уточнения термических условий, необходимых растениям, используются также суммы дневных и суммы ночных температур. Средняя суточная температура и ее суммы нивелируют термические различия суточного хода температуры воздуха. Исследования, проведенные А. И. Руденко и З. А. Мищенко, показали, что для более точной оценки влияния температуры воздуха на растения необходим раздельный учет средних дневных и средних ночных температур воздуха и их сумм.

Суммы температур, характеризующие скорость развития растений, зависят от широты места, а следовательно, и от продолжительности светового дня. С увеличением последней сумма необходимых для развития растений температур уменьшается; для короткодневных растений (южные сорта проса, кукурузы и др.) она, наоборот, увеличивается.

Сумма температур зависит и от высоты над уровнем моря. По мере увеличения высоты над уровнем моря увеличивается продолжительность дня для ранних стадий развития — следствие более поздних сроков сева. Сумма активных температур при этом уменьшается аналогично изменению сумм температур при перенесении растений с юга на север.

11.4. Классификация растений по их отношению к световому фактору. Фотопериодизм

По отношению к свету растения подразделяются обычно на три группы:

1. *Световые* (*светолюбивые*) *растения* (*гелиофиты*). Оптимальная их жизнедеятельность наблюдается в условиях полного солнечного освещения. Они или совсем не переносят, или переносят очень плохо даже незначительное затенение. Типичными гелиофитами являются растения открытых местообитаний: степные и луговые злаки, растения тундр и высокогорий, прибрежные и полупогруженные растения, эфемеры и эфемероиды, большинство культурных растений открытого грунта, многие сорняки.

2. *Теневыносливые растения.* Они характеризуются широкой экологической амплитудой по отношению к световому фактору. Эти растения лучше растут и развиваются при полной освещенности, однако способны адаптироваться и к условиям разного уровня затенения. К этой группе растений относится ряд древесных пород, большинство видов кустарников и травянистых растений лесной зоны, а также многие комнатные растения.

3. *Теневые растения* (*сциофиты*). Растения этой группы произрастают только в затененных местах и в условиях сильной освещенности никогда не растут. В процессе эволюции эти растения адаптировались к условиям, свойственным нижним затененным ярусам сложных растительных сообществ темнохвойных и широколиственных лесов, например, кислица обыкновенная (*Oxalis acetesella L*), тропических влажных лесов и т. п. Тенелюбивость этих растений обычно сочетается с высокой потребностью в воде.

Регулярность и неизменная повторяемость продолжительности дня и ночи из года в год позволили организмам в ходе эволюции выработать ритмичные изменения важнейших жизненных процессов и свойств их организма — так называемый *фотопериодизм.* Фотопериодизм управляет ритмичностью суточной и сезонной жизнедеятельности организмов, т. е. всеми метаболическими процессами, связанными с ростом, развитием и размножением растений и животных.

У растений фотопериодический эффект проявляется в согласовании периодов цветения и созревания плодов с периодом наиболее активного фотосинтеза.

В зависимости от фотопериодической реакции растений, которая определяется продолжительностью светового периода, необходимой для перехода их к цветению, выделяют: *растения короткого дня*, у которых переход к цветению происходит при продолжительности светового периода менее 12 ч за сутки (конопля, капуста, перилла, хризантема, амарант и др.); *растения длинного дня*, для цветения и дальнейшего развития которых необходима продолжительность непрерывного светового периода более 12 ч за сутки (лен, лук, овес, морковь, пшеница, шпинат и др.); *фотопериодически нейтральные растения*, у которых развитие генеративных органов наступает при различной продолжительности светового периода (кроме очень короткой, означающей для растения световое голодание). К этой группе относятся гречиха, виноград, бархатцы, одуванчик, сирень, флоксы и др.

Растения длинного дня характерны преимущественно для северных широт, растения короткого дня — для южных. Растения длинного дня успевают дать урожай даже в условиях короткого северного лета. Накопление биомассы происходит в течение довольно продолжительного светового периода. Так, на широте Москвы она составляет 17 ч за сутки, на широте Архангельска — более 20 ч за сутки. В тропическом поясе, где продолжительность дня и ночи мало изменяется в течение года, фотопериод не может служить фактором, определяющим периодичность биологических явлений. Его заменяет чередование сухого сезона и сезона дождей.

11.5. Классификация растений по их потребности в воде

В настоящее время наиболее распространенной классификацией экологических групп растений по их отношению к водному фактору является классификация А. П. Шенникова с теми или иными модификациями. По потребности растений в воде различают следующие экологические группы:

1. Гидрофиты — растения, произрастающие и свободно плавающие в водной среде или укорененных на дне водоемов, например, водяная лилия (*Nymphaea alba L*).

2. Гигрофиты — сухопутные растения, жизненный цикл которых осуществляется в условиях достаточного водоснабжения и высокой влажности воздуха, в связи с чем они слабо приспособлены к изменениям водного режима. Наиболее типичными гигрофитами являются обитатели влажной и теплой атмосферы тропических лесов (эпифитные папоротники, орхидеи), а также светолюбивые растения болотистых и переувлажненных почв.

3. Ксерофиты — растения, которые в силу своих анатомических, морфологических и физиологических особенностей приспособились к значительному постоянному или временному недостатку

влаги в почве или воздухе. Приспособления к таким условиям объединяют в три категории: а) ограничивающие испарение, б) усиливающие добывание воды при ее недостатке в почве, в) позволяющие создавать запасы воды во время длительного перерыва в водоснабжении.

Сокращение внеустьичной непродуктивной транспирации достигается частичной редукцией листьев, развитием толстой кутикулы и многочисленных волосков, углублением устьиц, свертыванием листьев устьичной стороной внутрь, увеличением количества склеренхимных элементов и другими приспособительными чертами, объединенными термином ксероморфные признаки.

Повышенная способность многих ксерофитов добывать воду связана с деятельностью их корневых систем. Одни растения формируют глубокую малоразветвленную систему корней, достигающих водоносных горизонтов или их капиллярной каймы — это саксаул (*Haloxylon aphyllum* (*Minkw*) *Hjin*), верблюжья колючка (*Alhagi camelorum Fisch*); у других организация корневой системы направлена на густое пронизывание многочисленными разветвлениями значительного объема почвы (дерновинные злаки); у третьих — корневая система поверхностного типа, которая способна наиболее эффективно и быстро обеспечивать водой надземные части растения в периоды относительно скудных осадков и резервировать ее на бездождевой период суккуленты: различные виды солянок (*Salsola*), кактусов (*Cereus* и др.). Ксерофиты распространены обычно в степных, пустынных и полупустынных зонах.

4. Мезофиты занимают промежуточное положение между гигрофитами и ксерофитами. Распространение мезофитов приурочено к умеренно влажным местообитаниям. Это наиболее обширная по видовому составу экологическая группа растений умеренного климата, включающая деревья, кустарники, луговые и лесные травянистые виды, сорняки и культурные растения, эфемеры и эфемероиды.

Эфемеры и эфемероиды — очень своеобразные растения с необычайно коротким (30—50 дней) периодом вегетации. Это или однолетники с коротким жизненным циклом (эфемеры) или многолетники (эфемероиды), которые быстро заканчивают вегетацию в весенний влажный период, а остальную часть года либо сухого сезона проводят в состоянии покоя. Эфемеры характерны для пустынь, полупустынь и сухих степей.

В целом явление эфемерии среди растений — это способ «ухода» от засухи за счет использования влажного периода года для своей вегетации, в течение которой такие растения сохраняют все морфофизиологические признаки мезофитов. То есть это переходная группа растений от мезофитов к ксерофитам.

Глава 12

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ВОДНЫЙ ОБМЕН РАСТЕНИЙ

12.1. Движение воды через растение

Система побегов наземного растения, находясь в воздушном пространстве, все время теряет путем испарения воду, и для восполнения этой потери растение должно извлекать воду из почвы. Транспирация, всасывание воды и проведение ее от корней к транспирирующим поверхностям — нераздельно связанные друг с другом основные процессы водного обмена. При этом дефицит давления водяного пара в воздухе служит движущей силой для испарения, а от количества воды в почве решающим образом зависит водоснабжение. Водный обмен растения поддерживается благодаря постоянному притоку воды, находящемуся в подвижном равновесии.

Поглощение воды корнями. Растение извлекает воду из почвы до тех пор, пока сосущая сила его тонких корешков может конкурировать с сосущей силой почвы. Сосущая сила почвы (растительной клетки) — эквивалентный показатель, равный потенциалу давления влаги в почве (в растительной клетке) с противоположным знаком. Поглощение воды происходит тем интенсивнее, чем больше всасывающая поверхность корневой системы и чем легче корни и почвенная влага приходят в соприкосновение друг с другом:

$$v_S = \frac{\psi_S - \psi_R}{\sum r}. \qquad (12.1)$$

Согласно этой формуле, предложенной В. Гарднером, поток воды v_S, проходящий через единицу поверхности корневой системы в единицу времени, прямо пропорционален разности потенциалов корня ψ_R и почвы ψ_S и обратно пропорционален сумме сопротивлений транспорту воды $\sum r$ в почве и при переходе из почвы в растение.

Если предположить, что в единице объема почвы все корни поглощают воду одинаково, то скорость поглощения воды из единичного объема почвы Q_{WS} (г воды/(см^3·с)) будет равна

$$Q_{WS} = \rho_W \sigma_R v_S, \qquad (12.2)$$

где v_S — поток воды через единицу поверхности корня, см^3 воды/(см^2 корня·с); σ_R — площадь корней в единице объема почвы, см^2 корней/см^3 почвы. Суммарное количество воды, поглощаемое корневой системой растения за единицу времени Q_{WR} (г воды/(с·раст)), равно

$$Q_{WR} = \int_{V_S} Q_{WS}\, dV = \rho_W \int_{V_S} \sigma_R v_S\, dV = \rho_W \overline{V}_S S_R, \qquad (12.3)$$

где V_S — объем почвы, занимаемый корневой системой растения, см³ почвы/раст;

$$S_R = \int_{V_S} \sigma_R \, dV, \tag{12.4}$$

S_R — площадь поверхности корней всего растения и $\bar{v}_S$ — средний поток воды к единице поверхности корня.

Активная поверхность корней у травянистых сельскохозяйственных растений составляет примерно 1 см²/см³, а у древесных растений 0,1 см²/см³.

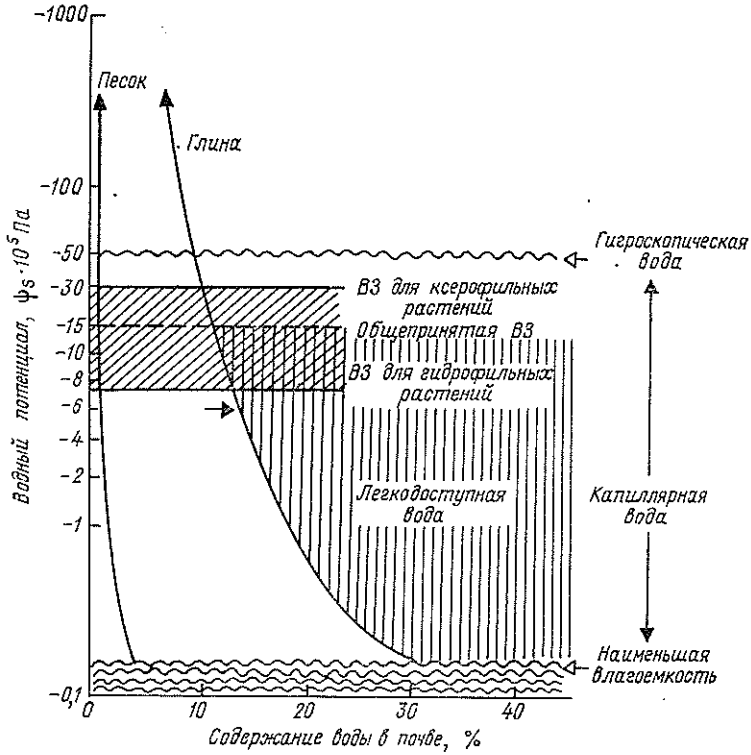


Рис. 12.1. Схема зависимости водного потенциала песчаной и суглинистой почвы от содержания воды в почве (Kramer, 1949, Slatyer, 1967, Laatsch, 1954; с использованием данных Gradmann, 1928 и Ellenberg, 1963).

Общепринятые пограничные значения: за исключением гигроскопически связанной воды, при которой водный потенциал почвы ψ_S принимают равным $-50 \cdot 10^5$ Па, содержание воды при наименьшей влагоемкости определяют при $\psi_S = -0{,}15 \cdot 10^5$ Па, а влажность устойчивого завядания (ВЗ) — при $\psi_S = -15 \cdot 10^5$ Па; количество доступной для растений подвешенной воды зависит от величины ВЗ: у влаголюбивых растений она лежит между $-6 \ldots -8 \cdot 10^5$ Па, у засухоустойчивых может составлять $-30 \cdot 10^5$ Па.

Благодаря концентрации клеточного сока корни чаще всего развивают сосущие силы $1 \cdot 10^5$—$2 \cdot 10^5$ Па, но этого вполне достаточно для извлечения из большинства типов почв бóльшей части связанной воды. Это видно из рис. 12.1: с помощью сосущей силы, равной всего лишь $2 \cdot 10^5$ Па, корни извлекают более $^2/_3$ воды, запасаемой в песчаной почве; глинистая почва, благодаря своей мелкопористости сильнее удерживающая воду, отдает половину своего запаса связанной воды при сосущей силе корней $6 \cdot 10^5$ Па.

Некоторые травянистые растения умеренной зоны способны увеличивать сосущую силу своих корней до значений порядка $40 \cdot 10^5$ Па; растения сухих областей — до значения $60 \cdot 10^5$ Па и более; лесные деревья развивают сосущую силу около $30 \cdot 10^5$ Па.

Однако уже при незначительном уменьшении содержания воды в почве сосущая сила почвы резко возрастает до чрезвычайно высокой. Дальнейшее извлечение воды возможно лишь в случае притока ее из участков почвы, свободных от корней. При прогрессирующем высыхании почвы отдельные корни могут отмирать и засыхать, тогда как в других местах корень разрастается и густо ветвится. Эта способность особенно сильно выражена у растений засушливых областей.

Поступление воды в растение зависит от температуры почвы, так как она влияет на всасывающую деятельность корня и на сопротивление движению воды в почве. Из теплых почв растения извлекают воду легче, чем из холодных. При низкой температуре уменьшается водопроницаемость протоплазмы и прежде всего ухудшается рост корней, чрезвычайно важный для продвижения корней в более обеспеченные влагой слои почвы. У многих трав и древесных растений при снижении температуры до нескольких градусов выше 0 °С поглощение воды значительно сокращается. У фасоли, томатов, огурцов, тыквы и других теплолюбивых растений поглощение воды прекращается при температуре немного ниже 5 °С. При температуре ниже —1 °С бóльшая часть доступной для растений воды в почвенных порах замерзает (величина r в формуле (12.1) бесконечно велика) и растения не могут поглощать воду.

Путь воды в растении. Вода в растении транспортируется от клетки к клетке (ближний транспорт) и по ксилемным путям (дальний транспорт).

В тканях вода движется от клеток с более высоким водным потенциалом по градиенту сосущей силы осмотическим путем, прежде всего в клеточных стенках по принципу фитиля. Весь поток воды идет через пропускные клетки. В центральном цилиндре корня вода поступает в систему дальнего транспорта, где передвижение воды аналогично движению ее в водопроводе. Паренхимные клетки центрального цилиндра служат источником корневого давления, которое возникает вследствие того, что вода (вместе с минеральными ионами) ускоренно, с затратой метаболической энергии подается в сосудистую систему.

Сеть сосудов приспособлена для быстрого проведения и распределения воды по всему растению. Вода движется в основном сплошным потоком в просветах сосудов. В системе дальнего транспорта осуществляется и движение воды по клеточным стенкам, но оно в количественном отношении совершенно незначительно. В листьях ксилемные пути делятся на тонкие разветвления, где из концов трахеид вода поступает в паренхиму сосудистых пучков; оттуда она распределяется, передвигаясь по клеткам мезофилла.

Растение сглаживает крутой градиент водного потенциала между почвой и воздухом. Поскольку побег соприкасается с воздухом, где существует дефицит давления водяного пара (а потому водный потенциал низок), возникает непрерывный ток воды через растение. Для транспорта воды характерны закономерности, аналогичные тем, которые для электрического тока описываются законом Ома. Поэтому отношения в системе почва — растение — атмосфера могут быть представлены аналогичными схемами. Движущей силой для транспорта воды через растение служит градиент потенциала в системе почва — растение — вода. Из-за различных сопротивлений проведению воды в растении создается градиент сосущей силы от листа через проводящую систему вплоть до корня.

Б. Хубер, Г. Градман и Т. Ван ден Хонерт представили отношение между проведением воды (поток F, соответствующий силе электрического тока), градиентом потенциала $\Delta\psi$ (напряжением) и сопротивлениями r в следующей форме:

$$F = \Delta\psi / \sum r. \qquad (12.5)$$

Сосущая сила ψ_z в том или ином участке (z) растения будет тем выше, чем ниже водный потенциал в почве, чем больше проявляется действие ускорения свободного падения (ψ_g), чем больше суммарное сопротивление проведению воды $\sum r$ между почвой и данной точкой в побеге и чем больше воды проходит через растение. Соответствующую формулу предложил Х. Рихтер:

$$\psi_z = \psi_S + \psi_g - \left(\sum r\right) F. \qquad (12.6)$$

Из формул (12.5) и (12.6) следует, что значительного градиента сосущей силы в растении можно ожидать только при сильном токе воды, т. е. при более интенсивной транспирации.

Интенсивность транспирационного тока. Количество воды, транспортируемой в единицу времени через проводящую систему, будет тем больше, чем больше площадь сечения, через которое протекает вода (проводящего сечения), и чем выше скорость тока. В свою очередь скорость тока зависит от сопротивлений проведению воды и разности потенциалов.

Суммарный поток воды в растении $Q_{W\text{р}}$ (г/(с·раст)) от корней до транспирирующих поверхностей в межклетниках листа определяется формулой

$$Q_{W\text{р}} = \rho_W S_\text{р} v_\text{р} = \frac{10}{g} \frac{\psi_R^6 - \psi_L}{r_\text{р}}. \qquad (12.7)$$

Здесь $S_р$ — эффективное сечение растения, см^2/раст; $v_р$ — скорость тока воды в растении, см/с; $r_р$ — сопротивление растения току воды, с/см^2, причем $r_р = l_р/(S_р\rho_р)$, где $\rho_р$ — эффективная удельная проводимость тканей для воды, см^3/(см^2·с); ρ_W — плотность воды, g — ускорение свободного падения, $l_р$ — эффективная длина потока воды в растении, см.

Водный потенциал листа ψ_L связан с относительной влажностью h_L над испаряющей поверхностью формулой (B. Slavik, 1974):

$$\psi_L = \rho_W R_W T_L \ln h_L, \qquad (12.7а)$$

где R_W — газовая постоянная для водяного пара; T_L — температура листа; h_L — относительная влажность воздуха у испаряющей поверхности клеток мезофилла.

Проводящее сечение осевой части побега или листового черешка представляет собой сумму поперечных сечений всех элементов ксилемы. Проводящее сечение в большинстве случаев относят к массе тех частей растения, которые через него снабжаются водой (относительное проводящее сечение), например проводящее сечение черешка — к сырому весу соответствующего листа, проводящее сечение стебля — к общему весу примыкающего к нему побега.

Транспирация как физический процесс. Вода испаряется со всей наружной и всех внутренних поверхностей растения, соприкасающихся с воздухом. У низших растений это наружные поверхности вегетативного тела, у листостебельных растений — кутикулянизированные наружные стенки клеток эпидермиса (кутикулярная транспирация) и опробковевшие поверхности (перидермальная транспирация). Внутри органов растения воду испаряет поверхность клеток, граничащих с межклетниками. Там вода сначала переходит из жидкой фазы в парообразную, а затем водяной пар улетучивается через устьица в атмосферу (устичная транспирация). С поверхности растения водяной пар диффундирует в прилегающий слой воздуха и в свободное воздушное пространство. Транспорт водяного пара от испаряющих поверхностей по направлению к свободному воздушному пространству происходит путем диффузии в соответствии с законом Фика.

Транспирацию можно рассматривать как диффузионный процесс: интенсивность транспирации прямо пропорциональна разности между концентрацией водяного пара ΔC у испаряющих поверхностей и содержанием водяного пара в атмосфере (г/см^3), площади испаряющей поверхности A и обратно пропорциональна сумме диффузионных сопротивлений $\sum r$:

$$E_L = \Delta C A / \sum r. \qquad (12.8)$$

У листьев сопротивление диффузии водяного пара складывается из сопротивления пограничного слоя, кутикулярного и устьичного сопротивлений.

Поскольку пути движения водяного пара — через кутикулу и через устьица — параллельны, то суммарное внутреннее сопротивление водяному пару r_W выражается через устьичное сопротивление r_S и кутикулярное сопротивление r_{cut} формулой

$$\frac{1}{r_W} = \frac{1}{r_{cut}} + \frac{1}{r_S}. \qquad (12.9)$$

На поверхности листа на перенос водяного пара влияет, как и при теплообмене, сопротивление пограничного слоя r_a. На пути водяного пара сопротивления r_W и r_a последовательные.

Учитывая (12.8), получаем для интенсивности транспирации листа

$$E_L = \rho_A \frac{q_L - q_A}{r_a + r_W}, \qquad (12.10)$$

где E_L выражена в г H_2O/(см^2·с); q_L и q_A — массовая доля водяного пара соответственно в межклеточном пространстве внутри листа и между листьями, выраженная в г H_2O/г воздуха; ρ_A — плотность воздуха, г/см^3.

Ось сопротивления r_a и r_W рассчитаны на единицу площади одной стороны листа в предположении, что устьица расположены только на его нижней стороне. Кутикулярная транспирация принимается равной нулю.

Сопротивление пограничного слоя для транспорта водяного пара. Сопротивление пограничного слоя, так же, как и для CO_2-газообмена, очень сильно зависит от размеров, формы и свойств поверхности листьев, а также от скорости ветра. У мелких листьев значения r_a даже при отсутствии ветра едва ли достигают 1 с/см; у крупных плоских листьев сопротивление пограничного слоя может составлять при отсутствии ветра 3 с/см и более. С увеличением скорости ветра различия сглаживаются: при скорости ветра около 2 м/с сопротивление пограничного слоя обычно меньше 0,3 с/см; в этом случае оно не имеет особого значения по сравнению с устьичным диффузионным сопротивлением r_S.

Устьичная транспирация. Устьичное диффузионное сопротивление зависит от степени открытия устьиц. Его минимальное значение зависит от таких анатомических особенностей, как размеры, строение, расположение и количество устьиц у данного вида растений, поэтому оно является видоспецифической величиной, определяющей максимальную транспирационную способность. Сопротивление устьиц r_S примерно в 10 раз больше, чем r_a.

Для светолюбивых трав и особенно травянистых сельскохозяйственных растений характерны значения (отнесенные ко всей поверхности листа — верхней + нижней) от 0,8 до 2 с/см, у листопадных деревьев, кустарничков и большинства злаков минимальное диффузионное сопротивление листьев составляет 2—4 с/см, у тенелюбивых трав, степных злаков, ксерогалофитов и вечнозеленых лиственных деревьев — 3—5 с/см.

Кутикулярная транспирация. При кутикулярной транспирации молекулы воды диффундируют через кутикулярные слои наружных стенок эпидермиса и через кутикулу. В связи с этим кутикулярную транспирацию можно рассматривать как диффузию через гидрофобную среду. У тонких листьев кутикулярное сопротивление диффузии составляет 20—100 с/см, у листьев и хвои с массивной защитой от транспирации оно может достигать 400 с/см.

Перидермальная транспирация. С кутикулярной транспирацией сравнима также весьма незначительная потеря воды через поверхность опробковевших стеблей, уровень которой зависит от специфичного для каждого вида строения перидермы, проницаемости чечевичек и наличия трещин в коре. Поэтому ветви и стволы тополя, дуба, клена и сосны теряют больше воды, чем ветви и стволы ели, бука и берез с их более гладкой и плотной корой.

Транспирация и CO_2-газообмен. Через устьичный аппарат, где происходит диффузия водяного пара и CO_2, транспирация и усвоение углерода связаны друг с другом. Чтобы получать CO_2, растение вынуждено отдавать воду, а уменьшение потери воды снижает и приток CO_2.

Условия диффузии для обоих обменных процессов неодинаковы. Градиент концентрации CO_2 между наружным воздухом и хлоропластами менее значителен, чем градиент массовой доли водяного пара между внутренней средой листа и атмосферой, если только наружный воздух не насыщен влагой. При температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 50 % градиент водяного пара примерно в 20 раз больше градиента CO_2. Только из-за этого испарение воды идет гораздо интенсивнее, чем поглощение CO_2. Кроме того, небольшие молекулы H_2O диффундируют в 1,56 раза быстрее, чем более крупные молекулы CO_2. Существенно различаются и пути диффузии.

Таблица 12.1

Средний расход воды при накоплении сухого вещества (в граммах транспирированной воды на 1 г образованного сухого вещества) (Stocker, 1929; Polster, 1967; Black, 1971; Szarek, Ting, 1975)

	C_3-растения		
Травянистые растения		*Лиственные деревья*	
Рис	680	Дуб	340
Рожь	630	Береза	320
Овес	580	Бук	170
Пшеница	540	*Хвойные деревья*	
Ячмень	520		
Люцерна	840	Сосна	300
Фасоль	700	Лиственница	260
Клевер красный	640	Ель	230
Картофель	640	C_4-растения	
Подсолнечник	600		
Арбуз	580	Кукуруза	370
Хлопчатник	570	Просо	300
		Амарант	300
		Портулак	280

Отношение между расходом воды и продукцией выражается *транспирационным коэффициентом* или продуктивностью транспирации; в первом случае указывается, сколько воды было израсходовано растением или растительным сообществом за вегетационный период на единицу массы выработанного сухого вещества, во втором — количество накопленного сухого вещества на 1 л испаренной воды. Потребность в воде на образование единицы сухого вещества неодинакова для разных видов (табл. 12.1) и сильно зависит от условий местообитания и сомкнутости фитоценоза.

12.2. Водный баланс растения

Водный баланс растения определяется разностью между поглощением воды и ее расходованием. Суммарное количество воды, поглощаемой корневой системой растения, определяется выражением (12.3).

Суммарное количество воды, выходящей из растения в единицу времени путем транспирации, в предположении, что интенсивность транспирации всей листвы одинакова, равно

$$E_{\text{р}} = E_L S_L, \tag{12.11}$$

где S_L — площадь листьев растения, см^2/раст; интенсивность транспирации E_L задается формулой (12.10).

В общем случае поток воды в растение Q_{WR} и поток транспирации $E_{\text{р}}$ не равны, поскольку водосодержание растения может изменяться.

Если обозначить через $W_{\text{р}}$ влагосодержание растительной ткани в г воды на г сухой фитомассы, то уравнение водного баланса растения с учетом $Q_{WR} = Q_{W\text{р}}$ можно записать в виде

$$m_{\text{р}}\, \partial W_{\text{р}}/\partial \tau = Q_{WR} - E_{\text{р}}, \tag{12.12}$$

где $m_{\text{р}}$ — сухая фитомасса растения.

Принимая во внимание (12.10) и (12.12) вместо (12.12) получаем

$$m_{\text{р}} \frac{\partial W_{\text{р}}}{\partial \tau} = \frac{10^6}{g} \frac{\psi_R - \psi_L}{r_{\text{р}}} - \rho_A \frac{q_L - q_A}{r_a + r_W} S_L. \tag{12.13}$$

Транспирация рассматривается здесь как статья расхода водного баланса, а не как физический процесс. Поэтому количество израсходованной воды относят не к единице поверхности, а к единице массы.

Водный баланс остается уравновешенным только в том случае, если поглощение, проведение и расходование воды гармонично согласованы друг с другом. Он становится отрицательным, как только поступление воды перестает покрывать ее потерю в результате транспирации. Если вследствие дефицита воды устьичные отверстия суживаются и транспирация снижается при прежнем уровне поглощения воды, то баланс выравнивается, после чего на некоторое время становится положительным. Таким образом, вод-

ный баланс постоянно колеблется, отклоняясь то в положительную, то в отрицательную сторону, причем необходимо различать кратковременные колебания и длительные нарушения баланса. Днем в естественных условиях почти всегда происходит ухудшение водного баланса, который вновь выравнивается только вечером или ночью, если только запас воды в почве достаточен для этого. В засушливые периоды водный баланс за ночь восстанавливается уже не полностью, дефицит растет изо дня в день до выпадения следующего дождя; таким образом, водный баланс подвержен и сезонным колебаниям.

12.3. Суточный ход транспирации

При достаточной увлажненности почвы интенсивность транспирации E_L определяется в основном метеорологическими условиями. Поэтому интенсивность транспирации, рассчитанная для первого дня после увлажнения (рис. 12.2) не зависит от разновидности почвы и развитости корневой системы растения. Однако по мере уменьшения запаса влаги в почве влияние обоих факторов все больше сказывается на дневном ходе транспирации.

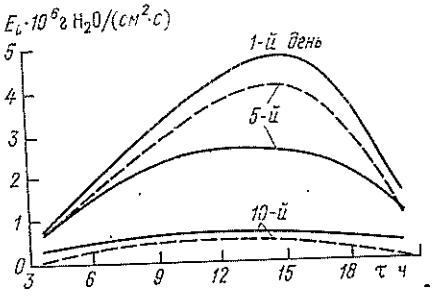


Рис. 12.2. Дневной ход интенсивности транспирации E_L для растений с хорошо развитой (штриховая кривая) и слабо развитой (сплошная кривая) корневой системой за 1-й, 5-й и 10-й день после увлажнения; $r_a = 0{,}3$ с/см, почва — глина (по З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Россу, 1980).

Так, оказывается, что для растений с хорошо развитой корневой системой характер дневного хода транспирации мало изменяется в течение первых 5—7 дней, понижается лишь общая интенсивность транспирации. В отличие от этого интенсивность транспирации у растений со слабо развитой корневой системой существенно понижается и очень мало изменяется в течение 6—7 ч в середине дня (сплошная кривая для 5-го дня). Далее по мере высыхания почвы интенсивность транспирации остается почти постоянной бóльшую часть дня, независимо от внешних и внутренних факторов (кривые для 10-го дня после увлажнения). Дело в том, что в условиях острого недостатка влаги сопротивление устьиц увеличивается в середине дня настолько, что изменение метеорологических факторов уже не может сколько-нибудь существенно влиять на интенсивность транспирации. Чем суше почва, тем меньше изменяется величина E_L в течение дня.

Сравнение кривых рис. 12.2, характеризующих транспирацию за 10-й день после увлажнения, показывает также, что растение

с хорошо развитой корневой системой на 10-й день транспирирует уже меньше, чем растение со слабо развитой корневой системой. Причина этого, очевидно, в том, что до 10-го дня растение со слабо развитой корневой системой использовало воду медленнее (ср. кривые для 5-го дня).

Особенно резко понижается интенсивность транспирации растения на опесчаненном суглинке. Так, уже на 7—8-й день после увлажнения она почти вдвое ниже, чем транспирация растений на глинистой почве на 10-й день. Это объясняется резким сужением устьиц под влиянием водного дефицита.

С увеличением скорости ветра больше сказывается на величине E_L и влияние относительной влажности воздуха.

Следует отметить, что в отличие от ветреной погоды при слабом ветре и штиле интенсивность транспирации значительно снижается утром и вечером и повышается в середине дня. Это связано с понижением температуры листа утром и вечером по сравнению с температурой воздуха.

По мере высыхания почвы дневной ход интенсивности транспирации E_L постепенно сглаживается, пока сопротивление устьиц не увеличится настолько, что метеорологические факторы практически перестают заметно влиять на транспирацию.

12.4. Зависимость транспирации от факторов внешней среды

Солнечная радиация. Согласно уравнению теплового баланса листа интенсивность транспирации E_L непосредственно связана с падающей на лист солнечной радиацией Q_L. Отсюда естественно следует и линейная зависимость E_L от Q_L при постоянной температуре. Согласно расчетам Ю. К. Росса, E_L линейно зависит от Q_L во всех случаях при: $Q_L > 0{,}007$ Вт/см^2, что объясняется зависимостью устьичного сопротивления от радиации (формула Ю. К. Росса):

$$r_S(Q_\Phi,\ \psi_L) = r_{s0}\left(1 + \frac{\gamma}{Q_L}\right)\left(\frac{\psi_m - \zeta\psi_L}{\psi_m - \psi_L}\right)\exp(\delta\,\Delta q), \qquad (12.14)$$

где Q_Φ — интенсивность ФАР; ψ_L — водный потенциал листа; r_{s0} — характерный для данного вида параметр, обозначающий сопротивление полностью раскрытых устьиц; γ — параметр, характеризующий чувствительность устьиц к радиации; ψ_m — критическое значение водного потенциала листа, при котором устьица полностью закрываются; ζ — безразмерный параметр, характеризующий реакцию устьиц на изменение водного потенциала листа; Δq — разность массовой доли водяного пара в межклеточном пространстве внутри листа q_L и между листьями q_A ($\Delta q = q_L - q_A$); δ — параметр, характеризующий чувствительность устьиц к разности Δq.

Температура воздуха. Зависимость интенсивности транспирации от температуры воздуха T_A определяется в основном формулой (12.15), согласно которой при постоянном устьичном сопротивле-

нии величина E_L должна увеличиваться с ростом T_A:

$$E_L = \frac{A_{\exp}(-B/T_A)}{T_A(r_a + r_s)}\left[\left(1 + \frac{\psi_L}{\rho_W R_W T_A} - \frac{\Delta T}{T_A}\right)\exp\left(B\frac{\Delta T}{T_A^2}\right) - h_A\right], \tag{12.15}$$

где T_A — температура воздуха; ΔT — разность температур листа и воздуха, $\Delta T = T_L - T_A$; h_A — относительная влажность воздуха; A и B — коэффициенты уравнения Клаузиса — Клапейрона, $A = 3{,}76 \cdot 10^5$ г·К/см^3; $B = 5{,}31 \cdot 10^3$ К.

Относительная влажность воздуха. Формула (12.15) указывает на линейную зависимость интенсивности транспирации от относи-

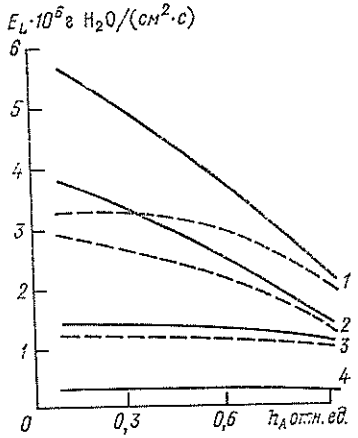


Рис. 12.3. Зависимость интенсивности транспирации E_L от относительной влажности воздуха h_A при $S_R/S_L = 0{,}2$, $r_a = 0{,}3$ с/см, $Q_L = 0{,}084$ Вт/см^2; почва — глина (по З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Россу, 1980).

Сплошные кривые — без учета явного влияния Δq на r_s ($\delta = 0$), штриховые — с учетом явного влияния Δq на r_s ($\delta = 6 \cdot 10^4$ см^3/г).

Кривая	ψ_S, Па	t_A, °С
1	$-0{,}1 \cdot 10^5$	20
2	$-0{,}1 \cdot 10^5$	10
3	$-2{,}5 \cdot 10^5$	20
4	$-8{,}0 \cdot 10^5$	10 и 20

тельной влажности воздуха при постоянных температуре и устьичном сопротивлении. В случае влажной почвы, если не учитывается явное влияние Δq на r_s, расчетные данные дают действительно близкий к линейному ход E_L (рис. 12.3, сплошные кривые), причем изменение h_A от 0,2 до 0,9 (в относительных единицах) понижает интенсивность транспирации более чем вдвое (сплошные кривые *1* и *2*). Незначительное отклонение хода $E_L(h_A)$ от линейного (выпуклость кривых) обусловлено в основном небольшими изменениями устьичного сопротивления (примерно на 20 %) в рассматриваемом интервале h_A. Кроме того, поскольку уменьшение интенсивности транспирации вызывает повышение температуры листа (увеличение Δt), то надо учесть и обратную связь E_L и Δt, хотя этот вторичный фактор и играет меньшую роль в определении величины E_L, чем сопротивление устьиц. Особенно хорошо это видно при недостатке влаги.

Так, при снижении водного потенциала почвы до $-2{,}5 \cdot 10^5$ Па падение интенсивности транспирации с увеличением h_A сильно замедляется (сплошная кривая *3*), а при $\psi_S = 8 \cdot 10^5$ Па она практически не зависит от h_A (сплошная кривая *4*). Причина здесь заключается в том, что водный потенциал листа низок и, хотя он

незначительно зависит от влажности воздуха, все же это приводит к резкому изменению r_s. Здесь можно констатировать, что, с одной стороны, увеличение относительной влажности воздуха должно уменьшить интенсивность транспирации, но, с другой стороны, оно должно уменьшить и r_s. В результате эти два влияния взаимно компенсируют друг друга и интенсивность транспирации почти не меняется с изменением h_A. Что касается температуры воздуха, то из рис. 12.3 видно, что она принципиально не влияет на форму кривых, лишь немного изменяя их наклон (ср. сплошные кривые *1* и *2*), но заметно влияет на величину транспирации, о чем уже говорилось выше. При явном влиянии влажности на сопротивление устьиц (штриховые кривые) зависимость E_L/h_A значительно отклоняется от линейной. В этом случае рост устьичного сопротивления в сухом воздухе сильно снижает транспирацию и степень ее зависимости от h_A.

Скорость ветра. Интенсивность транспирации связана со скоростью ветра u в уравнении теплового баланса листа (4.17), где u определяет конвективный теплообмен между листом и воздухом.

Конвективный теплообмен между листом и воздухом выражается формулой

$$H_L = 2\,\frac{\rho_A c_p\,(T_L - T_A)}{r_{aH}}, \qquad (12.16)$$

где r_{aH} — диффузионное сопротивление теплообмена пограничного слоя одной стороны листа. Фактор 2 в формуле (12.16) указывает, что учитываются обе стороны листа.

Для определения величины r_{aH} применяется полуэмпирическая формула

$$r_{aH} = a_H\,(b_L/u)^{1/2}, \qquad (12.17)$$

где эмпирическая постоянная a_H, выраженная в $с^{1/2}/см$, зависит от турбулентности ветра, формы и ориентации листа и других факторов; b_L — характеристическая длина (ширина) листа, см. Для колеблющихся листьев a_H примерно в 1,4 раза, для хвои в два раза меньше, чем значение a_H для неподвижных листьев. Для «среднего» листа в «средних» условиях $a_H = 0{,}9$.

Кроме того, от скорости ветра зависит сопротивление прилистового слоя r_a, входящее в формулу (12.15). Правда, здесь r_a играет существенную роль лишь в случае, когда оно сравнимо по величине с r_s, т. е. при хорошем водоснабжении листьев. В условиях же водного дефицита $r_a < r_s$.

Водный потенциал почвы. Согласно (12.15), влияние водного потенциала почвы ψ_S на интенсивность транспирации осуществляется главным образом посредством устьичного сопротивления r_s. Поскольку последнее резко увеличивается с уменьшением ψ_S, то это приводит и к быстрому уменьшению интенсивности транспирации в подсыхающей почве. Как видно из рис. 12.4, ход $E_L(\psi_S)$ существенно зависит от корневой системы растения. У растения со слабо развитой корневой системой ($S_R/S_L = 0{,}2$) интенсивность

транспирации освещенных листьев резко снижается в интервале ψ_S от $-0{,}1 \cdot 10^5$ до $-3 \cdot 10^5$ Па (кривые *2* и *4*). При дальнейшем уменьшении влажности почвы влияние внешних факторов, таких, как радиация, влажность и температура воздуха, а также скорость ветра, становится все меньше. У затененных листьев изменение E_L не так резко, но сами значения малы (кривая *5*).

Растение же с мощной корневой системой ($S_R/S_L = 2{,}0$) способно поглощать влагу из почвы и при низких значениях ее вод-

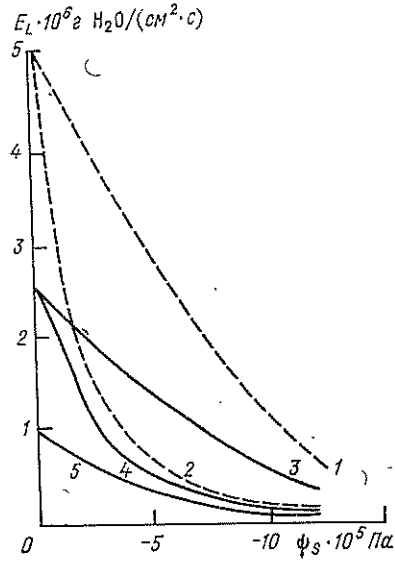


Рис. 12.4. Зависимость величины E_L от водного потенциала почвы ψ_S при $t_A = 20$ °С и $r_a = 0{,}3$ с/см; почва — глина (по З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Россу, 1980).

Кривая	Q_L Вт/см²	h_A	S_R/S_L
1	0,07	0,2	2,0
2	0,07	0,2	0,2
3	0,07	0,8	2,0
4	0,07	0,8	0,2
5	0,007	0,8	0,2

ного потенциала, поэтому и падение интенсивности транспирации с уменьшением ψ_S происходит постепенно (кривые *1* и *3*). Благодаря этому даже при $\psi_S = -10 \cdot 10^5$ Па еще существенно влияние на E_L внешних факторов. Зависимость транспирации от водного потенциала почвы в данном случае близка к линейной.

Из рис. 12.4 следует общее правило: при одной и той же корневой системе чем благоприятнее условия для высокой интенсивности транспирации (низкая влажность воздуха, высокая интенсивность радиации), тем резче снижается интенсивность транспирации с падением водного потенциала почвы. Самыми контрастными на рис. 12.4 в этом отношении являются кривые *2* и *5*. Эта закономерность неоднократно наблюдалась в экспериментах.

12.5. Потребность посевов в воде

Потребность растений в воде. Потребность растений в воде есть расход воды в полевых условиях на транспирацию и испарение с поверхности почвы при бесперебойном притоке влаги и воздуха к корневой системе растений, находящихся в определенном

сообществе и, если речь идет о фитоценозах культурных растений, развивающихся при определенных, свойственных каждому типу культуры площадях питания, условиях освещения и агротехники.

Потребность культуры в воде за весь вегетационный период, будучи производной от условий среды, находится в зависимости от продолжительности вегетационного периода данного растения, о чем дают представление данные Полтавской опытной станции (табл. 12.2). Расходы воды за сутки отклоняются от средних не более чем на 10 %, а расходы воды за весь вегетационный период — на 36—43 %.

Таблица 12.2

Влияние продолжительности вегетационного периода растений на валовой расход воды (по А. М. Алпатьеву, 1954)

Культура	Продолжительность вегетационного периода, дни	Расход воды, мм		Расход воды за сутки, мм
		за весь период	в том числе осадки	
Вика — овес	67	182	92	2,7
Гречиха	93	264	184	2,8
Ячмень	97	264	187	2,7
Яровая пшеница	101	271	187	2,7
Кукуруза	131	317	265	2,4
Сахарная свекла	154	407	305	2,6
Среднее		284		2,65

Методы расчета потребности в воде фитоценозов. В общем виде связь максимально возможного суммарного испарения фитоценоза с метеорологическими факторами в условиях оптимальной влажности почвы (что соответствует потребности в воде фитоценоза) можно установить исходя из затрат тепла на суммарное испарение, равных, как известно, произведению скрытой теплоты испарения l на суммарное испарение $E(L)$.

Если известен радиационный баланс РП $R(L)$, турбулентный теплообмен $P(L)$ (поток тепла от зеленой поверхности фитоценоза в атмосферу) и поток тепла в почву $B_п$, то затраты тепла на испарение определяют как остаточный член теплового баланса в виде $lE(L)=R(L)-P(L)-B_п$.

В этом случае суммарную потребность фитоценоза в воде нетрудно определить по уравнению

$$E_ф = \frac{R(L)-P(L)-B_п}{l}, \qquad (12.18)$$

где $E_ф$ — суммарная потребность в воде фитоценоза.

Так как суммарная потребность в воде фитоценоза в оптимальных условиях равна испаряемости, то на практике эту потребность легко рассчитать, если известна испаряемость от начала до конца вегетации изучаемого сообщества.

М. И. Будыко (1948) и Х. Л. Пенманом (Penman, 1948) одновременно были предложены методы определения испаряемости на основе материалов наблюдений над радиационным и тепловым балансом.

В основе метода Пенмана лежит уравнение теплового баланса водоема. Согласно Пенману, «возможная транспирация», или, по нашей терминологии, «суммарная потребность в воде фитоценоза» равна

$$E_{\Phi} = fE_0, \tag{12.19}$$

где E_0 — испарение с водной поверхности, f — коэффициент. Для Западной Европы летом $f = 0{,}8$, зимой $f = 0{,}6$, весной и осенью $f = 0{,}7$, в среднем за год $f = 0{,}7$. Пенман вычисляет E_0 исходя из установленной им сложной зависимости от радиационного баланса, скорости ветра, температуры и влажности воздуха.

М. И. Будыко (1950) для определения испаряемости предложил так называемый комплексный метод, учитывающий влияние радиационного баланса, температуры и влажности воздуха. Согласно этому методу, испаряемость рассчитывается по формуле

$$E_0 = \rho D (q_0 - q_2), \tag{12.20}$$

где ρ — плотность воздуха; D — коэффициент обмена, весьма изменчивый, для теплого периода $D \approx 0{,}60$—$0{,}70$ см/с; q_0 — массовая доля насыщенного водяного пара воздуха при температуре испаряющей поверхности; q_2 — массовая доля водяного пара на высоте, принятой в массовых наблюдениях равной 2 м.

А. И. Будаговский (1956) вводит в уравнение потока влаги между растительным покровом и атмосферой дополнительный коэффициент β, учитывающий влияние нелинейности между массовой долей насыщенного водяного пара и температурой испаряющей поверхности, а также влияние характера и состояния увлажненной испаряющей поверхности. Для хорошо развитого растительного покрова $\beta = 1{,}15$.

Формула А. И. Будаговского для расчета испаряемости имеет вид:

$$E_0 = \rho D (\beta q_0 - q_2), \tag{12.21}$$

где все обозначения, кроме безразмерного коэффициента β, прежние. Так как при испарении с растительного оптимально увлажненного покрова β больше единицы, то и испарение в этом случае может быть больше испаряемости, что хорошо согласуется с условиями при высоких урожаях.

Оптимальная для растений влажность почвы. Исходя из того, что растение развивается в сфере одновременного воздействия почвы (корни) и атмосферы (надземные органы растений), можно считать оптимальной только ту влажность, которая, кроме благоприятного сочетания запасов воды и воздуха в почве, обеспечивает нормальные условия жизнедеятельности растений в атмосфере и

прежде всего нормальное оводнение клеток растительного организма.

Верхняя граница зоны оптимального увлажнения в условиях глубокого залегания грунтовых вод, когда подъем воды по капиллярам снизу вверх не достигает корнеобитаемой зоны, близка к наименьшей влагоемкости. При этих условиях аэрация корнеобитаемой зоны растений вполне достаточна даже в тяжелосуглинистых почвах, но в сильно солонцеватых почвах, а тем более в солонцах, она может быть ниже критического уровня, так как степень набухания их значительна.

В условиях близкого к поверхности почвы залегания грунтовых вод насыщение почвы влагой сверх 80 % общей пористости часто затрудняет аэрацию почвы, снижает интенсивность микробиологических процессов и обычно приводит к снижению урожая.

Резкое снижение урожая часто наблюдается при влажности почвы выше 90—100 % от полной влагоемкости, что приблизительно соответствует запасам воздуха 10—20 % объема почвы в период между поливами.

Верхняя граница оптимальной влажности почв определяется либо требованиями растений к аэрации (случаи близкого залегания грунтовых вод), либо максимально возможной в полевых условиях степенью насыщения водой зоны размещения основной массы корней (случаи глубокого залегания грунтовых вод).

Нижняя граница оптимальной влажности почв лежит выше влажности устойчивого завядания. Для растений небезразлично, снижается ли влажность почвы до влажности устойчивого завядания или она поддерживается на более высоком уровне.

При некоторой минимальной влажности, различной для разных почв, подвижность воды в почве становится настолько малой, что растения начинают обнаруживать признаки недостатка влаги даже при наличии усвояемой влаги в почве вследствие слабого притока воды к корням растений. Кроме того, с уменьшением влажности почвы возрастают силы, удерживающие воду в почве, что создает дополнительные затруднения в обеспечении растений влагой, несмотря на рост осмотического давления клеточного сока (табл. 12.3).

Данные табл. 12.3 относятся к самым разнообразным по биологическим требованиям растениям и не менее разнообразным по плодородию почвам и климатическим условиям. Несмотря на это они показывают, что нижняя граница оптимальной влажности почв для различных полевых культур колеблется чаще всего от 70 до 75 %, а для овощных — от 75 до 80 % наименьшей влагоемкости.

Это положение объясняется тем обстоятельством, что высокая степень оводнения клеток является необходимым условием протекания процессов метаболизма всех культурных растений.

При указанной выше степени насыщения почв влагой удовлетворяются и некоторые другие требования растений к факторам жизни. Прежде всего достаточно обеспечивается оптимальная

Таблица 12.3

Оптимальная влажность почвы для разных растений по данным полевых опытов (по А. М. Алпатьеву, 1954)

Почва	Культура	Нижняя граница оптимальной влажности, % наименьшей влагоемкости	Периоды поддержания оптимальной влажности почвы
Серозем тяжелосуглинистый	Хлопчатник	70	До созревания
Серозем суглинистый	»	70	»
Каштановая суглинистая	»	75	»
Серозем тяжелосуглинистый	»	75—80	Весь вегетационный период
	Сахарная свекла	70—73	С июня по сентябрь при севе в конце марта — начале апреля
Чернозем тяжелосуглинистый	»	75	С образованием 4-й пары листьев до половины августа
Чернозем суглинистый	Лук репчатый, яровая пшеница	70—80	От кущения до молочной спелости
Чернозем легко суглинистый	Огурцы	80	Не указано
	Капуста кочанная	80	То же
	Томаты	75	От начала цветения до плодоношения
	Люцерна на сено	70—75	Не указано
	Яровая пшеница	70—75	Трубка — налив

аэрация основной зоны распространения корневых систем. Аэрация при этих условиях не лимитирует нормальный ход физиологических процессов в растениях, так как содержание воздуха в почве более чем достаточно. Кроме того, выполняется и второе обязательное условие оптимальной влажности почв для растений — достаточно высокая подвижность воды в почве, обеспечивающая в зоне основной массы корней подток воды к корням растений, необходимый для поддержания высокого оводнения тканей растений и соответственно бесперебойного фотосинтеза при условии достаточного питания. Согласно А. А. Роде (1952), нижняя граница оптимальной влажности суглинистых почв (70 % наименьшей влагоемкости) соответствует влажности разрыва капилляров и, следовательно, резкому уменьшению подвижности почвенной влаги. Потребность в воде посевов удовлетворяется полностью, если влажность тяжелосуглинистых и глинистых почв не ниже 70—80 % их наименьшей влагоемкости, легко- и среднесуглинистых не ниже 65—75 %, а супесчаных не ниже 50—60 %.

Биологическая кривая водопотребления. Режим потребления воды культурными растениями по фазам и стадиям развития рассматривается в условиях оптимальной влажности почвы. Вне этих

условий динамика потребления воды растениями не отражает потребность их в воде и в значительной мере определяется режимом влажности почвы, который зависит от влияния самих растений, условий погоды и уровня агротехники.

Режим потребления воды по фазам развития растений — есть результат совокупного влияния ритмов развития, с одной стороны, и экологических условий — с другой. Тогда общая кривая потребления воды может быть расчленена на две составляющие кривые: «биологическую» и «экологическую». Биологическая кривая выражает влияние ритмов развития на режим потребления воды растениями, т. е. то, что односторонне приписывают обычно приросту растительной массы. Экологическая кривая характеризует влияние климатических условий на режим потребления воды, если последнее рассматривается на оптимальном фоне влагообеспеченности и питания.

Для расчленения общей кривой потребления воды на биологическую и экологическую кривые воспользуемся испаряемостью как показателем, более доступным для практического использования и более полно отображающим комплексное воздействие метеорологических факторов на валовой расход воды растениями.

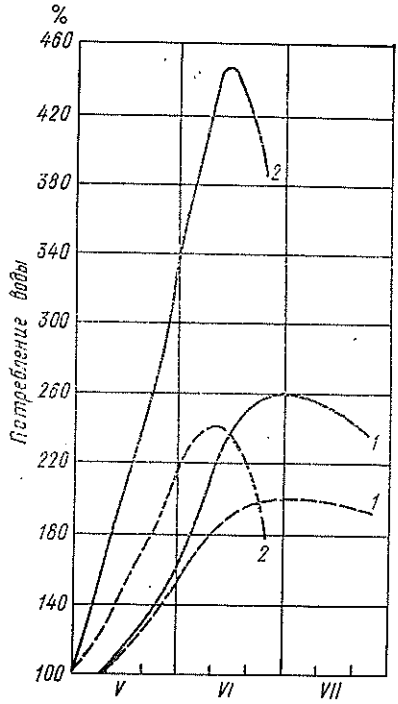


Рис. 12.5. Валовое потребление воды растениями по фазам (в процентах к потреблению) в первый срок наблюдений с приведением (штриховые кривые) и без приведения (сплошные кривые) к начальной испаряемости (по А. М. Алпатьеву, 1954).

1 — яровая пшеница, Средний Урал, *2* — то же, Северный Кавказ.

Влияние темпов развития растений на режим потребления воды в первом приближении можно учесть приведением кривых потребления воды к начальной испаряемости, т. е. установить, как изменялся бы режим потребления воды по фазам, если бы испаряемость оставалась постоянной.

На рис. 12.5 показаны общие кривые потребления воды яровой пшеницей (сплошные линии) и кривые, приведенные к начальной испаряемости (штриховые линии). В относительных величинах (в процентах) штриховые кривые показывают влияние темпов развития растений на режим потребления воды. Это влияние довольно значительно.

Следует отметить, что обе группы кривых относятся к условиям оптимальной влажности почвы, так как одна из них получена на поливе, другая же — в районах, где естественный режим влажности почвы в многолетнем разрезе удерживается на оптимальном уровне.

При анализе режима валовых расходов воды растениями по фазам и стадиям развития, выделены периоды явного превышения потребления воды растениями над испаряемостью. Это явление объясняется биологическими кривыми водопотребления.

Биологические кривые водопотребления представляют собой ряд коэффициентов K, изменяющихся в онтогенезе от декады к декаде или от стадии к стадии вегетации и вычисляемых путем деления валового расхода воды q (транспирация плюс испарение с поверхности почвы при оптимальной влажности) за декадный или межфазный период на сумму дефицитов влажности воздуха $\sum d$ за те же периоды:

$$K = q/\sum d. \qquad (12.22)$$

Средние значения переменных коэффициентов биологической кривой водопотребления, полученные на основании многолетних опытов в Ленинградской области, приведены в табл. 12.4.

Таблица 12.4

Средние коэффициенты (безразмерные) биологических кривых водопотребления (по А. М. Алпатьеву, 1969)

Культура	Декада вегетации									Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Ячмень (5 лет)	0,40—0,60	0,54	0,60	0,66	0,71	0,77	0,73	0,66	0,58	0,64
Картофель (8 лет)	0,30—0,60	0,40—0,60	0,56	0,64	0,70	0,76	0,73	0,65	0,54	0,60

Для расчета расходов воды на испарение при достаточной влагообеспеченности и достаточной биологической продуктивности фитоценозов сумму средних суточных дефицитов влажности воздуха за декаду вегетации (первую декаду вегетации отсчитывают начиная от всходов) необходимо умножить на коэффициент биологической кривой испарения, соответствующий той же декаде: $q = K\sum d$. Дефицит влажности воздуха в этих расчетах удобнее выражать не в гектопаскалях, а в миллиметрах, что дает возможность вести расчет водного баланса и водного режима с учетом атмосферных осадков.

Несмотря на то что биологическая кривая для данного вида растения относительно консервативна, коэффициенты биологической кривой испарения изменяются по регионам. Общая тенденция их изменения в умеренном поясе с продвижением из гумидных

прохладных и умеренно теплых районов в аридные теплые и жаркие заключается в уменьшении числовых значений коэффициентов биологических кривых испарения.

Критические периоды у растений в связи с недостаточным водоснабжением. В интервале влажности почвы между нижней границей оптимума и влажностью устойчивого завядания различные растения имеют много общего в отношении их реакции на фактор влаги. С уменьшением влажности почвы у всех растений подавляются ростовые процессы, соответственно этому снижается накопление органического вещества, убывают (до некоторого предела) транспирационные коэффициенты, после чего они увеличиваются и приближаются к влажности завядания, а затем снова резко убывают в состоянии завядания растений.

В онтогенезе каждый растительный организм неодинаково реагирует на неблагоприятные условия влагообеспеченности, что впервые было отмечено П. И. Броуновым (1912), который назвал такие периоды в жизни растений *критическими*. В эти периоды растения при недостатке влаги наиболее значительно снижают урожай. У разных растений критическими периодами (табл. 12.5) являются разные периоды их развития (Ф. Д. Сказкин, 1938).

Таблица 12.5

Критические периоды различных растений

Культура	Критический период
Озимая рожь	Выход в трубку — колошение
Озимая пшеница	То же
Яровая пшеница	»
Овес	»
Ячмень	»
Кукуруза	Выметывание — молочная спелость
Сорго	Выметывание — налив
Просо	То же
Зерновые бобовые	Цветение
Гречиха	То же
Подсолнечник	Образование корзинки — цветение
Хлопчатник	Цветение — заложение коробочек
Бахчевые	Цветение — созревание
Картофель	Цветение и формирование клубня
Томаты	Завязывание и созревание плодов

Исследования Ф. Д. Сказкина (1938) показали, что даже у различных сортов одного и того же растения критическими могут быть различные периоды, но недостаток влаги в почве больше всего действует на растение в момент образования репродуктивных органов. В более поздней работе (1957) Сказкин уточнил это положение, говоря, что наибольшая чувствительность к недостатку влаги «...обнаруживается в период, когда в образующихся цветках формируется пыльца, т. е. в период от самого начала... заложения тетрад и до цветения и оплодотворения включительно».

Это положение хорошо подтверждается данными о расходе влаги озимой пшеницы по периодам вегетации, приведенными в табл. 12.6. Как видно из этих данных, наиболее интенсивный расход влаги озимой пшеницей наблюдается в период колошение — цветение.

Таблица 12.6

Расход влаги озимой пшеницей (по Л. А. Разумовой, 1950)

Межфазный период	Продолжительность периода, дни	Всего израсходовано влаги за период, мм	Расход влаги за сутки, мм
Возобновление вегетации — выход в трубку	32	40	1,2
Выход в трубку — колошение	30	101	3,4
Колошение — цветение	11	58	5,3
Цветение — молочная спелость	10	26	2,6
Молочная спелость — уборка	15	19	1,3

Глава 13

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И УГЛЕРОДНЫЙ ОБМЕН РАСТЕНИЙ

13.1. CO_2-газообмен растений

Углеродный обмен клетки связан с внешней средой посредством газообмена. При фотосинтезе хлоропласты потребляют CO_2, запас которой должен пополняться, и высвобождают кислород. Наряду с этим клетки днем и ночью поглощают необходимый для дыхания кислород и выделяют двуокись углерода. По изменению среды, где находятся ассимилирующие листья, можно обнаружить тот из двух конкурирующих процессов, который в данный момент происходит с большей интенсивностью. Днем, как правило, потребление CO_2 для фотосинтеза Ф больше, чем выделение CO_2 при дыхании. Дыхание на свету складывается из фотодыхания C_{Ri} и митохондриального дыхания C_{RM}.

Если интенсивность фотосинтеза понижается, то может наступить момент, когда фотосинтез будет в точности компенсировать одновременно идущее дыхание. При дальнейшем снижении фотосинтеза дыхание начинает преобладать, а в темноте происходит только выделение CO_2 в процессе дыхания.

Скорость диффузии. Газообмен между клетками и окружающей растение средой (наружным воздухом, водой) происходит путем диффузии. Этот обмен имеет огромные масштабы: для образова-

ния 1 г глюкозы необходимо поглотить 1,47 г CO_2. При стандартных условиях это количество углекислоты занимает объем 0,75 л. Так как в воздухе объемное содержание CO_2 составляет только около 0,03 %, указанное количество CO_2 должно быть извлечено из 2500 л воздуха.

Важнейшим регулятором процесса диффузии является устьичный аппарат. У большинства растений число устьиц на 1 мм² листовой поверхности составляет 50—300 штук, отверстия устьиц занимают 0,5—1,5 % поверхности листа.

Для транспорта CO_2 и O_2 применим закон диффузии (закон Фика):

$$\frac{dm}{dt} = DA\frac{dC}{dx}. \qquad (13.1)$$

Скорость диффузии (перемещение массы dm за промежуток времени dt) зависит от константы диффузии D и, кроме того, будет тем больше, чем больше градиент концентрации dC/dx в направлении диффузии и чем больше поверхность обмена A. Константа диффузии специфична для каждого вещества; она изменяется также в зависимости от среды, в которой происходит диффузия: в воздухе CO_2 и O_2 могут диффундировать примерно в 10^4 раз быстрее, чем в воде.

Для газообмена растений можно применить закон Фика в форме уравнения, выведенного П. Гаастра:

$$F = \Delta C/\sum r. \qquad (13.2)$$

Скорость диффузии F соответствует интенсивности газообмена, т. е. на свету — интенсивности поглощения CO_2 (нетто-фотосинтеза), а в темноте — скорости поглощения O_2 в процессе дыхания. Газообмену способствует большой градиент концентрации ΔC между наружным воздухом и местом реакции в клетке. Газообмен уменьшается под влиянием ряда диффузионных сопротивлений $\sum r$. В понятие «диффузионное сопротивление» входят константа диффузии, сопротивление на поверхности раздела фаз, длина пути диффузии и его поперечное сечение.

Путь диффузии и диффузионные сопротивления в листе. На пути от наружного воздуха до хлоропластов двуокись углерода должна преодолеть ряд диффузионных сопротивлений. Молекулы CO_2 проникают через отверстия устьиц в систему межклетников. В клеточных стенках CO_2 переходит из газообразной фазы, в которой она могла распределяться довольно быстро, в жидкую фазу. Процесс растворения значительно замедляет диффузию CO_2. Внутри клетки растворенный CO_2 медленно движется к хлоропластам.

Рис. 13.1 дает представление о путях диффузии и встречаемых сопротивлениях около листа и внутри него. При фотосинтезе наибольшее парциальное давление $CO_2(C_A)$ имеет место снаружи от прилегающего к листу воздушного слоя, толщина которого зависит от величины и расположения листьев, от их опущенности и

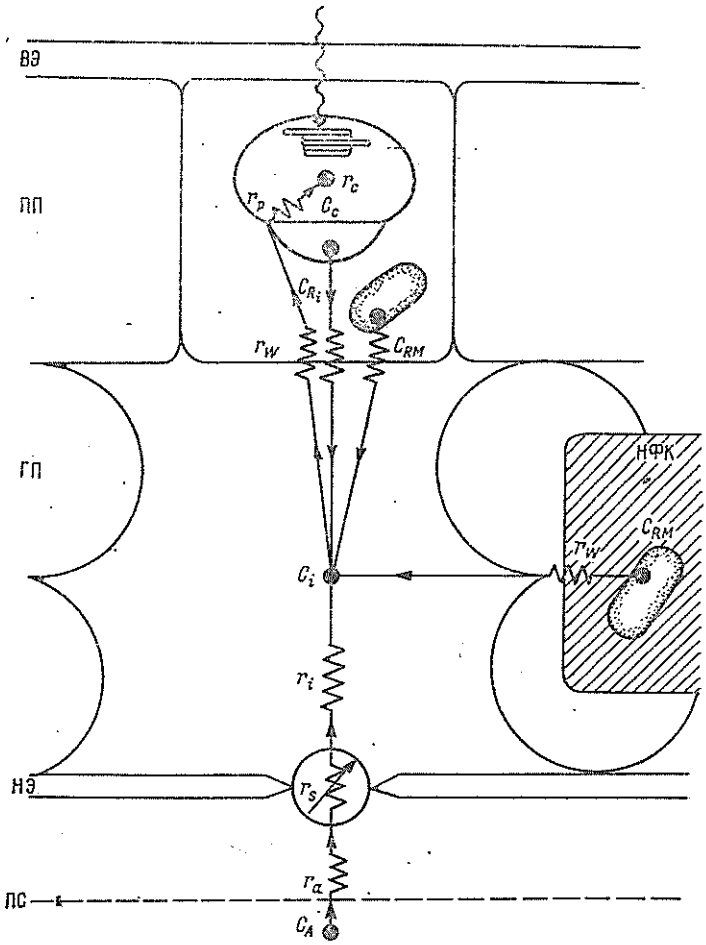


Рис. 13.1. Градиенты концентрации CO_2 и сопротивления ее транспорту в лист при фотосинтезе (по В. Лархеру, 1978).

Условные обозначения: ВЭ — верхний эпидермис, ПП — палисадная паренхима, ГП — губчатая паренхима, НЭ — нижний эпидермис, НФК — лишенные хлоропластов нефотосинтезирующие клетки. ПС — пограничный слой (воздушная пленка около листа). При фотосинтезе устанавливается градиент концентрации CO_2 от наружного воздуха C_A через воздух межклетников C_i до минимума концентрации в месте карбоксилирования C_{cx}. В систему межклетников листа CO_2 поступает не только извне, но и изнутри, в результате дыхательной активности митохондрий C_{RM} и фотодыхания C_{Ri}. Сопротивление транспорту CO_2 включает сопротивление пограничного слоя r_a, физиологически регулируемое устьичное сопротивление r_s, диффузионное сопротивление в системе межклетников r_i, сопротивление при растворении и транспорте CO_2 в жидкой фазе клеточной стенки r_w и в протоплазме (r_p). «Сопротивление карбоксилирования» обозначено r_c.

прежде всего от интенсивности движения воздуха. При полном безветрии он может иметь толщину несколько миллиметров, а сильный ветер полностью уносит его. Чем толще этот пограничный слой, тем больше создаваемое им сопротивление r_a. В таком случае CO_2 быстрее переходит в лист, чем притекает извне, и воздушная оболочка около листа становится беднее двуокисью углерода. В лист CO_2 проникает только через устьица. Хотя показано, что при необычно высоких внешних концентрациях CO_2 способна проходить через кутикулу и клетки эпидермиса, в естественных условиях кутикулярное поглощение CO_2 наземными растениями можно не принимать в расчет. Поэтому решающим препятствием для свободного поступления CO_2 в лист часто бывает устьичное сопротивление диффузии r_s; при закрытых устьицах оно возрастает до бесконечности.

Концентрация CO_2 в дыхательной полости и в воздухе межклетников (C_i) уже значительно ниже, чем в наружном воздухе, но еще не равна нулю. Ведь CO_2 не только поглощается из воздуха межклетников, но и выделяется в него благодаря дыханию зеленых и незеленых клеток. Точку компенсации в равновесии можно определить как такое состояние, при котором $C_i = C_A$. В таком случае даже при широко открытых устьицах газообмен прекращается. Сопротивление диффузии в системе межклетников (r_i) зависит от строения листа. Как правило, газопроводимость у теневых листьев лучше, чем у световых, а в мягких листьях лучше, чем в жестких ассимиляционных органах. Величинами примерно того же порядка, как и сопротивление диффузии в межклетниках, являются пограничное сопротивление r_w при переходе в жидкую фазу в клеточных стенках и диффузионное сопротивление r_p в протоплазме и хлоропластах.

Зачастую рассматривается сумма сопротивлений диффузии $r_i + r_w + r_p$, называемая «сопротивлением мезофилла» r_m.

Путь диффузии оканчивается в хлоропластах, где CO_2 присоединяется к акцептору. Крутизна градиентов CO_2, а тем самым и поступление CO_2 определяются в конечном счете скоростью переработки этого вещества. Карбоксилирование может отставать от световых реакций фотосинтеза и становиться «узким местом», лимитирующим скорость процесса в целом. В литературе это иногда называют «сопротивлением карбоксилирования» r_c, но это, собственно говоря, уже не диффузионное сопротивление.

Процесс фотосинтеза в листе подразделяется на два этапа: диффузия молекул CO_2 из воздуха к центрам карбоксилирования в клетке и биохимический цикл фотосинтеза в хлоропластах (З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Росс, 1980).

Сопротивления диффузии зависят от многих факторов. У сельскохозяйственных культур минимальные значения суммарного сопротивления меньше, чем у дикорастущих растений. Самые большие сопротивления наблюдаются у теневых растений под лесом.

Сопротивление воздуха вблизи поверхности листа зависит от размеров и формы листа, характера его поверхности, от скорости ветра. Обычно в полевых условиях $r_a \approx 0{,}2\ldots 1{,}0$ с/см.

Сопротивление устьиц зависит от числа и размеров устьиц, интенсивности ФАР, концентрации CO_2, водного дефицита листьев, температуры листа, скорости ветра, влажности воздуха, водного режима почвы, содержания минеральных веществ в почве. Поэтому сопротивление устьиц изменяется в широких пределах. При открытых устьицах у светолюбивых растений $r_s = 1$ с/см, при закрытых $r_s \approx 20$ с/см.

Диффузионное сопротивление мезофилла определяется анатомическим строением листа: его толщиной, размерами клеток, расчлененностью паренхимы, распределением хлоропластов в клетке. В последнее время установлено, что r_m не зависит от дефицита воды до наступления влажности увядания, $r_m \approx 10$ с/см.

Химическое сопротивление r_c выше сопротивления мезофилла r_m и является также видовой характеристикой, но в то же время зависит от интенсивности ФАР Q_Φ.

Одна из первых формул фотосинтеза предложена Е. Рабиновичем (1951):

$$\begin{aligned} \Phi_L(Q_\Phi) &= a_\Phi Q_\Phi, \quad \text{если} \quad Q_\Phi < Q'_\Phi, \\ \Phi_L(Q_\Phi) &= \frac{a_\Phi}{b}, \quad \text{если} \quad Q_\Phi \geqslant Q'_\Phi, \end{aligned} \tag{13.3}$$

где a_Φ и b — величины, зависящие от гидрометеорологических и биологических факторов, a_Φ — наклон световой кривой фотосинтеза при малых интенсивностях ФАР, т. е. $a_\Phi = \Phi_L/Q_\Phi$ при $Q_\Phi \to 0$, $\Phi_{max} = a_\Phi/b$ — насыщающая интенсивность фотосинтеза, Q'_Φ — насыщающая интенсивность ФАР. Эта формула аппроксимирует световую кривую фотосинтеза при помощи двух прямолинейных отрезков.

Другая формула в виде гиперболической зависимости предложена Монси и Саеки (M. Monsi, T. Saeki, 1953):

$$\Phi_L(Q_\Phi) = \frac{a_\Phi Q_\Phi}{1 + bQ_\Phi}. \tag{13.4}$$

Здесь обозначения такие же, как и в формуле (13.3). Исходя из того что интенсивность фотосинтеза при световом насыщении, т. е. при $Q_\Phi \to \infty$, равна $\Phi_{max} = a_\Phi/b$, формулу (13.4) можно представить в виде

$$\Phi_L(Q_\Phi) = \frac{\Phi_{max} bQ_\Phi}{1 + bQ_\Phi}, \tag{13.5}$$

или

$$\Phi_L(Q_\Phi) = \frac{\Phi_{max} Q_\Phi}{\Phi_{max}/a_\Phi + Q_\Phi}. \tag{13.6}$$

Как упоминалось ранее, Гаастра (P. Gaastra, 1959) применил закон Фика для описания диффузии молекул CO_2 в листе. Запи-

шем уравнение (13.2) в развернутом виде

$$\Phi_L = \frac{C_0 - C_{Cl}}{r_a + r_s + r_m}, \qquad (13.7)$$

где C_0 и C_{Cl} — концентрация CO_2 (г CO_2/см^3) соответственно во внешнем воздухе и вблизи хлоропластов. Если диффузионные процессы являются для фотосинтеза лимитирующими, то $C_{Cl} \to 0$ и выражение для интенсивности фотосинтеза при насыщающейся ФАР принимает вид

$$\Phi_{max} = \frac{C_0}{r_a + r_s + r_m + r_c}. \qquad (13.8)$$

13.2. Регулирование газообмена устьичным аппаратом

Степень открытия устьичных щелей и связанное с ней устьичное сопротивление диффузии зависят от изменений внешней среды и внутреннего состояния растения. Из внешних факторов на ширину устьичных щелей больше всего влияют свет, температура, влажность воздуха и условия водоснабжения.

На *свету* устьица открываются при хорошем водоснабжении тем шире, чем больше интенсивность освещения. М. Стольфелт (Stålfelt), обстоятельно изучивший зависимость устьичных движений от различных факторов, назвал этот механизм «фотоактивным открыванием».

Экспериментально установлено, что у большинства видов растений ночью устьица закрыты или полузакрыты, а при увеличении интенсивности ФАР (Q_Φ) быстро открываются. Эта зависимость описывается эмпирическими формулами типа

$$r_{sQ} = \frac{a_1}{b_1 + b_2 Q_\Phi}, \qquad (13.9)$$

где a_1, b_1 и b_2 — эмпирические постоянные.

Температура влияет прежде всего на скорость открывания устьиц, которая зависит от выработки энергии, необходимой для процесса движения. При более высокой температуре (15—30 °С) клетки располагают большим количеством энергии, и поэтому не удивительно, что механизм открывания действует быстрее. При температуре ниже примерно 5 °С устьица открываются очень медленно и не полностью, а при отрицательной температуре (от 0 до —5 °С) остаются закрытыми. При сверхоптимальных температурах устьица также открываются не полностью, однако при большой жаре (40—45 °С) у некоторых видов ширина устьиц вновь достигает максимума.

Согласно зависимости Маккри (K. J. McCree, 1974), устьица открываются при температуре T_{L1}, затем при увеличении T_L устьичное сопротивление уменьшается до минимального значения при T_{L0} и далее растет до закрывания устьиц при T_{L2}. Эмпирически

эта зависимость описывается формулой

$$r_{st} = \frac{T_L - T_{L1}}{\theta_1}\left(\frac{T_{L2} - T_L}{\theta_2}\right)^{\theta_2/\theta_1}, \qquad (13.10)$$

где $\theta_1 = T_{L0} - T_{L1}$ и $\theta_2 = T_{L2} - T_{L1}$.

Важным внешним фактором, регулирующим состояние устьиц, является *влага*. Ширина устьичных щелей увеличивается с повышением тургора замыкающих клеток. Как только тургор падает, щель закрывается. Стольфельт назвал такой процесс «гидроактивным закрыванием». Движение воздуха создает значительные градиенты давления водяного пара около поверхности листа, поэтому прямое влияние влажности воздуха на степень открытия устьиц проявляется особенно отчетливо при ветре.

Эксперименты показывают, что при убывании водного потенциала листа ψ_L устьичное сопротивление сначала растет медленно, но с приближением к определенному значению начинает быстро увеличиваться, так что если $\psi_L \to \psi_m$, то $r_s \to \infty$. Значение ψ_m, при котором устьица закрываются, зависит от предыстории водного режима растения; оно разное у различных видов и изменяется от $-10 \cdot 10^5$ Па у гигрофитов до $-50 \cdot 10^5$ Па у пустынных растений. Для описания этой зависимости предложены различные эмпирические формулы типа

$$r_{s\psi} = \frac{a_1 + a_2\psi_L}{b_1 + b_2\psi_L}, \qquad (13.11)$$

где a_1, b_1, a_2 и b_2 — эмпирические постоянные.

Установлено, что у некоторых видов растений r_s имеет прямую зависимость от градиента парциального давления водяного пара между листом и воздухом Δe. При низкой освещенности эта зависимость от Δe выражена сильнее, а при высоких температурах листа слабее. Для описания этой зависимости предложена эмпирическая формула

$$r_{s\,\Delta e} = a + b\,\Delta e + c\exp(-d\,\Delta e), \qquad (13.12)$$

где a, b, c и d — эмпирические постоянные.

Совместное действие вышеприведенных параметров на величину r_s задается либо в виде суммы

$$r_s = r_{s\psi} + r_{sQ} + r_{sT} + r_{s\,\Delta e}, \qquad (13.13)$$

либо в виде произведения

$$r_s = r_{s\psi} \cdot r_{sQ} \cdot r_{sT} \cdot r_{s\,\Delta e}. \qquad (13.14)$$

Довольно сложные механизмы устьичной регуляции можно экологически объяснить тем, что в растении существует не менее двух систем оптимизации, направленных, во-первых, на поддержание оптимальной температуры листьев для максимизации интенсивности фотосинтеза и других физиологических процессов, во-вторых, на рациональное использование воды в условиях водного стресса.

13.3. Фотосинтетическая способность и активность дыхания

Фотосинтетическая способность. При оптимальных условиях, т. е. при сильном освещении, хорошем водоснабжении, благоприятной температуре и искусственно повышенном (до 0,3—1 %) объемном содержании CO_2 в воздухе, травянистые растения способны усваивать за 1 ч до 150 мг CO_2 на 1 $дм^2$ листовой поверхности. При этом достигается предел карбоксилирующей способности (потенциального фотосинтеза). Поскольку в природе объемное содержание CO_2 в воздухе едва ли поднимается выше 0,03—0,04 %, растения в лучшем случае могут связывать 80 мг CO_2 на 1 $дм^2$ в 1 ч.

Из ассимилятов, выработанных в процессе фотосинтеза, не только строится тело растения, но определенная их часть всегда расходуется на дыхание, которое идет постоянно. Количество ассимилятов, выработанное растением в целом (и для построения своего тела, и для покрытия расходов на дыхание), называют истинным, или *брутто-фотосинтезом.* Видимый, или наблюдаемый фотосинтез — *нетто-фотосинтез* — это разность между количеством углекислоты, ассимилированной листом и одновременно выделенной в атмосферу в процессе дыхания.

Интенсивность фотосинтеза может быть выражена в разных единицах; чаще всего она выражается количеством поглощенной углекислоты в расчете на единицу площади листьев за единицу времени, т. е. в мг $CO_2/(дм^2 \cdot ч)$. В других случаях ведут расчет на сухую или сырую массу фотосинтезирующих тканей, т. е. в мг $CO_2/(г \cdot ч)$.

Интенсивность нетто-фотосинтеза при данном состоянии растения (его развития и активности), при естественном содержании CO_2 в воздухе и при оптимальных величинах всех прочих внешних факторов мы называем *фотосинтетической способностью.*

Фотосинтетическая способность — это величина, которая получается при стандартных условиях и может быть использована для характеристики определенных типов растений, а также видов, экотипов и даже отдельных сортов. Фотосинтетическая способность растений различна. На первом месте стоят C_4-растения (50—80 мг $CO_2/(дм^2 \cdot ч)$); в результате фиксации CO_2 на свету в клетках мезофилла этих растений образуются кислоты, содержащие четыре атома углерода. Из сельскохозяйственных культур в эту группу входят кукуруза, сорго, сахарный тростник, просо и др. За ними следует C_3-растения (20—40 мг $CO_2/(дм^2 \cdot ч)$); фиксирующие CO_2 на свету и в восстановительном цикле Кальвина с образованием трех атомов углерода. В эту группу входит большинство сельскохозяйственных растений: пшеница, ячмень, овес, рис, картофель, подсолнечник, фасоль, свекла и др.

Активность дыхания. Интенсивность дыхания у одного и того же вида растений зависит от изучаемого органа, от наличия дыхательного субстрата, состояния развития и активности и от температуры. Чтобы обеспечить возможность сравнения, используют

так называемую *специфическую активность дыхания*, т. е. интенсивность дыхания, измеренную при стандартной температуре, чаще всего при 20 или 25 °С, в темноте, выражаемую в количестве выделенной углекислоты на 1 г сухой массы в единицу времени, т. е. мг $CO_2/(г_{с.м} \cdot ч)$.

Дыхание травянистых (особено быстрорастущих) видов при одинаковых условиях вдвое интенсивнее (3—8 мг $CO_2/(г_{с.м} \cdot ч)$, чем дыхание листвы летнезеленых деревьев (1—4 мг $CO_2/(г_{с.м} \cdot ч)$, а дыхание последней — в среднем в пять раз интенсивнее по сравнению с вечнозелеными ассимилирующими органами. В пределах одной группы у светолюбивых растений уровень дыхания заметно выше, чем у теневыносливых.

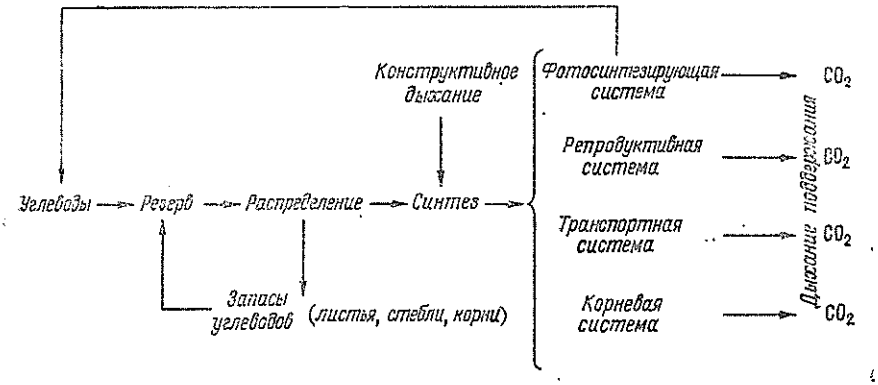


Рис. 13.2. Схема распределения углеводов на затраты дыхания (по Х. Г. Тоомингу, 1977).

При более детальном рассмотрении функцию дыхания можно разделить на две части: 1) *дыхание, связанное с поддержанием структур* органов растения; 2) дыхание, связанное с передвижением веществ, с фотосинтезом и созданием новых структурных единиц (белков, липидов, клеточных стенок и т. д.). Эта часть дыхания называется конструктивным дыханием, или *дыханием роста.* Необходимость в таком разделении функции дыхания вытекает из упрощенной схемы использования CO_2 растениями (рис. 13.2). Согласно этой схеме, углеводы, созданные в процессе фотосинтеза, накапливаются в резерв, откуда распределяются и используются для разных целей. Часть углеводов запасается в листьях. Показано (K. J. McCree, 1970), что интенсивность дыхания всего растения $\bar{R}_c$ за сутки пропорциональна массе растения M и его фотосинтезу Φ_c:

$$\bar{R}_c = c_1 M + c_2 \bar{\Phi}_c, \qquad (13.15)$$

где c_1, c_2 — соответственно коэффициенты затрат на дыхание, связанное с поддержанием и ростом. Для некоторых трав $c_1 \approx$ $\approx$ 0,014... 0,020 $CH_2O/(г \cdot сут)$, для ячменя $c_1 \approx 0{,}03$. Значение c_2 варьирует от 0,02 до 0,45 в зависимости от вида растения и фазы

его онтогенеза; широко используется среднее значение $c_2 = 0{,}25$, которое получено для клевера белого. Установлено, что коэффициент c_1 зависит от температуры.

В работах Карри (R. B. Curry, 1971) и де Вита (C. T. de Wit, 1970) формула (13.15) уточнена:

$$\overline{R}_c = c_2\overline{\Phi}_c + [Dm_1 + Em_2]\, Q_{10}^{(T-T_0)/T_0} + Hm_3, \qquad (13.16)$$

где m_1, m_2, m_3 — сухая фитомасса соответственно листьев, стеблей и корней; D, E, H — коэффициенты, характеризующие затраты на дыхание отдельных органов растения; $Q^{(T-T_0)/T_0}$ — множитель, учитывающий температурную зависимость дыхания (T — средняя температура растения, $T_0 = 10\,^{\circ}\mathrm{C}$).

Х. Г. Тооминг (1970) для функции дыхания листьев предложил формулу

$$R_L = c_1\Phi_{\max} + c_2\Phi_L, \qquad (13.17)$$

где c_1 и c_2 — коэффициенты затрат на дыхание, связанное с поддержанием структур и ростом.

Влияние стадии развития и состояния активности на дыхание и фотосинтетическую способность. Фотосинтетическая способность и активность дыхания — величины хотя и характерные для каждого вида растений, но не постоянные. Газообмен одного и того же растения изменяется в процессе индивидуального развития и в связи с сезонными и даже суточными колебаниями активности.

Молодые растения дышат более интенсивно, чем старые. Особенно высок уровень дыхания растущих частей: для осуществления большой синтетической работы протоплазма потребляет АТФ в количествах, значительно превышающих затраты при обычной жизнедеятельности. При помощи механизма обратной связи клетка способна стимулировать образование АТФ в процессе дыхания в соответствии со своими потребностями. В проростках и кончиках корней, при распускании листвы и в развивающихся плодах дыхание, обеспечивающее рост, в 3—10 раз больше обычного дыхания, поддерживающего жизнедеятельность. По мере дифференцировки и созревания тканей интенсивность дыхания снова сильно снижается.

В ходе развития изменяется и фотосинтетическая способность. У травянистых растений отдельные листья на побеге значительно различаются в зависимости от времени развертывания и степени дифференцировки, особенно у видов с быстрым развитием. С развертыванием листьев быстро развивается способность к интенсивному связыванию CO_2. Полностью развитые молодые листья обладают наивысшей продуктивностью, но уже через несколько дней или недель их фотосинтетическая способность ослабевает и продолжает неуклонно снижаться с увеличением возраста листьев.

Изменения интенсивности фотосинтеза и дыхания органов в зависимости от физиологического возраста растения описываются *онтогенетическими кривыми фотосинтеза и дыхания* (А. Н. Поле-

вой, 1978). Так, онтогеническая кривая фотосинтеза листьев имеет вид:

$$\alpha_\Phi = \exp\left[-a_e\left(\frac{\sum T_э - \sum T'_э}{10}\right)^2\right]. \qquad (13.18)$$

Здесь $\sum T_э$ — сумма эффективных температур от начала вегетации культуры, полученная нарастающим итогом; параметр a_e находится с помощью формулы

$$a_e = 100 \ln \alpha'_\Phi \Big/ \left(\sum T'_э\right)^2, \qquad (13.19)$$

где $\sum T'_э$ — сумма эффективных температур, при которой наблюдается максимальная интенсивность фотосинтеза листьев, α'_Φ — начальная интенсивность фотосинтеза по отношению к максимально возможной на начало вегетации при $\sum T_э = 0$.

13.4. Влияние факторов внешней среды на фотосинтез и дыхание растений

На CO_2-газообмен влияет целый ряд внешних факторов. Будучи фотохимическим процессом, фотосинтез непосредственно зависит от условий освещения. Темновые реакции фотосинтеза и дыхания — биохимические процессы, и их в первую очередь лимитируют температура и количество CO_2.

Влияние света на фотосинтез. Если подвергать листья все более сильному освещению, то поглощение CO_2 возрастает сначала пропорционально, а затем более медленно до некоторой максимальной величины (рис. 13.3).

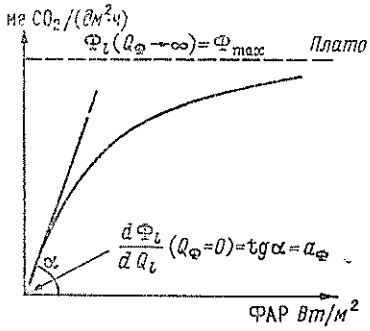


Рис. 13.3. Параметры световой кривой фотосинтеза (по Х. Г. Тоомингу, 1977).

Для оценки зависимости интенсивности фотосинтеза от плотности светового потока существует много формул, однако наиболее часто процесс фотосинтеза листа представляют в виде:

$$\Phi_l = \frac{a_\Phi Q_\Phi \Phi_{max}}{a_\Phi Q_\Phi + \Phi_{max}} \qquad (13.20)$$

или

$$0 = \Phi_l^2 \theta - \Phi_l (a_\Phi Q_\Phi + \Phi_{max}) + a_\Phi Q_\Phi \Phi_{max}, \qquad (13.21)$$

где Φ_l — интенсивность фотосинтеза; a_Φ — наклон световой кривой фотосинтеза; Q_Φ — плотность ФАР; Φ_{max} — величина, к которой стремится Φ при световом насыщении ($Q_\Phi \to \infty$); θ — безразмерная константа.

Функция (13.20) графически представлена на рис. 13.3. Кривая, изображенная на этом рисунке, известна под названием равносторонней гиперболы, и ее асимптоты пересекаются под углом 90° в точках $a_\Phi (Q_\Phi = -\Phi_{max}$ и $\Phi_l = \Phi_{max})$. Пунктирная линия на уровне Φ_{max} указывает величину, к которой стремится интенсивность фотосинтеза Φ_l при световом насыщении (*плато световой кривой фотосинтеза*). Наклон кривой в начале координат равен постоянному коэффициенту a_Φ:

$$\frac{d\Phi_l}{dQ_\Phi}(Q_\Phi = 0) = a_\Phi, \qquad (13.22)$$

который известен под названием *коэффициента эффективности фотосинтеза.*

Уравнение (13.21) представляет собой непрямоугольную гиперболу.

Зависимость фотосинтеза и дыхания от температуры. Температура влияет на процессы обмена веществ, изменяя скорость химических реакций и активность различных ферментов. Влияние температуры на скорость реакции в общем подчиняется правилу Вант — Гоффа: с повышением температуры скорость реакции k экспоненциально возрастает.

Ускорение реакции при повышении температуры на 10 °С выражают посредством температурного коэффициента Q_{10}:

$$\ln Q_{10} = \frac{10}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{k_2}{k_1}. \qquad (13.23)$$

В этом уравнении $T_2 - T_1$ обозначает температурный интервал, k_2 и k_1 — соответствующие скорости реакции. В небольшом диапазоне температур коэффициент Q_{10} остается довольно постоянным и составляет для большинства ферментативных реакций 1,4—2,0, а для физических процессов 1,03—1,3.

Действие температуры на фотосинтез связано с ее влиянием на темновые реакции и на вторичные процессы, тогда как фотохимический процесс почти не зависит от температуры. Поглощение и восстановление двуокиси углерода при повышении температуры ускоряются, пока не будет достигнут некоторый оптимальный уровень, который сохраняется в довольно широком диапазоне температур. Только при высоких температурах, когда начинается инактивация ферментов, а также нарушается согласованность различных реакций, фотосинтез быстро прекращается.

При повышении температуры темновое дыхание экспоненциально возрастает. Ниже 5 °С энергия активации для различных обменных реакций, участвующих в дыхании, велика, поэтому высок и коэффициент Q_{10}. У тропических растений Q_{10} при температуре ниже 10 °С скачкообразно увеличивается до 3 и более. Выше

25—30 °С температурный коэффициент дыхания снижается у большинства растений до 1,5 и менее. Наконец, при очень высоких температурах биохимические процессы протекают так быстро, что снабжение субстратом и метаболитами не может поспевать за обменом веществ, и интенсивность дыхания быстро падает (рис. 13.4).

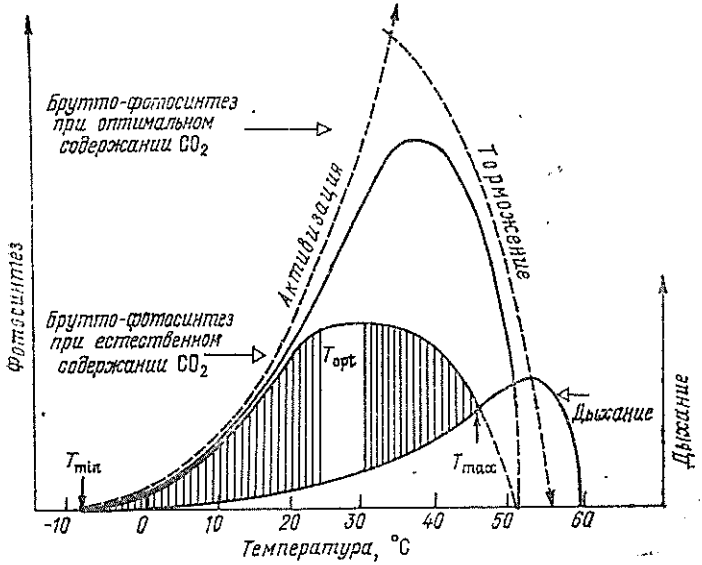


Рис. 13.4. Схема зависимости фотосинтеза и дыхания от температуры воздуха (по В. Лархеру, 1978).

Брутто-фотосинтез возрастает благодаря температурной активации участвующих в этом процессе ферментов до тех пор, пока недостаточное поступление CO_2 и тормозящие эффекты (например, несогласованное действие ферментов) не приведут к замедлению фотосинтеза. Дыхание экспоненциально возрастает в более широком диапазоне температур и быстро прекращается при высоких температурах, которые повреждают также и протоплазму. Разность между брутто-фотосинтезом и дыханием определяет уровень нетто-фотосинтеза (заштрихованная область) и положение его температурного минимума T_{min}, температурного оптимума T_{opt} и температурного максимума T_{max}.

Зависимость нетто-газообмена от температуры определяется разностью между скоростями фотосинтетического усвоения CO_2 и процессов дыхания при той же температуре (рис. 13.4). Кроме того, сказывается влияние температуры на ширину устьичных щелей. Повышение температуры воздуха до зоны оптимума усиливает нетто-фотосинтез, затем — тормозит этот процесс. Эти области определяются тремя основными точками: нижней границей (температурным минимумом) нетто-фотосинтеза, температурным оптимумом и верхней границей (температурным максимумом) нетто-фотосинтеза.

Оптимальная область температур. Оптимумом можно считать область температур, при которых нетто-фотосинтез достигает более

90 % своей максимальной величины. Температурный оптимум нетто-фотосинтеза уже, чем оптимальный интервал температур для активности важных фотосинтетических ферментов; в то время как брутто-фотосинтез еще близок к максимуму, дыхание усиливается и снижает чистую продуктивность.

У C_4-растений оптимум продуктивности наблюдается при высокой температуре (выше 30 °С, а иногда и при 50 °С). У C_3-растений оптимум (20—30 °С) зависит не столько от вида, сколько от теплового режима в естественном местообитании в период активной жизнедеятельности.

Нижняя температурная граница нетто-фотосинтеза. Тропические растения начинают продуктивно ассимилировать только при 5 или 7 °С, растения умеренной зоны и холодных областей фиксируют CO_2 и при температуре ниже 0 °С. У высших растений поглощение CO_2 прекращается, как только ассимилирующие органы начинают замерзать; это наступает во время вегетационного периода у большинства листостебельных растений при —1 или —2 °С, а у некоторых видов только при температуре —5... —7 °С.

Верхняя температурная граница нетто-фотосинтеза. При перегреве продуктивность фотосинтеза резко снижается, одновременно в результате повышенного дыхания высвобождается большое количество CO_2. У верхней границы нетто-фотосинтеза (50—60 °С для C_4-растений, 40—50 °С для C_3-растений) образующаяся при дыхании углекислота еще реассимилируется, однако при дальнейшем повышении температуры происходит выделение CO_2. Поэтому температурный максимум нетто-фотосинтеза можно рассматривать как тепловую точку компенсации, которая достигается тем раньше, чем чувствительнее к теплу фотосинтез и чем интенсивнее процесс дыхания.

Для описания влияния температуры воздуха на интенсивность фотосинтеза и дыхания предложены различные формулы. Так, в работе З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Росса (1980) температурная кривая фотосинтеза ψ_Φ аппроксимирована выражением

$$\psi_\Phi = 0{,}2\frac{T_l - T_0}{T_{opt} - T_0}\left[6 - \left(\frac{T_l - T_0}{T_{opt} - T_0}\right)^5\right], \qquad (13.24)$$

где T_l — температура листа, T_0 — пороговая температура начала фотосинтеза, T_{opt} — оптимальная температура протекания фотосинтеза.

Изменение интенсивности дыхания в зависимости от температуры φ_R в работе Карри (R. B. Curry, 1971) описывается формулой

$$\varphi_R = Q_{10}^{(T-T_0)/T_0}, \qquad (13.25)$$

где T — температура растения, T_0 — температура, при которой берется исходное значение дыхания.

Газообмен и водный дефицит у листостебельных растений. У листостебельных растений водный дефицит действует прежде всего на устьица, сужение которых ограничивает CO_2-газообмен.

При более сильном обезвоживании ухудшается состояние набухания протоплазмы, а в результате и продуктивность фотосинтеза. Как правило, высокий уровень поглощения CO_2 поддерживается только при хорошем водоснабжении; уже при небольшом дефиците воды оно начинает снижаться, а при дальнейшей потере влаги в конце концов полностью прекращается.

Ранее отмечалось, что среди сопротивлений на пути диффузии H_2O из листа в воздух или на пути CO_2 из воздуха в лист наиболее важное регуляторное значение имеет устьичное сопротивление r_s. Формулы (13.11) и (13.12) описывают влияние водного потенциала листа ψ_L и градиента парциального давления водяного пара между листом и воздухом Δe.

Карри (R. B. Curry, 1971) предложено уравнение зависимости устьичного сопротивления от водного потенциала почвы ψ_S:

$$r_s = \frac{7{,}5}{15 - \psi_S}. \tag{13.26}$$

Водный потенциал почвы в свою очередь связан с влажностью почвы:

$$\psi_S = d \exp(-n\theta_S), \tag{13.26а}$$

где θ_S — объемная влажность почвы; d, n — эмпирические параметры.

Обмен CO_2 и совместное действие внешних факторов. В естественных условиях факторы внешней среды действуют не изолированно, а совместно. Поэтому газообмен растения отражает взаимодействие всех внутренних и внешних факторов. Один из них всегда оказывается в минимуме и в течение некоторого времени лимитирует ассимиляцию, однако некоторое влияние оказывают и остальные факторы.

Для представления в явном виде зависимости фотосинтеза не только от плотности потока ФАР, но и от содержания углекислого газа иногда прибегают к допущению, что Φ_{max} есть функция от концентрации углекислого газа C_a, например,

$$\Phi_{max} = \tau C_a, \tag{13.27}$$

где τ — постоянный коэффициент, часто связываемый с проводимостью CO_2.

Тогда, уравнение (13.20) примет вид

$$\Phi = \frac{a_\Phi Q_\Phi \tau C_a}{a_\Phi Q_\Phi + \tau C_a}. \tag{13.28}$$

Для функции фотосинтеза листа Ю. К. Росс, З. Н. Бихеле (1968) и Г. В. Менжулин (1968) предложили полуэмпирическую формулу

$$\Phi_L = \frac{1}{1/\Phi_p + 1/a_C \mathcal{C}_0 + 1/a_\Phi \Pi}, \tag{13.29}$$

где C_0 — концентрация CO_2 в воздухе; Φ_p — интенсивность фотосинтеза при $C_0 \to \infty$ и $П \to \infty$ (так называемая интенсивность потенциального фотосинтеза); a_C — угол наклона углекислотной кривой фотосинтеза при насыщающей радиации, т. е. когда концентрация углекислоты в хлоропластах $C_{Cl} = 0$; $П$ — поглощенная листом ФАР.

Функцию фотосинтеза листа Рабинович (1951) предложил описывать формулой

$$\Phi_L = \frac{a_\Phi Q_\Phi}{1 + (a_\Phi r_c Q_\Phi)/C_{Cl}} = \frac{C_0 - C_{Cl}}{r_a + r_s + r_m}. \qquad (13.30)$$

Шартье (P. Chartier, 1970), исключая из этого выражения C_{Cl}, получил следующее уравнение:

$$(r_a + r_s + r_m)\,\Phi_L^2 - (r_a + r_s + r_m + r_c)\,a_\Phi Q_\Phi \Phi_L - C_0 \Phi_L + C_0 a_\Phi Q_\Phi = 0. \qquad (13.31)$$

Решение этого уравнения позволяет определить функцию фотосинтеза в зависимости от ФАР при разном сочетании сопротивлений диффузии и сопротивления карбоксилирования.

Влияние на фотосинтез факторов внешней среды (температуры T, влажности почвы W и др.) можно учесть путем умножения функции фотосинтеза:

на эмпирические функции воздействующих факторов

$$\Phi_L = \frac{\Phi_{max} a_\Phi Q_\Phi}{\Phi_{max} + a_\Phi Q_\Phi} f(T) \cdot f(W) \ldots \qquad (13.32)$$

или с учетом закона Либиха только на минимальное значение воздействующего фактора

$$\Phi_L = \frac{\Phi_{max} a_\Phi Q_\Phi}{\Phi_{max} + a_\Phi Q_\Phi} \min \{f(T),\ f(W),\ \ldots\}. \qquad (13.33)$$

Формулы (13.32) и (13.33) — эмпирические формулы, позволяющие учесть влияние температуры и влажности почвы и других факторов на фотосинтез.

13.5. Уравнение баланса CO_2

Для продуктивности и конкурентоспособности вида в месте его обитания важны не столько кратковременные максимальные величины фотосинтеза, сколько среднее эффективное поглощение CO_2. Даже при благоприятных климатических условиях, преобладающих в умеренной зоне, средние значения нетто-фотосинтеза составляют около 50—60 % от максимальных за день (т. е. 30—50 % максимальной фотосинтетической способности).

Для накопления углерода решающее значение имеет время, в течение которого возможно эффективное усвоение CO_2. Это — светлое время дня в период облиствления, если только мороз, вы-

сокая температура или засуха не блокируют ассимиляционную деятельность. Из суммарного поглощения углерода нужно вычесть прежде всего ночное выделение CO_2 листьями. Суточный баланс — это чистая продуктивность фотосинтеза за 24 ч, а сумма суточных балансов дает годовой баланс CO_2-газообмена. Суточный баланс будет положительным, если дневной приход больше ночного расхода; он будет тем выше, чем благоприятнее для фотосинтеза сочетание различных факторов в течение дня и чем короче и прохладнее ночь. Если поглощение CO_2 было непродолжительным или малоэффективным, то чистый выход продуктов ассимиляции будет невелик. Это имеет место в засушливые периоды и в сухих местообитаниях, а также после морозов. В глубокой тени слабо положительный, а иногда (особенно в теплые ночи) отрицательный суточный баланс — явление постоянное, которое может привести даже к голоданию растений. Таким образом, зависимость границ распространения определенных форм растений от минимума светового довольствия находит свое эколого-физиологическое объяснение.

Существуют определенные закономерности изменения с возрастом листа отношений между фотосинтезом, ростом и оттоком ассимилятов. Молодые листья имеют отрицательный газообмен CO_2. Их метаболизм осуществляется в значительной степени на основе углерода, поступающего из взрослых листьев. Баланс углерода молодых листьев L' в течение суток определяется следующим уравнением:

$$\Delta m_c(L') = \Phi_c(L') - R_c(L') + A_c(L''), \qquad (13.34)$$

где $\Delta m_c(L')$ — прирост; $\Phi_c(L')$ — фотосинтез за сутки; $R_c(L')$ — дыхание; $A_c(L'')$ — транспорт ассимилятов в молодые листья из старых листьев L.

Со временем в процессе роста молодой лист превращается из органа импортирующего в орган, экспортирующий органические вещества (ассимиляты) в другие части растения. Взрослый лист характеризуется нулевым или положительным углеродным балансом.

Растения состоят не только из зеленых, фотосинтетически продуктивных частей, но и из других тканей, которые только дышат и должны питаться за счет листьев. Поэтому в общем балансе обмена CO_2 необходимо учитывать и дыхание всех незеленых тканей. Эта «статья расхода» особенно важна в тех случаях, когда общая масса стеблей, корней, цветков и плодов значительна по сравнению с листовой массой.

Газообмен CO_2 между листом и воздухом является результатом протекания в листе процессов фотосинтеза и дыхания.

Выражение для газообмена CO_2 фитоценоза в интервале времени $t_1 - t_2$ записано Х. Г. Тоомингом (1967) в виде:

$$F_c(L_0) = \int_{t_1}^{t_2} \int_{0}^{L_0} [\Phi_s(L, t) - R_s(L, t)]\, dL\, dt, \qquad (13.35)$$

где $\Phi_s(L, t)$ и $R_s(L, t)$ — соответственно интенсивность фотосинтеза и дыхания горизонтального слоя фитоценоза с единичной толщиной в момент времени t.

В случае необходимости учитывать фотосинтез и дыхание других органов, кроме листьев (например, у злаковых культур), под L_0 следует понимать не относительную площадь листьев, а относительную площадь всех надземных органов.

Баланс CO_2 за сутки $F_c(L_0)$ получается из дневного выхода брутто-фотосинтеза всех фотосинтезирующих органов фитоценоза $\Phi_c(L_0)$ за вычетом суммарного за сутки дыхания как фотосинтезирующих, так и не фотосинтезирующих органов фитоценоза $R_c(L_0)$:

$$F_c(L_0) = \Phi_c(L_0) - R_c(L_0). \tag{13.36}$$

Баланс газообмена выражают в граммах или килограммах CO_2 на одно растение за день или год. Используя соответствующие коэффициенты (1 г $CO_2 \approx 0{,}65$ г органического сухого вещества), можно перевести эту величину в количество сухого органического вещества или углерода. Таким образом переходят от газообмена к продуктивности растения, предпосылкой которой является положительный баланс газообмена.

Глава 14

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ОБМЕН МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

14.1. Перенос питательных веществ в почве вблизи корневых поверхностей

Движение растворенных веществ в почве происходит в значительной степени за счет диффузии и конвекции в жидкой и паровой фазах, а также благодаря механическим передвижениям в почве (П. Х. Най, П. Б. Тинкер, 1980).

Рассмотрим движение растворенных веществ в почве в направлении оси x через две воображаемые плоскости единичной площади, расположенные перпендикулярно к направлению оси x и находящиеся на расстоянии δx друг от друга. Заключенный между ними объем равен $\delta x \times 1 = \delta x$. Внутри этого объема имеем:

{скорость притока растворенных веществ в объеме δx} =
= {скорость притока через плоскость x} —
— {скорость оттока через плоскость $x + \delta x$},

т. е.

$$\left(\delta x \frac{\partial C}{\partial t}\right)_x \approx (F_x - F_{x+\delta x}) \approx \left(-\frac{\partial F}{\partial x}\delta x\right)_t, \tag{14.1}$$

где F_x, $F_{x+\delta x}$ — поток растворенных веществ (моль/(см^2·с)) в плоскостях x и $x + \delta x$, C — количество растворенных веществ

на единицу объема почвы, моль/см³. Так как $\delta x \to 0$,

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_x = \left(-\frac{\partial F}{\partial x}\right)_t. \tag{14.2}$$

Уравнение (14.2) — одномерное уравнение неразрывности.

Если движение растворенных веществ происходит только в результате диффузии, то в сответствии с первым законом Фика

$$F = -D\frac{dC}{dx}, \tag{14.3}$$

где D — коэффициент диффузии, см²/с; и

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{dC}{dx}\right). \tag{14.4}$$

Это уравнение известно как второй закон Фика.

В уравнениях (14.3) и (14.4) F — поток; dC/dx — градиент концентрации в направлении оси x. Знак минус появляется из-за того, что движение происходит от высоких значений концентрации к низким в направлении увеличения x. Таким образом, коэффициент диффузии D определяется в соответствии с этим уравнением как коэффициент пропорциональности между величинами F и dC/dx, которые можно измерить экспериментально.

Простые катионы и анионы в растворах питательных веществ характеризуются коэффициентами диффузии порядка $(0{,}5—2{,}0) \times 10^{-5}$ см²/с при температуре 25 °С.

Растворенные вещества передвигаются с диффузионным потоком как в почвенном растворе, так и в адсорбированной форме благодаря поверхностной диффузии. Хотя подвижность в адсорбированной форме, вероятно, значительно ниже, чем в растворе, бóльшая часть растворенных веществ может находиться в этой форме, так что ею нельзя пренебрегать; принимая это во внимание, запишем

$$F = -D_l \theta f_l \, dC_l/dx + F_E, \tag{14.5}$$

где D_l — коэффициент диффузии растворенных веществ в свободном растворе, см²/с; f_l — фактор сопротивления, с$^{-1}$; C_l — концентрация растворенных веществ в почвенном растворе, моль/см³; F_E — избыточный поток, обусловленный возможностью поверхностной диффузии, моль/(см²·с); θ — объемная влажность почвы, см³/см³. Добавление члена F_E не означает, что поверхностная диффузия и диффузия в растворе являются независимыми и дополняющими друг друга.

В действительности растворенные молекулы или ионы будут постоянно двигаться из одной фазы в другую. Величина F_E характеризует избыточный поток, возникающий, когда растворенные вещества могут двигаться с диффузионным потоком несмотря на то, что они адсорбированы твердой фазой.

Так как по определению $F = -DdC/dx$, замена значения F в уравнении (14.5) приводит к выражению

$$D = D_l \theta f_l \, dC_l/dx + D_E, \tag{14.6}$$

где коэффициент D_E учитывает любое влияние, которое оказывает подвижность в твердой фазе на величину D. Если подвижностью адсорбированных растворенных веществ, передвигающихся с диффузионным потоком, можно пренебречь, поток будет обусловлен только диффузией через раствор. Тогда можно записать

$$D = D_l \theta f_l \, dC_l/dx. \qquad (14.7)$$

Остановимся подробнее на рассмотрении уравнения (14.6). В этом уравнении θ — объемная влажность почвы. Произведение θC_l есть количество растворенных веществ в растворе, отнесенное к единице объема почвы.

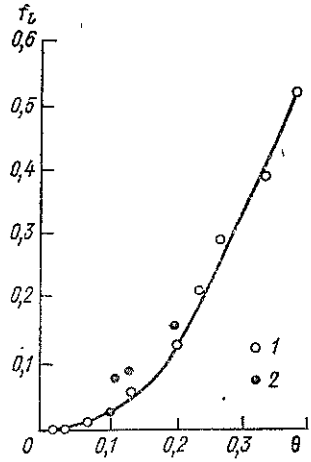


Рис. 14.1. Соотношение между фактором сопротивления диффузии f_l ($с^{-1}$) и объемной влажностью почвы θ ($см^3/см^3$) для иона хлора в опесчаненном суглинке (по П. Х. Наю, П. Б. Тинкеру, 1980).

1 — экспериментальные данные, *2* — данные Портера и др.

Фактор сопротивления f_l учитывает в первую очередь извилистую траекторию, по которой движутся растворенные вещества через поры. Он отражает влияние, с одной стороны, увеличения длины диффузионного пути, а с другой — уменьшения градиента концентрации вдоль этого пути. Он может также включать эффект возрастания вязкости воды вблизи заряженных поверхностей. В свою очередь, вязкость будет сказываться на подвижности всех растворенных веществ.

Соотношение между фактором сопротивления диффузии и объемной влажностью почвы для хлориод-иона в суглинке показано на рис. 14.1. Можно видеть, что в сухих почвах значение фактора сопротивления мало: менее 0,03 $с^{-1}$ при объемной влажности $<0{,}1$. В интервале объемной влажности 0,1—0,2 эта величина возрастает в 5—6 раз. При значениях объемной влажности 0,2—0,4 фактор сопротивления диффузии f_l увеличивается линейно с ростом влагосодержания и достигает 0,5—0,6 $с^{-1}$.

При заданном потенциале влаги глинистые почвы характеризуются более высоким значением f_l, чем песчаные, так как они содержат больше воды.

Исследования показали, что для насыщенных почв значения f_l колеблются от 0,4 до 0,7. Для среды, содержащей смесь сферических частиц различного размера, Бругман (1925) теоретически вывел соотношение $f_l = \theta^{0,5}$.

В действительности растворенные вещества движутся как в результате диффузии, так и благодаря конвекции (потока массы)

почвенного раствора, вызываемой такими процессами, как транспирация, испарение и инфильтрация.

Если растворитель (вода) также движется, растворенные вещества переносятся путем конвекции:

$$F = -D_l^* \frac{dC}{dx} + v_S C_l, \tag{14.8}$$

где D_l^* — коэффициент дисперсии, отличающийся от коэффициента диффузии, так как движение влаги само вызывает некоторое рассеивание молекул растворенных веществ, см^2/с; v_S — поток влаги в направлении x, см^3/(см^2·с); C — концентрация растворенных веществ в почвенном растворе, моль/см^3.

Следует отметить, что скорость обусловленного транспирацией потока воды к корневой поверхности редко превышает $5 \cdot 10^{-6}$ см/с. Скорость инфильтрации часто значительно выше и составляет 10 см/сут, или 10^{-4} см/с.

Фриссел и Поэлстра (1967) установили, что уравнение

$$D_l^* = D_l + \frac{v_S d\lambda}{\theta f_l}, \tag{14.9}$$

в котором коэффициент дисперсии возрастает линейно со скоростью потока v_S, описывает дисперсию стронция в насыщенных колонках, заполненных смесями песка со смолой или песка с глиной, в диапазоне значений v_S от $2 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-6}$ см/с; λ — фактор упаковки; для сферических частиц $\lambda = 1$, для частиц неправильной формы значение λ может возрастать до 10; d — диаметр частиц.

В естественных почвах, при скоростях потоков, которые имеют место при инфильтрации и отводе воды, коэффициент дисперсии будет значительно превышать коэффициент молекулярной диффузии.

Для совместного конвективного и диффузионного потока уравнение неразрывности, полученное путем подстановки величины F из уравнения (14.8) в уравнение (14.2), имеет вид:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_l^* \frac{dC}{dx}\right) - \frac{\partial (v_S C_l)}{\partial x}. \tag{14.10}$$

Следует заметить, что значение v_S находится под знаком дифференциала в тех случаях, когда движение воды не является равномерным.

Уровень содержания растворенных веществ может также изменяться в результате процессов, происходящих внутри объема δx. Чтобы учесть скорость таких реакций, добавим в уравнение (14.2) член $f(C)x, t$, часто называемый функцией источника, и получим выражение

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_x = \left(-\frac{\partial F}{\partial x}\right)_t + f(C)_{x,\,t}. \tag{14.11}$$

Примерами процессов, которые определяются этой функцией скорости, могут служить:

а) медленное освобождение ионов из неспособной к обмену формы и их переход к обменоспособной;

б) освобождение или фиксация растворенных веществ за счет трансформации почвенных органических веществ;

в) разложение органических растворенных веществ с помощью чисто химических или микробиологических воздействий.

Функция такого вида также особенно полезна для выражения скорости поглощения питательных веществ системой корней в небольшом ограниченном объеме почвы.

Если движение происходит в направлении, перпендикулярном к поверхности цилиндра, например к корню, уравнение (14.11) можно записать в виде

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rF_r) + f(C)_{r,t}, \qquad (14.12)$$

где r — расстояние по радиусу от оси цилиндра, см.

Уравнение неразрывности для почвенного цилиндра с корнем на его оси следует из уравнения (14.12):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD\frac{dC}{dr} + rv_S C_l\right), \qquad (14.13)$$

где v_S — поток влаги по направлению к корню, C_l — концентрация растворенного вещества в жидкой фазе.

Граничные условия для бесконечного объема почвы имеют вид

$$t = 0,\ a_r < r < \infty,\ C_l = C_{li}$$

$$t > 0,\ r = a_r,\ F = \alpha C_l,$$

где a_r — радиус осевого корня, см (для зерновых культур 0,01—0,03 см); α — поглотительная способность корня, см/с (для зерновых культур — $0{,}3 \cdot 10^{-5}$—$1{,}8 \cdot 10^{-5}$ см/с).

14.2. Поглощение растворенных веществ растениями

Поступление ионов в корень. Из почвенного раствора ионы питательных солей попадают в паренхиму коры корня путем диффузии и с поступающей водой. Там они связываются благодаря зарядам на поверхности влажных клеточных стенок и на внешней границе протопластов. Это процесс чисто пассивный, он обусловлен градиентами концентрации и электрических зарядов между почвенным раствором и внутренней частью корня. Наружную зону корня, в которой происходит выравнивание концентрации с внешним раствором путем диффузии, называют *кажущимся свободным обменным пространством.*

Ионы плохо проникают в живую клетку из-за водной оболочки. Они транспортируются через биомембраны с помощью молекул-«переносчиков»[1] и накапливаются внутри клеток. Этот активный

[1] «Переносчики» рассматриваются как соединения, которые образуют комплексное соединение с ионом, в результате чего он становится «растворимым» в мембране (П. Най, П. Тинкер, 1980).

перенос ионов в клетку связан с преодолением электрохимического градиента и поэтому требует затраты энергии, источником которой служит дыхание. Активное поглощение питательных веществ зависит от факторов, влияющих на интенсивность дыхания.

Поглощение ионов обнаруживает свойства катализируемой ферментами реакции, в которой отношение между концентрацией снаружи мембраны и потоком через нее подчиняется уравнению кинетики Михаэлиса — Ментен. Тогда поток ионов $F_{кл}$ внутрь клетки корня может быть задан в виде

$$F_{кл} = F_{max} \frac{C_{la}}{K_m + C_{la}}, \qquad (14.14)$$

где F_{max} — максимальный поток в клетку, C_{la} — концентрация растворенного вещества у поверхности корней, K_m — постоянная Михаэлиса. Отсюда следует, что скорость поглощения V всеми корнями будет определяться аналогичным соотношением

$$V = V_{max} \frac{C_{la}}{K_m + C_{la}}, \qquad (14.15)$$

где V_{max} — максимальная скорость поглощения всеми корнями.

Зависимость между потоком через корневую поверхность вовнутрь F и величиной C_{la} (при достаточно низкой концентрации) для любого короткого корневого сегмента приближенно выражается следующим уравнением:

$$F = \left(\frac{F_{max}}{K_m + C_{la}}\right) C_{la}. \qquad (14.16)$$

При $K_m \gg C_{la}$ это уравнение сводится к выражению

$$F \simeq \left(\frac{F_{max}}{K_m}\right) C_{la}. \qquad (14.17)$$

Поток ионов через корневую поверхность, как видно из табл. 14.1, при концентрации раствора $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л для P и $4 \cdot 10^{-4}$ моль/л для K составил соответственно $0{,}8 \cdot 10^{-12}$ г·ион/(см²·с) и $1{,}5 \cdot 10^{-12}$ г·ион/(см²·с). При более высокой концентрации раствора для N ($2{,}1 \cdot 10^{-3}$ моль/л) этот поток составил $7{,}1 \times 10^{-12}$ г·ион·(см²·с).

Таблица 14.1

Скорость поглощения ионов корнями ячменя из питательных растворов (по П. Х. Наю, П. Б. Тинкеру, 1980)

Концентрация раствора C_{la}, моль/л	Элемент	$F \cdot 10^{-12}$, г·ион/(см²·с)	$I \cdot 10^{-13}$, г·ион (см·с)	$S \cdot 10^{-10}$, г·ион/(г·с)	$\alpha \cdot 10^{-5}$, см/с	Радиус корня a_r, см
$4 \cdot 10^{-4}$	K	1,5	1,5	2,1	0,37	0,015
$1 \cdot 10^{-4}$	P	0,8	0,78	1,1	0,82	0,015
$2{,}1 \cdot 10^{-3}$	N	7,1	11,9	6,1	0,3	0,025

Растворенные вещества абсорбируются поверхностью корня со скоростью, определяемой их концентрацией в почвенном растворе вблизи него C_{la}, поглотительной способностью корня α и размерами корня в виде его длины или единицы массы.

Зависимость между поглощением и концентрацией C_{la} можно представить в виде

$$I = 2\pi\alpha a_r C_{la}, \tag{14.18}$$

$$S = \frac{2\alpha C_{la}}{a_r}, \tag{14.19}$$

где I — приток, т. е. скорость поглощения, отнесенная к единице длины корня; S — единичная скорость поглощения, отнесенная к единице сырой массы корня (см. табл. 14.1). В последнем уравнении предполагается, что плотность корней равна единице и значение S практически характеризует поглощение единицей объема. Если эти параметры осреднены по всей корневой системе, то осреднение обозначается чертой сверху, например $\bar{S}$. Произведению $\bar{\alpha} a_r$ дано название «коэффициента потребности корня».

Следовательно, поглощение является потоком через поверхность корневого цилиндра. Если корни имеют корневые волоски и ионы поступают через поверхность последних, то поток через поверхность собственно корня увеличивается.

Скорость поглощения питательных веществ целым растением определяется соотношением

$$\frac{du}{dt} = \bar{I} L_r = \bar{F} A_r = \bar{S} m_r, \tag{14.20}$$

где du/dt — скорость поглощения питательных веществ целым растением, моль/с; L_r — длина корня, см; A_r — площадь поверхности корня, см^2; m_r — масса корня, г.

Влияние температуры почвы. По данным А. И. Коровина (1972), при увеличении температуры в зоне корней кукурузы до 30 °С скорость поглощения питательных веществ возрастает ($Q_{10} \approx 2$). При дальнейшем увеличении температуры величина Q_{10} уменьшается. С повышением температуры в зоне корней интенсивность поглощения элементов питания во всех случаях (рис. 14.2 *а*) возрастает, но с разной скоростью. Так, при температуре 1... 5 °С интенсивность поглощения азота, фосфора, кальция и серы практически не изменяется. Исключение составляет калий, поглощение которого возрастает более чем в два раза. В интервале температур 5... 10 °С незначительно снижается поглощение фосфора и кальция; поглощение серы возрастает в 7 раз, азота — примерно в 4 раза.

С физиологической точки зрения для кукурузы температура 10 °С представляет особый интерес. Дело в том, что до температуры 8 °С рост кукурузы делением практически отсутствует. Он начинается при температуре 8 °С и интенсивно нарастает при дальнейшем повышении температуры. При 10 °С этот процесс идет при сниженном поступлении фосфора и кальция, в результате чего

вновь образующиеся клетки обеднены ими. Интенсивное поглощение фосфора и кальция наблюдается при температуре около 12 °С.

Интенсивное поглощение азота отмечается при температуре 10... 15 °С. По сравнению с интервалом 5... 10 °С оно увеличивается более чем в 2 раза. Поглощение серы, наоборот, становится менее интенсивным. При температуре 30 °С поступление всех элементов, за исключением калия, замедляется. Следовательно, температура 20... 25 °С в зоне корней с точки зрения поглощения большинства элементов питания является оптимальной. Зависимость усвоения растениями азота, фосфора и калия от температуры приведена на рис. 14.2 *б*.

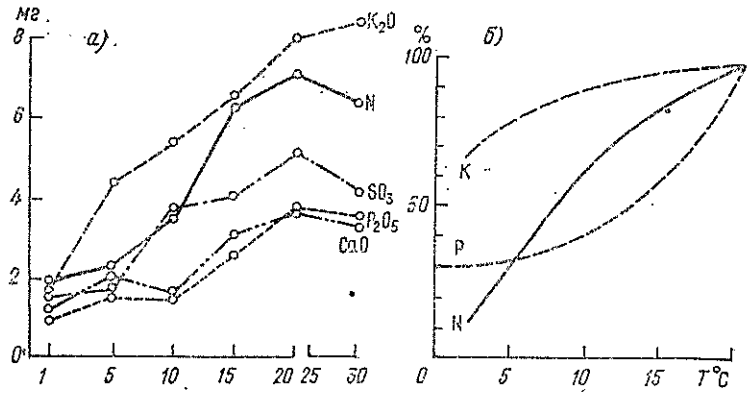


Рис. 14.2.

а) Поглощение (мг на одно растение) элементов минерального питания растениями кукурузы на 6-е сутки воздействия различных температур в зоне корней при естественном освещении (по А. И. Коровину, 1972).
б) Зависимость усвоения растениями (%) азота N, фосфора P и калия K от температуры *T* (по М. С. Кулику, 1966).

Обобощение данных отечественных и зарубежных исследований позволяет сделать вывод, что температура питательного раствора 5 °С является пределом, ниже которого поглощение питательных элементов большинством растений почти прекращается.

При температуре 10 °С и ниже задерживается поступление питательных элементов в растения. Наиболее благоприятные условия для поглощения питательных элементов создаются при температуре питательного раствора 18 °С и выше.

Влияние влажности почвы. Влажность почвы оказывает влияние на абсорбцию растворенных веществ целыми растениями. Подробнее объяснение этого влияния чрезвычайно сложно, так как оно включает в себя как перенос почвенных растворенных веществ, так и сложные физиологические реакции растений. Рассмотрим влияние снижения влажности на поглощение растворенных веществ отдельным корнем.

В опытах Данхема и Ная (1976) изучалось влияние водного потенциала на поглотительную способность корня (табл. 14.2).

Таблица 14.2

Влияние потенциала почвенной влаги у корневой поверхности на поглощение, поглотительную способность корня и относительную концентрацию у поверхности плоских корней лука (Dunham R. J., Nye P. H., 1974)

Начальная объемная влажность почвы θ	Продолжительность опыта, число дней	Средний поток влаги $v_S \cdot 10^8$, см³·см²/с	C_l/C_{ll} у корневой поверхности	α·10⁻⁶ см/с: почвенный опыт	α·10⁻⁶ см/с: встряхиваемый раствор [1]	Конечное значение потенциала влаги у корневой поверхности, $\psi_S \cdot 10^5$ Па	Поглощение, мкмоль: измеренное	Поглощение, мкмоль: предсказанное
				Хлорид				
0,20	6,0	0,25	0,20	1,0	7,0	—25	0,84	0,51
0,27	6,0	0,63	0,20	2,0	7,0	—6,5	2,7	1,7
0,45	6,0	2,09	1,40	1,2	1,0	> —0,05	5,7	4,3
				Фосфат				
0,14	4,5	0,12	1,0	0,4	> 100	—3,3	0,004	0,003
0,18	4,5	0,32	0,06	10	> 100	—0,15	0,015	0,020
0,36	4,5	0,70	0,06	20		—0,10	0,043	0,050
				Калий				
0,14	4,5	0,12	0,004	(100)		—3,3	5,7	1,3
0,18	4,5	0,32	0,077	10		—0,15	3,7	1,4
0,36	4,5	0,70	0,036	50		—0,10	7,3	4,5

[1] Поглотительная способность корня при поглощении из свободного раствора, концентрация которого равна конечной концентрации у поверхности плоского корня.

В опытах с хлоридом значение v_S заметно уменьшается для умеренно влажной почвы и существенно для сухой почвы, в которой потенциал влаги у поверхности корня снижается до $-25 \cdot 10^5$ Па. Отношение конечной к начальной концентрации C_l/C_{li} у корневой поверхности к концу опыта приближается к величине v_S/α; причем оно значительно ниже для сухой и умеренно влажной почв по сравнению с влажной почвой. В сильно увлажненной почве отношение C_l/C_{li} уменьшается через 2,5 дня до значений, меньших 1,0, а через 6 дней возрастает до 1,4, так как водный потенциал v_S влажной почвы больше, чем значение α. Значение α для сильно увлажненной почвы хорошо согласуется со значением, определенным для питательного раствора. Для умеренно влажной почвы значение α несколько ниже, а для сухой почвы значительно ниже, чем соответствующие значения, для питательных растворов.

В сухой почве слабая конвекция, малая поглотительная способность корня и заторможенная диффузия хлорида способствуют снижению поглощения.

В опытах с фосфатами в умеренно и сильно увлажненных почвах отношение концентраций C_l/C_{ll} было низким, что свидетельствует о наличии значительного сопротивления диффузии. В сухой почве при потенциале влаги $-3{,}3 \cdot 10^5$ Па, поглотительная способность корня заметно понижена.

В опытах с калием при всех уровнях влажности наблюдалось значительное сопротивление диффузии, а поглотительная способность корня оставалась высокой в сухой почве.

14.3. Транспорт минеральных веществ в растении

Поглощаемые ионы начинают свой путь в «кажущемся свободном пространстве» корня. Там они поступают в цитоплазму паренхимных клеток и через нее проходят в клеточный сок. Транспорт ионов от клетки к клетке осуществляется благодаря прямому контакту цитоплазмы через плазмодесмы. Вакуоли служат только местами накопления и не играют никакой роли в ближних перемещениях солей. Питательные соли, просочившиеся в вакуоли или активно выделенные в них, остаются там до тех пор, пока вновь не произойдет их активный перенос в цитоплазму. Ближний транспорт происходит, таким образом, в обход вакуолей через симпласт корня, т. е. по непрерывной цепи живых протопластов. Симпластический путь ведет через эндодерму в центральный цилиндр. Там паренхимные клетки соприкасаются с проводящими элементами. Клетки флоэмы получают ионы через симпластический контакт. В заполненные водой сосуды и трахеиды ионы проникают пассивно, по градиенту концентрации; кроме того, происходит и активное выделение их в воду, находящуюся в сосудах.

По путям ксилемы питательные соли движутся вверх с транспирационным током и распределяются по всему растению. В конечных пунктах сосудистой сети они диффундируют через клеточные стенки на поверхность протопластов в паренхиме проводящих пучков, в которую они активно выделяются. Ближний транспорт происходит снова симпластическим путем, и опять часть питательных солей откладывается в вакуолях. В цепи транспорта питательных веществ лимитирующим фактором служит перемещение ионов через симпласт в корне; в большинстве случаев транспирационный ток мог бы переносить значительно большие количества питательных солей.

Предложена концепция количественного описания транспорта минеральных веществ в растении (Дж. Г. М. Торнли, 1976). При этом исходят из представления, что сухая фитомасса в растении существует в двух видах — в виде фонда свободных углеводов N, P, K и в виде структурной фитомассы, состоящей из связанных углеводов и более сложных биохимических соединений. Причем фонд азота состоит преимущественно из свободных нитратов, фонд фосфора — из мобильного P и фонд калия — из иона K^+.

Количественно уровень фонда в растении можно характеризовать его концентрацией, причем концентрация фонда j-го вещества в k-м органе растения $x_k^{(j)}$ определяется соотношением

$$x_k^{(j)} = m_k^{(j)}/m_{sk}, \tag{14.21}$$

где $m_k^{(j)}$ — масса j-го фонда в k-м органе, г; m_{sk} — структурная масса k-го органа, г; индекс j означает углеводы, азот, фосфор и калий. Единицы измерения $x_k^{(j)}$ — грамм фондовой массы (грамм структурной массы)$^{-1}$.

В процессе роста фондовое вещество перемещается из одного органа в другой. Скорость транспортного тока фондовой массы описывается формулой типа

$$I_{kl}^{(j)} = \frac{x_k^{(j)} - x_l^{(j)}}{r_{kl}^{(j)}} \beta_{kl}, \tag{14.22}$$

где $I_{kl}^{(j)}$ — скорость транспортного тока вещества j-го фонда из k-го органа в l-й орган, выраженная в г фондовой массы/с; $r_{kl}^{(j)}$ — транспортное сопротивление $r_{kl}^{(j)}$-го фонда; β_{kl} — фактор, учитывающий изменение $r_{kl}^{(j)}$ с увеличением размеров растений. Единицы измерения $r_{kl}^{(j)}$ зависят от выбора β_{kl}, причем $\beta_{kl}^{(j)}/r_{kl}^{(j)}$ — выражается в г структурной массы/с.

Транспортные сопротивления фондовых материалов $r_{kl}^{(j)}$ являются важными физиологическими характеристиками передвижения веществ внутри растения, однако в настоящее время они еще мало изучены.

Важную роль в передвижении солей играет и флоэма. Через многочисленные места соприкосновения, особенно в корне и в стеблевых узлах, оба пути дальнего транспорта соединены друг с другом. Вместе с током ассимилятов к местам большей потребности направляются и минеральные вещества. Транспорт по ситовидным трубкам обеспечивает прежде всего перемещение уже усвоенных минеральных веществ внутри растения. Различные биоэлементы перемещаются не одинаково легко: те элементы, которые переводятся в органическую форму (например, N, P и S), хорошо транспортируются, так же как и щелочные ионы ($K^+ > > Mg^{2+} > Ca^{2+} \approx Mn^{2+}$) и Cl^-. Плохо перемещаются тяжелые металлы и щелочноземельные ионы, особенно кальций, который поэтому все больше накапливается в листьях (в конце пути ксилемного транспорта).

14.4. Усвоение минеральных веществ в растении

В растении при образовании структурной фитомассы необходимые исходные вещества — вода, углеводы, N, P и K — используются в соотношениях, определяемых химическим составом

структурной массы. В качестве первого приближения принимается, что эти соотношения мало меняются со временем и от вида к виду и являются, таким образом, универсальными характеристиками растительной массы. При образовании структурной массы, например, азот и углероды используются в соотношении 1 г азота на 8,25 г углеводов. Фонды воды, углеводов, N, P и K, являющиеся исходными веществами для создания фитомассы, одновременно выполняют регуляторные функции при ростовых процессах. Недостаток одного из фондов в каком-либо органе растения нарушает нормальный ход роста и вызывает разбаланс фондов в растении. В полевых условиях из элементов N, P и K наиболее часто недостает азота.

В случае азота пополнение фонда в листьях происходит транспортным током из корней $I_{RL}^{(N)}$, а расходование — включением азота в структурную массу листьев в процессе их роста, т. е. $G_{2L}^{(N)} = \gamma_N dm_{sL}/d\tau$, где γ_N — количество фондового азота, включаемое в создание 1 г структурной массы. Величина γ_N выражается в граммах азота × (грамм структурной массы)$^{-1}$. Тогда уравнение

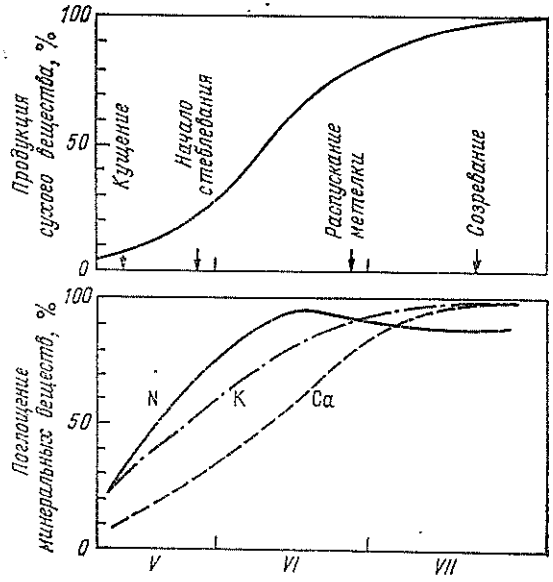


Рис. 14.3. Поглощение минеральных веществ и накопление сухого вещества растущими и созревающими растениями овса (Scharter и Mengel, Mengel, 1968).

Поглощение минеральных веществ дано в процентах от общего поглощения за период вегетации, прирост сухого вещества — в процентах от конечной величины; N и K особенно интенсивно поглощаются молодыми, быстро растущими растениями; поглощение Ca следует в основном за ходом образования сухого вещества.

баланса концентрации фондового азота в листьях можно записать в следующем виде:

$$m_{sL}\, dx_L^{(N)}/d\tau = I_{RL}^{(N)} - \gamma_N\, dm_{sL}/d\tau. \qquad (14.23)$$

Аналогичные уравнения записываются для фондов фосфора и калия.

Пополнение фонда азота происходит за счет его поглощения из почвы в соответствии с формулой (14.19). Расходование фонда азота происходит за счет транспорта азота в другие органы и за счет роста самих корней. Уравнение баланса азота в корнях растения имеет вид

$$m_{sR}\, dx_R^{(N)}/d\tau = \bar{S} m_{sR} - \sum_k I_{Rk}^{(N)} - \gamma_N\, dm_{sR}/d\tau, \qquad (14.24)$$

где индекс k означает суммирование по всем органам, кроме корней.

В развивающихся растениях поглощение минеральных веществ и включение их в состав органов опережают прирост массы (рис. 14.3). Поэтому важнейшие элементы минерального питания должны быть уже заранее в наличии; таким образом, становится понятным, что нехватка минеральных элементов с самого начала ограничивает синтез органических веществ. У деревьев распускающиеся листья заблаговременно накапливают N, P, K и другие элементы. В дальнейшем количество органического вещества увеличивается быстрее, чем количество минеральных веществ, так что соотношение смещается в пользу органического вещества.

Глава 15

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ПОСЕВОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

15.1. Общая характеристика продукционного процесса

Продукционный процесс растений (ППР) — это совокупность отдельных взаимосвязанных процессов, из которых фундаментальными являются фотосинтез, дыхание и рост, в ходе которых происходит формирование урожая (рис. 15.1). ППР зависит от условий внешней среды и сам преобразует среду, в основном через архитектонику, газообмен и транспирацию фитоценоза.

Растения, поглощая листьями из атмосферы CO_2 и корневой системой воду из почвы, создают в процессе *фотосинтеза* под воздействием энергии солнечной радиации органическое вещество в виде ассимилятов. Одновременно происходит транспирация, которая ответственна за снабжение растений водой и элементами минерального питания и за регуляцию теплового режима расте-

ний. В зависимости от интенсивности ФАР, водного и температурного режима, скорости ветра, концентрации CO_2 в воздухе, плодородия почвы и видовых особенностей растений процесс фотосинтеза может идти с большей или меньшей скоростью.

Другой фундаментальный процесс — *дыхание* — обеспечивает снабжение энергией различных биохимических процессов синтеза, связанных с ростом, построением новых структурных элементов растений и с транспортом веществ, а также поддержание живых

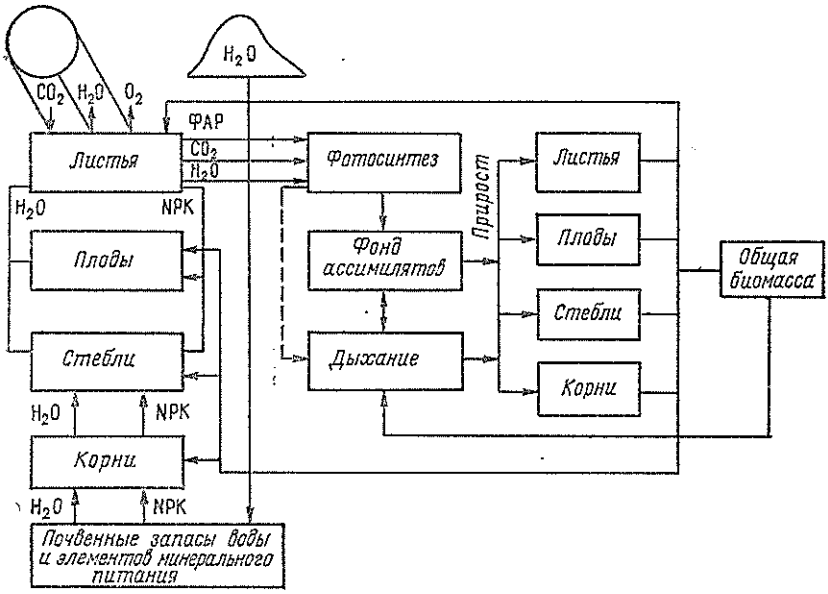


Рис. 15.1. Блок-схема продукционного процесса (по Х. Г. Тоомингу, 1984).

структур органов растений. При этом затрачивается органическое вещество, накопленное в органах растений.

Третий фундаментальный процесс — *рост*. Фотосинтез и рост рассматриваются как сопряженные процессы. Энергетическое обеспечение ростовой функции со стороны фотосинтеза является непременным условием роста. Система донорно-акцепторных отношений является основным проявлением интеграции фотосинтеза и роста на уровне целого организма. Между донором и акцептором формируются временные промежуточные фонды ассимилятов. Фонды могут находиться в каждом органе, но более мобильные из них, вероятно, находятся в листьях и стеблях. Ассимиляты, запасенные на более длительный период, большей частью накапливаются в корнях. В условиях экологического стресса, когда подавляется фотосинтез, величина фондов становится существенным фактором формирования урожая.

Фонды обеспечивают частичную автономность функции фотосинтеза и роста. Возможен ограниченный рост без фотосинтеза при условии, что энергетическое снабжение происходит за счет запасных субстратов предшествующего фотосинтеза. Таким путем растут проростки, побеги и листья из почек деревьев. Так происходит рост в ночные часы и т. д. Налив зерна у зерновых культур и формирование клубней у картофеля осуществляется также не только за счет «свежих» ассимилятов, образующихся в листьях, но и путем использования фондов ассимилятов. Современные экспериментальные и теоретические исследования Х. А. Молдау (1985), Дж. Х. М. Торнли (1982) и др. позволили расширить наши знания о суточной и онтогенетической динамике фондов.

Рост — это составная часть продукционного процесса, который сопровождается увеличением массы и размеров органов, органелл и живого организма в целом.

Наиболее элементарный показатель роста фитомассы — это *прирост*, т. е. разница между сухой фитомассой за определенный промежуток времени: $\Delta M = M_2 - M_1$. Прирост сухой фитомассы не является исчерпывающей характеристикой при оценке роста органов растений, так как не учитывает химический состав фитомассы. Прирост сухой массы происходит за какой-то временной интервал Δt, поэтому употребляется понятие *абсолютной скорости роста*:

$$\Delta M/\Delta t = (M_2 - M_1)/(t_2 - t_1) \qquad (15.1)$$

и относительного прироста:

$$R_r = (M_2 - M_1)/[\overline{M}(t_2 - t_1)], \qquad (15.2)$$

где $\overline{M}$ — средняя сухая масса растения за период $t_2 - t_1$.

При анализе прироста биомассы используется и величина $E_{\text{п. ф}}$, равная

$$E_{\text{п. ф}} = \frac{1}{\overline{L}_0} \frac{\Delta M}{\Delta t}, \qquad (15.3)$$

где $\overline{L}_0$ — средняя суммарная площадь листьев растения за период Δt. Величина $E_{\text{п. ф}}$ названа А. А. Ничипоровичем (1956) *чистой продуктивностью фотосинтеза посевов*. Она широко используется для характеристики фотосинтетической активности листовой поверхности.

В период вегетативного роста и в оптимальных условиях увеличение структурной массы происходит пропорционально самой массе (стадия экспоненциального роста). Рост отдельных органов растения в оптимальных условиях в течение всего онтогенеза имеет характерные для данного вида закономерности, заданные генетическим кодом растения. При недостатке какого-либо фондового вещества рост ограничен и пропорционален концентрации фондового вещества. При полных фондах лимитирование роста фондами отсутствует.

Кроме фондов углеводов и N, P, K, существенное влияние на рост оказывают температура и водный режим растений. Рост происходит в определенном температурном интервале, а внутри этого интервала при оптимальной температуре рост достигает максимальной скорости. При больших значениях водного потенциала ψ_k k-го органа вода не лимитирует его рост, однако при ухудшении водного режима растения (ψ_k убывает) рост будет заторможен и прекратится, если ψ_k достигнет некоторого критического значения $\psi_{k\text{кр}}$. Учитывая все вышеизложенное, рост структурной массы k-го органа растения m_{sk} можно описать следующим эмпирическим уравнением (З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Росс, 1980):

$$\frac{dm_{sk}}{d\tau} = \frac{g_k(\tau) f_T(T_k) f_W(\psi_k) m_{sk}}{1 + \frac{1}{\alpha_C x_k^{(C)}} + \frac{1}{\alpha_N x_k^{(N)}} + \frac{1}{\alpha_P x_k^{(P)}} + \frac{1}{\alpha_K x_k^{(K)}}}, \qquad (15.4)$$

где $f_T(T_k)$ — температурная функция роста, причем $f_T = 0$ на крайних точках температурного интервала роста и $f_T = 1$ при оптимальной температуре роста. Функция $f_W(\psi_k)$ является убывающей и учитывает влияние водного режима растения на его рост, причем $0 \leqslant f_W \leqslant 1$. Функция $g_k(\tau)$ определяет максимальную скорость роста при отсутствии лимитирующих факторов, и ее ход определяется генетическим кодом. Функции f_T и f_W — безразмерные; функция g_k выражена в 1/с. Члены $\frac{1}{\alpha_j x_k^{(j)}}$ в формуле (15.4) характеризуют зависимость роста структурной массы от концентрации фондов углеводов и N, P, K; α_j — эмпирические постоянные, выраженные в граммах структурной массы × (грамм фондовой массы)$^{-1}$.

15.2. Эффективность использования солнечной радиации фитоценозами

КПД фитоценозов. Эффективность использования солнечной радиации фитоценозами характеризуется *коэффициентом полезного действия* (КПД), который определяется отношением количества энергии, запасенной в продуктах фотосинтеза или образовавшейся в фитомассе урожая, к количеству поглощенной радиации (Х. Г. Тооминг, 1967):

$$\eta = \frac{qY \cdot 100\ \%}{\sum Q_\Phi}, \qquad (15.5)$$

где q — калорийность растения, кДж/г; Y — биологический урожай общей сухой фитомассы, г/см^2; $\sum Q_\Phi$ — сумма ФАР за вегетационный период, МДж/м^2.

Если изучается динамика КПД, то под величиной Y следует подразумевать прирост сухой фитомассы за рассматриваемый период, а под $\sum Q_\Phi$ — сумму ФАР за этот же период.

Средняя калорийность сухой биомассы у видов варьирует в пределах 16,7—20,5 кДж/г. Калорийность меняется в онтогенезе и для разных органов растения она разная. Калорийность листьев кукурузы снижается от 17,6 кДж/г в начале вегетационного периода до 10,5 кДж/г в конце.

В экстремальных условиях роста растений калорийность выше, чем в благоприятных, что объясняется адаптацией растений к условиям среды.

КПД фитоценоза можно выразить как относительно падающей, так и относительно поглощенной фитоценозом радиации. Они связаны соотношением

$$\eta_{\text{п}} = a_{\text{п}}\eta_{\text{а}}, \qquad (15.6)$$

где $\eta_{\text{п}}$ — КПД, определенный относительно падающей радиации, $\eta_{\text{а}}$ — КПД относительно поглощенной радиации, $a_{\text{п}}$ — функция поглощения радиации фитоценозом.

КПД поглощенной фитоценозом радиации характеризует прежде всего фотосинтетическую активность и экономичность дыхания самих растений. КПД относительно падающей на растительный покров ФАР характеризует эффективность использования растениями поверхности земли. В посевах сельскохозяйственных культур КПД относительно падающей ФАР характеризует эффективность агротехники и качество эксплуатации земли. Например, если эксперимент показывает, что КПД относительно поглощенной ФАР высокий, а относительно падающей ФАР низкий, то это значит, что растения интенсивно и эффективно фотосинтезируют, но их мало на единицу площади земли, поэтому значительная часть поступающей на поверхность почвы бесполезна для растений. Следовательно, либо норма сева была низкой, либо факторы среды препятствовали увеличению относительной площади листьев РП.

КПД посевов зависит от срока и плотности посева, от количества внесенных минеральных удобрений, погодных условий и т. д. Наблюдается весьма большое изменение КПД отдельных сельскохозяйственных культур в течение вегетационного периода. Например, КПД посева кукурузы относительно падающей ФАР в течение вегетационного периода может изменяться от 0,4 до 9,5 %. В особенно благоприятные для фотосинтеза периоды у поливных растений кукурузы КПД, рассчитанный по поглощенной ФАР, достигает 12,5 % (Х. Г. Тооминг, 1984).

Потенциальный КПД C_3-растений за вегетационный период составляет около 3 %; КПД C_4-растений достигает 5 %. КПД природных пастбищ, в которых преобладают виды с C_4-циклом, как правило, не превышают КПД пастбищ, состоящих из C_3-растений. В период максимальных приростов потенциальный КПД по ФАР у C_3-растений составляет 3—4 %, а в отдельных случаях достигает 9—11 %; КПД C_4-растений 5—6 % и более.

Коэффициент хозяйственной эффективности урожая. Важным показателем продуктивности посевов сельскохозяйственных куль-

тур является *коэффициент хозяйственной эффективности урожая* $K_{хоз}$, выражающий отношение количества сухой фитомассы хозяйственной части урожая (зерно, клубни и т. д.) к массе общей сухой фитомассы. Коэффициент хозяйственной эффективности зависит от сорта сельскохозяйственных культур и агрометеорологических условий. Например, $K_{хоз}$ озимой пшеницы в условиях Полтавской области варьирует от 13 до 53 %. Из причин, снижающих $K_{хоз}$, прежде всего следует отметить засуху и полегание растений. При высокой общей продуктивности фотосинтеза и высоком приросте общей сухой фитомассы снижение $K_{хоз}$ обусловлено ухудшением условий ФАР внутри посева при интенсивном вегетативном росте растений, высокорослостью растений и недостаточной

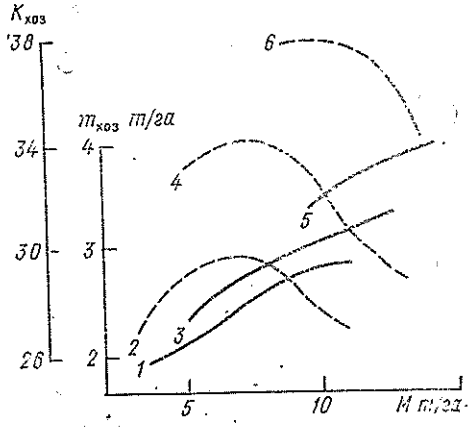


Рис. 15.2. Изменение урожая зерна $m_{хоз}$ и показателя $K_{хоз}$ в зависимости от урожая сухой фитомассы озимой пшеницы M в процессе сортосмены (по Х. Г. Тоомингу, 1977).

1, 3, 5 — урожай зерна; *2, 4, 6* — показатель $K_{хоз}$; *1, 2* — испытания 1886—1907 гг.; *4, 3* — 1923—1928, 1944—1961 гг.; *5, 6* — 1952—1962 гг.

обеспеченностью растений питательными веществами при высокой влажности почвы.

Минеральные элементы при дробном и дифференциальном применении повышают $K_{хоз}$ и качество урожая. Совместное внесение азота и фосфора, усиленное фосфорное питание, а также бор и марганец способствуют повышению $K_{хоз}$, тогда как усиленное азотное питание и медь снижают $K_{хоз}$ отдельных культур. Анализ полученных уникальных данных опытов с озимой рожью и пшеницей на Полтавской опытной станции в течение 71 года позволяет сделать некоторые важные выводы: 1) в ходе селекции урожай как общей сухой фитомассы, так и зерна постепенно повышается, при этом отмечается тенденция роста $K_{хоз}$; 2) показатель $K_{хоз}$ снижается при очень низком и при достаточно высоком накоплении фитомассы, однако при некотором среднем значении фитомассы он достигает наибольшей величины (рис. 15.2).

Таким образом, высокий уровень накопления общей фитомассы является, с одной стороны, базой для создания высокого урожая зерна, с другой — часто ведет к снижению коэффициента хозяйственной эффективности посевов $K_{хоз}$. Следовательно, уровень хозяйственно ценной части урожая не всегда пропорционален зна-

чению КПД, рассчитанному по общей сухой фитомассе. Поэтому наряду с КПД посева η, рассчитанным по общей сухой фитомассе, иногда можно рассматривать отдельно КПД хозяйственно ценной части урожая за вегетационный период:

$$\eta_{хоз} = q m_{хоз} / \sum Q_{ф}, \qquad (15.7)$$

где $m_{хоз}$ — сухая фитомасса хозяйственно ценной части урожая, q — калорийность урожая, $\sum Q_{ф}$ — сумма ФАР за вегетационный период. Таким образом, $\eta_{хоз}$ — это доля ФАР, запасенная в течение вегетационного периода в фитомассе хозяйственно ценных органов растений. КПД, рассчитанный по общей сухой фитомассе, и $\eta_{хоз}$ связаны соотношением

$$\eta_{хоз} = \eta K_{хоз}. \qquad (15.8)$$

Следовательно, чтобы обеспечить высокие значения КПД хозяйственно ценной части урожая, разведение новых сортов и все агротехнические приемы должны быть направлены на обеспечение высокого показателя $K_{хоз}$ при высоком значении КПД общей фитомассы посева η.

КПД посева в целом значительно ниже КПД листьев. Естественными причинами снижения КПД посевов являются: 1) недостаточная площадь листовой поверхности в начале вегетационного периода, что не позволяет полностью использовать падающую на посев ФАР; 2) постепенное увеличение в ходе роста затрат на дыхание фотосинтезирующих и нефотосинтезирующих органов растений; 3) наличие листьев, фотосинтетически не активных из-за их возраста; 4) наличие листьев, не адаптированных к существующим условиям ФАР внутри посева.

По Ничипоровичу (1956), посевы по их средним значениям КПД подразделяются на следующие группы:

обычно наблюдаемые	0,5—1,5 %
хорошие	1,5—3,0 %
рекордные	3,5—5,0 %
теоретически возможные	6,0—8,0 %

По оценкам Х. Г. Тооминга теоретически возможный КПД посева ячменя несколько ниже предполагаемого Ничипоровичем и составляет около 5 %.

15.3. Потенциальный и действительно возможный урожай посевов

Потенциальный урожай посевов (ПУ). При разработке принципов максимального использования ФАР и программирования урожайности посевов сельскохозяйственных культур прежде всего следует уточнить значение теоретически максимально возможного урожая. При этом целесообразно использовать понятие *потенциальный урожай* (ПУ). ПУ — это значение урожая, которое обеспечивается приходом энергии ФАР при оптимальном в течение

вегетационного периода режиме метеорологических факторов. ПУ общей сухой фитомассы (г/см²) можно рассчитать по формуле

$$У_{пот} = \int_0^{\tau_0} \frac{\eta_{пот}(t)}{q(t)} Q_ф(t)\, dt, \qquad (15.9)$$

где $\eta_{пот}(t)$ — функция (ход) потенциального КПД посева в течение вегетационного периода; $q(t)$ — калорийность растений, кДж/г; $Q_ф(t)$ — функция дневных сумм ФАР в течение вегетационного периода, МДж/м²; τ_0 — длина вегетационного периода, дни.

ПУ общей сухой фитомассы можно приближенно рассчитать на основании среднего за вегетационный период потенциального КПД

$$У_{пот} = \frac{\eta_{опт} \sum Q_ф}{q}, \qquad (15.10)$$

где $\eta_{пот}$ — средний за вегетационный период потенциальный КПД, $\sum Q_ф$ — приход ФАР за вегетационный период.

ПУ хозяйственно ценных органов (зерна, клубней картофеля и др.) рассчитывается использованием множителя $K_{хоз}$ в формуле (15.10). ПУ зависит не только от сумм ФАР, но и от хода потенциального КПД посева в течение вегетационного периода. Потенциальный КПД посева — это максимальный КПД посева, обеспечиваемый биологическими свойствами сорта, современной агротехникой и уровнем плодородия почвы в оптимальных для данного сорта метеорологических условиях. Следовательно, при неизменном приходе ФАР ПУ посевов зависит от биологических свойств культур и сортов, а также от плодородия почвы, которые отражаются на КПД.

Значения потенциального КПД и ПУ непостоянны. В связи с интенсификацией сельскохозяйственного производства, разведением новых сортов, усовершенствованием агротехники и увеличением доз удобрений потенциальный КПД и ПУ возрастают.

Действительно возможный урожай (ДВУ) — это урожай, который определяется значением ПУ и лимитирующим действием режима метеорологических факторов в течение вегетации. ДВУ отличается от ПУ тем больше, чем больше метеорологические факторы отличаются от оптимальных.

В первом приближении можно игнорировать взаимосвязанность воздействия метеорологических факторов на урожай и выражать ДВУ формулой

$$У_{ДВУ} = У_{пот} F_1(f_1) F_2(f_2) \ \ldots \ F_k(f_k), \qquad (15.11)$$

где $У_{ДВУ}$ — действительно возможный максимальный урожай, $F_i(f_i)$ — функция, выражающая зависимость урожая от фактора f_i.

Задача агротехники, мелиорации, районирования культур, селекции и разработки принципов повышения эффективности ис-

пользования посевами ФАР — уменьшить разности между $У_{\text{ДВУ}}$ и $У_{\text{пот}}$, т. е. уменьшить разность

$$\Delta У = У_{\text{пот}} - У_{\text{ДВУ}} = У_{\text{пот}} \left[1 - \prod_{i=1}^{k} F_i (f_i) \right]. \qquad (15.12)$$

Другими словами, эта разность определяет максимальный прирост урожая, если удается оптимизировать фактор f_i.

Главной предпосылкой для получения высокого урожая, близкого к ПУ, является оптимальность водного режима в посевах.

В качестве функции снижения урожая водным дефицитом можно использовать отношение

$$F_1 = E/E_0, \qquad (15.13)$$

где F_1 — функция снижения урожая водным дефицитом, которая в данном случае представляет собой коэффициент почвенно-атмосферного увлажнения, E — суммарное испарение растительностью, E_0 — испаряемость растительности.

При условии $E = E_0$ водный режим посева можно считать оптимальным. Если $E < E_0$, то урожай лимитируется водным дефицитом.

На основании формул (15.7) и (15.13) можно записать

$$У_{\text{ДВУ}} = У_{\text{пот}} E/E_0. \qquad (15.14)$$

Включая сюда выражение (15.3), получаем

$$У_{\text{ДВУ}} = \eta_{\text{пот}} E \sum Q_{\text{ф}}/qE_0. \qquad (15.15)$$

Недобор урожая из-за водного дефицита $\Delta E = E_0 - E$ можно определить по формуле

$$\Delta У = У_{\text{пот}} - У_{\text{ДВУ}} = У_{\text{пот}} (1 - E/E_0), \qquad (15.16)$$

или

$$\Delta У = \eta/q = \sum Q_{\text{ф}} (1 - E/E_0). \qquad (15.17)$$

На основе формул (15.15)—(15.17) можно оценить действительно возможные урожаи и урожай, недополучаемый из-за дефицита осадков, если $E \leqslant E_0$.

Рассмотрение этих формул показывает, что потери урожая из-за водного дефицита возрастают с повышением ПУ и КПД посева.

15.4. Уравнения роста и функции распределения ассимилятов

Для описания количественного роста (увеличения со временем) сухой фитомассы растения долгое время использовались эмпирические кривые роста. Как правило, они имели сигмоидальный вид, описываемый уравнением

$$\frac{1}{m_{\text{р}}} \frac{dm_{\text{р}}}{d\tau} = k (m'_{\text{р}} - m_{\text{р}}), \qquad (15.18)$$

где $m_р$ — фитомасса растения в момент времени τ, $m'_р$ — окончательная масса растения при $\tau \to \infty$ и k — постоянная.

Значение уравнений заключалось в основном в возможности аппроксимировать рост фитомассы растений математическим выражением. Но они не позволяли раскрыть и анализировать сущность роста растений.

Принципиально новое балансовое уравнение, связывающее фотосинтез и дыхание с накоплением общей сухой фитомассы было предложено Л. А. Ивановым (1946):

$$M + \Delta m_{оп} = \Phi L \tau - R M_1 \tau_1, \qquad (15.19)$$

где M — сухая масса всего растения за учитываемый период, $\Delta m_{оп}$ — масса опавших за это время частей, Φ — интенсивность фотосинтеза, L — рабочая поверхность или масса, τ — рабочее время, R — интенсивность дыхания, M_1 — дышащая масса, τ_1 — время дыхания.

Уравнение Иванова показывает, что урожай определяется балансом фотосинтеза и дыхания, т. е. газообменом. Кроме того, это уравнение учитывает роль ассимилирующей поверхности и продолжительности ее работы в накоплении урожая. Таким образом, уравнение (15.19) явилось основой при зарождении нового этапа в количественном описании роста растений.

Физиологически обоснованное уравнение роста предложено Давидсоном и Филипом (1958):

$$dM/dt = \varepsilon(\overline{\Phi} - \overline{R}), \qquad (15.20)$$

где $\overline{\Phi}$ — суммарный фотосинтез растения, $\overline{R}$ — суммарное дыхание растения, ε — коэффициент перехода от массы усвоенной двуокиси углерода к сухой фитомассе. Если первичными продуктами фотосинтеза являются углеводы, то $\varepsilon = 0{,}67$ (г сухой массы/г CO_2). Уравнение Давидсона и Филипа в принципе мало отличается от уравнения Иванова, но оно представлено математически в более общем виде и по существу является элементарной динамической моделью.

Существенным шагом для дальнейшего развития математического описания роста явились работы Ю. К. Росса (1966). Его система уравнений роста послужила основой для интенсивного развития динамического моделирования продукционного процесса и стала к настоящему времени общепризнанной. Запишем предложенную Россом систему дифференциальных уравнений для описания роста по органам растений:

$$\frac{dm_j}{dt} = \varepsilon_\Phi \sum_{i=1}^{4} A_{ij} \overline{\Phi}_{ci} - \varepsilon_R \overline{R}_{cj} - V_j + M \sum_{i=1}^{4} B_{ij}, \qquad (15.21)$$

где i и j обозначают органы растения ($i=1$ — листья, $i=2$ — стебли, стволы, $i=3$ — корни, $i=4$ — репродуктивные органы); m_j — сухая масса органа j; ε_Φ — коэффициент эффективности фо-

тосинтеза, г сухой массы/г CO_2; ε_R — коэффициент эффективности дыхания; $\bar{\Phi}_{ci}$ — суммарный фотосинтез органа i за сутки, г CO_2/(сут · раст); $\bar{R}_{cj}$ — суммарное дыхание органа j за сутки; V — потери сухой фитомассы за сутки вследствие опада, г/(сут × × раст); M — суммарная сухая масса растений; A_{ij} — доля созданных за сутки в i-м органе растения «свежих» ассимилятов, оттекаемых в течение суток в j-й орган; B_{ij} — обмен «старых» ассимилятов (г/сут) между i-м и j-м органами, отнесенный к 1 г сухой фитомассы целого растения; A_{ij} и B_{ij} представляются в виде «ростовых матриц». В упрощенном случае, когда основными фотосинтезирующими органами являются листья, вместо ростовых матриц для периода вегетативного роста рассматриваются функции вегетативного роста A_j, а для периода репродуктивного роста — функции репродуктивного роста, или так называемые функции притока — оттока B_j.

Уравнение роста для j-го органа тогда записывается в виде

$$\Delta m_j/\Delta t = A_j\,\Delta M/\Delta t + MB_j, \qquad (15.22)$$

причем $\sum A_j = 1$ и $\sum B_j = 0$.

В период вегетативного роста $B_j \approx 0$, и тогда из (15.22) получаем

$$\Delta m_j/\Delta t = A_j\,\Delta M/\Delta t, \quad \text{или} \quad \Delta m_j/\Delta M = A_j. \qquad (15.23)$$

Отсюда становится ясным смысл функции A_j — она определяет долю от прироста всего растения $\Delta M/\Delta t$, которая в данный момент времени приходится на прирост j-го органа. Функцию роста Монси и Мурата (1970) называют *отношением распределения ассимилятов*.

В течение онтогенеза развитие отдельных органов происходит по-разному, поэтому $A_j(t)$ изменяется во времени. Кроме того, $A_j(t)$ зависит от погодных условий, которые, воздействуя на $A_j(t)$, могут оказывать влияние на весь облик растения.

В период только репродуктивного роста $\Delta M/\Delta t = 0$ и

$$\Delta m_j/\Delta t = MB_j, \qquad (15.24)$$

откуда вытекает, что функция B_j определяет долю от всей фитомассы, которая перемещается в виде «старых», запасенных ассимилятов из других органов в j-й орган. Если $B_j > 0$, то происходит приток ассимилятов в j-й орган, если же $B_j < 0$, то, наоборот, ассимиляты оттекают из j-го органа в другие органы. Таким образом, функции A_j и B_j отдельных органов растения характеризуют внутренние закономерности роста, раскрывают характер общего прироста по отдельным органам.

Исходя из предположения, что отток ассимилятов из j-го органа пропорционален массе живой части $\tilde{m}_j$ этого органа, Е. П. Галямин (1974) предложил функцию репродуктивного роста определять по выражению

$$b_j = \frac{\Delta m_j}{\Delta t}\,\frac{1}{\tilde{m}_j}. \qquad (15.24а)$$

где $\tilde{m}$ — биомасса, в составе которой имеются компоненты, осуществляющие и регулирующие обмен веществ, называемая *функционирующей биомассой* (А. Н. Полевой, 1979). Ее количество оценивается на основе использования универсального закона старения биологических систем.

Для периода активного роста вся биомасса является функционирующей, следовательно, прирост общей и функционирующей биомассы одинаков:

$$\frac{\Delta \tilde{m}_j}{\Delta t} = \frac{\Delta m_j}{\Delta t} \geqslant 0. \qquad (15.25)$$

В случае возникновения стрессовых условий или при естественном старении растения, когда количество общей биомассы снижается вследствие преобладания процессов распада над процессами синтеза, изменения количества функционирующей биомассы определяется по выражению

$$-\frac{\Delta \tilde{m}_j}{\Delta t} = -\left(\frac{\Delta m_j}{\Delta t}\,\frac{1}{k_s}\right), \qquad (15.26)$$

где k_s — параметр, характеризующий долю жизнедеятельных структур и подвижных углеводов в общей биомассе органа, безразмерный.

В работе Х. Г. Тооминга (1977) уравнение Росса несколько модифицировано. Включив в (15.22) вместо $\Delta M/\Delta t$ суточный газообмен посева, можно получить уравнение

$$\frac{\Delta m_j}{\Delta t} = \varepsilon A_j(t)\left[\int_t^{t+1}\int_0^{L_0(t)} (\Phi_1 - R_1)\,dL\,d\tau - \sum_{i=2}^{n}\overline{R}_{ci}\right] + MB_j, \qquad (15.27)$$

где $\sum_{i=2}^{n} R_{ci}$ — суммарное за сутки дыхание всех органов, кроме листьев; t — время в сутках.

В этом уравнении значения прироста $\Delta m_j/\Delta t$ являются функциями относительной площади листьев посева $L_0(t)$. Следовательно, для определения прироста фитомассы отдельных органов растений в посевах прежде всего необходимо найти относительную площадь листьев посева в любой момент вегетационного периода. Относительная площадь листьев определяется по ее начальному значению и отдельным приростам. Прирост площади листьев посева определяется путем подстановки в уравнение (15.27) удельной поверхностной плотности (УПП) листьев [1] $m_l(t)$

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\varepsilon A_1(t)}{m_l(t)}\left[\int_t^{t+1}\int_0^{L_0(t)} (\Phi_1 - R_1)\,dL\,d\tau - \sum_{i=2}^{n}\overline{R}_{ci}\right] - v_1(t), \qquad (15.28)$$

где $v_1(t)$ — скорость уменьшения площади зеленых листьев, кото-

[1] Удельная поверхностная плотность листьев есть сухая масса единицы площади поверхности листьев (г/м²).

рая считается пропорциональной площади действующей листовой поверхности (Е. П. Галямин, 1974).

Для описания динамики площади листьев введено (О. Д. Сиротенко, 1981) понятие о функции «пожелтения», представляющей собой отношение

$$\gamma = LG/L, \tag{15.29}$$

где LG — зеленая площадь фотосинтезирующего органа растения, L — его общая площадь.

Исходя из представлений о динамике функционирующей биомассы (выражения (15.25) и (15.26)) скорость изменения площади

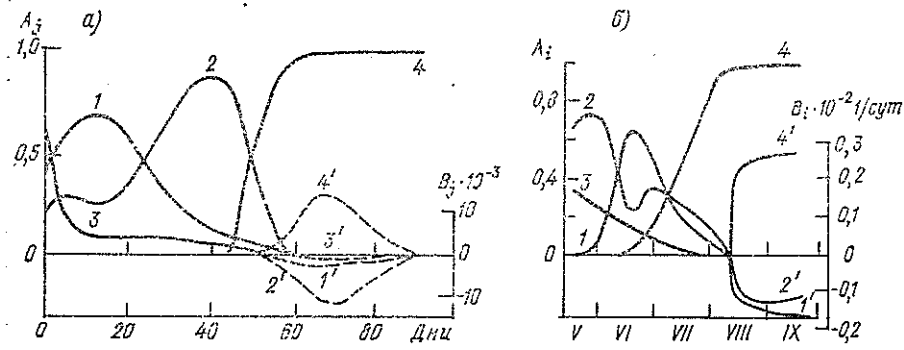


Рис. 15.3

а) Функция роста отдельных органов ячменя (по Х. Мяги, Ю. Россу, 1969). A_j — функция роста j-го органа, B_j — функции, характеризующие перераспределение ассимилятов по органам; *1* — листья, *2* — стебли, *3* — корни, *4* — репродуктивные органы; *1'*, *2'*, *3'*, *4'* — кривые B_j (j = 1, 2, 3 и 4).

б) Функции роста картофеля сорта Сулев (по Х. Г. Тоомингу, Х. И. Мяэталу, 1978). A_i — вегетативные органы, B_i — репродуктивные; *1* — листья, *2* — стебли, *3* — корни, *4* — клубни; *1'*, *2'*, *4'* — кривые B_i.

ассимилирующей поверхности j-го органа при благоприятных условиях роста и развития растений, воздействии стрессовых условий и в период старения описывается выражением (А. Н. Полевой, 1979):

$$\frac{\Delta L_j}{\Delta t} = \frac{\Delta \tilde{m}_j}{\Delta t} \frac{1}{m_t(t)}. \tag{15.30}$$

Прирост сухой фитомассы значительно зависит от метеорологических условий. Хотя и функции роста в некоторой степени зависят от факторов внешней среды, в частности, в первых фазах развития они прежде всего свойственны данному генотипу, характеризуют вид или сорт. Они показывают, как происходит рост отдельных органов растения, когда начинается и когда кончается рост того или иного органа, когда относительный прирост органа является максимальным и т. д.

Ячмень сорта Домен, например, характеризуется функцией вегетативного роста листьев (рис. 15.3*а*), которая в начале вегета-

ционного периода сравнительно быстро достигает максимума, а затем в течение 20 дней снижается до нуля — рост листьев прекращается. Часть «старых» ассимилятов из листьев оттекает в колосья, которые характеризуются функциями B_1 и B_3 (см. рис. 15.3 *а*). В то время как рост листьев прекращается, рост стеблей максимален, начинается также быстрое повышение функции роста колосьев.

Функции роста картофеля (рис. 15.3 *б*) существенно отличаются от функций роста зерновых. Рост картофеля можно разделить на три периода: 1) от посадки до истощения запасов материнского клубня, 2) рост ботвы, 3) рост клубней. Эти периоды частично перекрываются. Рост ботвы начинается с момента появления всходов и заканчивается в начале интенсивного клубнеобразования (см. рис. 15.3 *б*). В течение 40 дней происходит одновременно рост ботвы и клубнеобразование. В начале образования ботвы рост ее происходит как за счет фотосинтеза листьев, так и за счет фондов, находящихся в материнских клубнях. После появления всходов наибольший прирост имеют стебли и корни, их рост идет за счет фондов материнского клубня. При максимуме функции роста стеблей начинается рост листьев. Их прирост достигает максимума через 25—30 дней. Максимум прироста листьев составляет около 70 % всего прироста растения. При максимуме функции роста листьев наблюдается минимум функции роста стеблей. С момента максимума прироста листьев начинается и рост клубней. Прирост листьев прекращается к началу интенсивного клубнеобразования. В этот период клубни растут за счет фотосинтеза листьев и притока ассимилятов из стареющих органов — листьев и стеблей.

Раздел VI

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАСТЕНИЙ

Глава 16

ЗАСУХИ И СУХОВЕИ

16.1. Понятие о засухах и суховеях

Из неблагоприятных явлений засухи наносят наибольший ущерб сельскому хозяйству в нашей стране, так как около 70 % всех посевных площадей зерновых культур расположено в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения.

Засуха возникает при длительном отсутствии осадков в сочетании с высокой испаряемостью, что способствует иссушению корнеобитаемого слоя и нарушает нормальное водоснабжение растений. В результате резкого несоответствия между потребностью растений во влаге и ее недостаточным поступлением из почвы снижается их урожай. При длительных и интенсивных по напряженности засухах растения полностью погибают еще до формирования урожая. Различают три типа засух: атмосферную, почвенную и общую.

Атмосферная засуха обычно предшествует почвенной. Основным признаком атмосферной засухи считают устойчивую, антициклональную погоду с длительными бездождными периодами, высокой температурой и большой сухостью воздуха. Нередко при этом наблюдается сухой ветер (суховей).

Почвенная засуха возникает как следствие атмосферной засухи, когда при усиленном испарении запасы влаги в почве быстро уменьшаются и становятся недостаточными для нормального роста и развития растений. Наступает несоответствие между потребностью растений во влаге и поступлением ее из почвы. Это вызывает существенное снижение урожайности сельскохозяйственных культур, произрастающих в богарных условиях, даже на полях с высокой агротехникой. Когда оба типа засух наблюдаются совместно, наступает общая засуха, которая часто сопровождается пыльными бурями. При длительном периоде общей засухи у растений из-за недостатка влаги нарушаются физиологические функции и происходят повреждения или гибель растений.

Суховей — это сложное метеорологическое явление, характеризуемое низкой относительной влажностью воздуха (менее 30 %), в сочетании с высокой температурой воздуха (выше 25 °С) и ско-

ростью ветра не менее 5 м/с. Этот комплекс факторов вызывает высокую испаряемость, которая приводит к нарушению водного баланса растений.

Возникновение засух и суховеев связано с мощными атмосферными процессами, определяющими длительную антициклональную погоду. При прохождении над Европейской частью страны и Западной Сибирью сухой прозрачный холодный арктический воздух

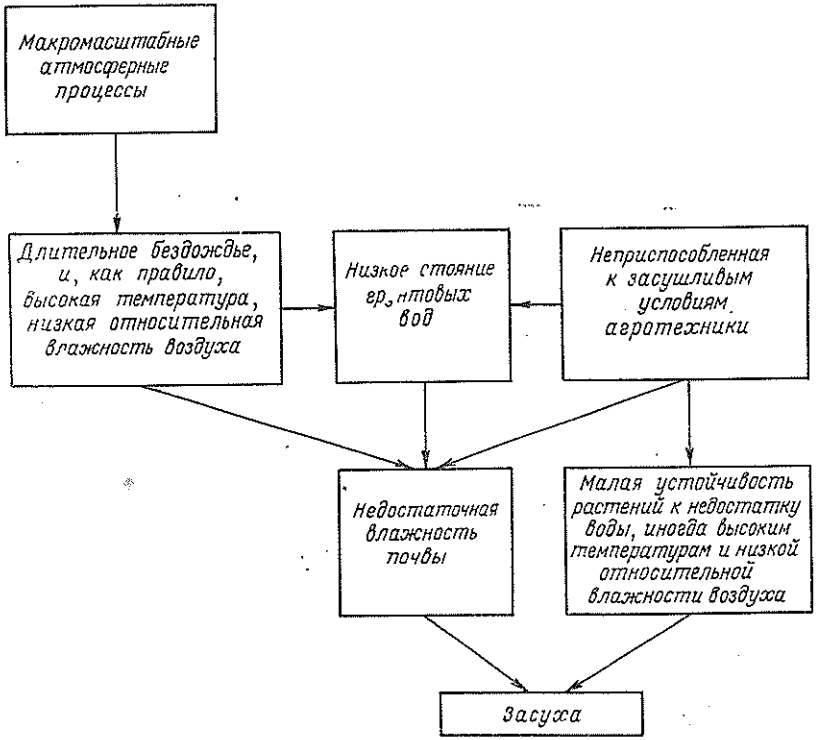


Рис. 16.1. Схема образования засухи (по Ф. Ф. Давитая, 1966).

прогревается и еще более иссушается. Испарение почвенной влаги усиливается, осадки не выпадают, начинается засуха (рис. 16.1).

В антициклонах движение воздуха 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 страны суховеи имеют преимущественно юго-восточное, восточное и северо-восточное направления, в Западной Сибири — юго-западное, а в Средней Азии — северное. Существовавшее ранее представление о распространении суховеев из среднеазиатских пустынь оказалось ошибочным.

По времени наступления различают весеннюю, летнюю и осеннюю засухи. *Весенняя засуха* характеризуется, как правило, невысокой температурой воздуха при низкой относительной влажности воздуха, малыми запасами продуктивной влаги в почве и сухими ветрами. Продолжительная засуха весной существенно снижает конечный урожай культур даже в условиях благоприятного по степени увлажнения лета. При *летней засухе* наблюдаются высокая температура воздуха, в отдельных случаях горячий сухой ветер, которые вызывают повышенную испаряемость. Последствия летней засухи проявляются в резком снижении урожая, щуплости зерна, иногда в «захвате» зерна[1] и т. д. Осенняя засуха характеризуется невысокой температурой воздуха. Она наиболее опасна для посевов озимых культур, которые не успевают укорениться, пройти фазу кущения и нередко погибают в зимний период. В отдельные засушливые осени, когда пахотный горизонт не имеет необходимых запасов продуктивной влаги, посев озимых зерновых вообще нецелесообразен.

По интенсивности засухи условно подразделяют на очень сильные, сильные и средние.

16.2. Ход составляющих теплового баланса листа, транспирации, фотосинтеза и продуктивности растений в засушливых условиях

В основе существования растений лежит постоянный экзогенный и эндогенный энергомассообмен, т. е. обмен энергией и веществом между растением и окружающей средой, а также внутри растительного организма. Засуха изменяет как абсолютные величины составляющих этого обмена, так и соотношение между ними, что в конечном итоге выражается в снижении продуктивности.

Рассмотрим пример изменения составляющих теплового баланса листа в ходе постепенного иссушения почвы.

Как видно из рис. 16.2, наиболее чувствительны к водному режиму почвы затраты тепла на транспирацию λE_L и конвективный теплообмен между листом и окружающим воздухом H_L. Уже на 3-й день после увлажнения почвы затраты тепла на транспирацию начинают заметно уменьшаться и к 6-му дню при $\psi_S = -1{,}7$ бар снижаются примерно до половины по сравнению с начальными. Именно в это время усиливаются перегрев листа и конвекция (кривые *4* и *5*), а также несколько увеличивается интенсивность эффективного излучения (кривые *6* и *7*).

Изменение скорости ветра мало влияет на суточные суммы транспирации, поэтому кривая *1* пригодна практически для любых значений r_a. В бóльшей степени проявляется влияние скорости ветра на конвективный теплообмен и отношение Боуэна (кривые *2—5*).

---

[1] Повреждение зерна в результате обезвоживания.

Характер временно́го хода составляющих теплового баланса листа для случая более развитой корневой системы и опесчаненного суглинка в общих чертах такой же, как и приведенный на рис. 16.2. Однако изменения во времени λE, H_L и B_0 протекают более резко, чем описанные выше.

Из полученных результатов следует, что освещенные листья теряют больше всего энергии за счет собственного излучения. Даже эффективное излучение листа $I_L - I_A$ часто превышает остальные потери. Транспирация при хорошем водоснабжении растения, т. е. при полностью раскрытых устьицах, будет больше конвективного переноса тепла. Но незначительное ограничение водоснабжения резко уменьшает расход энергии на транспирацию.

Отношение площади корней к площади листьев растения существенно влияет на изменение во времени водных потенциалов

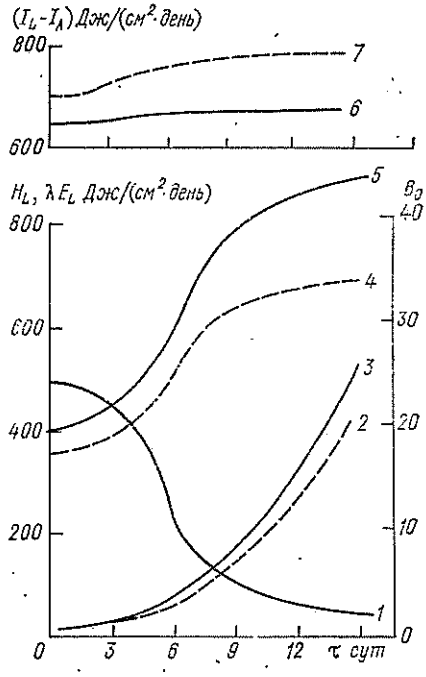


Рис. 16.2. Изменение во времени дневных сумм составляющих теплового баланса листа: затрат тепла на транспирацию λE_L (*1*), конвективного теплообмена H_L (*4*, *5*), эффективного излучения листа $I_L - I_A$ (*6*, *7*) и отношения Боуэна B_0 (*2*, *3*) по мере высыхания почвы (по З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Россу, 1980).

Сплошные кривые — для $r_a = 0{,}3$ с/см; штриховые — для $r_a = 1$ с/см; $S_R/S_L = 0{,}2$; почва — глина.

почвы и листа. Растения со слабо развитой корневой системой ($S_R/S_L = 0{,}2$) более чувствительны к изменению влажности почвы. Увеличение отношения S_R/S_L означает, что корневая система становится более разветвленной — более тонкие корни гуще пронизывают почву. Поэтому растение легче добывает воду из почвы и соответственно быстрее ее расходует.

Постепенное высыхание почвы влияет на суточный расход влаги E_L и продуктивность растения P_L. При этом следует отметить, что сам по себе водный потенциал почвы не определяет однозначно хода E_L и P_L. Так, начиная с 5-го после полива дня до 9-го суточные суммы транспирации и продуктивности растения при $S_R/S_L = 2$, больше, чем при $S_R/S_L = 0{,}2$, хотя водный потенциал почвы и первом случае ниже. Однако затем вследствие быстрого истощения запасов влаги в почве у растения с хорошо развитой корневой системой величины E_L и P_L уменьшаются быстрее, и на 10-й день прирост фитомассы у него прекращается.

Торможение роста с увеличением водного дефицита листьев определяется зависимостью максимальной скорости роста растений g_m от их водного потенциала ψ:

$$g_m(\psi) = \begin{cases} \dfrac{16{,}3\,(\psi - \psi_m)^2 \exp(-0{,}1\psi)}{(\psi - \psi_m)^2 + 7{,}6\psi^2}, & -2{,}5 \cdot 10^5 > \psi > -15 \cdot 10^5, \\ 16{,}3, & \psi \geqslant -2{,}5 \cdot 10^5 \end{cases} \tag{16.1}$$

где g_m — максимальная относительная скорость роста растения, ψ_m — потенциал устойчивого завядания, принятый равным $15 \cdot 10^5$ Па.

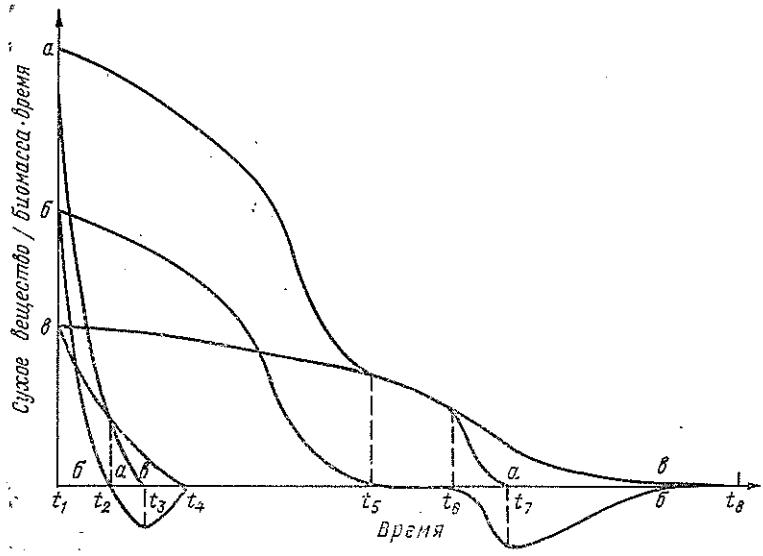


Рис. 16.3. Изменение соотношения между интенсивностью фотосинтеза, дыхания и прироста при засухе (по И. А. Куперман, Е. В. Хитрово, 1973).

а — фотосинтез, *б* — прирост, *в* — дыхание, $t_1, \ldots, t_4$ — быстрое обезвоживание; $t_1, \ldots, t_8$ — прогрессирующая засуха; t_2, t_5, t_6 — время наступления нулевого баланса органического вещества; $t_3, \ldots, t_7$ — время прекращения фотосинтеза.

При действии прогрессирующей засухи имеется определенная последовательность нарушения основных процессов, составляющих энергомассообмен растений: рост, фотосинтез, дыхание. По устойчивости к обезвоживанию эти процессы располагаются в обратном порядке: дыхание, фотосинтез, рост. Динамика соотношения между этими процессами представлена в работе И. А. Куперман, Е. В. Хитрово (1973) в следующем виде. Если принять за критерий изменение массообмена, то смену состояния растений при действии прогрессирующей засухи условно можно разделить на

3 фазы: положительного $t_1 \ldots t_8$, нулевого $t_5 \ldots t_6$ и отрицательного $t_6 \ldots t_8$ баланса органического вещества (рис. 16.3). Первая фаза характеризуется относительно благоприятными для протекания различных физиологических процессов условиями, но новообразование уже заторможено и надземная часть не в состоянии освоить образующиеся в процессе фотосинтеза углеводы, т. е. «предложение» превышает «спрос» и происходит «затоваривание» углеводами, что выражается в повышении их концентрации. Несмотря на усиливающуюся напряженность в обеспечении растения водой, корневая система, ориентируясь вдоль градиента влажности почвы, находится в относительно более благоприятных условиях и может использовать эти углеводные «излишки» на освоение новых объемов почвы. Следовательно, компенсационные реакции первой фазы, протекая на фоне положительного баланса биомассы, связаны в значительной степени с организменным уровнем регуляции и сопровождаются активным проникновением растения в более влажные горизонты, т. е. носят «динамический» характер.

При дальнейшем усилении засухи в результате снижения интенсивности фотосинтеза и ухудшения условий для роста массообмен падает до компенсационного уровня (вторая фаза); при этом новообразование возможно только за счет внутренних резервов и лишь в весьма ограниченных зонах роста. К этому времени может быть израсходована вся доступная влага, вследствие чего рост корней будет приостановлен. Компенсационные реакции в таком состоянии уже меньше связаны с организмом как целостной системой и осуществляются в значительной степени за счет локального сопротивления отдельных органов, тканей и клеток, связь между которыми неуклонно ослабевает, т. е. сопротивление становится все более «статичным».

В третью фазу наблюдается «отрицательный прирост», т. е. энергия, затрачиваемая на существование активной биомассы, уже не покрывается за счет внешнего энергомассообмена. При этом меняется соотношение между активными и пассивными (омертвевшими) элементами клеток и тканей в пользу последних, служащих, с одной стороны, донорами вещества и энергии, а с другой, физической защитой активных элементов от разрушительного действия внешней среды. В подобных условиях разные сорта могут существовать, видимо, различное время. Постепенно даже у наиболее устойчивой и защищенной части биомассы начинают преобладать глубокие необратимые нарушения, приводящие к прекращению дыхания и гибели растения.

16.3. Критерии оценки засух

В конце прошлого века В. В. Докучаев для характеристики степени засушливости района применил сопоставление осадков с испаряемостью. Эта идея нашла широкое признание и в дальнейшем развивалась и углублялась. Для определения испаряемости (потенциально возможного испарения) и испарения получено много эмпирических формул. Их применение позволило дать ха-

рактеристики отдельных зон по сухости и выявить в определенном приближении вероятность засух.

Г. Высоцкий (1905 г.) установил следующее отношение между природными зонами и величинами r/E (r — осадки, E — испаряемость): влажная лесная область — $1^1/_3$, переходная лесостепная область — 1; степь умеренно сухая — $^2/_3$, южная сухая степь — $^1/_3$.

Аналогичный метод позже применил А. Пенк (1910), Б. Ливингстон (1921) широко применял отношение осадков к испарению при оценке сухости климата в США.

В прошлом веке для характеристики сухости вегетационного периода Д. И. Прянишников применил гидротермический коэффициент, вычисленный как отношение суммы осадков к сумме температур.

Р. Э. Давид обосновал возможность использования дефицита давления водяного пара в качестве мерила транспирации культурных растений (1934). В дальнейшем многие исследователи использовали это обоснование для оценки влагообеспеченности и степени засушливости.

По формуле Давида

$$\frac{E-e}{2}=f, \tag{16.2}$$

где f — испаряемость, мм; E — давление насыщения при данной температуре воздуха; e — парциальное давление водяного пара.

П. И. Колосков (1925) показал возможность использования для сравнительной оценки засушливости отношения годового количества осадков к сумме средних суточных температур вегетационного периода, уменьшенной в 100 раз.

В 1947 г. П. И. Колосков предложил уточненный показатель увлажненности V — отношение количества осадков P к разности давления насыщения E при данной температуре и фактического давления водяного пара e:

$$V=k\frac{P}{E-e}, \tag{16.3}$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Гидротермический коэффициент (ГТК) Г. Т. Селянинова (1930) представляет собой отношение суммы месячных осадков $\sum P$ к сумме температур того же месяца $\sum t$, уменьшенной в 10 раз:

$$\text{ГТК}=\frac{\sum P}{0,1\sum t}. \tag{16.4}$$

Засушливым считается период с гидротермическим коэффициентом ниже 1,0, сухим — с гидротермическим коэффициентом ниже 0,5. ГТК $<0,4$ — признак очень сильной засухи, ГТК $=0,4\ldots 0,5$ — сильной, ГКТ $=0,5\ldots 0,6$ — средней.

Для общей оценки сухости или влажности климата используется формула, предложенная В. П. Поповым (1948).

$$P=\frac{\sum g}{2,4\,(t-t')\,n}, \tag{16.5}$$

где P — показатель сухости климата, $\sum g$ — годовое количество эффективных осадков, $t - t'$ — психрометрическая разность, n — коэффициент, зависящий от длины дня.

А. А. Каминский (1924—1931) на основе учета относительной влажности воздуха самого сухого месяца в 13 час и средней температуры вегетационного периода выделил шесть климатических областей.

Н. Н. Ивановым (1948) была разработана эмпирическая формула для вычисления испаряемости:

$$E = 0{,}0018\,(25 + t)^2\,(100 - a), \tag{16.6}$$

где E — испаряемость за месяц, мм; t — средняя месячная температура воздуха; a — средняя относительная влажность воздуха за месяц.

С помощью этой формулы Иванов установил коэффициент увлажнения, выражающий отношение годового количества осадков к годовой испаряемости.

В качестве показателя атмосферного увлажнения Md Д. И. Шашко (1961) использует отношение суммы осадков P к сумме средних суточных значений дефицита давления водяного пара $E - e$:

$$Md = \frac{\sum P}{\sum (E - e)}. \tag{16.7}$$

Для установления начала засухи Н. В. Бова (1941) предлагает следующую формулу

$$k = \frac{10\,(H + Q)}{\sum t}, \tag{16.8}$$

где k — показатель засушливости; H — запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см весной; Q — количество осадков, выпавших с весны и до наступления засухи; $\sum t$ — сумма температур от даты перехода через 0 °С.

Показатель k включает три основных фактора, в значительной мере определяющих условия роста сельскохозяйственных культур. Значение k возрастает при улучшении условий увлажнения и уменьшается с ростом температуры. Время установления значения k, равного 1,5, принимается за начало засухи. По П. И. Броунову (1904) сумма осадков менее 5 мм за декаду с апреля по декабрь является признаком засушливости.

Для оценки общих засух (атмосферных и почвенных) Е. С. Уланова (1973) предлагает использовать коэффициент увлажнения:

$$K_1 = \frac{W_в + \sum O_{V-VI}}{0{,}01 \sum t_{V-VI}}, \tag{16.9}$$

где $W_в$ — запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы во

время устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С весной, мм; $\sum O_{V-VI}$ — сумма осадков за май—июнь, мм; $\sum t_{V-VI}$ — сумма средних суточных температур воздуха за май—июнь.

Значения коэффициентов увлажнения соответствуют:

$K_1 < 15$ — очень сильная засуха
$15 \leqslant K_1 < 20$ — сильная засуха
$20 \leqslant K_1 < 25$ — средняя засуха

Многие исследователи за основу оценки интенсивности засухи берут снижение урожайности ведущей сельскохозяйственной культуры в районах, подвергшихся действию засухи. Так, по А. В. Процерову, снижение среднего урожая до 20 % — слабая засуха, от 20 до 50 % — средняя и более 50 % — сильная.

А. И. Руденко предлагает использовать следующие показатели: очень сильная засуха — осадки до 18 мм за период всходы — колошение яровой пшеницы и снижение урожая более 50 %; сильная засуха — осадки до 30—35 мм за аналогичный период и снижение урожая на 20—50 %; средняя засуха — осадки более 35 мм и снижение урожая до 20 %.

Ряд исследователей (В. М. Обухов, О. А. Дроздов, А. В. Мещерская) оценивают атмосферные засухи по сумме осадков в процентах средней многолетней (климатической нормы). Очень сильная засуха наблюдается при сумме осадков менее 50 % нормы, сильная — при 50—70 %, средняя — при 71—80 % нормы.

Известно, что наиболее надежный показатель засухи — данные о влажности почвы.

Снижение весенних запасов продуктивной влаги в метровом слое до 60 мм является признаком угрожающе плохих условий обеспеченности влагой растений в течение летней вегетации даже при значительных летних осадках. Весенние запасы продуктивной влаги в степных и лесостепных районах менее 100 мм также в большинстве случаев приводят к неудовлетворительной влагообеспеченности сельскохозяйственных культур.

Иссушение верхних слоев почвы в период вегетации — важнейший показатель при характеристике засухи.

По данным М. С. Кулика (1953), снижение запасов продуктивной влаги в пахотном слое до 19 мм следует считать началом засушливого периода, а до 9 мм — началом сухого периода. Декады, в течение которых запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—20 см оказываются <20 мм, относятся к засушливым, а декады с запасами влаги <10 мм — к сухим.

Три сухие декады в период кущение — молочная спелость — признак засухи, четыре-пять декад — признак сильной засухи. Если три сухие декады начались при запасах продуктивной влаги <60 мм в слое 20—100 см, то это следует считать показателем сильной засухи, а четыре-пять сухих декад — очень сильной засухи.

16.4. Агрометеорологические показатели суховеев

Сложность и многообразие явления суховея обусловили большое разнообразие определений и количественных характеристик, даваемых ему метеорологами.

А. А. Каминский (1934) под суховеем понимает «такой ветер, при котором относительная влажность ни в один из сроков наблюдений (7, 13 и 21 ч) не поднимается выше 50 % при относительно высоком минимуме температуры воздуха».

Е. Е. Федоров (1935) относит к суховейной малооблачную погоду со средней суточной температурой выше 27,5 °С при средней относительной влажности <60 % независимо от скорости ветра, а при средней суточной температуре 22,5... 27,5 °С — дни со средней суточной относительной влажностью 40 % и ниже и сильным ветром.

Н. К. Софотеров (1937) суховейными считает дни с максимальной температурой 30 °С и дневным дефицитом влажности 24 мм независимо от скорости ветра.

М. С. Кулик (1952) указывает, что среди агрономов наиболее широко распространен следующий критерий суховея: относительная влажность в 13 ч <30 %; температура в тот же срок выше 25 °С при скорости ветра 5 м/с по флюгеру. Этим критерием с небольшими изменениями пользуется и Е. И. Бучинский. Н. Ф. Самохвалов для условий Казахстана в этом критерии снижает предел относительной влажности до 20 %, оставляя те же пределы температуры (25 °С) и скорости ветра (5 м/с), а при температуре 30 °С снижает скорость ветра до 3 м/с.

Г. Т. Селянинов (1930) предлагает считать суховейными дни с суточным испарением по испарителю Вильда (испаряемостью) 8 мм и более. Он расценивает такую величину испаряемости, как «несомненно вредное явление», указывая что она нередко наблюдается при средней относительной влажности выше 50 % за сутки, но или при повышенной скорости ветра или при высокой температуре. Весной же и осенью такая испаряемость обычно наблюдается при средней суточной температуре ниже 20 °С, но при сильном ветре или низкой влажности воздуха.

Г. Т. Селянинов очень удачно выразил то основное, что характерно для суховеев — их «иссушающую силу», т. е. испаряемость, показав при этом, что она может проявляться при различных сочетаниях температуры, влажности воздуха и скорости ветра.

Работы Е. А. Цубербиллер (1966) показали, что причиной повреждений от суховеев является несоответствие между водоснабжением растений и испаряемостью, которое во время суховеев переходит через некоторый допустимый для растений предел. Этот вредный для растений предел непостоянный и меняется в зависимости от ряда факторов. Интенсивность повреждений зависит от степени этого несоответствия.

Таблица 16.1

Показатели повреждений (агрометеорологические критерии) зерновых культур суховеями (по Е. А. Цубербиллер, 1966)

Тип суховеев	Испаряемость, мм/сут (ист.)	Дефицит влажности в будке в 13 ч при разной скорости ветра, мм		Запасы продуктивной влаги (мм) по слоям, при которых наблюдаются повреждения			Эвапорометрический коэффициент	Характеристика степени повреждения растений
		< 10 м/с	⩾ 10 м/с	0—20 см	0—50 см	0—100 см		
Слабые	3—5	15—24	10—14	⩽ 20	⩽ 50	⩽ 80	0,5—0,4	Легкое снижение тургора
Средний интенсивности	5—6	25—29	⩾ 20	⩽ 10	⩽ 30	⩽ 50	0,3	Значительное снижение тургора листьев, их скручивание, пожелтение, подсыхание; у незакаленных растений возможен небольшой захват зерна через 3—5 дней
Интенсивные	6—8	30—39	⩾ 25	⩽ 10	—	⩽ 30	0,2—0,1	Сильное увядание и усыхание вегетативной массы, захват зерна через 2—3 дня, у незакаленных растений — через 1—2 дня
Очень интенсивные	> 8	⩾ 40	⩾ 35	0	—	⩽ 30	0,2—0,1	Быстрое и сильное повреждение вегетативной массы, захват зерна через 1—2 дня

Е. А. Цубербиллер в качестве показателя повреждения использует «эвапорометрический коэффициент» Скворцова:

$$K_э = \frac{И_ф}{И_{ст}}. \qquad (16.10)$$

Этот коэффициент выражает соотношение между фактическим (измеренным) испарением с естественной поверхности поля $И_ф$, и испарением со «стандартной» водной поверхности $И_{ст}$, которое рассчитывается по формуле Мейера—Тихомирова:

$$И_{ст} = 0{,}012Д, \qquad (16.11)$$

где $Д$ — дефицит давления водяного пара, гПа. Значение $K_э = 1$ показывает, что испарение с поверхности поля равно испарению со стандартной водной поверхности, при $K_э > 1$ испарение с поля больше испарения с той же площади водной поверхности, при $K_э < 1$ процесс испарения с поля идет с бо́льшим или меньшим недобором воды. При нормальной жизнедеятельности зерновых культур значение $K_э$ в дневные часы сохраняется в пределах 0,8—1,5.

С помощью показателя $K_э$ можно приблизительно установить, какая суточная испаряемость соответствует различным градациям интенсивности суховеев и какое количество воды должно испаряться растениями для предотвращения вредного действия суховеев. Это дает возможность выразить агрометеорологические показатели повреждений от суховеев в удобном для применения виде (табл. 16.1).

Все приведенные в табл. 16.1 градации суховеев не причиняют растениям существенных повреждений, если в почве имеется такое количество влаги, которое обеспечивает возможность повышения испарения в соответствии с уровнем испаряемости. Проведенные исследования показали, что повреждения отсутствуют, если значение $K_э$ в дневные часы не опускается ниже 0,8, и повреждения бывают незначительны, если $K_э$ эпизодически достигает значения 0,5.

Е. А. Цубербиллер сформулировано также определение и критерий суховеев в следующем виде: суховей характеризуется ненормально большим для данной географической точки и времени года дефицитом влажности воздуха, превышающим среднее месячное его значение в 13 ч в 1,5 раза (слабые), в 2 раза (интенсивные) и в 3 раза (очень интенсивные суховеи).

16.5. Засушливые условия и урожай

Степень опасности засух и суховеев зависит в первую очередь от засухоустойчивости данного вида и сорта растений. Очень сильно действию засух и суховеев подвержены яровые зерновые, которые наиболее активно развиваются в весенне-летний засухо-

опасный период, когда запасы влаги в почве, как правило, уже невысокие. Более благоприятные условия складываются для озимых культур, так как они хорошо используют весенние запасы влаги в почве и раньше завершают свою вегетацию.

Суховеи способны в сравнительно короткий срок (за несколько суток или даже несколько часов) сильно снизить или полностью уничтожить урожай.

Экспериментальные данные. В. Ф. Альтергот и С. С. Мордкович (1977) показали, что в фазе кущения яровой пшеницы перегрев растений (температура воздуха выше 40 °С) по 6 ч в сутки в течение одной недели даже при оптимальной влажности почвы приводит к снижению урожайности у сорта Саратовская 29 на 33—40 %, у сорта Минская на 18—50 %. Обезвоживание благодаря снижению влажности почвы до двойного значения влажности устойчивого завядания при температуре 15... 20 °С сказывается сильнее, чем высокие температуры. Воздействие высоких температур в период дифференциации главной оси зачаточного соцветия, закладки и дифференциации лопастей соцветия (III и IV этапы органогенеза) наносит непоправимый ущерб основным элементам урожая — озерненности колоса и числу плодоносящих стеблей. Высокая температура подавляет развитие продуктивных побегов кущения. После воздействия высоких температур на побеги продолжается их влияние на формирующийся колос: идет отмирание заложившихся зачаточных колосков и нарушение формирования цветков на V этапе органогенеза. В фазу колошения (VIII этап органогенеза) действие высоких температур (40... 45 °С) в течение недели (по той же схеме, что и в фазу кущения) вызывает еще бóльшее отрицательное последствие.

Опыты в камере искусственного климата (Е. Г. Минина, 1941) показали, что недостаточное увлажнение почвы (40 % ПВ) также весьма существенно сказывается на числе колосков как при воздействии в период от начала образования листовых бугорков до начала вытягивания конуса нарастания, так и в последующем — до окончания образования колосковых бугорков. Но и полная обеспеченность растений влагой (80 % ПВ) еще не гарантирует образования максимального числа колосков, если при этом в камере поддерживаются высокая температура воздуха и низкая относительная влажность. Даже один день с высокой средней суточной температурой (более 20 °С) в период заложения колосковых бугорков вызывает снижение числа колосков.

Засушливые условия и формирование вегетативных и репродуктивных органов. По данным Л. Е. Пасечнюк и В. А. Сенникова (1983), засушливые условия оказывают неблагоприятное влияние на формирование высоты стеблестоя и продуктивной кустистости.

Установлено влияние числа дней с суховеями за период 3-й лист — цветение на высоту растений яровой пшеницы, измеренную в фазу цветения. Эта зависимость криволинейна; уравнения связи имеют вид:

для степных районов Поволжья

$$y = 499{,}9/x + 26{,}6;\ S_y = \pm 13 \text{ см}, \quad (16.12)$$

для Кулунды

$$y = 343{,}3/x + 23{,}5;\ S_y = \pm 7 \text{ см}, \quad (16.13)$$

где x — число дней с суховеями за период 3-й лист — цветение; y — высота растений в фазу цветения, см. Уравнения рассчитаны для числа дней с суховеями от 6 до 28 в Поволжье и от 6 до 34 в Западной Сибири.

В лесостепных районах зависимость высоты растений от числа дней с суховеями менее тесная. Следовательно, при снижении засушливости зависимость высоты стеблестоя от числа дней с суховеями ослабевает.

Л. Е. Пасечнюк и В. А. Сенниковым (1983) проведено исследование влияния числа дней с суховеями на формирование репродуктивных органов яровой пшеницы. Получено, что наибольшее снижение числа колосков в колосе происходит при следующем комплексе условий: числе дней с суховеями за период 3-й лист — цветение более 16, количестве осадков за этот же период не более 40 мм, запасах продуктивной влаги в пахотном слое в фазу выхода в трубку менее 20 мм.

Число зерен в колосе в значительной степени определяется условиями среды в периоды закладки, дифференциации колоса и цветка и зависит также от количества полностью сформировавшихся и оплодотворенных цветков. Оно может варьировать в значительных пределах.

Недостаток влаги в начале фазы выхода в трубку и в последующие 10 дней, когда идет рост колоса и дифференциация элементов цветка, проявляется в увеличении количества бесплодных цветков, а в дальнейшем бесплодных колосков. В лесостепной зоне небольшое количество зерен формируется при числе дней с суховеями за период 3-й лист — цветение более 15 и за период выход в трубку — цветение более 11 дней. С продвижением в южные районы такое же количество зерен формируется при более жестких условиях.

С наступлением фазы молочная спелость заканчивается период формирования зерновки и начинается период налива зерна, который продолжается до фазы восковой спелости. Неблагоприятные условия могут прервать прирост сухого вещества, в результате чего будет получено зерно с низкой массой 1000 зерен.

Выделяют два типа повреждений от суховеев: захват — повреждение от обезвоживания и запал — повреждение от перегрева.

Получение щуплого зерна в суховейные годы связано с резко ускоренным снижением содержания в нем влаги, доходящего до такого предела, при котором становится невозможным дальнейшее поступление пластических веществ в зерно. Известны случаи, когда продолжительность периода колошение — восковая спелость

под влиянием суховеев катастрофически сокращалась. Влажность в зерне снижалась до 40 %, а при такой влажности происходит свертывание гидрофильных коллоидов, растение преждевременно засыхает и дает щуплое зерно. Если высыхание зерна до предельной влажности наступает чрезвычайно рано, когда ассимиляты из вегетативных частей растения еще не полностью переведены в зерно, то налив может прекратиться на любой фазе, и тогда налицо будет щуплость его или захват.

Атмосферной засухой в значительной степени объясняется и явление запала, распространенное на юге и юго-востоке ЕЧС. Здесь жаркий и сухой ветер может в течение нескольких часов привести к резкому ухудшению качества зерна.

Наибольшее снижение урожая зерна и его качества наблюдается в тех случаях, когда суховеи, особенно интенсивные, действуют на фоне сильной и продолжительной почвенной засухи. Так, при запасах влаги в метровом слое менее 30 мм наличие трех дней с дефицитом насыщения влажности воздуха более 30 мм или четырех-пяти дней с дефицитом насыщения более 25 мм вызывает снижение массы 1000 зерен на 40 % и более. По наблюдениям Е. А. Цубербиллер (1966), запасы продуктивной влаги у злаковых культур в момент повреждения зерна бывали почти всегда на исходе (в пахотном слое около 5—6 мм, в полуметровом 10—12 мм, в метровом 35—40 мм).

Моделирование влияния засухи на процесс формирования урожая. В основе существования растений лежит постоянный экзо- и эндогенный энергомассообмен. Неблагоприятный фактор, в частности засуха, изменяет как абсолютные величины составляющих этого обмена, так и соотношение между ними, что приводит к снижению продуктивности.

В работе А. Н. Полевого (1979) моделируется влияние засухи на формирование урожая. При напряженном водном режиме происходит нарушение основных процессов жизнедеятельности растений. Увеличение дефицита влаги сопровождается непрерывным усилением дыхания; изменения фотосинтеза противоположны изменениям дыхания. Отмечается замедление роста и уменьшение отношения надземной массы растения к массе корней.

Под воздействием неблагоприятных условий в период вегетативного роста изменения характера роста надземной части растения происходит при

$$\Delta M^{i+1}/\Delta t < \Delta M^{i}/\Delta t, \tag{16.14}$$

если $\Delta M^{i+1}/\Delta t \neq 0$.

Предположим, что прирост биомассы корней сохраняется на одном уровне или равен приросту биомассы всего растения:

$$\frac{\Delta m_r^{i+1}}{\Delta t} = \begin{cases} \dfrac{\Delta m_r^{i}}{\Delta t}, & \text{если } \dfrac{\Delta M^{i+1}}{\Delta t} \geqslant \dfrac{\Delta m_r^{i}}{\Delta t}, \\ \dfrac{\Delta M^{i+1}}{\Delta t}, & \text{если } \dfrac{\Delta M^{i+1}}{\Delta t} < \dfrac{\Delta m_r^{i}}{\Delta t}, \end{cases} \tag{16.15}$$

тогда прирост надземной биомассы определим из соотношения:

$$\frac{\Delta m_{\text{shoot}}^{j+1}}{\Delta t} = \begin{cases} \dfrac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t} - \dfrac{\Delta m_r^{j+1}}{\Delta t}, & \text{если } \dfrac{\Delta m_r^{j+1}}{\Delta t} < \dfrac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t}, \\ 0, & \text{если } \dfrac{\Delta m_r^{j+1}}{\Delta t} = \dfrac{\Delta M^{j+1}}{\Delta t}, \end{cases} \tag{16.16}$$

где m_{shoot} — биомасса надземных органов, г/м^2.

Распределение продуктов фотосинтеза между надземными органами растения проводится путем введения ростовых функций надземной части растения

$$\beta_{i\,(\text{dr})}^{j} = \beta_i^j \Big/ \sum_{i}^{l,\,s,\,p} \beta_i^j, \tag{16.17}$$

где $\beta_{i(\text{dr})}$ — ростовая функция периода вегетативного роста надземного органа в условиях засухи, безразмерная.

Уравнение динамики биомассы надземных органов записывается в виде

$$\Delta m_{i\,(\text{dr})}^{j+1}/\Delta t = \beta_{i\,(\text{dr})}^{j+1}\left(\Delta m_{\text{shoot}}^{j+1}/\Delta t\right), \tag{16.18}$$

где $\Delta m_{i(\text{dr})}^{j+1}/\Delta t$ — прирост сухой биомассы i-го надземного органа в условиях засухи, г/м^2.

Динамика прироста общей биомассы посева рассматривается в качестве внутреннего переключателя для адаптивного увеличения доли подземных органов при воздействии на растение неблагоприятных условий.

Потери урожая. Наибольший ущерб зерновому хозяйству нашей страны наносят весенне-летние засухи, охватывающие многие основные зерновые районы. По данным Е. С. Улановой (1988), к наиболее сильным засухам, которые охватывали огромную территорию от 7 до 10 основных зерновых районов ЕЧС, Сибири и Казахстана, относятся засухи следующих лет: 1891, 1901, 1920, 1921, 1924, 1936, 1946, 1954, 1955, 1963, 1965, 1972, 1975, 1979, 1981, 1984 гг. Среди них следует отметить две жесточайшие засухи 1975 и 1981 гг., которые охватили все основные зерновые районы ЕЧС, Сибири и Казахстана и не имели аналогов с 1891 г.

Нередки засухи, которые охватывают 5—6 основных зерновых районов и также значительно снижают валовой сбор зерновых культур в целом по стране. К таким засухам можно отнести засухи следующих лет: 1892, 1897, 1906, 1911, 1914, 1931, 1934, 1938, 1939, 1948, 1949, 1953, 1953, 1957, 1967, 1982 гг.

Далее следуют локальные засухи, которые снижают валовой сбор зерновых культур в отдельных районах, не влияя существенно на общий валовой сбор зерна по территории, например, сильная засуха 1969 г. на Северном Кавказе или засуха 1974 г. в Западной Сибири и Казахстане.

Наибольшую значимость представляют потери урожая зерновых культур в годы сильных засух одновременно в нескольких

крупных зерновых районах, нанося большой ущерб зерновому хозяйству страны.

В табл. 16.2 представлена урожайность зерновых культур в процентах урожайности по тренду в годы наиболее сильных засух в целом по стране, основным республикам и экономическим районам. Анализ данных табл. 16.2 позволяет дать сравнительную оценку этих засух и степени их влияния на урожайность зерновых культур в различных районах.

Таблица 16.2

Урожайность зерновых культур (% урожайности по тренду) в годы наиболее сильных засух (1946—1984 гг.) (по Е. С. Улановой, 1988)

Территория	1946	1954	1955	1957	1963	1965	1972	1975	1979	1981	1984
1. СССР	77	91	95	88	73	79	99	72	87	74	83
2. Российская Федерация	75	98	93	90	77	80	93	71	78	66	81
3. Украина	61	59	122	106	72	101	90	80	77	75	91
4. Центральночерноземный район	33	84	129	103	73	102	87	79	41	48	54
5. Северо-Кавказский	76	83	92	100	101	84	77	74	71	94	93
6. Поволжский	66	79	92	55	89	86	66	46	68	52	49
7. Уральский	86	96	65	68	97	63	99	40	105	64	66
8. Западно-Сибирский	100	167	69	122	38	47	148	88	109	68	19
9. Казахстан	102	146	45	68	57	39	136	48	133	88	57

Глава 17
ПЕРЕУВЛАЖНЕНИЕ

17.1. Изменение водно-физических свойств почв при переувлажнении и заболачивании

Избыточным увлажнением считают (А. А. Роде, 1955) такое состояние почвы, когда среднее содержание в ней влаги за вегетационный период превышает 70—80 % полной влагоемкости. Почвы, подверженные постоянному или периодически длительному избыточному увлажнению относятся к заболоченным.

В зоне избыточного увлажнения почти повсеместно в почве присутствуют и постоянно действуют три фактора: застой влаги, наличие анаэробной микрофлоры и органического вещества, способного к сбраживанию. Наличие этих факторов является необходимым и достаточным условием практически повсеместного распространения глееобразования в зоне избыточного увлажнения. Глееобразование трансформирует агрегатный состав исходных материнских пород и влияет на их физические свойства.

В почвах с нарастающей степенью оглеения в гумусовых горизонтах (независимо от генетической принадлежности почв) уменьшается объемная масса. Уменьшение плотности аккумулятивных горизонтов обусловливает увеличение их общей пористости, которая достигает максимальных значений в сильно заболоченных почвах (Ф. Р. Зайдельман, 1975).

В тяжелых дерново-подзолистых почвах по мере усиления оглеения несколько увеличивается плотность и уменьшается пористость. Это наиболее отчетливо выражено в нижних горизонтах глееватых почв. Вместе с тем, для неоглеенных и оглеенных тяжелых почв абсолютные значения плотности и пористости очень близки. Это объясняется, очевидно, тем, что действие оглеения на тяжелых почвах развивается на весьма плотных материнских породах. Поэтому оглеенные подзолистые тяжелые почвы существенно не отличаются по своим физическим свойствам от неоглеенных.

В более легких дерново-подзолистых почвах приуроченных к легко- и среднесуглинистым породам, постепенно увеличивается объемная масса и уменьшается пористость под влиянием прогрессирующего заболачивания, главным образом в иллювиальных горизонтах (в слое 50—120 см от поверхности). Уменьшение пористости дерново-подзолистых глеевых почв по сравнению с неоглеенными почвами легкосуглинистого механического состава вполне достоверно, обычно оно равно 4—6 %.

Наконец, в легких (супесчаных и песчаных) почвах водоразделов глеевые горизонты часто имеют такие же или меньшие значения объемной массы, что и неоглеенные горизонты. Максимальная плотность и минимальная пористость (35—37 %) наблюдаются не в глеевых, а, как правило, в ортзандовых, сильно ожелезненных слоях. В зоне переменного режима влажности заболачивание лишь незначительно уменьшает или не влияет на плотность и пористость пойменных почв. Для всех исследованных разновидностей дерновых зернистых почв независимо от степени их оглеения (в том числе и для дерновых зернистых глеевых) и глубины исследуемого горизонта (в 1,0—1,5-метровой толще) объемная масса оказалась весьма незначительной (0,96—1,12 в слое 0,50 см и 0,99—1,10 в слое 0—100 см). Относительно однородной и высокой была общая пористость всех рассматриваемых почв (соответственно 56—63 и 58—62 %).

В результате аккумуляции органического вещества, а также длительной гидрации коллоидов при заболачивании наблюдается закономерное увеличение влагоемкости верхних горизонтов оглеенных почв. На начальных стадиях заболачивания наименьшая влагоемкость увеличивается постепенно. Но при интенсивном оглеении ее значения резко возрастают.

Но если в верхних горизонтах прослеживается увеличение влагоемкости минеральных почв по мере нарастания заболоченности, то в нижних слоях профиля ее изменения не столь закономерны и в значительной мере связаны с генезисом и механическим

составом. В почвах водоразделов влагоемкость глеевых горизонтов такая же, как и менее заболоченных и неоглеенных слоев, или несколько меньше. Наиболее отчетливо уменьшение влагоемкости наблюдается в суглинистых и легких почвах. Это происходит, во-первых, из-за уменьшения пористости вследствие уплотнения, во-вторых, в результате предельного обезыливания глеевых горизонтов песчаных почв.

При исследовании водопроницаемости суглинистых подзолистых и дерново-глеевых почв установлены снижение от 0,44 до 0,40 м/сут скорости фильтрации верхнего горизонта в почвах, отличающихся наибольшим оглеением, относительная стабильность ее значений в глубоких слоях профиля и колебания водопроницаемости иллювиальных горизонтов. Низкая скорость фильтрации, свойственная этому слою в неоглеенных и глубокооглеенных почвах (0,08—0,15 м/сут) в глееватых и глеевых видах резко возрастает (в 2—4 раза) и оказывается равной или близкой водопроницаемости материнской породы (0,34—0,38 м/сут).

Можно указать по крайней мере три причины, обусловливающие увеличение коэффициента фильтрации оглеенных почв по сравнению с неоглеенными. Во-первых, интенсивное заболачивание легкосуглинистых подзолистых почв резко ослабляет процесс формирования уплотненного иллювиального горизонта. Во-вторых, в глубоких слоях под влиянием оглеения происходит вынос железа и алюминия, следствием этого является некоторое облегчение их механического состава. Наконец, в-третьих, причиной увеличения фильтрации воды в оглеенных почвах может оказаться их повышенная трещиноватость в сухом состоянии. Фильтрация в глееватой почве по всему профилю, а в глеевой на глубинах 30—40 и 90—100 см, т. е. в зоне активного действия дрен, в 1,5—2 раза выше фильтрации в неоглеенной почве.

Водопроницаемость легких дерново-подзолистых почв с поверхности невелика (0,3—0,8 м/сут), причем и в этом случае прослеживается некоторое снижение коэффициента фильтрации $K_ф$ при увеличении степени заболоченности почв.

Тяжелым пойменным почвам свойственны более высокие абсолютные значения водопроницаемости, чем тяжелосуглинистым подзолистым почвам водоразделов. Более отчетливо прослеживается влияние оглеения на водопроницаемость горизонтов почвенного профиля. Основная причина уменьшения водопроницаемости обусловлена увеличением объема связанной влаги и происходящей при этом закупоркой пор. Поэтому при усилении степени оглеения в пойменных почвах в отличие от подзолистых резко уменьшается водопроницаемость поверхностных горизонтов. Так, в незаболоченных дерновых зернистых почвах коэффициент фильтрации (с поверхности) составил 2,6 м/сут, а в глубокооглеенных, глееватых и глеевых почвах — соответственно 0,6; 0,3 и 0,16 м/сут.

17.2. Оценка состояния избыточного увлажнения почв по их агрогидрологическим свойствам

Критерии оценки верхнего предела влажности почв, диагностирующего возникновения неблагоприятных экологогидрологических условий, связанных с избыточным увлажнением, разработаны весьма неполно. Обычно (за исключением глинистых бесструктурных почв) такие условия возникают в интервале между полной и наименьшей влагоемкостями (ПВ—НВ). Из этого был сделан вывод о том, что избыточное увлажнение всегда вызывает влага, равная или большая НВ. На основании этого вывода почвы, на которых наблюдаются случаи наличия периодов с влажностью, равной или большей НВ, рассматриваются как избыточно увлажненные. Однако ранее Я. Копецким (1908), М. Расселом (1955) и др. показано, что нормальное развитие корней растений происходит в слоях с воздухоносной порозностью, равной или выше 6—8 %. П. Фагелер (1938) подчеркивал, что такие значения воздухоносной порозности отражают опытные и практические наблюдения.

Почти такие же критические значения воздухоносной порозности (5—10 %) были использованы Меннингом и Боне (1981) для определения границ оптимальной влажности при прогнозировании и оценке водного режима почв. Поэтому границу влажности, выше которой наступает экологическое избыточное увлажнение, следует рассматривать как величину, равную общей пористости (ОП) минус 8 % для пахотных горизонтов и минус 6 % для подпахотных слоев профиля.

Существенно и то, что движение сельскохозяйственных машин по полю резко ухудшается или становится невозможным при воздухоносной порозности почв в пахотном горизонте, равной или меньшей 6—8 %.

Целесообразность этих критериев оценки экологически избыточного увлажнения (ОП минус 8 % для горизонта A_p; ОП минус 6 % для подпахотных горизонтов) подтверждается и другими данными. Избыточное увлажнение опасно не поступлением гравитационной влаги в горизонты почвенного профиля, а прежде всего и главным образом нарушением газообмена корнеобитаемых слоев и резким ослаблением их *аэрации*. Вместе с тем воздухообмен и перемещение кислорода в почве обеспечены в том случае, если в корнеобитаемом слое сохраняется непрерывная система заполненных воздухом пор. По данным Гайслера (1973), данное состояние непрерывности возникает при содержании воздухоносных пор в почве, равном 4—7 %. Такое содержание воздухоносных пор в почвах различного генезиса и состава имеет место при самых разных значениях влажности почв, резко превышающих НВ, или напротив остающихся значительно ниже НВ.

Таким образом, НВ в общем виде нельзя рассматривать как универсальный критерий диагностики возникновения в почве экологически избыточного увлажнения. Такое заключение подтвер-

Таблица 17.1

Воздухоносная порозность (%) при влажности, соответствующей наименьшей влагоемкости (НВ), в глееватых подзолистых и пойменных почвах Нечерноземной зоны разного гранулометрического состава (по Ф. Р. Зайдельману, 1985)

Почва	Гранулометрический состав	Глубина, см	Общая порозность, %	Наименьшая влагоемкость, %	Воздухоносная порозность при НВ, %	Влажность почвы, соответствующая состоянию экологического избыточного увлажнения	
						% НВ	% абс. объемных
Подзолистая	Супесчано-песчаный	0—30	43	23	20	152	35
		50—60	36	11	25	272	30
		70—80	36	13	23	230	30
	Легкосуглинистый	0—30	50	36	14	122	44
		50—60	45	30	15	130	39
		70—80	40	33	7	103	34
	Средне- и тяжелосуглинистый	0—30	45	36	9	103	37
		50—60	40	35	5	97	34
		70—80	40	35	5	97	34
	Глинистый	0—30	53	47	6	96	45
		50—60	46	41	5	98	40
		70—80	45	41	4	95	39
Пойменная	Тяжелоглинистый	0—30	57	39	17	123	48
		50—60	61	37	24	149	55
		70—80	55	42	13	117	49

ждают данные табл. 17.1 из которой следует, что при влажности, равной НВ, в почвах разного генезиса и состава значения воздухоносной порозности изменяются в весьма широком диапазоне. Так, в горизонтах A_p изменения колеблются от 6 до 20 %, в иллювиальных горизонтах — от 4 до 25 %. При влажности, равной НВ, в супесчано-песчаной почве воздухоносная порозность превышает 20 %. Последнее указывает на экстремально высокую и неблагоприятную аэрацию. На таких почвах НВ недостаточна для нормального обеспечения влагой всех культур. Здесь влажность, равная НВ, свидетельствует не об избытке, а скорее о существенном дефиците влаги для роста и развития растений и о весьма неблагоприятных экологических условиях.

В легкосуглинистых подзолистых почвах при влажности, равной НВ, почти по всему профилю складываются благоприятные или удовлетворительные условия для развития растений. В этом случае НВ соответствует наиболее хорошему влагообеспечению и соотношению воды и воздуха. НВ в средне- и тяжелосуглинистых подзолистых почвах является, несомненно, той величиной, выше которой влажность почвы оказывается неблагоприятной и излишне высокой для растений. Наиболее низкие значения воздухоносной порозности при НВ наблюдают в иллювиальных горизонтах.

Наконец, в глинистых подзолистых почвах НВ столь значительна, что объем воздухоносной порозности по всему профилю при этой влажности оказывается ниже 6—8 %. Поэтому здесь критическая влажность, соответствующая переходу почвы в состояние избыточного увлажнения, ниже НВ. Следует отметить, что при оценке экологического состояния почв по влажности важное значение приобретает не только их генетическая принадлежность и механический состав, но и особенно структурное состояние. Так, в пойменных структурных тяжелоглинистых почвах состояние экологического избыточного увлажнения наступает при влажности выше НВ (120—150 НВ), т. е. так же как и в значительно более легких подзолистых почвах на лёссовидных легких суглинках.

Минимальный объем воздуха в почве, необходимый для нормального развития культур, изменяется в зависимости от их вида от 10 до 50 % пористости, а следовательно, оптимальная для роста растений влажность почвы будет изменяться от 90 до 50 % пористости. В табл. 17.2 приведены значения оптимальной влажности почвы для основных сельскохозяйственных культур, выращиваемых в зоне избыточного увлажнения.

Таблица 17.2

Оптимальная влажность почвы (по А. И. Климко, 1979)

Культура	Влажность, % пористости
Зерновые (преимущественно яровые)	40—50
Зернобобовые	50—60
Картофель, сахарная свекла, корнеплоды и др.	60—70
Капуста белокочанная	70—85
Полевые многолетние травы	70—80
Луговые травы	80—90

17.3. Влияние переувлажнения на периодичность роста и продуктивность растений

Ухудшение аэрации корней при избытке влаги ведет к снижению общего содержания воды в растении.

Даже кратковременный анаэробиоз способствует накоплению нитритов, закиси азота, сульфидов, сероводорода, углекислоты, закисных форм железа и марганца.

При избытке влаги снижается микробиологическая активность почвы, что ухудшает использование минеральных веществ растениями. Анаэробные условия в большей степени влияют на передвижение ионов от корней в надземную часть, чем на поглощение этих элементов. Наблюдается также и выделение ранее поглощенных питательных веществ в окружающую среду.

Нарушение синтетической деятельности корневой системы, а также регуляции передвижения веществ по растению уменьшает скорость роста и продуктивность растений.

По данным В. С. Шевелухи (1978) при избытке влаги в почве интенсивность среднесуточной скорости роста зерновых уменьшается на 8,0—46,7 % в зависимости от стадии развития растений и длительности сроков воздействия, а также степени избыточного увлажнения. При влажности почвы 100 % ПВ на III—IV этапах органогенеза растений отмечается уменьшение среднесуточной скорости роста на 8,0 % (8 дней), а при влажности 130 % ПВ — на 46,7 % (15 дней) по сравнению с контролем.

При затоплении на V—VII этапах органогенеза среднесуточная скорость роста уменьшается на 9,0—17,6 % (100 %-ная влажность) и до 33—34 % (130 %-ная влажность) относительно контроля.

Избыточное увлажнение нарушает водообмен клетки и всего растительного организма, что ведет к угнетению ростовых процессов, нарушению микро- и макроспорогенеза, к различным аномалиям в формировании репродуктивных органов, что в свою очередь обусловливает плохую завязываемость зерна из-за низкой жизнеспособности пыльцы. Наряду с этим нарушается нормальный обмен веществ как во всем растении, так и в его репродуктивных органах. Все это, естественно, сказывается на конечном результате роста, развития растений и урожая зерна.

Для учета влияния переувлажнения на снижение продуктивности фотосинтеза растений О. Д. Сиротенко (1981) предложил использовать коэффициент переувлажнения $\overline{SW}$:

$$SW_i = \frac{W_i - W_{opt}}{W_i^{ПВ} - W_{opt}}, \qquad (17.1)$$

если $W_i > W_{opt}$, иначе $SW_i = 1$,

$$\overline{SW} = \frac{\sum_{i=1}^{n} SW_i \mu_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_i}, \qquad (17.2)$$

где W_i — влажность i-го слоя почвы, мм; $W_i^{ПВ}$ — полная влагоемкость; W_{opt} — оптимальная для данной культуры влажность почвы например, для яровой пшеницы $W_{opt} = 0{,}7W_i^{ПВ}$; μ_i — доля корней в i-м слое почвы; n — число почвенных слоев.

Установлено, что при воздействии избытка влаги на растения ячменя в различной степени снижается урожай зерна в зависимости от фазы развития растений, длительности и степени затопления (табл. 17.3).

Снижение накопления общей биомассы происходит в основном за счет репродуктивных органов, корневой системы и несколько в меньшей степени за счет массы стеблей.

Таблица 17.3

Влияние избыточного увлажнения почвы на выход зерна и его урожай (по В. С. Шевелухе, 1978)

Вариант опыта	Масса зерна (14 %-ной влажности), г/сосуд						Выход зерна по всей биомассе, %					
	Кущение		Выход в трубку		Налив зерна		Кущение		Выход в трубку		Налив зерна	
	среднее за два года	% к контролю	среднее за два года	% к контролю	среднее за два года	% к контролю	1975 г.	1976 г.	1975 г.	1976 г.	1975 г.	1976 г.
Влажность почвы 100 % ПВ												
3 дня	24,0	87,6	23,8	87,0	24,1	88,0	—	40,0	—	40,9	—	39,3
8 дней	19,6	87,1	17,7	78,7	19,0	84,4	27,5	40,0	25,6	40,8	30,2	40,0
15 дней	22,0	80,3	21,1	77,0	20,7	75,5	—	39,3	—	40,4	—	39,1
Влажность почвы 130 % ПВ												
3 дня	18,6	82,6	17,0	75,5	17,0	75,5	28,5	40,3	26,0	40,6	24,7	38,3
8 дней	13,6	60,4	8,7	38,7	12,5	55,5	26,3	40,0	22,3	21,0	13,8	35,9
15 дней	8,4	37,3	2,2	19,5	9,2	40,9	19,0	37,2	4,7	10,1	13,4	30,6
Влажность почвы 60—65 % ПВ Контроль	22,5	100	22,5	100	22,5	100	29,3	42,6	29,3	42,6	29,3	42,6

Согласно оценке Ю. А. Канцибера (1978), на тяжелосуглинистых почвах потери урожайности в результате переувлажнения могут достигать для картофеля 56—84 %, зерновых культур 32—48 %, многолетних трав 24—36 %. При избыточном увлажнении нарушается режим почвенного питания, возникает анаэробный тип дыхания, неэкономично расходуются пластические вещества, что в целом приводит к истощению растений; эффективность удобрений снижается.

Внесение минеральных удобрений не позволяет полностью преодолеть отрицательное действие переувлажнения. Представляет

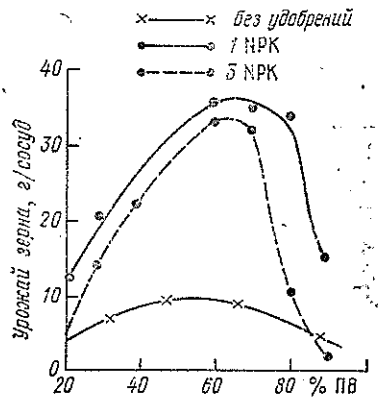


Рис. 17.1. Влияние доз минерального питания и влажности почвы на урожай ячменя (по В. С. Шевелухе, И. И. Берестову, В. О. Дорохову, 1980).

большой практический интерес наблюдаемый при внесении удобрений сдвиг оптимума в сторону более высоких уровней влагообеспеченности (В. С. Шевелуха, 1980). Если при среднем уровне обеспеченности растений элементами питания, оптимальная водообеспеченность находится на уровне 60 % полной влагоемкости (ПВ), то повышенные дозы питательных веществ будут более эффективны при 70—80 % ПВ (рис. 17.1).

17.4. «Стекание» зерна, прорастание на корню и в валках

Возникновение и развитие «стекания» обусловливается значительным повышением активности гидролитических ферментов как во время созревания семян, так и (что более существенно) при достижении ими полной спелости при увлажнении осадками или сильными, долго не спадающими росами и туманами. Образующиеся водорастворимые осмотически активные вещества увеличивают приток воды в зерно с его увлажненной поверхности и тем еще больше усиливают дальнейший гидролитический распад запасных питательных веществ, которые в конечном счете вытекают из зерна или расходуются в качестве дыхательного материала. При этом биомасса сухого вещества формирующейся зерновки уменьшается и проявляется щуплость.

М. И. Княгичев (1951), А. И. Носатовский (1965), ссылаясь на исследования ряда ученых, указывают, что стекание зерна при очень влажной и теплой погоде в период налива и созревания идет за счет большого расхода сухих веществ на дыхание и прямого вымывания питательных веществ дождями. Приводимые ими опыты Н. Г. Холодного показывают, что под воздействием дожде-

вания масса зерна может снижаться на 16,5—48 % в зависимости от фазы спелости зерна, в которую воздействовали на колос дождем. То, что под воздействием дождя идет экзоосмос сахара, гидролитический распад крахмала и отток пластических веществ, было доказано присутствием сахара в стекающей с колосьев воде. Стекание зерна может проходить и после уборки, пока влажность зерна выше 25 %, т. е. и в валках (снопах) после скашивания хлебов.

Результаты исследований И. В. Свисюка, проведенных летом 1977 г., показывают, что явление стекания зерна трудно отделить от тех явлений, которые ему сопутствуют. Это, во-первых, полегание хлебов, а отсюда увеличение влажности травостоя и ухудшение условий обмена веществ в растении. Во-вторых, происходит вымывание подвижных форм азота из почвы обильными дождями до и после начала налива зерна, особенно на неудобренных полях с непаровыми предшественниками. В верхних слоях почвы в период формирования и налива зерна наблюдались лишь следы такого азота, а его недостаток в растениях и привел к образованию мелкого зерна.

Стекание сопровождалось также явлением «захвата» из-за поражения растений ржавчиной и другими грибными заболеваниями. Ржавчина местами вызвала преждевременное отмирание листьев и прекращение ассимиляционных процессов у растений еще до того, как они вступили в фазу восковой спелости, что также приводило к образованию щуплого зерна.

Снижение массы зерна шло и после начала полной спелости хлебов, что хорошо прослеживается по табл. 17.4.

Таблица 17.4

Уменьшение натуры зерна после вступления растений в фазу полной спелости в зависимости от количества выпавших осадков в Ростовской области в период уборки в 1977 г. (по И. В. Свисюку, 1980)

Район	Сумма осадков за период, мм		Уменьшение массы зерна по периодам, г	
	5—31 VII	1—15 VIII	5—31 VII	1—15 VIII
Матвеево-Курганский	194	83	15	10
		83	—	11
Зеленоградский	114	63	11	9
		63	—	20
Зимовниковский	64	2	2	7
		2	—	7

Примечание. 1-я строка — озимая пшеница, 2-я строка — яровой ячмень.

Следует отметить, что с увеличением разрыва между наступлением полной спелости и скашиванием снижение урожайности увеличивается.

Задержка с уборкой из-за сильных дождей ведет к сильному зарастанию низкорослых посевов особенно ярового ячменя сорной растительностью, что также увеличивает потери урожая.

И. В. Свисюк (1977) установил, что увеличение осадков до 70 мм (60—80 мм) в период формирования и налива зерна улучшает условия протекания важнейших процессов и масса 1000 зерен повышается. При количестве осадков 70 мм она наиболее высокая, а в дальнейшем при увеличении осадков за тот же период идет ее снижение (рис. 17.2).

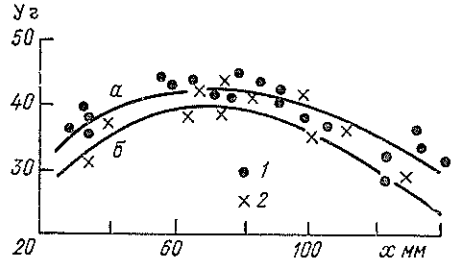


Рис. 17.2. Зависимость между массой 1000 зерен *у* и количеством осадков *х*, выпавших за период формирования и налива зерна озимой пшеницы (по И. В. Свисюку, 1980).

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.

Значительные потери урожая и ухудшение его качества происходят при прорастании неубранного зерна в валках и на корню. 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 дней всхожесть зерна снижается до 75—65 %, а масса сухого вещества уменьшается на 7—10 %. При прорастании в течение 7—8 дней зерно полностью теряет семенные качества, потери сухой массы достигают 25—28 %. Снижается количество и качество клейковины, заметно ухудшается качество хлеба.

Зерно прорастает в первую очередь в средней и нижней части валка. Колосья, расположенные на поверхности валка, при прекращении осадков быстро просыхают. Если дожди продолжаются более 4 дней, то зерно прорастает и на поверхности валков.

Таблица 17.5

Количество проросшего зерна (%) в зависимости от осадков за период лежки валков (при температуре 11... 13 °С и относительной влажности воздуха 71—75 %) (по Б. И. Борисоглебскому, 1963)

Вид валков	Количество осадков, мм				
	20	40	60	80	100
Стандартные	13	37	52	63	70
Тонкослойные	0	3	10	16	20

По данным Б. И. Борисоглебского (1963), при дефиците влажности воздуха <4 гПа и сумме эффективных (выше 5 °С) температур до 14 °С зерно наклевывается, при сумме температур 25—30 °С начинается сильное прорастание зерна в валках, при сумме эффективных температур 45—50 °С ростки достигают 5—7 см. Однако наиболее существенным условием является суммарное количество осадков за период лежки валков (табл. 17.5). В обычных стандартных валках зерно может начать прорастать при сумме осадков около 20 мм, в тонкослойных — около 30—40 мм.

Глава 18
ПОНИЖЕННЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

18.1. Холодостойкость растений

Разные растения неодинаковы по устойчивости к понижению температуры. Одни при охлаждении до температуры, близкой к 0 °С (не вызывающей образование льда), либо гибнут, либо у них наблюдаются видимые повреждения, задерживается рост, снижается продуктивность. Обычно у этой группы растений указанные явления наступают при температуре от 0 до 7 °С.

У других растений при тех же условиях признаки повреждения не проявляются, продуктивность их не снижается. Иными словами, под *холодостойкостью* подразумевается способность растений, находящихся в вегетирующем состоянии, переносить охлаждение до температуры, близкой к 0 °С. Повреждение проявляется вначале на более старых, нижних листьях и на более старых частях листовых пластинок, после чего распространяется на все растение. Формы проявления повреждений у разных культур могут различаться в зависимости от видовых особенностей и состояния растений. На одном и том же растении наиболее устойчивыми чаще всего оказывались молодые, но вполне сформированные листья и точки роста.

В сводной табл. 18.1 приведены данные о характере повреждения растений (различных по холодоустойчивости и происхождению) при положительных пониженных температурах.

По данным С. М. Иванова (1935) яровые культуры по их устойчивости к пониженной температуре, близкой к 0 °С, можно разделить на две группы: холодостойкие и неустойчивые. К *холодостойким* относятся яровая пшеница, овес, чечевица, нут, горох, рыжик, горчица, подсолнечник, сафлор, лен, конопля, свекла, капуста и др. Эти растения способны переносить длительное воздействие низких положительных температур без видимых повреждений. К *неустойчивым* (теплолюбивым) можно отнести огурцы, хлопчатник, фасоль, кукурузу, баклажаны, сорго, просо, кунжут, томаты, гречиху. Они в этом списке расположены в порядке возрастающей устойчивости к холоду. В опытах С. М. Ива-

Таблица 18.1

Зависимость холодостойкости однолетних культурных растений от их происхождения (по П. А. Генкель, С. В. Кушниренко, 1966)

Культура	Характер повреждения и температура	Происхождение растения
	Теплолюбивые	
Огурец	Всходы, цветки, плети гибнут при 1—2 °С. При 7 °С свыше семи дней растения гибнут полностью	Влажные тропики Восточной Индии
Арбуз	При 10 °С оплодотворения не происходит, цветки опадают. При длительном охлаждении при 10—15 °С наступает торможение роста, затем гибель	Южная Африка
Дыня	То же	Мексика
Баклажан	При 3—7 °С через несколько дней растения гибнут	Тропики Восточной Индии
Перец	То же	Тропики Африки
Томат	При 1 °С повреждаются цветки	Тропики Америки
Рис	В фазу кущения похолодание ниже 15 °С вызывает остановку в развитии, при 0 °С — гибель	Тропики Юго-Восточной Азии
Хлопчатник	При 3—10 °С растение гибнет, при 0,5 °С повреждаются цветки	Перу, Южная Америка
Гречиха	При 4 °С в течение 18 сут (в фазу вегетации) наступает гибель	Высокогорный Памир
Фасоль	При 3—4 °С в течение нескольких дней сначала задерживается рост, а затем растение гибнет	
	Холодостойкие	
Картофель	При 7 °С из глазков материнских клубней вместо побегов образуются маленькие клубни	Южная Америка
Пшеница	При 5 °С и ниже выколашивания не происходит, при 8—10 °С прекращается цветение	Грузия или Армения
Ячмень	При 5 °С и ниже выхода в трубку не происходит	Высокогория
Табак	При 0,5 °С повреждаются цветки	—

нова огурцы погибали через 3 дня после начала охлаждения (погибало больше половины всех растений), а растения гречихи погибли только через 15 сут.

18.2. Влияние пониженных температур на водный режим и минеральное питание растений

Водный режим. Для теплолюбивых видов было установлено замедление или прекращение поступления воды в клетки различных органов, при пониженных температурах, например, в прорастающие семена, в корни проростков и взрослых растений, в чешуи лука.

Отмечается несколько факторов, влияющих на уменьшение скорости поглощения воды корнями при понижении температуры. К физическим факторам относятся: 1) снижение скорости движения воды из почвы к корням при пониженных температурах, так как уменьшается «водоотдающая сила почвы» (при 0 °С в три раза по сравнению с 25 °С); 2) увеличение вязкости воды (при 0 °С она вдвое меньше, чем при 25 °С; это обстоятельство замедляет передвижение воды из почвы к корням, а также в самих корнях. К физиологическим причинам относятся: 1) увеличение вязкости протоплазмы при понижении температуры, что приводит к замедлению движения воды через массу клеток, лежащих между эпидермисом и ксилемой корней; 2) уменьшение проницаемости протоплазмы клеток; повышение сопротивления движению воды через корни при низких температурах (следует напомнить, что при повреждении протоплазмы и отмирании оно резко падает); 3) замедление роста корней в длину, так как в почвах, где содержание влаги ниже полной влагоемкости, корни должны постоянно расти, чтобы обеспечить непрерывное снабжение водой.

Охлаждение теплолюбивых растений при 10 °С значительно снижает скорость поглощения воды. По данным о поглощении воды на 1-е и 2-е сутки при 10 °С определены температурные коэффициенты скорости поглощения воды различными растениями:

Хлопчатник	10,2	Томат	3,3
Арбуз	3,8	Баклажан	2,3
Огурец	3,7	Кабачок	2,0
Дыня	3,4	Кукуруза	1,3

По мере увеличения продолжительности пребывания растений при 10 °С скорость поглощения воды уменьшается.

При переносе растений из холода в тепло наблюдается соответствие между темпом восстановления скорости поглощения воды и продолжительностью охлаждения. Изучение поглощения воды корнями из почвы, предварительно стерилизованной высокой температурой, показало, что наличие в почве патогенных микроорганизмов при охлаждении приводит к поражению растений, а это еще более замедляет поглощение воды. Особенно сильное отрицательное действие патогенных микроорганизмов проявляется при переносе охлаждавшихся растений в тепло. Предполагается, что инфекция в таком случае может выступать как основная причина их гибели.

Температуры, близкие к 0 °С (2... 5 °С), вызывают не только быстрое обезвоживание растений, но оказывают и прямое повреждающее действие на корневую систему. После воздействия этих температур корни огурцов легко поражаются почвенной микрофлорой, действие которой особенно сильно проявляется после переноса растений в тепло. Повреждающее действие температур, близких к 0 °С, удается уменьшить путем предварительной закалки — выдерживания проростков при 10 °С.

Понижение температуры влияет на состояние воды в клетке, которое характеризуется, в частности, соотношением свободной

и связанной воды, а также изменением вязкости протоплазмы. У теплолюбивых культур в период цветения с понижением температуры почвы от 15... 20 до 6... 10 °С снижается содержание свободной воды с 26,8 до 20,1 % и повышается содержание связанной воды с 52,2 до 57,9 %. Скорость поступления воды в протопласты у холодостойких культур при пониженных температурах резко снижается. Максимальная скорость наблюдается при 25 °С. При пониженной температуре (5 °С) скорость поступления воды в протопласты более чем в 10 раз ниже, чем при температуре 15 °С.

Пониженные температуры оказывают неблагоприятное воздействие на водный режим большинства теплолюбивых растений. Оно выражается в замедленном поглощении воды корнями и появлении водного дефицита в надземных органах. У холодостойких растений эти факторы или отсутствуют, или они выражены слабее и носят временный характер, т. е. через некоторое время после начала охлаждения растения могут оправиться от завядания, очевидно их водный режим складывается более благополучно.

Минеральное питание. Корни и надземные органы растений неодинаково реагируют на одну и ту же температуру. Как правило, растения более чувствительны к температуре корнеобитаемого пространства, чем к температуре воздуха. На холодной почве с температурой 8... 10 °С и ниже рост растений тормозится, задерживается усвоение азота и фосфора и затрудняется их передвижение из корней в надземные органы, снижается продуктивность растений.

При пониженных температурах затрудняется поглощение всех питательных элементов и их усвоение. В зависимости от уровня температуры изменяется последовательность элементов минерального питания по степени их поглощения. Так, при температурах 3... 6 °С они располагаются в следующем порядке — $N(NO_3) > P > K > Ca > S$; для температуры 10... 12 °С — $P > K > N(NO_3) > Ca > S$. Поглощение питательных элементов корнями и передвижение их в надземные органы растений зависит главным образом от температуры корней, а не надземных органов. При пониженной температуре резко нарушается распределение питательных веществ между органами — относительное увеличение количества питательных элементов в корнях и уменьшение их в надземных органах.

При температурах, близких к 0 °С, когда жизнедеятельность культурных растений очень угнетена, повышение концентрации питательных элементов в почве не всегда может улучшить их питание.

18.3. Воздействие пониженных температур на фотосинтез и дыхание растений

Фотосинтез. При обычных для вида сочетаниях факторов внешней среды растениям, обитающим в умеренном или холодном климате, свойственно фотосинтезировать при пониженных температу-

рах. Температурный оптимум фотосинтеза растений теплого климата лежит при 15... 30 °С (иногда выше), для флоры умеренных широт — при 15... 20 °С, в холодных широтах некоторые растения могут синтезировать при температурном минимуме, близком к 0 °С. В табл. 18.2 показана зависимость поглощения CO_2 от температуры для трех культурных растений и одного дикорастущего.

Таблица 18.2

Интенсивность поглощения CO_2 листьями (мг/ч на 150 см²) при различных температурах (Lundegard, 1957)

Растение	Температура, °С		
	0	10	20
Картофель	0,9	4,2	9,5
Томат	3,3	6,0	8,4
Сахарная свекла	3,0	6,0	8,5
Ветреница дубравная (*Anemone nemorosa*)	2,8	5,5	5,2

У разных экологических групп растений ход кривой фотосинтеза при одинаковых температурах и одинаковой напряженности света может быть различным. Установлено, что в большинстве случаев наблюдается соответствие между температурным оптимумом фотосинтеза и условиями обитания растений, однако встречаются и исключения.

При длительном выдерживании растения в условиях определенной пониженной (или повышенной) температуры может произойти увеличение стойкости фотосинтеза по отношению к той же зоне температурной шкалы и перемещение точки температурного оптимума фотосинтеза. Способность к такой «настройке» у разных растений выражена в различной степени.

Однако не следует считать, что любое перемещение растений в новые температурные условия вызывает «перестройку» фотосинтеза. В зависимости от исходного местообитания растений, их видовых особенностей и возраста длительное изменение температуры среды может привести не к перестройке, а к угнетению фотосинтеза. Уровень температур, приводящих к полному прекращению фотосинтеза, у тех или иных растений не одинаков. У теплолюбивых растений охлаждение вызывает снижение интенсивности фотосинтеза или полное его подавление.

Зависимость степени угнетения фотосинтеза от холодостойкости была установлена при сравнении реакций на охлаждение огурцов и конских бобов. У листьев огурцов, охлаждавшихся пять-шесть суток, при переносе в тепло фотосинтеза не было, тогда как у бобов, охлаждавшихся около трех недель, он сохранялся (Жол-

кевич, 1955). При охлаждении огурцов менее пяти-шести суток фотосинтез после переноса растений в тепло восстанавливался. Причину нарушения фотосинтетического процесса автор связывает с патологическими изменениями хлоропластов под влиянием охлаждения, а также с уменьшением оводненности протоплазмы при охлаждении, т. е. с повреждающим действием холода на протоплазматические структуры, в частности на хлоропласты.

Обратимость подавления фотосинтеза под влиянием пониженных температур выражается в том, что понижение интенсивности фотосинтеза, обнаруженное сразу после прекращения действия неблагоприятной температуры, постепенно уменьшается и интенсивность фотосинтеза восстанавливается до контрольной. Незговоров (1956) наблюдал это явление на листьях огурцов, где подавление фотосинтеза после охлаждения до 7 °С достигало 50 %, а затем интенсивность процесса восстанавливалась.

Обратимость угнетения фотосинтеза холодом зависит не только от холодостойкости вида, но и от возраста листьев, их физиологического состояния, в частности закалки к холоду. Яркий свет усугубляет угнетение фотосинтеза, происходящее при пониженных температурах.

Дыхание. Пониженные температуры вызывают резкое снижение интенсивности дыхания. Эта реакция у неодинаковых по холодостойкости видов растений значительно различается. У теплолюбивых культур средняя интенсивность дыхания при 4 °С в 2—2,5 раза ниже, чем у холодостойких видов. При температуре 20 °С интенсивность дыхания и теплолюбивых и холодостойких видов практически одинакова.

Изучение влияния умеренного понижения температуры в зоне корней у кукурузы (10... 12 °С) на интенсивность их дыхания (С. С. Андреенко, 1959) показало, что перемещение корней из тепла (18... 20 °С) в холод (8... 10 °С) резко снижает интенсивность дыхания, перенос из холода (10... 12 °С) в тепло (20 °С) сравнительно незначительно увеличивает дыхание.

Установлено (А. И. Коровин, 1962), что при понижении температуры в зоне корней снижение интенсивности дыхания у теплолюбивых культур (кукуруза) выражено сильнее, чем у более холодостойких (пшеница, картофель).

В. Н. Жолкевич (1952) исследовал причины гибели теплолюбивых растений при температурах, немного выше 0 °С и установил явное несоответствие сравнительно интенсивного дыхания поврежденных холодом тканей уровню тех физиологических процессов, которые в норме тесно сопряжены с дыханием, поскольку последнее служит для них источником энергии. Сравнивались физиологические особенности теплолюбивых растений — огурцов, томатов, сои, тыквы с особенностями холодостойких растений — конских бобов и подсолнечника. При охлаждении теплолюбивых растений подавляется рост листьев и междоузлий, соответственно уменьшается накопление сухого вещества, так как действие ферментов направляется преимущественно в сторону распада. Фотосинтети-

ческий процесс в результате продолжительного охлаждения растений огурцов (в течение пяти-шести суток) после переноса их в тепло обнаружен не был. При тех же условиях у конских бобов, охлаждаемых в течение трех недель, фотосинтез после перенесения в тепло протекал нормально. Дыхание листьев огурцов при общем охлаждении растений в начальный период ослабевало, а в дальнейшем, по мере развития повреждения — усиливалось. Перенос растений в тепло вызывал быстрый подъем дыхания, перед полной гибелью растений интенсивность его опять падала. Таким образом, возникало несоответствие между созидательными (синтетическими) процессами (они подавлялись) и процессами распада (они усиливались). Подавление роста и биосинтеза, нарушение структуры протоплазмы, необратимое смещение всей направленности обмена веществ в сторону распада на фоне интенсивного дыхания приводит к выводу о возможности разрыва между дыханием и сопряженными с ними процессами, к возможности уменьшения эффективности дыхания.

В. Н. Жолкевичем (1952) выдвинута гипотеза о разрыве между получением энергии в процессе дыхания и ее эффективным потреблением как об одной из возможных причин повреждения и гибели растений от холода. Охлаждение нарушает пути трансформации энергии дыхания через промежуточные системы к месту ее потребления. Поэтому дыхание в известной мере утрачивает свое физиологическое значение, приобретает характер патологического процесса, становится неэффективным.

18.4. Влияние пониженных положительных температур на развитие и продуктивность растений

По А. И. Коровину (1972), *низкими температурами*, оказывающими отрицательное последействие на рост, развитие и урожай растений в начальные периоды развития, являются температуры на 3—4 °С выше биологического нуля, или температуры первоначального роста той или иной культуры. Принимая за минимальную температуру первоначального роста хлебных злаков 2—3 °С, к неблагоприятным температурам следует отнести температуры ниже 5—7 °С.

Растения, развивающиеся в течение всего периода вегетации в одинаковых условиях, но при различной температуре почвы, имеют в зависимости от степени понижения температуры разную интенсивность роста, удлиненный вегетационный период и сниженную продуктивность.

А. И. Коровиным (1972) получены данные по влиянию температур почвы в течение всего вегетационного периода на его длину и продолжительность фаз развития. Продолжительность периодов посев — всходы, всходы — 3-й лист и двух последних межфазных периодов колошение — молочная спелость, молочная — восковая спелость зерновых при температуре 6... 7 и 8... 10 °С удлиняется почти в 2 раза. Периоды от 3-го листа до трубкования и от труб-

кования до колошения изменяются незначительно. Наибольшее удлинение фаз сочетается с формированием листьев и корней и с периодами налива и созревания зерна. Меньше всего меняется длина фаз в периоды формирования колоса и выхода его из влагалища (табл. 18.3, рис. 18.1 *а*). На рис. 18.1 *а* видно, что во все фазы развития, исключая фазу трубкование — колошение, суточные приросты пшеницы при 6... 7 °С меньше, чем при 15... 20 °С.

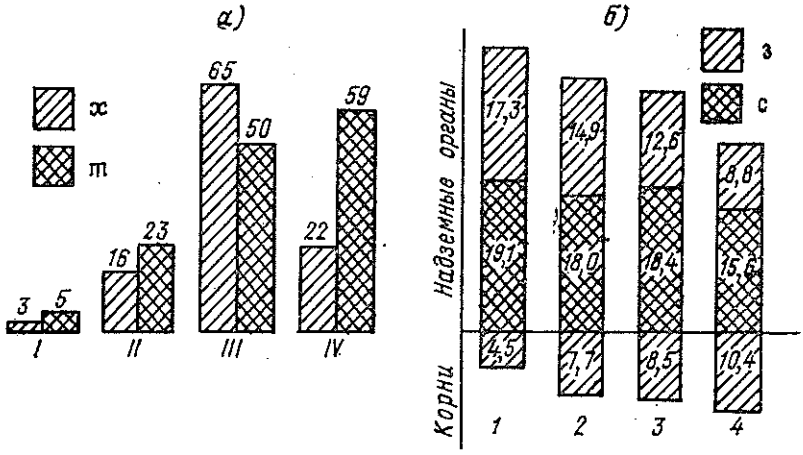


Рис. 18.1.

а) Суточные приросты сухого вещества (в миллиграммах на одно растение) у пшеницы за межфазные периоды (по А. И. Коровину, 1972). х — «холод», 5... 7 °С; т — «тепло», 15... 20 °С; I — всходы — 3-й лист, II — 3-й лист — трубкование, III — трубкование — колошение, IV — колошение — молочная спелость.

б) Влияние температуры почвы на распределение общего урожая у ячменя между зерном (з), соломой (с) и корнями (расчет на сосуд). Температура почвы: *1*) 15... 20 °С, *2*) 12... 14 °С, *3*) 8... 10 °С, *4*) 6... 7 °С.

Таблица 18.3

Влияние температуры почвы на продолжительность межфазных периодов и длину вегетационного периода пшеницы сорта Скала (по А. И. Коровину, 1972)

Температура почвы, °С	Продолжительность периодов, дни								
	сев — всходы	всходы — 3-й лист	3-й лист — трубкование	трубкование — колошение	колошение — молочная спелость	молочная — восковая спелость	сев — колошение	колошение — созревание	сев — созревание
6...7	11	23	14	20	32	24	68	56	124
8...10	9	20	14	20	22	21	63	43	106
12...14	6	15	10	19	17	14	50	31	81
15...20	5	13	10	20	17	13	48	30	78

В фазу же трубкование — колошение приросты на «холоде» превышали приросты на «тепле». Прирост сухого вещества надземной массы при низких температурах идет до конца вегетации, в то время как на тепле к концу вегетации наблюдается убыль сухого вещества. У всех зерновых влияние температуры почвы на продолжительность отдельных фаз аналогично влиянию ее на пшеницу.

У бобовых культур сохраняется примерно та же закономерность, что и у злаков. Низкие температуры почвы оказывают наибольшее влияние в начале вегетации, которое по мере развития растения ослабевает, хотя и сохраняется до последних фаз развития.

Воздействие пониженной температуры почвы (6... 7 °С) в отдельные периоды онтогенеза по-разному сказывается как на продолжительности фаз развития, так и на продуктивности растений.

Иными словами, влияние пониженной температуры почвы на процессы развития наблюдается только в период прохождения растением стадий яровизации и световой, т. е. до тех пор, пока точка роста стебля не выйдет из-под воздействия низкой температуры почвы. На этих этапах влияние температуры почвы сказывается подобно влиянию короткого дня, как это было отмечено В. И. Разумовым и М. И. Смирновой (1940).

При воздействии пониженной температуры почвы благодаря более продолжительному вегетационному периоду общий урожай может быть иногда даже выше, чем за короткий период без охлаждения почвы. Но при пониженных температурах всегда снижается доля зерна в урожае и возрастает доля корней. Это в полной мере относится как к случаю воздействия пониженной температуры в течение всей вегетации, так и в отдельные ее периоды. Если ее влияние на наступление фаз сказывается наиболее сильно в первые периоды онтогенеза, то на продуктивность — в конце его.

Влияние пониженной температуры почвы на урожай зерна отрицательно во все периоды онтогенеза и наиболее сильно в последние. Исключением является период от 3-го листа до трубкования (световая стадия). Высокие температуры почвы (свыше 20 °С) во время световой стадии действуют также отрицательно.

Наиболее отрицательно сказывается на урожае низкая температура почвы в период после трубкования. Особенно сильно снижается урожай, если низкая температура почвы в это время сочетается с пониженной влажностью почвы. Так, в опыте с пшеницей при сочетании температуры 6... 7 °С с влажностью почвы 30 % ПВ в период трубкование — колошение урожай зерна снизился против контроля в 3,5 раза без снижения урожая соломы.

При пониженных температурах почвы (ниже 10 °С) в течение вегетационного периода интенсивность процессов роста снижается, изменяется соотношение между зерном, соломой и корнями в сторону снижения урожая зерна и увеличения массы корней (рис. 18.1 *б*).

Глава 19

ЗАМОРОЗКИ

19.1. Ночное выхолаживание приземного слоя воздуха Типы заморозков

Ночное выхолаживание приземного слоя воздуха. Основной причиной ночного понижения температуры в приземном слое воздуха является потеря тепла подстилающей поверхностью вследствие длинноволновой радиации. Радиационный баланс в ночное время определяет эффективное излучение земли. Радиационное охлаждение собственно приземного слоя воздуха намного меньше охлаждения подстилающей поверхности. Поэтому вследствие эффективного излучения охлаждается в основном поверхность земли и это приводит к охлаждению ближайших к ней слоев воздуха и почвы. Таким образом, в ночные часы подстилающая поверхность оказывается охлажденной, а температура вверх и вниз от нее постепенно повышается.

Чем больше эффективное излучение земли, тем больше ночное выхолаживание воздуха и почвы. Увеличивается и разность между температурой нижнего и верхнего слоев воздуха, а также поверхностных и более глубоких слоев почвы, т. е. увеличивается градиент температуры. Ночное охлаждение, а также температурные градиенты возрастают с увеличением периода охлаждения после захода Солнца.

Вследствие того что подстилающая поверхность в ночное время охлаждена, а температура воздуха постепенно повышается с высотой, должен иметь место поток тепла от более нагретых слоев воздуха вниз к поверхности земли. Такой поток тепла несколько ослабляет выхолаживание подстилающей поверхности, но вместе с тем обусловливает понижение температуры воздуха.

С увеличением скорости ветра и шероховатости подстилающей поверхности коэффициент турбулентного обмена увеличивается. С его ростом увеличивается тепловой поток из воздуха к поверхности почвы. Уменьшение ночного падения температуры подстилающей поверхности в свою очередь вызывает ослабление выхолаживания приземного слоя в ночные часы.

Растительный покров сглаживает резкие вариации температурного режима поверхности почвы. В настоящее время разработаны теоретические схемы расчета ночного понижения температуры в растительном покрове при безоблачном небе. Первая модель формирования радиационных заморозков в растительном покрове предложена В. А. Горбачевым (1983). Он рассматривает систему почва—растение—атмосфера в виде совокупности трех сопряженных сред.

Зона I охватывает приземный слой атмосферы, непосредственно прилегающий к верхней границе растительного покрова. Его высота ($z=H_1$) выбирается на уровне, где не сказывается возмущаю-

щее влияние обменных процессов агроценоза, и составляет обычно $(3—4)h$ (h — высота посева). Зона II ($0 \leqslant z \leqslant h$) — это межлистное пространство сообщества растений. Растительный покров при этом предполагается достаточно протяженной средой, для которой выполнено условие горизонтальной однородности в статистическом смысле. Последнее обстоятельство позволяет пренебречь влиянием горизонтальных градиентов и рассматривать перенос основных субстанций только в вертикальном направлении. Зона III включает в себя корнеобитаемую область почвы ($R_1 \leqslant \leqslant z \leqslant 0$). Границы системы выбираются таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить расчетную схему всем необходимым

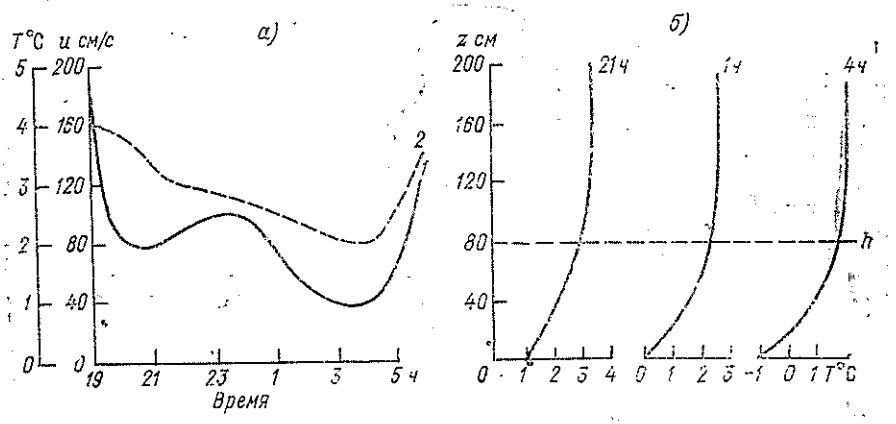


Рис. 19.1.

а) Метеорологические условия на уровне $z = H_1$, где не сказывается возмущающее влияние РП (по В. А. Горбачеву, В. И. Тищенко, 1983).
1 — скорость ветра u на уровне $z = H_1$, *2* — температура воздуха T на уровне H_1.
б) Рассчитанные вертикальные профили температуры воздуха T в ночное время; h — высота растений (по В. А. Горбачеву, В. И. Тищенко, 1983).

комплексом наблюдаемых метеорологических параметров (уровень $z=H_1$) и, с другой, — достичь уровня стабильности термических характеристик, на котором не сказывается влияние суточного хода надземных метеорологических элементов (уровень $z=R_1$).

Конструкция модели строится в предположении, что в условиях формирования заморозков процессы влагообмена в межлистном пространстве настолько угнетены, что не влияют на общий энерго- и массообмен системы почва — растение — атмосфера. При таком подходе предметом основного внимания является формирование температурного режима в выбранной последовательности сред.

Характерной особенностью зоны I является качественно разное содержание процессов переноса на ее границах. Если удаленность верхней границы $z = H_1$ позволяет рассматривать ее как часть квазистационарного приземного слоя, то нижний уровень $z = h$ подвержен существенному влиянию обменных процессов расти-

тельного покрова. Профиль температуры здесь находится из соотношения

$$P(z) = -\rho c_p k_т(z) \frac{dT}{dz}, \tag{19.1}$$

где $T(z)$ — температура воздуха; $P(z)$ — поток тепла; $k_т$ — коэффициент турбулентного обмена для потока тепла; ρ, c_p — плотность и удельная теплоемкость воздуха соответственно.

Предполагая, что условия квазистационарности выполняются вплоть до уровня $z=h$, поведение температуры в области $h \leqslant z \leqslant H_1$ описывается в виде

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{P(h)}{\rho c_p k_т(z)}. \tag{19.2}$$

Вид коэффициента $k_т(z)$ определяется общими особенностями переноса количества движения в слое атмосферы, прилегающем к верхней границе растительного покрова.

Построенная совокупность уравнений разрешима при условии, что поток тепла с верхней границы растительного покрова $P(h)$ известен. Для получения его числового значения необходимо описать процесс турбулентного теплопереноса в межлистном пространстве растительного покрова $(0 \leqslant z \leqslant h)$. Это достигается с помощью уравнения турбулентного теплообмена и уравнения теплопроводности для составляющих посев фитоэлементов:

$$\begin{cases} \rho c_p \dfrac{\partial T}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\rho c_p k_т \dfrac{\partial T}{\partial z}\right) + \rho c_p S D_т (T_L - T), \\ \dfrac{\partial T_L}{\partial t} = \dfrac{1}{c_L}\left\{\dfrac{\partial}{\partial z} R_L - \rho c_p S D_т (T_L - T)\right\}, \end{cases} \tag{19.3}$$

где $T_L(z)$ — температура фитомассы; S — удельная площадь листьев; $D_т$ — коэффициент теплообмена «лист—воздух»; R_L — радиационный баланс растительного покрова; c_L — удельная теплоемкость фитомассы. Картина термического режима растительного покрова вообще и вид функции $k_т(z)$, в частности, определяются численными значениями основных параметров, характеризующих перенос количества движения внутри посева. Таковыми в нашем случае являются: масштаб турбулентности $l(z)$; интенсивность турбулентности $b(z)$; коэффициент турбулентного обмена скорости ветра $k_u(z)$. Формирование их профилей в агроценозе описывается системой уравнений, приведенной в главе 8.

Неоднородность радиационного поля на поверхности почвы порождает соответствующую изменчивость ее температуры. В то же время температура на уровне $z=R_1$ считается неизменной. Поэтому необходимо учесть формирование температурного профиля в зоне III. Это осуществляется путем использования обычного уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \tag{19.4}$$

где μ — коэффициент температуропроводности почвы, значение которого в данном случае считается постоянным. Запишем граничные условия задачи. Выше говорилось о способах заданий условий на границах $z=H_1$ и $z=R_1$. Неопределенными остаются только поверхности раздела сред: верхняя граница растительного покрова и для процессов переноса тепла — поверхность почвы. При написании граничных условий на поверхности $z=h$ в данном случае исходим из традиционной физической посылки о непрерывности основных метеорологических субстанций и их градиентов. В таком случае приходим к условиям «сшивания» в виде

$$T(z)\big|_{z=h_+} = T(z)\big|_{z=h_-},$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=h_+} = \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=h_-}. \tag{19.5}$$

Граничные условия на поверхности почвы учитывают также условия сохранения энергетического баланса и выглядят следующим образом:

$$T(z)\big|_{z=0_+} = T(z)\big|_{z=0_-},$$

$$-\lambda_0 \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0_+} + \lambda_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0_-} = R(t), \tag{19.6}$$

где λ_0 и $\lambda_{\text{п}}$ — теплопроводность воздуха и почвы соответственно. Начальные значения функций, необходимые для решения дифференциальных уравнений, задаются в форме

$$T(z,\ t)\big|_{t=0} = T_0(z),\ \ z \in [R_1,\ H_1],$$

$$T_L(z,\ t)\big|_{t=0} = T_0(z) + 5,\ \ z \in [0,\ h]. \tag{19.7}$$

Исследования поведения модели проводились по следующим данным: высота растительного покрова 80 см; верхняя граница системы 200 см; глубина в почве 50 см; температура на поверхности почвы 2,0 °С; температура почвы на глубине 50 см 6,8 °С; относительная площадь листьев 5 см^2/см^2; удельная поверхность листьев распределена равномерно по высоте посева. Исходная информация о температуре воздуха и скорости ветра представлена на рис. 19.1 *а*.

На рис. 19.1 *б* приведены профили температуры в растительном покрове, характеризующие в динамике формирование радиационного заморозка. Так, если в 21 ч температура воздуха в межлистном пространстве изменялась от 1 до 2,7 °С, то в 1 ч в результате радиационного выхолаживания произошло ее снижение — она изменялась от 0 до 2,2 °С. В утренние часы (4 ч) произошло более значительное изменение профиля температуры воздуха в межлистном пространстве. Температура на поверхности почвы и темпера-

тура воздуха в нижних слоях РП была отрицательной. Наблюдался заморозок.

Типы заморозков. Под *заморозком* следует понимать падение минимальной температуры ниже 0 °С на поверхности почвы и травостоя во время вегетационного периода на фоне положительных среднесуточных температур воздуха. По процессам возникновения и условиям погоды различают три типа заморозков (И. А. Гольцберг, 1961).

1. *Заморозки адвективные* возникают в результате наступления волны холода. Они, как правило, наблюдаются в течение нескольких суток подряд в начальный период весны и поздней осенью при общем низком уровне температуры, полной облачности и ветре. При таких заморозках ниже 0 °С опускается не только минимальная, но часто и среднесуточная температура. Иногда при значительном притоке холодного воздуха дневные температуры также бывают близки к 0 °С. При последующем радиационном выхолаживании такие заморозки значительно усиливаются до —8... —10 °С ночью.

2. *Радиационные заморозки* возникают в тихие ясные ночи в результате суточного хода температуры при относительно низких среднесуточных температурах и интенсивном ночном излучении. Уровень среднесуточных температур, при которых наблюдаются заморозки этого типа, зависит от климатических условий. В приморских районах такие заморозки прекращаются при среднесуточных температурах порядка 5... 6 °С, в континентальной части (Северный Казахстан, Средняя Азия, Забайкалье) — только при 12... 13 °С, в узких, глубоких долинах в условиях континентального климата — при среднесуточной температуре 14... 15 °С.

Вследствие малых скоростей ветра и слабого вертикального перемешивания приземного слоя воздуха при радиационных заморозках создаются большие инверсии температуры в этом слое. Температура воздуха в метеорологической будке на высоте 200 см бывает на ЕТС в среднем на 2,5—3,0 °С и в континентальном климате — в восточной части ЕТС, в Сибири, в Казахстане — на 4—4,5 °С выше, чем на уровне травостоя. В отдельные ночи эта разность может достигать 9—10 °С.

3. *Адвективно-радиационные заморозки* образуются в результате вторжения холодного воздуха северного происхождения и последующего его выхолаживания за счет ночного излучения. В этом случае процессы адвекции и радиации дополняют друг друга.

Снижение температуры ниже 0 °С при этом типе заморозка обычно составляет 2—3 °С и часто отмечается лишь в припочвенных слоях воздуха при положительной температуре в метеорологической будке.

Различие свойств подстилающей поверхности (различие во влажности почвы, ее окраске, наличие или отсутствие растительного покрова и т. п.) приводит к большому разнообразию в интенсивности излучения отдельных участков и к пестроте в распреде-

лении заморозков на близких расстояниях даже в ровной местности и особенно в условиях изрезанного рельефа.

При адвективных заморозках, сопровождающихся ветром и большой облачностью, микроклиматические различия в значительной степени сглаживаются. При этом типе заморозков наиболее морозоопасными являются открытые холодным ветрам участки, особенно наветренные склоны возвышенностей.

Заморозки первых двух типов наблюдаются преимущественно в начале весны и поздней осенью, перед установлением морозов. Заморозки третьего типа наблюдаются при довольно высоком уровне средних суточных температур в конце весны, летом и ранней осенью, являясь наиболее опасными для сельскохозяйственных культур полярной и умеренной зон.

Наиболее длительными являются заморозки первого типа — адвективные. Прогревание холодной волны и трансформация принесенного воздуха в местный занимает 3—4 дня, причем в начале холодной волны температура может держаться ниже 0 °С в течение суток и более. К концу этого процесса температура ниже 0 °С наблюдается только ночью, постепенно повышаясь от ночи к ночи.

Заморозки второго типа, радиационного — «утренники» — наблюдаются в течение ночи или немного дольше, т. е. 5—6 ч подряд, иногда до 8—12 ч. При ясной погоде они могут быть ежедневно в течение довольно длительного времени.

Третий тип заморозков — адвективно-радиационный — наблюдается под утро или с половины ночи и длится 3—4 ч, в большинстве случаев в течение одной-двух ночей подряд.

19.2. Механизм повреждения растений при заморозке. Классификация растений по их устойчивости к заморозкам

Механизм повреждения растений при заморозке. Заморозки нарушают жизненные функции растений и ограничивают распространение вида в зависимости от их интенсивности, продолжительности и периодичности, но прежде всего от состояния активности и степени закалки растений. Стресс — это всегда необычная нагрузка, которая не обязательно должна быть опасной для жизни, но непременно вызывает в организме адаптивную реакцию.

Протоплазма растений вначале отвечает на стресс резким усилением метаболизма. Если температура переходит критическую точку, клеточные структуры и функции могут повреждаться так внезапно, что протоплазма тотчас же отмирает. В природе такое внезапное разрушение нередко происходит при эпизодических морозах, например, при поздних заморозках весной. Но повреждения могут возникать и постепенно; отдельные жизненные функции выводятся из равновесия и угнетаются, пока, наконец, клетка не отомрет в результате прекращения жизненно важных процессов.

Различные жизненные процессы неодинаково чувствительны к температуре (рис. 19.2). Сначала прекращается движение прото-

плазмы, интенсивность которого непосредственно зависит от энергоснабжения за счет процессов дыхания и от наличия высокоэнергетических фосфатов. Затем снижаются фотосинтез и дыхание. У поврежденных холодом растений после возвращения в умеренные условия уровень дыхания сильно колеблется и часто бывает ненормально повышен. Повреждение хлоропластов ведет к длительному или необратимому угнетению фотосинтеза. В конечной стадии утрачивается полупроницаемость биомембран, разрушаются клеточные компартменты, особенно тилокоиды пластид, и клеточный сок выходит в межклетники.

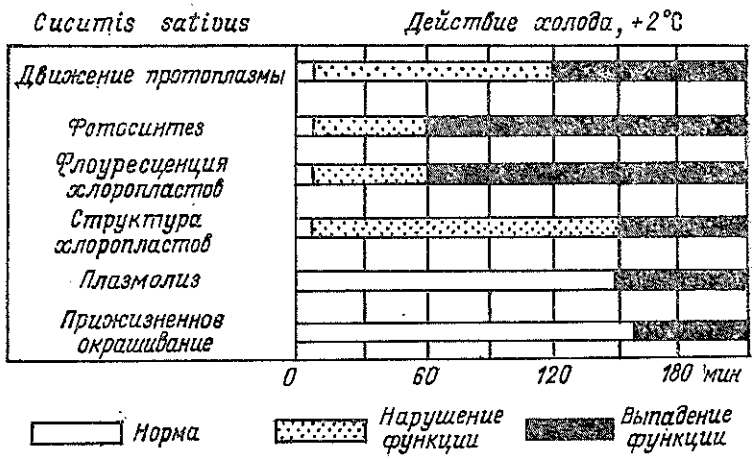


Рис. 19.2. Нарушение различных клеточных функций под действием холода (по Александрову, Кислюку, 1964).

«Выпадение функции» означает окончательное повреждение.

Во время воздействия экстремальных температур газообмен полностью прекращается. Если потом опять наступают благоприятные условия, то растения восстанавливают свои функции сразу только в редчайших случаях. После мороза тотчас же начинают ассимилировать некоторые (но далеко не все) лишайники. Высшие растения к этому не способны (рис. 19.3 *а*). У них после холодного шока происходит временное резкое повышение дыхания. Только через несколько часов дыхание вновь нормализуется. Фотосинтез возобновляется после оттаивания медленно, так что вначале повышенное дыхание преобладает и происходит выделение CO_2. Лишь по прошествии нескольких (иногда многих) часов CO_2 начинает поглощаться. Угнетение поглощения CO_2 бывает тем более сильным и продолжительным, чем сильнее был мороз и чем дольше он воздействовал. Многократное замерзание действует так же, как большие холода. Для дневного нетто-фотосинтеза после морозных ночей характерно то, что поглощение CO_2 возрастает тем медленнее и максимальное поглощение тем ниже, чем холоднее была ночь (рис. 19.3 *б*). Серия ночных морозов все более

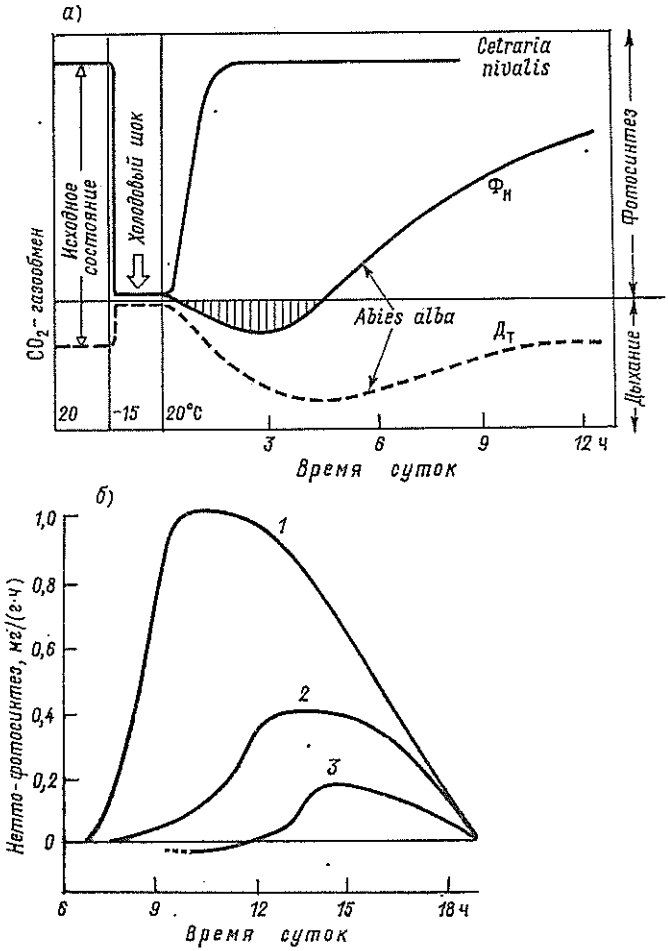


Рис. 19.3.

а) Нетто-фотосинтез и темновое дыхание после воздействия мороза (Lange, 1962; Kallio, Heinonen, 1971; Pisek, Kemmitzer, 1968; Bauer, Huter, Larcher, 1969; Huter, неопубликованные данные). Нетто-фотосинтез лишайника *Cetraria nivalis* полностью восстанавливается после холодового шока, если выдержать растение в течение одного часа при температуре 20 °С. У пихты *Abies alba* после оттаивания фотосинтез так сильно заторможен, что на свету несколько часов выделяется CO_2 (заштрихованная область). Даже после этого восстановление идет очень медленно и не всегда бывает полным. Темновое дыхание пихты (штриховая кривая) после холодового шока в течение нескольких часов бывает чрезмерно повышенным; для его нормализации может потребоваться от одного до нескольких дней.

б) Влияние ночных заморозков на ход и продуктивность нетто-фотосинтеза веток сосны *Pinus sylvestris* на следующий день (Polster, Fuchs, 1963).

1 — 3 апреля, без заморозков; *2* — 16 марта, ночные заморозки — 6,5 °С; *3* — 14 марта, ночные заморозки — 10,5 °С.

сокращает используемое для поглощения CO_2 дневное время и значительно снижает продуктивность растений.

Некоторые растения тропического происхождения повреждаются уже при снижении температуры до нескольких градусов выше нуля. Гибель от охлаждения прежде всего связана с дезорганизацией обмена нуклеиновых кислот и белков, но здесь играют роль также нарушения проницаемости и прекращение тока ассимилятов.

Растения, которым охлаждение до температур выше нуля не причиняет вреда, повреждаются только при температурах ниже нуля, т. е. в результате образования льда в тканях. Богатые водой, незакаленные протопласты могут легко замерзать; при этом внутри клетки мгновенно образуются ледяные кристаллики, и клетка погибает. Чаще всего лед образуется не в протопластах, а в межклетниках и клеточных стенках. Такое образование льда называют внеклеточным.

Выкристаллизовавшийся лед действует как сухой воздух, так как упругость пара надо льдом ниже, чем над переохлажденным раствором. В результате от протопластов отнимается вода, они сильно сжимаются (на $^2/_3$ своего объема) и концентрация растворенных веществ в них возрастает. Перемещение воды и замерзание продолжаются до тех пор, пока в протоплазме не установится равновесие сосущих сил между льдом и водой. Положение равновесия зависит от температуры; при температуре —5 °С равновесие наступает примерно при $60 \cdot 10^5$ Па, а при температуре —10 °С — при $120 \cdot 10^5$ Па. Таким образом, низкие температуры действуют на протоплазму так же, как высыхание. Морозоустойчивость клетки более высока, если вода прочно связана со структурами протоплазмы и осмотически связана. При обезвоживании цитоплазмы (безразлично, в результате засухи или замерзания) инактивируются ферментные системы, ассоциированные с мембранами, — системы, участвующие главным образом в синтезе АТФ и в процессах фосфорилирования. Инактивацию вызывают чрезмерные и потому токсичные концентрации ионов солей и органических кислот в незамерзшем остаточном растворе. Напротив, сахара, производные сахаров, определенные аминокислоты и белки защищают биомембраны и ферменты от вредных веществ.

Растворенные вещества понижают точку замерзания растворов. Клеточный сок замерзает в зависимости от его концентрации при температурах от —1 до —5 °С; клетки, соединенные в ткани, замерзают при несколько более низкой температуре, чем клеточный сок, так как помимо осмотически обусловленной депрессии точки замерзания здесь действуют и другие силы, связывающие воду (например, матричные). Кроме того, вода в клетках способна к переохлаждению, т. е. она может охлаждаться ниже точки замерзания без немедленного образования льда.

Классификация растений по их устойчивости к заморозкам. Устойчивость растений к заморозкам и степень их повреждения весьма различна и зависит от времени наступления, интенсивности

Таблица 19.1

Устойчивость сельскохозяйственных культур по отношению к заморозкам в разные фазы развития (по В. Н. Степанову, 1948)

Культура	Начало повреждения и частичная гибель, °С			Гибель большинства растений, °С		
	всходы	цветение	созревание (молочная спелость)	всходы	цветение	созревание (молочная спелость)
Наиболее устойчивые к заморозкам						
Яровая пшеница	—9, —10	—1, —2	—2, —4	—10, —12	—2	—4
Овес	—8, —9	—1, —2	—2, —4	—9, —11	—2	—4
Ячмень	—7, —8	—1, —2	—2, —4	—8, —10	—2	—4
Чечевица	—7, —8	—2, —3	—	—8, —10	—3	—
Горох	—8, —9	—3	—3, —4	—8, —10	—3, —4	—4
Устойчивые к заморозкам						
Люпин многолетний	—7, —8	—3	—3	—8, —10	—3, —4	—3, —4
Вика яровая	—8, —9	—2, —3	—2, —3	—8, —9	—3	—3, —4
Люпин узколистный	—5, —6	—2, —3	—3	—6, —7	—3, —4	—3, —4
Бобы	—6, —7	—2, —3	—	—6, —7	—3	—3, —4
Подсолнечник	—5, —6	—1, —2	—2, —3	—7, —8	—3	—3
Лен, конопля	—5, —7	—1, —2	—2, —4	—7	—2	—4
Сахарная свекла	—6, —7	—2, —3	—	—8	—3	—
Свекла кормовая	—6, —7	—2, —3	—	—8	—3	—
Морковь, брюква, турнепс	—6, —7	—	—	—8	—	—

Культура	Начало повреждения и частичная гибель, °С			Гибель большинства растений, °С		
	всходы	цветение	созревание (молочная спелость)	всходы	цветение	созревание (молочная спелость)
Среднеустойчивые к заморозкам						
Капуста	—5, —7	—2, —3	—6, —9	—	—	—
Люпин желтый	—4, —5	—2 —3	—	—6	—3	—
Соя	—3, —4	—2	—	—4	—2	—
Редис	—4, —5	—	—	—6	—	—
Могар	—3, —4	—1, —2	—	—4	—2	—
Малоустойчивые к заморозкам						
Кукуруза	—2, —3	—1, —2	—2, —3	—3	—2	—3
Просо, сорго, картофель	—2	—2	—1, —2	—2, —3	—2, —3	—3
Неустойчивые к заморозкам						
Огурцы, томаты	—0, —1	0, —1	0, —1	—2	—	—
Гречиха	—1, —2	—1	—1,5, —2	—2	—1	—1
Хлопчатник	—0,5, —1	—0,5, —1	—	—1	—1	—
Фасоль	—0,5, —1,5	—0,5, —1	—2	—1, —5	—1	—2
Рис	—0,5, —1	—0,5	—	—1	—0,5	—
Бахчевые	—0,5, —1	—0,5, —1	—0,5	—1	—1	—1

и продолжительности заморозка, а также от состояния самого растения — фазы его развития, культуры, сорта и условий агротехники.

Температура, ниже которой растения повреждаются или гибнут, называется *критической*. В. Н. Степановым (1948) выделено пять групп полевых культур по их устойчивости к заморозкам на уровне растений в различные фазы развития растений (табл. 19.1). Из данных табл. 19.1 видно, что у растений наименее устойчивы к заморозкам генеративные органы. В начальный период роста растения наиболее устойчивы к заморозкам, и слабые заморозки в этот период мало сказываются на урожае. Более сильные поздневесенние заморозки, даже если они не превышают критическую температуру, вызывают замедленное развитие растений, что снижает конечный урожай на 10—15 %. Заморозки в период цветения и созревания наиболее опасны, так как заморозкоустойчивость растений резко снижается. В этот период гибель большинства растений наступает при температурах —2... —4 °С.

У плодовых и ягодных культур различные части одного и того же растения имеют разную степень заморозкоустойчивости. В период цветения и образования завязей заморозки от 0 до —2 °С могут погубить весь урожай (табл. 19.2).

Таблица 19.2

Критическая температура повреждения различных частей растений некоторых плодово-ягодных культур (по Н. И. Сницциной, 1973)

Культура	Часть растения, повреждаемая заморозком	Критическая температура, °С
Лимон	Дерево полностью	—9...—10
	Крона	—7...—8
	Листва	—6
Апельсин	Дерево полностью	—10...—11
	Крона	—8...—9
	Листва	—7
Мандарин	Дерево полностью	—12
	Крона	—10
	Листва	—8
Виноград	Распустившиеся почки	—1
	Цветки	0
Яблоня, груша, вишня, слива	Закрытые бутоны	—4
	Цветки	—2
	Плодовые завязи	—1
Черешня	Бутоны и цветки	—2
	Плодовые завязи	—1
Абрикос, персик	Закрытые бутоны	—2
	Цветки	—3
	Плодовые завязи	—1
Малина, клубника	Цветки и завязи	—2

Кратковременные заморозки растения переносят с меньшими повреждениями, чем длительные.

19.3. Влияние повреждения растений заморозком на продуктивность посевов

Экспериментальные данные. Заморозки в начале вегетации, не вызывая видимых внешних повреждений, оказывают сильное последействие на рост, развитие и урожай растений. При этом после сильного заморозка интенсивность ростовых процессов снижается, а наступление фаз развития запаздывает (А. И. Коровин, 1972). Установлено, что заморозки разной интенсивности вызывают различную реакцию в ростовых процессах. Заморозки слабой интенсивности (—1... —1,5 °С) у теплолюбивых и (—4 °С) холодоустойчивых культур на ранних этапах развития не вызывают существенного последействия. Заморозки интенсивностью —2... —3 °С для теплолюбивых (кукуруза) и —6... —8 °С для холодоустойчивых (пшеница) культур вызывают у растений сильное отставание в росте, ведут к удлинению вегетационного периода и снижению в конечном итоге урожая до 70 %. Установлено, что особенно сильно повреждаются после заморозка репродуктивные органы растений.

Таблица 19.3

Влияние заморозков в разные периоды онтогенеза на длину вегетационного периода и урожай яровой пшеницы сорта Скала (на сосуд) (по А. И. Коровину, 1972)

Вариант опыта	Длина вегетационного периода, дни	Высота растений, см	Число зерен в колосе	Абсолютная масса зерна, г	Общий урожай		Зерно		Солома	
					г	%	г	%	г	%
Без заморозка (контроль)	75	70	30	25	30,9	100	8,6	100	22,3	100
Заморозок —6 °С в фазу двух листьев	83	75	20	19	27,4	89	4,4	51	23,0	103
—7 °С в фазу кущения	76	75	25	18	30,7	99	6,7	78	24,0	107
—6 °С в фазу молочной спелости	75	70	25	19	21,5	70	4,5	52	17,0	76
—9 °С в начале восковой спелости	70	70	30	21	25,3	82	7,7	90	17,6	79

Как видно из данных табл. 19.3, заморозок в самом начале вегетации удлиняет вегетационный период, а в конце вегетации сокращает его. После заморозка в самом начале вегетации ростовые процессы в первые дни приостанавливаются, а впоследствии постепенно возвращаются к норме, но при этом растения, как правило, не достигают высоты контрольных растений.

Снижение урожая зерна происходит за счет уменьшения озер-

ненности колоса и абсолютной массы зерна. Озерненность снижается в результате уменьшения количества цветков в колосе, так как заморозок вызывает в колосках гибель верхних недифференцированных цветков, а также недоразвитие некоторых из них. Неблагоприятные внешние воздействия снижают озерненность колоса пшеницы за счет изменения количества и качества тех элементов колоса, которые в это время находятся в процессе дифференцировки.

Замедление ростовых процессов сказывается на накоплении сухого вещества, в результате чего сухая масса растений после заморозка оказывается заниженной (см. табл. 19.3). По данным А. К. Винтер (1981), отставание в росте и развитии кукурузы, подвергшейся заморозку, интенсивностью —4 °С, наблюдалось вплоть до уборки урожая. Прирост вегетативной массы у растений, подвергшихся заморозку, происходил медленнее, чем у контрольных. Заморозок задержал развитие растений. Появление султана у растений, получивших повреждающий заморозок, задерживалось на 7—8 сут. Заморозок снизил озерненность початков опытных растений на 30 % по сравнению с контрольными. Подобное явление отмечается как «феномен стерильности» — черезерницы в результате действия заморозков на генеративные органы.

Предшествующие заморозку среднесуточные температуры оказывают определенное влияние на заморозкоустойчивость растений. Низкие предшествующие среднесуточные температуры несколько ослабляют вредное действие заморозка. Данные опытов А. И. Коровина (1972) показывают, что низкие положительные температуры почвы повышают устойчивость растений к заморозкам. С. Р. Поповым (1969) была проведена серия опытов по выявлению влияния низких положительных ночных температур воздуха перед заморозком. Оказалось, что как у теплолюбивых (кукуруза), так и у холодостойких (пшеница, бобы) низкие ночные температуры порядка 2... 3 °С в течение 3—4 сут перед заморозком повышают заморозкоустойчивость растений. Такое воздействие у холодостойких, например, у кормовых бобов, полностью нейтрализует отрицательное действие заморозка на конечный урожай.

В ходе опытов А. И. Коровина (1972) было установлено, что слабые и сильные заморозки по-разному влияют на минеральное питание. В начале вегетации заморозки —1... —1,5 °С для теплолюбивых культур и —3... —4 °С для холодостойких не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на минеральное питание. Более того, такие заморозки могут даже несколько стимулировать поглощение отдельных элементов в период заморозка. Более сильные заморозки (ниже —1,5 °С для теплолюбивых культур и —4 °С для холодостойких) вызывают уже заметные отклонения, которые проявляются в изменении скорости поступления элементов. Отклонения в минеральном питании фиксируются в первые 5—6 дней, они тем больше, чем сильнее заморозок. На 10-й—12-й день последействие заморозка затухает.

Влияние заморозка на поглощение фосфора начинается уже в момент самого заморозка. Как правило, при снижении температуры, особенно после перехода ее через 0 °С, поглощение фосфора корнями увеличивается, и это возрастание идет с углублением заморозка. В дальнейшем интенсивность поступления фосфора снижается. Поступление зависит от интенсивности заморозка: при сильном заморозке снижение начинается в середине заморозка, при менее сильном — после него, иногда через несколько суток. При заморозках —4,3 °С для кукурузы и —7,2 °С для пшеницы у большинства растений повреждались два нижних листа. При заморозке —5,6 °С у пшеницы полностью повреждался лишь первый нижний лист, верхние же листья внешне не изменялись.

Поглощение азота, так же как и других элементов питания, корнями растений в момент заморозка в значительной мере определяется температурой в зоне корней: если она не ниже 7... 8 °С, то заморозок даже несколько стимулирует поступление азота, если ниже — подавляет. Подавленность метаболизма элементов минерального питания в растениях после заморозка соответствует снижению интенсивности дыхания, фотосинтеза. В целом под влиянием заморозка в течение 10—12 дней заторможен общий тонус синтетических процессов, что в итоге приводит к удлинению вегетационного периода и снижению конечной продуктивности растений.

Моделирование влияния заморозков на продуктивность растений впервые предложено А. Н. Полевым (1983). Моделирование фотосинтеза при заморозке основывается на следующих предпосылках. Известно, что воздействие заморозка приводит прежде всего к нарушению структуры хлоропластов, в результате чего уменьшается содержание хлорофилла в листе. В физиологической литературе приведено достаточно полное теоретическое обоснование зависимости интенсивности фотосинтеза от содержания хлорофилла. Имеются материалы об изменении коэффициента поглощения ФАР и формы световой кривой фотосинтеза в зависимости от уровня хлорофилла в листьях.

Скорость фотосинтеза сразу после заморозка при оптимальных условиях среды и естественной освещенности можно описать следующим уравнением:

$$\Phi^{j}_{i0f} = \frac{\Phi_{i\ \max f} a_{if} Q^{j}_{\Phi}}{\Phi_{i\ \max f} + a_{if} Q^{j}_{\Phi}}, \qquad (19.8)$$

где Φ^{j}_{i0f} — скорость фотосинтеза i-го органа сразу после заморозка, мг CO_2/(дм^2 · ч); $\Phi_{i\ \max f}$ — скорость фотосинтеза при световом насыщении, мг CO_2/(дм^2 · ч); a_{if} — начальный наклон световой кривой фотосинтеза, мг CO_2/(дм^2 · ч)/(Вт · см^2); Q_{Φ} — интенсивность ФАР Вт/см^2; f — индекс повреждения растения заморозком; j — шаг по времени.

Площадь ассимилирующей поверхности сразу после повреждающего заморозка оценивается исходя из того, что в результате

последнего в растении (особенно в поздние фазы развития) уменьшается содержание белков, то есть количество «функционирующей» биомассы. Площадь ассимилирующей поверхности к началу следующего после заморозка дня определяется из соотношения

$$L_{if}^{I} = \frac{m_i^i K_{mf}}{\sigma_i}, \tag{19.9}$$

где m^i_i — биомасса i-го органа при отсутствии заморозка, г/м²; K_{mf} — коэффициент, характеризующий снижение биомассы за счет уменьшения содержания белков — «функционирующей» биомассы; σ_i — удельная поверхностная плотность i-го органа, г/м².

Как известно, под влиянием заморозка снижается также интенсивность дыхания растений. Происходит изменение затрат на дыхание роста и дыхание поддержания структур. При моделировании влияния заморозков принимается во внимание не только его непосредственное воздействие и последействие, но и репарационные возможности растений. Известно, что в период восстановления после повреждения заморозком вновь создаваемые в процессе ассимиляции вещества затрачиваются на репарацию и тем самым отвлекаются от формирования продуктивных частей растения. Это изменяет характер распределения ассимилятов в растениях, незакончивших рост.

Функции периода вегетативного в репродуктивного роста при повреждении растений заморозками определяются из соотношения

$$\beta_{i\,(p)\,f} = K_{\beta f}\beta_{i\,(p)}, \tag{19.10}$$

$$v_{if} = K_{vf}v_i, \tag{19.11}$$

где $K_{\beta f}$ и K_{vf} — соответственно, параметры, характеризующие изменение ростовой функции периода вегетативного и репродуктивного роста в зависимости от интенсивности заморозка, безразмерные.

Итак, вышеописанным способом моделируется фотосинтез, дыхание и распределение ассимилятов в растении сразу после заморозка. При моделировании динамики этих процессов в период последействия заморозков учитываются репарационные возможности растения, которые определяются биологическими особенностями данной культуры, фазой онтогенеза и состоянием во время непосредственного действия заморозка.

Глава 20

СИЛЬНЫЕ ЛИВНИ И ВЕТРЫ. ГРАД

20.1. Водная эрозия почв

Водная эрозия — выпадение капель дождя на почву, вызывающее разрушение частиц почвы. Уровнем интенсивности водной эрозии определяется степень влияния ее на хозяйственную деятель-

ность человека. Это влияние проявляется в нескольких направлениях: во-первых, падающие капли уплотняют поверхность почвы, что ухудшает условия произрастания растений; во-вторых, выпадающие капли разрушают пахотный слой почвы, что в дальнейшем приводит к смыву. Потоки воды, образующиеся от выпадающих капель, вызывают образование промоин и оврагов, вследствие чего уменьшаются площади, используемые для сельскохозяйственного производства. Разлетающиеся вместе с брызгами частицы почвы, попадая на поверхность травяного и лугового покрова, вызывают развитие на нем гнилостных бактерий; частицы почвы, осевшие на кисти винограда и листья табака, снижают их качество, а попавшие вместе с растениями в корм скоту, вызывают порчу зубов у животных.

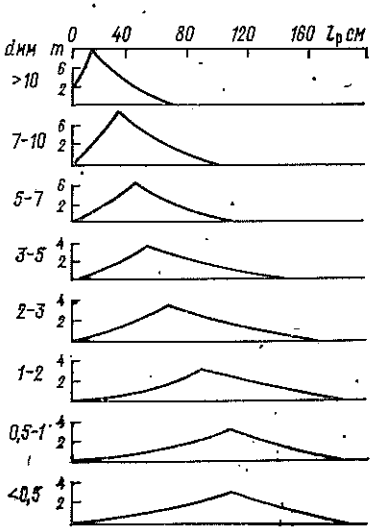


Рис. 20.1. Дальность разлета частиц почвы l_p для различных размеров частиц почвы d при падении капель с эквивалентным диаметром 1,9—3,6 мм (по А. О. Гаврилица, 1978).

m — удельная масса почвы (10^{-4} г/см^2), перенесенной на расстояние l_p (по Н. Гудзону, 1974).

Водная эрозия почвы включает в себя эрозию разбрызгивания, поверхностный смыв, струйную, овражную, русловую и подземную эрозию. Источником энергии для всех видов эрозии почв является кинетическая и потенциальная энергия атмосферных осадков. При естественных осадках интенсивность эрозии оголенной почвы определяется размером капель, интенсивностью и продолжительностью их выпадения.

Капельная эрозия проявляет себя только на почве, не покрытой или мало покрытой растительностью. В тех случаях, когда растения покрывают незначительную часть поверхности земли и имеют наибольшую высоту, капельная эрозия заметно меньше, чем на оголенной почве. Для растительности высотой 20 см, занимающей 80 % площади, капельная эрозия не имеет места, так как растения гасят кинетическую энергию выпадающих капель. Особенно это проявляется при ветре, наклоняющем траекторию капель, в результате чего уменьшается число капель, непосредственно попадающих на землю. В начальной стадии выпадения осадков, т. е. до покрытия поверхности почвы пленкой или слоем воды, наиболее подвержены разрушению песчаные почвы. Наибольший выброс песка происходит при минимальной влажности, затем с ростом влажности происходит резкое уменьшение выброса и уменьшение размеров каверны. При влажности 5,5 % имеет ме-

сто наименьший выброс, после чего с ростом влажности объем каверны и количество выброшенного песка увеличиваются. Количество выброшенного песка линейно связано с кинетической энергией капель. Тяжелосуглинистые черноземы имеют неровную поверхность с характерными масштабами неоднородностей от десятков сантиметров до долей миллиметра. Этот вид почв состоит из комков различного размера и формы.

Энергия капель, попадающих в узкие глубокие щели между крупными агрегатами, постепенно гасится и падение капель не сопровождается их разбрызгиванием. Капли выпадают на отдельные комки, вызывают их распад и отдельные элементы почвы разлетаются на различные расстояния, поднимаясь на большие высоты. Мелкие частицы почвы (< 1—2 мм) поднимаются на высоту до 60—90 см и отлетают на расстояния до 1,5 м (рис. 20.1).

Эрозия разбрызгивания вызывает подъем большого количества почвенных частиц. 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 поднимается 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 на гектар. Однако этот подъем следует рассматривать как «мнимый», ибо фактически все частицы, поднятые в воздух, выпадают на землю на расстоянии до 1,5 м от места выброса.

Перемещение почвы P (т/га) связано с максимальной (в течение дождя) интенсивностью осадков за один час I (мм/ч) соотношением

$$P = 0{,}33I - 1{,}8. \tag{20.1}$$

К водной эрозии почв относится и *эрозия смыва.* По Н. Ф. Бондаренко (1975), когда интенсивность осадков у поверхности почвы превысит инфильтрационную способность, начинается склоновый сток и поверхность земли покрывается слоем воды H, называемым поверхностным смачиванием. Среднее значение H за рассматриваемый период определится из выражения

$$H = p - S_l - F, \tag{20.2}$$

где p — средняя высота слоя осадков, выпавших в течение рассматриваемого периода t (одного дождя, сезона, года) на определенной площади; S_l — поверхностное задержание; F — общая инфильтрация за тот же период.

Средняя скорость равномерного плоского потока $\bar{v}$ высотой H ($H \approx R$, где R — гидравлический радиус) можно определить по формуле

$$\bar{v} = C\sqrt{Hi}, \tag{20.3}$$

где C — коэффициент Шези, $м^{1/2}/с$; i — гидравлический уклон.

Как только средняя скорость потока достигнет некоторого критического значения и перейдет его, поток начинает систематически и в массовом порядке отрывать почвенные частицы от поверх-

ности, поднимать и транспортировать их. В динамике русловых процессов ту наименьшую среднюю скорость потока, при которой происходит непрерывный срыв отдельных частиц на поверхности и при которой средний уровень пульсационных подъемных усилий примерно равен массе частицы в воде, называют *срывающей скоростью* $v_с$.

В условиях турбулентного обтекания выступов для равномерного плоского потока с деформируемой поверхностью, сложенной из смеси несвязных частиц разной крупности

$$v_с = \lg \frac{8{,}8H}{d_5} \sqrt{\frac{2g\,(\gamma_1 - \gamma)\,d}{1{,}75\gamma}}, \qquad (20.4)$$

где d_5 — средний размер тех наиболее крупных частиц, доля которых составляет 5 %; d — средний размер частиц (радиус равновеликого шара); γ_1 — плотность частиц; γ — плотность воды.

Наибольшую скорость потока, при которой еще не происходит перемещения и сдвига частиц на дне и при которой наибольшие пульсационные значения подъемной силы еще не превосходят массы частиц в воде, именуют *несдвигающей*, или *непередвигающей, скоростью* $v_н$. Из опытов данных найдено соотношение $v_с \approx 1{,}4v_н$.

Каждому типу почвы соответствует свой характер эрозионного процесса. Против эрозии относительно менее устойчивы почвы степей и более устойчивы почвы влажных областей. Почвы других областей занимают промежуточное положение.

Более стойки против водной эрозии структурные черноземы и менее стойкие бесструктурные относительно уплотненные почвы. Сильнее эродируются легкие почвы солонцеватые и карбонатные. Между физическими свойствами почв и процессами эрозии существует прямая зависимость. Так, если водопроницаемость превышает интенсивность выпадения осадков, то поверхностный сток и эрозия не возникают. Большое значение также имеет предэрозионная влажность почвы и характер выпадения осадков. С увеличением влажности почв водопроницаемость уменьшается, а поверхностный сток увеличивается по сравнению с относительно более сухой почвой, и эрозия возрастает. Водная эрозия сильнее выражена на уплотненных лёссовидных породах и менее — на моренных суглинках и других водопроницаемых породах.

С уничтожением верхних более стойких против эрозии рыхлых, более влагоемких и водопроницаемых горизонтов почвы смыв ее резко возрастает и уплотненные нижние горизонты размываются сильнее.

Развитию водной эрозии способствуют вспашка и рядовой посев вдоль склонов, а также распашка крутых (больше 10—15°) склонов, бровок и ложбин балок, неурегулированная пастьба скота, беспорядочная вырубка леса и кустарников, освоение песчаных целинных и залежных земель без применения противоэрозионных землеустроительных и агротехнических мероприятий.

20.2. Ветровая эрозия почв

Понятие ветровой эрозии. *Ветровой эрозией, или дефляцией,* почвы, называют процесс ее разрушения и выдувания ветром, перенос и оседание частиц почвы. Интенсивность дефляции зависит от скорости ветра, размера частиц почвы и их связности.

При порывистом ветре в соответствии с законом Бернулли у верхней поверхности частицы образуется частичный вакуум, а снизу — повышенное давление. Обтекание воздушным потоком (со скоростью 5—10 м/с) поверхности с выступами шероховатости 4,5 мм вызывает падение давления воздуха между выступами соответственно на 2,1—7 кг/м^2. Относительно почвенной частицы оба изменения давления (т. е. некоторая подъемная сила P) направлены вверх (Г. Конке, 1962):

$$P = C_y \frac{\rho U}{2} S, \qquad (20.5)$$

где C_y — коэффициент подъемной силы, ρ — плотность среды, U — скорость движения, S — площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения. Когда P превысит массу частицы, она поднимается вверх под углом 75—90° и приобретает вращательное движение в 200—1000 оборотов в секунду.

Объем почвы, сдуваемый ветром, зависит от двух факторов — скорости ветра и шероховатости поверхности почвы. Естественно, сильный ветер может сдвинуть большее количество почвы, причем более крупных частиц, чем слабый ветер. Дж. Швабом (1965) предложена формула:

$$S_V = (V - V_0)^3 d^{0,5}, \qquad (20.6)$$

где S_V — количество перемещенной почвы; V — скорость ветра; V_0 — минимальная скорость ветра, при которой происходит перемещение частиц данного размера; d — диаметр частиц.

Шероховатость поверхности почвы оказывает сопротивление силе ветра, то есть влияет на градиент ветра. В зависимости от размеров почвенных частиц различают три типа их перемещения: передвижение во взвешенном состоянии, волочение и сальтация (скачкообразное движение частиц).

Передвижение во взвешенном состоянии — перемещение частиц диаметром менее 0,1 мм. Скорость падения таких частиц настолько мала, что они могут находиться длительное время во взвешенном состоянии при турбулентном (вихревом) движении воздуха. *Пыльные бури* представляют собой взвешенные мелкие частицы почвы, которые в больших количествах могут перемещаться на большие расстояния (при скорости ветра более 10 м/сек).

Волочение — передвижение крупных частиц по поверхности под действием силы ветра. Практически большинство перекатываемых частиц имеет диаметр от 0,5 до 1—2 мм.

Сальтация — вид движения частиц, при котором наблюдается наибольшее их перемещение. Передвижение во взвешенном со-

стоянии, а также волочение обычно сопровождается сальтацией, т. е. скачкообразным движением частиц. Путем сальтации перемещаются частицы средних размеров (0,05—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.

Дефляционноопасность почвы определяется в первую очередь ее механическим составом: чем меньше в почве глины, тем ветроопаснее почва. Особенно большую роль играет наличие прочных структурных агрегатов. Структурность верхнего (0—5 см) слоя почвы может служить диагностическим показателем ветроустойчивости. Мелкозернистые легкие почвы всегда ветроопасны. Чем выше содержание гумуса, тем более связанной и ветроустойчивой является почва. Иногда круглогодичная дефляция сдувает с поверхности обрабатываемой земли частицы гумуса и глины, в результате чего связанность поверхностного слоя почвы уменьшается и ветроопасность увеличивается.

На степень эрозионных процессов оказывает влияние рельеф и микрорельеф местности. Выдуванию больше подвержены верхние и наветренные части склонов. Чем круче ветроударный склон, тем больше скорость ветра и сильнее разрушение почвы. При движении воздушного потока вниз по склону скорость его уменьшается.

Немаловажную роль играет и микрорельеф местности. Ветровой эрозии особенно подвержены поля с выровненной зябью. На грубо взрыхленных полях выдувание почвы уменьшается. На выровненной поверхности поля скорость ветра на 40 % выше, чем на невыровненной.

Ветер является основным фактором развития дефляции. Скорость ветра, изменяясь за секунды в пределах 20—25 % среднего значения, носит пульсирующий характер, играющий существенную роль в развитии дефляции. Критические скорости ветра (м/с) на высоте 0,15 м: для песчаных почв — 3,5; супесчаных почв — 3—4; суглинистых почв — 4—7; торфяных почв — 4,5. Для начала дефляции требуется несколько большая скорость ветра, чем для дальнейшего продолжения дефляции.

Осадки, повышая связность почвенных частиц, как бы защищают почву от дефляции. Однако такое защитное влияние оказывается недолговременным. Выдувание почвенных частиц начинается при достижении поверхностным слоем влажности 9—13 %. Влажность переносимой почвы составляет 5—7 %.

В зависимости от скорости ветра количество перекатывающихся частиц для песка составляет 15,7 %, а для суглинка — 7,4 %. Количество частиц, передвигающихся скачками, составляет 67,7 % для песка и 54,5 % для суглинка. На частицы, перемещающиеся во взвешенном состоянии, приходится около 20 % для песка и около 40 % для суглинка (от веса всей движущейся массы). Максимальная высота подъема взвешенных частиц колеблется от десятков до сотен метров, порой до 1,5—2,0 км и более.

Количество материала темно-каштановых супесчаных почв, переносимого в слое 0—5 см при скорости ветра на высоте 1,5 м 11 м/с составляет 68 %, в слое 5—10 см — 26 %, в слое 10—15 см — 4 %, в слое 15—20 см — 2 % и в слое 20—25 см — 1 %. При переносе пыли происходит ее сортировка, так как более крупные частицы оседают быстрее, а более мелкие переносятся на далекие расстояния. Так, частицы диаметром 1—8 мм передвигаются на несколько метров и десятков метров; диаметром 1—0,1 мм — на 1—1,5 км; 0,06 — 0,1 мм — на несколько километров; 0,03—0,06 мм — на 300 км и более; 0,01—0,03 мм — на 1500 км и более, $<$ 0,01 мм — вокруг земного шара.

Вредное влияние пыльных бурь. В нашей стране ветровая эрозия проявляется больше всего в засушливых районах с усиленной ветровой деятельностью. Если ветер, вызывающий эрозию почвы, сохраняется в течение 24 ч, то с 1 га может быть потеряно около 13 тыс. т почвы. Это значит, что примерно в течение трех суток непрерывной пыльной бури поле может терять около 1 см пахотного слоя почвы.

Обычно ветровая эрозия редко продолжается непрерывно. Скорость ветра в течение суток неоднократно снижается и пыльная буря утихает или приостанавливается на некоторое время, возникая вновь при усилении ветра. Например, по данным И. В. Свисюка (1986), в 1984 г. на Северном Кавказе из 24 дней с пыльной бурей непрерывная продолжительность ветровой эрозии в разных районах составила 50—100 ч, т. е. 2—4 сут. В 1969 г. из 39 дней с пыльной бурей продолжительность ветровой эрозии составила 75—190 ч, т. е. около 3—8 сут. Из общего числа дней с пыльной бурей примерно 25—30 % времени наблюдается интенсивная эрозия почвы. Во время пыльных бурь в 1960 г. в Ростовской обл. на площадях, подвергшихся эрозии, с потерей каждого сантиметра верхнего слоя почвы терялось (на каждом гектаре) 31 кг азота, 22 кг фосфора, 312 кг калия и 2—3 т гумуса. При периодических выдуваниях во время пыльных бурь почва обедняется, что ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Наряду с выдуванием, в период ветровой эрозии происходит засекание растений. В результате на поле остаются остатки стеблей с поврежденными листьями или совершенно без них. На таких полях урожайность снижается на 1—3 ц/га.

У изреженных и недостаточно развитых с осени посевов (2—3 побега) во время пыльной бури отсекаются один за другим листья, обнажается узел кущения и вся корневая система порой настолько, что часть растений вырывается ветром с корнем. Почва под такими посевами выдувается в среднем на 3—5 см и более.

20.3. Полегание посевов

Понятие полегания посевов. *Полеганием посевов* хлебных злаков называется такое состояние посевов, при котором под влиянием слабого сцепления корневой системы с почвой или неблаго-

приятных метеорологических условий, оказывающих механическое воздействие на растения, стеблестой в той или иной степени наклоняется к поверхности почвы и не возвращается в вертикальное положение после прекращения этих воздействий. Полегание посевов вызывается различными причинами. Выделяются два типа полегания: корневое и стеблевое.

При *корневом полегании* растения полегают вследствие слабого сцепления корневой системы с почвой. Обычно это бывает вызвано разжижением почвы при поливах или сильных дождях при развитии процессов водной эрозии. В таких случаях полегание может наблюдаться даже у устойчивых к полеганию сортов. При стеблевом полегании происходит изгиб, а иногда даже излом соломины у основания от несоответствия между динамическими нагрузками на нижнюю часть стебля и ее прочностью.

Механическая прочность стеблей и корней определяется биологическими особенностями сорта и формируется в зависимости от условий среды (световой режим, влагообеспеченность посевов, уровень минерального питания, тепловой режим почвы и воздуха), агротехники (нормы и сроки посева, предшественники, нормы и виды удобрений), развития растений (высота и густота стеблестоя, фазы развития) и других причин (грибковые заболевания). Корневая устойчивость растений определяется развитием корней, консистенцией верхних слоев почвы, глубиной заделки семян. Динамические нагрузки на основание стеблей и корни определяются массой колоса и верхнего яруса листьев, давлением ветрового потока, дождя и града.

Воздействие метеорологических условий на полегание (А. Д. Пасечнюк, 1990) проявляется двояко: а) их ежегодные особенности сказываются на формировании устойчивости посевов к полеганию, б) разовые неблагоприятные явления (интенсивные дожди, ветры, град, ранние осенние заморозки) непосредственно вызывают полегание посевов.

Основной причиной полегания хлебов являются сильные ливневые дожди и ветер, оказывающие механическое воздействие на растения. Однако потенциальная возможность полегания посевов подготавливается всем ходом агрометеорологических условий периода, предшествующего полеганию.

Механизм стеблевого полегания изучался Т. И. Русаковой (1975). Растение представлялось в виде трубчатого стержня определенной механической прочности, закрепленного на одном конце. К силам, вызывающим полегание, следует отнести: 1) силу, создаваемую ветровым напором (принимаем эту силу направленной горизонтально); 2) силу, создаваемую динамическим воздействием капель (в первом приближении принимаем эту силу направленной вертикально), 3) силу, создаваемую массой растений (действует вертикально). Силы, вызывающие полегание, схематично представлены на рис. 20.2.

Рассмотрим действие перечисленных сил. Вначале выделим необходимое и достаточное условие для наступления полегания. Не-

обходимое заключается в том, что растение отклоняется от вертикального положения под воздействием внешних сил, а достаточное — в том, что растение не возвращается в вертикальное положение после прекращения действия внешних сил из-за излома растения или из-за того, что сила, стремящаяся вернуть растение в вертикальное положение, оказывается меньше силы, создаваемой массой растений. Остановимся более подробно на полегании растений при сильном ветре.

В первом приближении можно считать, что сила ветрового напора приложена к верхней части растения, так как в нижней части посева наблюдается затухание скорости ветра. Растительный по-

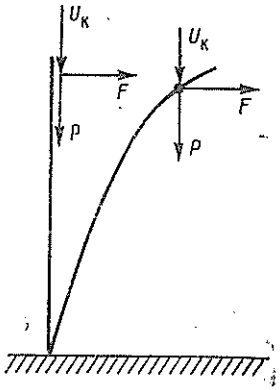


Рис. 20.2. Силы, действующие на растение при полегании (по Т. И. Русаковой, 1985).

$U_к$ — кинетическая энергия капель дождя; F — сила ветрового напора; P — сила, вызванная массой растения.

кров зерновых культур представляется как группа тонких стержней, ориентированных горизонтально потоку воздуха.

Учитывая перечисленные ограничения, запишем условие, необходимое для наступления полегания:

$$F \geqslant F_y, \tag{20.7}$$

где F — сила, создаваемая ветровым напором, Н; F_y — сила, стремящаяся вернуть растение в вертикальное положение, Н.

Силу, создаваемую ветровым напором, можно рассчитать по известной формуле

$$F = a_v \frac{\rho v^2}{2} L', \tag{20.8}$$

где ρ — плотность воздуха, $\rho = 1{,}293$ 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.

Сила, стремящаяся вернуть растение в вертикальное положение, рассчитывается следующим образом:

$$F_y = \frac{k_y E I_x}{l^2}. \tag{20.9}$$

Здесь 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 от исходного положения.

Момент инерции поперечного критического сечения растения рассчитывается по формуле

$$I_x = 0{,}4d^3\delta, \tag{20.10}$$

где d — диаметр стебля растения в критическом сечении, м; δ — толщина стенки соломины растения в критическом сечении, м.

Достаточное условие полегания записывается неравенством

$$P \geqslant F_y, \tag{20.11}$$

где P — сила, создаваемая массой растения, Н; она представляет собой произведение массы растения от точки изгиба до верхушки растения на ускорение свободного падения.

Для случая, когда происходит излом растения, примем достаточное условие полегания:

$$\sigma \leqslant \frac{M_{изг}}{W_x}, \tag{20.12}$$

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, Н·м. Величина W_x рассчитывается по формуле

$$W_x = 0{,}8d^3\delta, \tag{20.13}$$

$$M_{изг} = Pl', \tag{20.14}$$

где l' — длина растения от точки изгиба до точки приложения силы массы растения, м.

Рассмотрим полегание растений при наличии интенсивного дождя. В этом случае явление полегания растений вызывается кинетической энергией капель и возможно уже при незначительном ветре. Необходимое условие полегания при этом выразится неравенством

$$U_к \geqslant A, \tag{20.15}$$

$$A = \frac{k_y E l_x}{l}, \tag{20.16}$$

где $U_к$ — кинетическая энергия капель, вызывающая изгиб растения, Н·м; A представляет собой работу, которую необходимо совершить капле дождя, чтобы вызвать максимальное отклонение растения от вертикального положения, Н·м.

В этом случае $U_к$ можно выразить следующим образом:

$$U_к = \frac{m_к v_к^2}{2}, \tag{20.17}$$

где $m_к$ — масса капли, кг; $v_к$ — скорость падения капли, м/с.

Массу капли $m_к$ определим по известной формуле

$$m_к = V_к \rho_к, \tag{20.18}$$

где $V_к$ — объем капли, м^3; $\rho_к$ — плотность капли, кг/м^3.

Установившаяся скорость дождевых капель зависит от их радиуса. При диаметре капель 1—4 мм установившаяся скорость $v_к$ (м/с) хорошо аппроксимируется выражением

$$v_к = 200{,}8 \left(\frac{D}{2}\right)^{1/2}. \tag{20.19}$$

В случае дождя происходит увеличение массы растения от длительного намокания. Изменение массы растений во время дождя определим по формуле

$$P_н = P k_н, \tag{20.20}$$

где $k_н$ — безразмерный коэффициент изменения массы растения от длительности намокания. В первом приближении значение $k_н$ в первые четыре часа определяется по эмпирической зависимости, предложенной Ванштоком (1974):

$$k_н = 1 + 0{,}4t, \tag{20.21}$$

где t — время увлажнения, ч.

Достаточное условие полегания в этом случае запишем так:

$$P \cdot k_н \geqslant F_y. \tag{20.22}$$

Если происходит излом растения, условие достаточного полегания определяется согласно выражению (20.12).

Таким образом, нами рассмотрены два типа воздействия погодных условий на полегание посевов: 1) сильного ветра, 2) интенсивного дождя и незначительного ветра. В первом случае полегание растений вызывается силой ветрового напора, во втором случае изгиб растений вызывается кинетической энергией капель дождя.

Агрометеорологические показатели полегания установлены в исследованиях А. Д. Пасечнюка. Наименьшая устойчивость стеблестоя наблюдается в годы с пониженным температурным режимом и хорошей влагообеспеченностью растений. При такой погоде и благоприятном пищевом режиме зерновые злаки продолжают куститься даже после выхода растений в трубку, а отмирание стеблей начинается поздно. В результате формируется очень густой стеблестой. Второй причиной низкой устойчивости стеблестоя к полеганию в годы с прохладной и влажной погодой в период кущение—колошение является большая высота растений.

В репродуктивный период полегание зависит от устойчивости стеблестоя. Если за показатель устойчивости к полеганию принять максимальную высоту растений, то обнаруживается следующая закономерность: в годы с максимальной высотой ячменя сорта Винер менее 70 см посевы не полегают ни при каких агрометеорологиче-

ских условиях периода колошение—восковая спелость или полегают только в слабой степени, а при большей высоте растений интенсивность полегания в основном определяется метеорологическими условиями указанного периода.

При большом количестве осадков за период колошение—восковая спелость значительна вероятность выпадения одного или нескольких сильных дождей, способных вызвать полегание посевов. По мере уменьшения количества осадков вероятность полегания снижается и при осадках менее 20 мм практически очень мала.

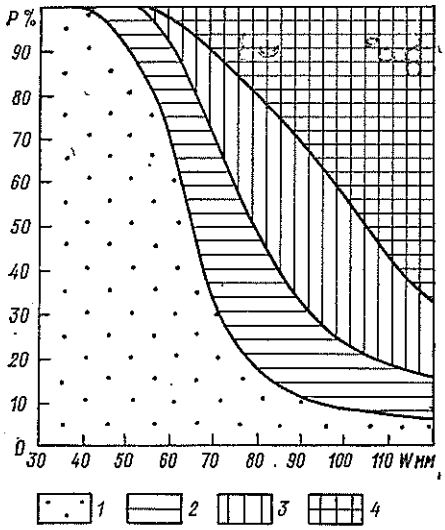


Рис. 20.3. Вероятность полегания посевов ячменя P при различных запасах продуктивной влаги W в слое почвы 0—50 см, измеренных через декаду после наступления фазы выхода в трубку (по А. Д. Пасечнюку, 1974).

1 — полегание отсутствует, *2* — слабое полегание, *3* — среднее, *4* — сильное.

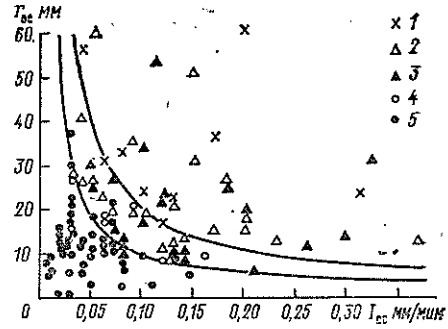


Рис. 20.4. Зависимость интенсивности полегания ячменя (сорт Винер) от количества осадков r_{oc} за один дождь и средней интенсивности их выпадения I_{oc} (по А. Д. Пасечнюку, 1974).

Интенсивность полегания: *1* — 1 балл (очень сильное); *2* — 2 балла (сильное); *3* — 3 балла (среднее); *4* — 4 балла (слабое); *5* — 5 баллов (полегание отсутствует).

Полегания может не быть и при большом количестве осадков, если они имеют обложной характер, малую интенсивность и не сопровождаются сильными ветрами. Но такие случаи наблюдаются редко.

Если запасы влаги в верхнем полуметровом слое через декаду после наступления фазы выхода в трубку менее 60 мм, вероятность полегания очень мала (рис. 20.3). При запасах влаги больше 100—110 мм создается очень большая опасность полегания на больших площадях. Зависимость интенсивности полегания посевов от количества осадков за один дождь и средней интенсивности их выпадения приводится на рис. 20.4.

Значительное влияние на полегание хлебов оказывает ветер, хотя сам по себе причиной полегания он бывает только в 3 % случаев. Обычно его действие проявляется одновременно с осадками. В подавляющем большинстве случаев полегание ячменя отмечается при скорости ветра не менее 3—4 м/с. Начало полегания определяется устойчивостью растений к полеганию и наличием метеорологических явлений, вызывающих полегание. Посевы могут полегать даже в фазу выхода в трубку, если перед этим длительное время стояла дождливая пасмурная погода. Но наиболее критический к полеганию период наступает после колошения. При благоприятных метеорологических условиях, когда отмечается интенсивный рост стебля, даже сравнительно небольшие дожди или умеренный ветер могут вызвать полегание сразу же после колошения.

Потери урожая при полегании посевов. Полегание посевов приводит к нарушению распределения биомассы по вертикальному профилю и изменению фитометеорологических условий. Согласно наблюдениям А. Д. Пасечнюка (1970), в полегших посевах максимум биомассы смещается к поверхности почвы, а колосья располагаются во всех слоях посева. Объемная плотность зеленой биомассы полегших посевов в несколько раз превышает плотность нормальных, что снижает турбулентный обмен, ухудшает равномерность распределения солнечной радиации в травостое и, в конечном счете, уменьшает продуктивность фотосинтеза. Проникающая в нижние слои полегших посевов солнечная радиация в два-четыре раза меньше, чем в неполегших.

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. На полегших посевах дольше сохраняется роса. Эти условия благоприятствуют поражению полегших посевов грибковыми заболеваниями. В полегших посевах интенсивно развивается зеленый подгон.

Срок начала полегания оказывает большое влияние на показатели структуры урожая и на размеры биологических потерь. Количество зерен в колосе и продуктивная кустистость уменьшаются при раннем полегании. В случае позднего полегания размеры потерь урожая определяются в основном только уменьшением абсолютного веса зерна. Так, абсолютный вес 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 %.

20.4. Градобития

Градины образуются в мощных кучево-дождевых облаках в теплое время года. Выпадающие градины срывают листья, ломают мелкие ветви, обдирают кору, нарушают поверхность плодов и ягод, выбивают зерна из колосовых растений, вдалбливают

колосья в земляной покров. При длительных и интенсивных градобитиях происходит полная потеря урожая года, а в ряде случаев и полная гибель растений.

По данным исследований И. В. Литвинова (1987), ущерб, наносимый растениям выпадающим градом, зависит от размера, массы, формы градин, а также от вида растений, фазы их развития и от того, на какую часть растения выпадает градина. Растения состоят из различных элементов (цветы, листья, побеги, ветви и т. д.), которые по-разному реагируют на удары выпадающих градин. Например, цветы плодовых деревьев разрушаются даже крупными каплями дождя, не говоря уже о градинах, в то время как для заметного повреждения стволов старых деревьев, покрытых толстым слоем коры, требуется выпадение особо крупных градин.

Таким образом, для всех частей различных растений в зависимости от фазы их развития должны существовать некоторые граничные значения размеров выпадающих частиц (градин), ниже которых соударение не ведет к повреждению растений. В настоящее время степень повреждения растений предложено сопоставлять с двумя параметрами града: количеством выпавших частиц с диаметром выше критического и суммарной кинетической энергией 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.

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 (более 10 м/с) относительное влияние ветра на кинетическую энергию градин меньше, чем для частиц выпадающих осадков другого вида.

Ниже приведены рассчитанные значения кинетической энергии градин различного размера:

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

Критическое значение критической энергии градин для различных частей растений не определено. По всей видимости, оно близко к значению $U = 3 \cdot 10^{-3}$ Дж, что соответствует $d \approx 5$ мм. Значения кинетической энергии в Дж/м^2 совокупности градин определяются из выражения

$$U = 10^{-6} b \sum_{i=1}^{N} n_i d_i^4, \qquad (20.23)$$

где b — безразмерный параметр, зависящий от плотности градин;

n_i — число градин диаметром d_i, выпавших за время одного градобития на площади горизонтальной поверхности 1 м². По данным различных исследований, b может принимать значения от 1 до 10.

Степень повреждения сельскохозяйственных культур градинами определяется суммарной энергией градин, видом культуры, фазой ее развития. Для пшеницы в зрелой фазе развития при общей энергии за все время выпадения града менее 10 Дж/м² повреждения растений практически нет. При $U = 50$ Дж/м² степень повреждения может достигать 25 %, а при $U > 450$ Дж/м² гибнет весь урожай. Максимальные значения U за время одного градобития могут достигать $2 \cdot 10^3$ или даже $2 \cdot 10^4$ Дж/м².

Глава 21

ВЫМЕРЗАНИЕ РАСТЕНИЙ

21.1. Зимостойкость растений. Агрометеорологические условия, определяющие закалку и состояние зимнего покоя растений

Зимостойкость растений — способность переносить неблагоприятные условия зимовки без существенных повреждений — является важнейшим признаком, сложившимся в процессе эволюции растений. И. И. Туманов (1940) подчеркивает, что зимостойкость — мобильное, непостоянное и не всегда характерное даже для одного и того же растения свойство. Оно обусловлено направленностью физиологических и биохимических процессов, возникающих у растений в холодный период года.

Озимые культуры. В осенний период при понижении температуры воздуха и почвы у озимых культур протекают сложные физиологические процессы, обеспечивающие подготовку их к зимовке, так называемая *закалка растений* (В. А. Моисейчик, 1975).

Процесс закаливания И. И. Туманов делит на две фазы. Первая фаза проходит в условиях хорошего освещения при понижении средней суточной температуры воздуха до 0... 6 °С. Наилучшие условия для первой фазы закалки создаются в солнечные ясные дни, при большой суточной амплитуде температуры (днем 5... ... 10 °С, ночью — 1... 2 °С). Первая фаза закалки длится 12—14 дней. При таких условиях растения растут слабо (не хватает тепла), а фотосинтез протекает нормально. В результате накапливаются сахара, выполняющие функцию защитных веществ. Хорошо развитые раскустившиеся растения озимых способны накопить 20—30 % сахаров (от сухой массы растений). После окончания первой фазы закалки растения озимых безболезненно выдерживают понижение температуры почвы на глубине узла кущения до —12 °С (в период активного роста им опасна температура ниже —8 °С).

Вторая фаза закалки растений проходит в конце осени — начале зимы при средней суточной температуре воздуха —2... —5 °С.

Она возможна при отсутствии света, когда на полях установится снежный покров.

В течение второй фазы закалки повышение зимостойкости растений идет главным образом за счет обезвоживания тканей, перехода свободной воды в связанную и увеличения концентрации клеточного сока. Крахмал в клетках растений частично превращается в сахара, запасы которых поэтому увеличиваются. Продолжительность второй фазы, по мнению Туманова, может быть небольшой — 3—5 дней. Н. П. Панченко (1957) считает, что вторая фаза закалки растений при температуре —3 °С длится 8—12 дней. Наибольшее количество сахаров у растений наблюдается в период второй фазы закаливания.

После прохождения полного закаливания значительно повышается зимостойкость озимых культур. Критическая температура озимой пшеницы среднезимостойких сортов понижается до —18 °С, а высокозимостойких — до —20 °С и ниже. Растения становятся более устойчивыми к действию и других неблагоприятных факторов. Закалка озимых культур тесно связана с процессами, вызывающими у них состояние вынужденного покоя. В период вынужденного покоя у растений не только прекращаются ростовые процессы, но и резко снижается обмен веществ, в значительной степени уменьшается реакция растений на воздействие внешней среды.

Глубина покоя у различных сортов озимых неодинакова и, согласно данным П. А. Генкеля, Е. З. Окниной (1954) и др., изменяется в течение зимовки: в первой половине зимы увеличивается, а во второй половине уменьшается. Высокоморозостойкие сорта озимых характеризуются большей глубиной и продолжительностью периода покоя. Наименьшей продолжительностью периода покоя характеризуется озимый ячмень, наибольшей — озимая рожь.

Одним из показателей перехода растений в состояние зимнего покоя является значительное обезвоживание тканей растений осенью. Уровень обезвоживания зависит от многих причин: запасов влаги в почве, температуры почвы, биологических особенностей сорта, развития корневой системы растений и др. В годы с большим количеством осадков, преобладанием пасмурной погоды осенью и при пониженной температуре почвы обезвоживание растений меньше, чем при сухой и солнечной погоде. В связи с этим зимостойкость растений в такие годы снижается.

У озимых зерновых культур, особенно озимого ячменя и озимой пшеницы слабозимостойких сортов, зимний покой неглубокий, процессы обмена веществ у них полностью не прекращаются. При повышении температуры он легко нарушается, обособление протоплазмы в клетках конуса нарастания и узла кущения растений исчезает уже через несколько дней. В связи с этим длительные и интенсивные оттепели зимой, особенно при небольшом снежном покрове, вызывающие оттаивание верхнего слоя почвы, снижают зимостойкость растений.

Постепенное понижение температуры в дальнейшем восстанавливает состояние покоя растений и их зимостойкость. Однако при этом полного восстановления прежнего состояния растений не происходит. После длительных оттепелей уменьшаются запасы сахаров, увеличиваются размеры конуса нарастания и изменяются другие показатели состояния растений. Их зимостойкость оказывается ниже, чем до наступления оттепели.

При резких колебаниях температуры воздуха и непродолжительных оттепелях состояние покоя у высокоморозостойких сортов озимых культур не прерывается. Это можно объяснить, очевидно, инерцией повышения температуры почвы на глубине узла кущения.

Активная вегетация озимых зерновых культур осенью, согласно В. А. Моисейчик (1975), в южных районах страны (Средняя Азия и Закавказье, Северный Кавказ, юг Украины и Молдавия) прекращается при переходе средней суточной температуры воздуха через 3 °С, а в более северных районах — при переходе средней суточной температуры через 5 °С. Установлено, что окончательное прекращение ростовых процессов происходит при температуре несколько выше 0 °С и у различных сортов озимых культур в разные сроки.

Возобновление активной вегетации озимой пшеницы и озимой ржи весной, судя по наблюдениям метеостанций, совпадает со сроком перехода температуры воздуха на юге через 3 °С, в остальных районах — через 5 °С.

Прекращение периода вынужденного покоя растений слабозимостойких сортов озимой пшеницы (Украинка, Лютесценс 17 и др.) наступает на 5—6 дней раньше, чем высокозимостойких сортов озимых культур. Сокращение периода покоя способствует меньшему истощению растений, так как у них раньше начинается фотосинтез и поглощение питательных веществ из почвы.

Плодовые культуры. Для развития высокой зимостойкости необходимо накопление в тканях растений значительного количества сахаров. У садовых растений это происходит в первой фазе закаливания путем гидролиза ранее запасенного крахмала. Накопление же крахмала начинается с периода ослабления и прекращения роста побегов, созревания плодов и продолжается до окончания фотосинтетической работы листьев, т. е. до фазы расцвечивания листьев или сильного понижения температуры. Содержание крахмала к этому времени достигает наибольшего значения — осеннего максимума. Затем при наступлении отрицательных температур воздуха происходит гидролиз крахмала. Количество его в побегах и корнях постепенно убывает, а содержание сахаров растет.

21.2. Влияние осеннего состояния растений на их зимостойкость

Озимые культуры. Состояние озимых посевов после прекращения вегетации осенью имеет большое значение для их перезимовки. При неблагоприятных условиях перезимовки изреженность

озимых в фазах всходов, 3-го листа, начала кущения и перерос-ших озимых, как правило, бывает больше, чем у нормально развитых — раскустившихся до 3—5 побегов (В. А. Моисейчик, 1975).

Слаборазвитые растения вследствие малой высоты и небольших запасов питательных веществ (сахаров) в большей степени подвержены вымерзанию и вымоканию, быстрее погибают под притертой к почве ледяной коркой. Отсутствие или слабое развитие узловых корней у нераскустившихся озимых посевов приводит к значительному выпиранию растений при неоднократном замерзании и оттаивании верхнего слоя почвы, более сильному повреждению озимых пыльными бурями и зимней засухой.

Наименее зимостойкими являются озимые в период между образованием 2-го и 3-го листа.

Переросшие растения озимых культур осенью имеют в среднем высоту более 25 см, более пяти боковых побегов (у озимой пшеницы сорта Безостая 1 более трех), длина конуса нарастания у главного побега озимой пшеницы составляет $\geqslant 0{,}30$ мм, у озимой ржи $\geqslant 0{,}50$ мм. Зимостойкость таких посевов озимых снижается вследствие интенсивного роста растений осенью, задерживающего прохождение растениями первой фазы закалки.

Зимостойкость растений ранних сроков сева, с удлиненным и значительно дифференцированным конусом нарастания осенью понижена из-за неглубокого состояния покоя зимой.

Зимой состояние конуса нарастания в зависимости от агрометеорологических условий значительно изменяется. При длительном залегании на полях мощного снежного покрова (более 30 см), при слабом промерзании почвы или небольшом снежном покрове, но интенсивных оттепелях минимальная температура почвы на глубине залегания узла кущения длительный период удерживается в пределах, близких к 0 °С. В связи с этим конусы нарастания, особенно у главных побегов растений, усиленно растут в длину на II этапе, не переходя к III этапу органогенеза из-за недостатка тепла. Происходит так называемое «вытягивание» или «израстание» конусов нарастания растений. Это приводит к снижению зимостойкости растений и большему повреждению их в результате выпревания, действия притертой к почве ледяной корки и резких понижений температуры почвы на глубине узла кущения.

Необычный рост конуса нарастания у растений озимых культур зимой наблюдается также в годы с длительными и интенсивными (+2... +5 °С) оттепелями, когда снежный покров сходит, верхний слой почвы оттаивает и температура почвы на глубине узла кущения длительный период удерживается около 0 °С.

В такие годы растения, потерявшие зимостойкость, особенно страдают от вымерзания во время резких похолоданий при небольшом снежном покрове, а также от вредного влияния притертой к почве ледяной корки.

Между длиной конуса нарастания, температурой и глубиной промерзания почвы до 20 февраля существует хорошо выраженная прямолинейная зависимость (рис. 21.1). Аналитическое выражение

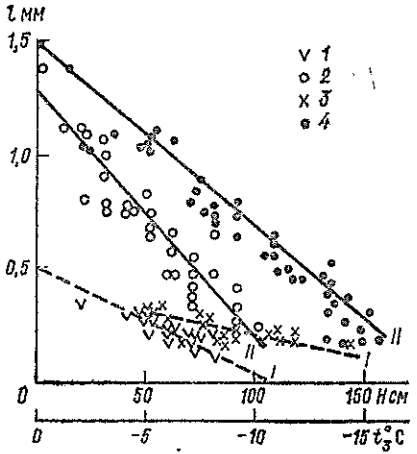


Рис. 21.1. Зависимость длины конуса нарастания l главного побега на 20 февраля у озимой пшеницы сорта Мироновская 808 (I) и озимой ржи сорта Вятка (II) от минимальной температуры почвы на глубине узла кущения t_3 (I — *1* и II — *2*) и глубины промерзания почвы H (I — *3* и II — *4*) (по В. А. Моисейчик, 1975).

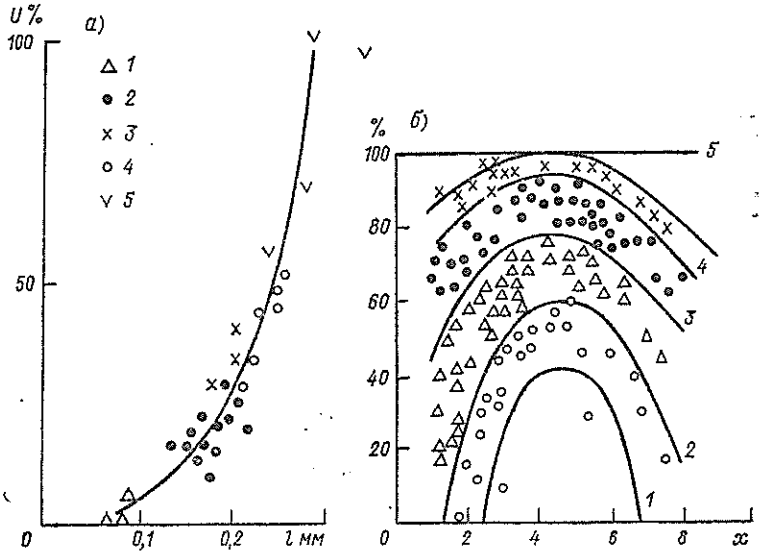


Рис. 21.2.

а) Зависимость изреженности U (%) озимой пшеницы сорта Мироновская 808 в результате вымерзания и действия ледяной корки от длины конуса нарастания l (мм) главного стебля (по В. А. Моисейчик, 1975).
Толщина ледяной корки: *1*) 0 мм, *2*) 10—20 мм; *3*) 21—40 мм, *4*) 41—60 мм; *5* — минимальная температура почвы на глубине узла кущения — 15. . . — 17 °С при $m \geqslant 20$ мм.

б) Зависимость количества сохранившихся растений озимой ржи сорта Вятка (%) от коэффициента кущения растений осенью x при различных условиях перезимовки (по В. А. Моисейчик, 1975).
Условия перезимовки: *1* — очень плохие, *2* — плохие, *3* — удовлетворительные, *4* — хорошие, *5* — очень хорошие.

этой связи можно представить уравнениями множественной регрессии:

1) для озимой ржи

$$z = -0{,}006x + 0{,}025y + 1{,}377, \qquad (21.1)$$

$$E_z = 0{,}013,$$

2) для озимой пшеницы

$$z = -0{,}0005x + 0{,}0370y + 0{,}4839, \qquad (21.2)$$

$$E_z = 0{,}028,$$

где z — длина конуса нарастания, мм; y — минимальная температура почвы на глубине узла кущения, °С; x — глубина промерзания почвы до 20 февраля, см; E_z — средняя квадратическая ошибка уравнения.

При одинаковых условиях конус нарастания у озимой ржи бывает значительно больше, чем у озимой пшеницы. С повышением температуры почвы у растений на III этапе органогенеза конус нарастания растет быстрее, чем у растений на II этапе. Этим, очевидно, можно объяснить меньшую зимостойкость переросших посевов.

Между длиной конуса нарастания зимой и зимостойкостью растений обнаружена достаточно четкая количественная зависимость: чем больше размеры конуса, тем меньше зимостойкость растений.

Зависимость между изреженностью посевов весной и длиной конуса до 20 февраля у озимой пшеницы сорта Мироновская 808 представлена на рис. 21.2 а. Аналитически ее можно выразить уравнением

$$\lg y = 1{,}5277 \lg x_1 + 0{,}369 \lg x_2 + 2{,}036, \qquad (21.3)$$

где y — изреженность посевов озимой пшеницы весной, %; x_2 — длина конуса нарастания к 20 февраля, мм; x_1 — толщина ледяной корки, притертой к почве, мм.

Наиболее зимостойкими являются хорошо развитые посевы, раскустившиеся до трех-пяти побегов, имеющие конус нарастания на втором этапе органогенеза, с длиной у озимой пшеницы менее 0,1 мм, у озимой ржи 0,30—0,45 мм.

Зависимость между количеством сохранившихся после перезимовки растений и состоянием (степенью кустистости) их осенью у озимой ржи Вятка в годы с различными условиями перезимовки достаточно хорошо выражена (рис. 21.2 *б*).

Многолетние сеяные травы. Клевера первого года жизни имеют слабую морозоустойчивость в период от всходов до развертывания 5-го листа; с развертыванием 5-го настоящего листа до конца кущения морозоустойчивость клеверов резко возрастает. В период стеблевания побегов она снижается и только после образования укороченных побегов и почек (в зоне корневой шейки) возрастает

снова. В последующие годы развития высокая морозоустойчивость наблюдается в период формирования почек после возобновления вегетации и кущения.

Люцерна в период от всходов до развертывания 5-го листа имеет высокую морозоустойчивость, так как устойчивые почки на главном побеге люцерны образуются в раннем возрасте, сразу же после всходов. С начала развития 5-го листа до начала бутонизации в связи с закладкой цветочных бугорков в точке роста морозоустойчивость ее снижается и снова повышается в фазы бутонизации и цветения за счет формирования устойчивых почек высших порядков.

Для повышения морозоустойчивости большое значение приобретают сроки сева, сроки уборки покровной культуры, определяющие степень развития растений перед уходом в зиму, а в последующие годы — сроки проведения укосов.

По данным А. И. Страшной (1988), между числом листьев, сформировавшихся у одноукосных клеверов первого года жизни к концу вегетации, и морозоустойчивостью растений (подпокровные посевы) имеется определенная зависимость. Так, изреженность растений весной, равная 50 %, у клеверов первого года жизни, сформировавших осенью два-четыре листа, отмечалась при температуре около —12 °С, а у растений с хорошо развитой розеткой (пять—восемь листьев) — при —15 °С. Различие в морозоустойчивости растений в зависимости от степени развития составило, таким образом, около 3 °С.

По данным И. П. Мининой (1972), растения клевера первого и второго года жизни лучше переносят зимовку, чем те растения, которые близки к окончанию полного биологического цикла (возраст три—четыре года). Так, в первый год зимовки перезимовало в среднем за три года опытов 80 % растений клевера сорта Московский 1, во второй год — 55 %, в третий — лишь 15 %.

21.3. Изменение морозостойкости растений в зависимости от условий периода закалки и зимовки

Способность растений противостоять длительному воздействию низких температур в зимний период, т. е. их *морозостойкость*, сильно колеблется. Морозостойкость, как и зимостойкость растений, зависит не только от исторически сложившихся наследственных свойств, но и от внешних условий, в том числе от агрометеорологических условий осеннего, зимнего и ранневесеннего периодов.

Озимые культуры. Динамика морозостойкости у всех озимых культур и их сортов при устойчивом характере зимних условий погоды подчиняется определенной закономерности, обусловленной сезонным ходом температуры воздуха и верхнего слоя почвы. При понижении температуры воздуха осенью и в первой половине зимы она у всех сортов озимых культур повышается, в середине зимы достигает максимального значения, а затем, при повышении

температуры воздуха и почвы во второй половине зимы и особенно весной падает.

В период активной вегетации растений осенью им опасны понижения температуры воздуха до —8 °С. В момент понижения средней суточной температуры воздуха в конце осени до 5 °С и после прохождения растениями первой фазы закалки критическая температура вымерзания озимых культур близка к —10, ..., —12 °С. После перехода температуры воздуха через 0 °С и понижения температуры почвы на глубине узла кущения до —2, ..., —5 °С, когда растения проходят вторую фазу закалки, морозостойкость их значительно повышается. При благоприятных условиях зимовки (температура почвы на глубине узла кущения —6, ..., —8 °С) морозостойкость растений со второй половины декабря до конца февраля бывает близкой к оптимальному значению ее для данного сорта и состояния озимых культур. Наивысшая морозостойкость озимых культур в этот период (—20, ..., —25 °С) объясняется наиболее глубоким состоянием зимнего покоя, вызванного низкими температурами воздуха и почвы.

В марте при повышении температуры почвы и нарушении состояния вынужденного покоя у растений морозостойкость постепенно снижается. Критическая температура их вымерзания повышается до пределов, близких к ее значению осенью (—10, ..., —12 °С). Весной после возобновления активной вегетации растениями озимых культур опасны понижения температуры до —7 °С и ниже.

Влияние сортовых особенностей на морозостойкость растений более четко выражено в дальнейший период, когда они проходят вторую фазу закалки и находятся в состоянии вынужденного покоя, а также после выхода растений из состояния вынужденного покоя в конце зимы и ранней весной.

Зимостойкость озимых культур зависит также от влажности почвы в осенний период вегетации. Озимая рожь, как и озимая пшеница, более морозостойка при выращивании с влажностью, равной 50, 60 и 70 % полной влагоемкости (ПВ). Избыточное увлажнение более 80 % ПВ в этот период отрицательно влияет на закалку озимых. Хорошо развитые (раскустившиеся до трех—пяти побегов) и закаленные озимые, как показали исследования И. И. Туманова, в начале зимы имеют в узлах кущения запасы сахаров, составляющие около 25 % сухой массы, а в листьях — около 17 %. В зависимости от состояния озимых осенью и условий закалки запасы сахаров в начале зимы могут быть больше или меньше указанных пределов. Установлено, что хорошо закаленные растения значительно медленнее тратили сахара под глубоким снежным покровом по сравнению с незакаленными. Слабозакаленные растения прекращают вегетацию с меньшим запасом сахаров, быстрее (в 2—3 раза) их расходуют и начинают голодать значительно раньше, чем хорошо закаленные.

Хотя зимой интенсивность дыхания при пониженных температурах и невелика, однако, за длительный промежуток времени на

процессы дыхания расходуется большое количество сахаров. И. М. Петунин (1957) рассчитал расход сахаров хорошо развитыми и закаленными растениями озимых культур на дыхание под снежным покровом за одни сутки в зависимости от температур (табл. 21.1). Расход сахаров у озимых резко возрастает в период интенсивного снеготаяния. Этот период может иметь решающее значение для исхода перезимовки.

Таблица 21.1

Расход сахаров хорошо развитыми и закаленными растениями озимых культур на дыхание под снежным покровом за одни сутки в зависимости от температуры (по И. М. Петунину, 1957)

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	1,3

Морозостойкость растений, так же как и зимостойкость, зависит от степени закалки и условий зимовки посевов. Морозостойкость озимых принято характеризовать *критической температурой вымерзания*, при которой погибает 50 % и более растений. Установлено (В. А. Моисейчик, 1975), что динамика морозостойкости озимых, которая количественно выражается через критическую температуру вымерзания растений, вызвана изменением физиологического состояния, углеводного обмена и глубины вынужденного покоя у растений под воздействием агрометеорологических условий зимовки. В зависимости от этих условий морозостойкость растений может иметь необычный сезонный ход и наибольшее ее значение возможно в любой период зимы.

В. Н. Личикаки (1971) предложил оценивать условия формирования морозостойкости озимых культур и определять ее динамику по средней температуре почвы на глубине узла кущения озимых. Он получил количественные зависимости между критической температурой $t_к$ для некоторых сортов озимых (пшеницы, ячменя и ржи), районированных на Украине, и средней минимальной температурой почвы на глубине узла кущения $\bar{t}_з$. Зависимость между этими величинами для хорошо раскустившихся осенью посевов нелинейна и достаточно хорошо выражена.

Исследования В. А. Моисейчик (1970) показали, что степень развития растений влияет на их морозостойкость; при различной минимальной температуре почвы на глубине узла кущения она неодинакова.

Установлена связь между степенью изреженности озимых культур, прекративших вегетацию осенью в различном состоянии, и абсолютной минимальной температурой почвы на глубине узла кущения за зиму (табл. 21.2).

В зимний период происходят значительные изменения состояния посевов озимых. В. А. Моисейчик установлено, что количество побегов весной у сохранившихся растений, выраженное в процен-

Таблица 21.2

Изреженность (%) посевов озимой пшеницы в зависимости от минимальной температуры почвы на глубине 3 см и степени развития растений осенью (по В. А. Моисейчик, 1975)

Сорт	Фаза развития	Пределы минимальной температуры почвы, °С								
		—5	—10	—15	—16	—17	—18	—19	—20	—21
Безостая 1	Всходы — 3-й лист	0	12	30	40	50	100	100	100	100
	Кущение	0	4	12	18	25	50	100	100	100
Мироновская 808	Всходы — 3-й лист	0	8	25	30	35	50	70	100	100
	Кущение	0	4	8	10	15	30	50	75	100

тах от количества их осенью, при различных условиях зимовки имеет нелинейную связь со средней кустистостью посевов в момент прекращения вегетации осенью (рис. 21.3). Условия зимовки при этом оценивались по количеству (%) сохранившихся к весне побегов. Очень плохими (*1*) считались такие условия, при которых у хорошо развитых растений весной на 10-й день после возобновления вегетации было менее 50 % побегов от осеннего их количества, плохими (*2*) — 50—70 %, неудовлетворительными (*3*) 70—90 %, удовлетворительными (*4*) — 90—100 % и хорошими (*5*) — более 100 % побегов. При хороших условиях зимовки растения, прекратившие вегетацию в фазах всходов или 3-го листа, могут

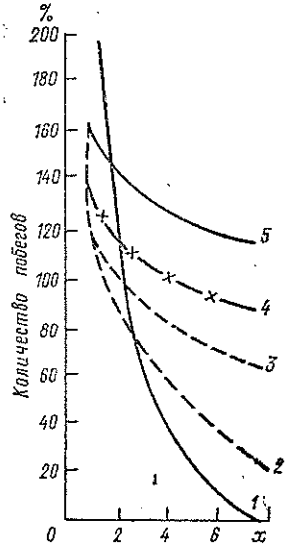


Рис. 21.3. Изменение количества побегов (%) весной по сравнению с осенью у сохранившихся растений в зависимости от коэффициента их кущения осенью x и числа декад с высотой снежного покрова 30 см и более (по В. А. Моисейчик, 1986).

Число декад: *1*) 15 и более, *2*) 13—14, *3*) 11—12, *4*) 6—10, *5*) менее 6.

раскуститься до двух-трех побегов, т. е. иметь весной 200—300 % побегов.

В годы с удовлетворительными условиями зимовки (см. рис. 21.3, кривая *4*) число побегов весной и осенью почти равно. При плохих и очень плохих условиях зимовки количество побегов у сохранившихся растений весной бывает меньше, чем осенью у хорошо развитых и особенно у переросших посевов. Сохранившиеся слаборазвитые осенью растения (в фазах всходов и 3-го листа) весной могут дать дополнительные побеги, но число живых кустов у этих посевов весной при плохих условиях зимовки бывает

небольшим. Поэтому общее количество побегов на 1 м² у слаборазвитых растений весной оказывается значительно меньшим, чем у хорошо развитых.

Таким образом, чем хуже условия зимовки, тем большее значение для озимых имеет степень их развития осенью. При неблагоприятных условиях зимы погибает не только часть растений, но и значительная часть побегов у сохранившихся растений.

Многолетние сеяные травы. При нормальных сроках уборки покровной культуры клевер первого года жизни обычно успевает хорошо развиться во все годы, так как теплообеспеченность этого периода в зоне возделывания двуукосных клеверов почти всегда бывает достаточной. Установлена (А. И. Страшная, 1988) тесная связь критической температуры вымерзания клевера с суммой осадков за август—октябрь и средними за сентябрь—октябрь запасами влаги в пахотном слое почвы.

Высокую морозоустойчивость растения клевера развивают при количестве выпавших за этот период осадков 100—200 мм, уменьшение или увеличение сумм осадков обычно приводит к снижению морозоустойчивости клевера. Снижается морозоустойчивость растений и при средних запасах влаги < 15 мм и > 30 мм, а наиболее благоприятные условия для формирования высокой морозоустойчивости клевера создаются при средних запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы 20—25 мм. Отмечается также достаточно тесная прямая связь критической температуры вымерзания клевера со средней амплитудой температуры воздуха в период от перехода средней суточной температуры воздуха через 10 °С до перехода ее через 5 °С. Наибольшая морозоустойчивость (критическая температура вымерзания —14,5... —15,5 °С) растений двуукосного клевера формируется, при средней амплитуде температуры воздуха 12—14 °С, при средней амплитуде менее 8 °С критическая температура повышается до —12 °С.

И. И. Яшкиной (1985) установлено, что низкая морозоустойчивость клевера формируется в годы с повышенным температурным режимом предзимнего периода (табл. 21.3).

Таблица 21.3

Зависимость морозоустойчивости клевера в начале зимы от метеорологических условий (по И. И. Яшкиной, 1985)

Морозоустойчивость	Критическая температура, °С	Сумма температур воздуха в ноябре, °С		Продолжительность периода (дни) с температурой 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

Впервые применительно к люцерне расчетный метод определения критической температуры вымерзания трав предложил В. М. Личикаки (1975). Им были найдены зависимости между критической температурой вымерзания люцерны $T_к$ и средней из минимальных температур почвы на глубине залегания корневой шейки $t_з$:

$$T_к = 0{,}024t_з^2 + 0{,}993t_з - 14{,}05, \qquad (21.4)$$

где $T_к$ — критическая температура вымерзания люцерны, $t_з$ — средняя из минимальных температур почвы на глубине корневой шейки люцерны (3 см) за прошедший период зимы (от перехода температуры через 0 °С до даты определения критической температуры).

Плодовые культуры. Исследованиями Г. Г. Белобородовой (1982) установлено, что накопление крахмала осенью в тканях побегов яблони, смородины и малины при оптимальном увлажнении и отсутствии ранних опасных заморозков зависит от продолжительности и теплообеспеченности осеннего периода со средней суточной температурой воздуха 15... 10 °С. Чем продолжительнее и теплее этот период, тем лучше условия для накопления крахмала и подготовки растений к зиме. При продолжительности периода с такой температурой 20 дней и более условия для накопления крахмала благоприятны, при продолжительности 10 дней и менее — неблагоприятны.

В конце вегетации плодовые растения проходят две фазы закалки: 1) при постепенном понижении температуры воздуха от 6 до 0 °С и ниже (время листопада) идет накопление защитных питательных веществ; 2) при дальнейшем понижении температуры воздуха от 0 до —12 °С идет процесс обезвоживания, т. е. удаление воды из тканей и перехода растений в состояние глубокого покоя.

Чем лучше прошло вызревание древесины, тем более низкую температуру может выдержать растение в зимний период. Причиной повышенной подмерзаемости зимой является недостаточное развитие ассимиляционного аппарата летом, высокая урожайность и поздние сроки сбора плодов. Холодное лето мешает вызреванию древесины; дождливая, холодная осень и засушливое лето также неблагоприятны для подготовки растений к зиме. По данным Т. А. Побетовой (1981), накопление за период вегетации сумм температур выше 10 °С, равной 2000—2200 °С, способствует нормальной подготовке растений к зиме (вызреванию древесины, накоплению сахаров и т. д.).

21.4. Вымерзание зимующих культур

Озимые культуры. Вымерзание посевов происходит в годы с недостаточным снежным покровом при понижении температуры почв на глубине узла кущения ниже критической температуры, при которой гибнет 50 % растений. Такие условия создаются на юге

и юго-востоке нечерноземной зоны Европейской части в первой половине зимы, когда на полях еще не установился достаточный для сохранения растений от морозов снежный покров.

Суть гибели озимых культур от действия низких температур впервые научно обосновал Н. А. Максимов (1929). Современное состояние вопроса о причинах вымерзания растений достаточно подробно изложено в работах И. И. Туманова (1960), П. А. Генкеля (1953) и др. Под действием низких температур свободная вода в межклетниках растений замерзает и образует кристаллы льда. Дальнейшее обезвоживание (кристаллы льда оттягивают воду из клеток) нарушает структуру протоплазмы. Образование льда внутри протоплазмы и нарушение субмикроскопического строения клеток приводит к их гибели. Ф. М. Куперман (1953) установила, что полная гибель растения происходит при гибели от морозов узла кущения. В первую очередь повреждается конус нарастания главного побега.

Степень повреждения определяется интенсивностью, продолжительностью действия опасных морозов и морозостойкостью растений. Наиболее устойчивы к морозам узлы кущения озимой ржи. Хорошо развитые и закаленные посевы ее, находясь в состоянии покоя, могут выдержать понижение температуры на глубине узла кущения до —24 °С и ниже (местные сибирские сорта до —28 °С). Узлы кущения озимой пшеницы менее морозостойки. Даже высокозимостойкие сорта ее в естественных условиях полностью погибают при температуре почвы на глубине узла кущения ниже —22 °С. Растения слабозимостойких сортов (Безостая 1, Украинка, Аврора, Кавказ и большинство западноевропейских сортов) погибают в момент их максимальной морозостойкости (после прохождения второй фазы закалки и отсутствии оттепелей в период, предшествующий похолоданию) при минимальной температуре почвы на глубине узла кущения —16... —18 °С, озимый ячмень при —13... —16 °С. В начале и в конце зимы, а после интенсивных оттепелей и в середине зимы растения погибают при более высокой температуре почвы. Вымерзают озимые культуры наиболее часто на возвышенных участках поля, а также на западных и южных склонах, где высота снежного покрова меньше, а промерзание почвы больше.

Как очень сухие, плотные, так и переувлажненные почвы отрицательно влияют на состояние посевов и их перезимовку.

Основным агрометеорологическим показателем условий вымерзания озимых культур является минимальная температура почвы на глубине залегания узла кущения растений. Понижение ее до критической температуры вымерзания растений даже в течение одного дня, особенно после оттепели, приводит к значительному изреживанию посевов, а более длительное (до трех дней и более) и интенсивное понижение — к полной гибели посевов.

Рассматривая критическую температуру как предел морозостойкости данного сорта и сопоставляя ее с фактической минимальной температурой почвы на глубине узла кущения, можно

предвидеть результаты перезимовки. Если критическая температура ниже температуры почвы, вымерзания не будет, а при температуре почвы, равной или ниже критической, гибель значительная. Соотношение между этими величинами, выраженное в виде отношения абсолютного минимума температуры почвы на глубине узла кущения к критической температуре, получило название *коэффициента морозоопасности* (В. М. Личикаки, 1974):

$$K = t/T_к, \qquad (21.5)$$

где K — коэффициент морозоопасности; t — минимальная температура почвы на глубине узла кущения, °С; $T_к$ — критическая температура (°С), т. е. отрицательная температура, вызывающая гибель озимой пшеницы более 50 %.

Коэффициент морозоопасности следует рассматривать как выражение связи температуры почвы с критической температурой. Установлена связь между коэффициентом морозоопасности и гибелью озимой пшеницы по данным весеннего обследования посевов (рис. 21.4).

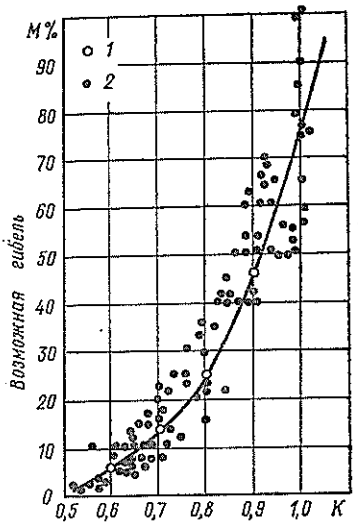


Рис. 21.4. Связь возможной гибели озимой пшеницы от вымерзания M (%) с коэффициентом морозоопасности K (по В. М. Личикаки, 1974).

1 — теоретические данные, *2* — фактические данные.

Общая зависимость (В. А. Моисейчик, 1975) между изреженностью посевов, минимальной температурой почвы на глубине 3 см и коэффициентом кущения растений осенью озимой пшеницы имеет нелинейный характер и выражается для сорта Мироновская 808 уравнением

$$\ln U = 2{,}6600 \lg t_з - 0{,}1290 \lg K - 1{,}7330, \qquad (21.6)$$

где U — изреженность озимой пшеницы, %; $t_з$ — минимальная температура почвы на глубине узла кущения с обратным знаком; K — коэффициент кустистости озимой пшеницы осенью. Уравнение действительно для пределов кустистости 1,1—4,5 и $t_з$ ниже —10 °С. Ошибка уравнения $E_и = \pm 10{,}2$ % обеспечена в 80 % случаев.

При отсутствии других причин повреждения перезимовка озимой пшеницы проходит хорошо при минимальной температуре почвы на глубине узла кущения выше —10 °С. Удовлетворительное состояние озимых посевов (изреженность $\leqslant 30$ % для слаборазвитых с осени посевов и $\leqslant 50$ % для хорошо развитых) обеспечивается соответственно для пшеницы сорта Безостая 1 при —15... ... —18 °С, для пшеницы Мироновская 808 при —17... —19 °С.

При более низких значениях температуры изреженность значительно увеличивается.

Достаточно тесная связь степени изреженности озимой ржи от минимальной температуры почвы на глубине узла кущения обнаружена В. А. Шавкуновой (1980) для сортов озимой ржи Саратовская 1, Саратовская 4, Саратовская крупнозерная. Ее можно представить следующим уравнением:

$$U = 9{,}398t_3 + 0{,}369t_3^2 + 60{,}012, \qquad (21.7)$$

где U — степень изреженности озимой ржи, %; t_3 — минимальная температура почвы на глубине узла кущения, °С. Средняя квадратическая ошибка уравнения $E_u = \pm 7{,}7$ %. Уравнение действительно при минимальной температуре почвы —10... —25 °С.

Многолетние сеяные травы. А. И. Страшной (1988) установлена тесная связь изреженности посевов клевера весной с показателем условий зимовки посевов — минимальной температурой почвы на глубине 3 см. С понижением минимальной температуры почвы от —5 до —11 °С изреженность посевов изменяется незначительно, при дальнейшем понижении температуры до —18... —19 °С она резко возрастает, затем снова уменьшается, но медленнее.

Для одноукосного клевера полученное уравнение имеет вид

$$y = \frac{100}{1 + 10^{3{,}8960 + 0{,}2334t_3}}, \qquad (21.8)$$

$$S_y = \pm 8\ \%,$$

где y — изреженность клевера (%) по данным весеннего обследования посевов; t_3 — минимальная за зиму температура почвы на глубине 3 см на поле с озимой культурой.

Плодовые культуры. Основным фактором, обусловливающим повреждение плодовых зимой, является температура воздуха (Г. Г. Белобородова, 1982). Ниже приведена температура, при которой начинается повреждение *яблони* в период зимовки:

слабоморозостойкие сорта: —20... —22 °С,

среднеморозостойкие сорта: —25... —30 °С,

сорта повышенной морозостойкости: —30... —35 °С.

Частичные повреждения спящих и ростовых почек *груши* возможны при температуре —23 °С, значительные повреждения наблюдаются при температуре —25 °С и ниже.

Подмерзание *косточковых* (вишня, слива, абрикос, черешня, персик) начинается при понижении температуры воздуха до —20... ... —25 °С.

К наиболее широко распространенным типам зимних повреждений относится повреждение коры, камбия, древесины ветвей и ствола. Наименее морозостойки побеги и плодовые веточки с хорошо развитой сердцевиной.

Критическая температура гибели разных пород и тканей неодинакова. Согласно наблюдениям Г. Г. Белобородовой (1982), надземная часть большинства сортов яблони в период глубокого покоя

обмерзает до снегового покрова при температурах —35... —45 °С, косточковых культур и слабоморозостойких сортов яблони при —30... —35 °С. Повреждение цветковых почек и однолетней древесины у яблони в зависимости от морозостойкости сорта и времени наступления морозов наблюдается при температурах —20... ... —30 °С, у сливы, вишни при —20... —25 °С, у персика при —18... —25 °С.

Температура однолетних ветвей (диаметр не более 1,0—1,5 см) яблони и вишни (ткань на глубине 0,3—0,4 см) близка к температуре воздуха; температура внутри почек на 4—5 °С выше температуры воздуха. У двух-трехлетних ветвей температура тканей выше, чем у однолетних. В результате степень повреждения первых меньше. Различия в температуре тканей одно- и двухлетних ветвей яблони достигали 2—3 °С. Разность между критическими температурами, повреждающими одно- и двухлетние ветви, составляет 5 °С.

Корневая система плодовых деревьев повреждается морозами значительно реже, чем надземная часть. Повреждение и вымерзание корней обычно отмечаются в случае сильных холодов при отсутствии снежного покрова. Морозостойкость корневой системы плодовых культур сравнительно невысокая, неодинаковая по глубине залегания корней и меняется на протяжении зимы.

Степень повреждения корней плодовых деревьев в период зимовки зависит также от типа почв и их механического состава. На легких супесчаных почвах корни плодовых деревьев подмерзают сильнее, чем на более тяжелых и богатых органическими веществами.

Для оценки условий перезимовки культур Г. Г. Белобородовой (1972) предложен коэффициент суровости зимы K — отношение числа дней $П$ с минимальной температурой воздуха, вызывающей повреждения культур, за период зимовки к продолжительности холодного периода $а$, т. е. $K = П/а$.

Коэффициент суровости характеризует «насыщенность» холодного периода критическими температурами, повреждающими плодовые растения: большим значениям коэффициента соответствуют худшие условия зимнего периода.

Установлено (Г. Г. Белобородова, 1982), что осенне-зимние и зимние сорта яблони в большинстве случаев хорошо переносят зимы, характеризующиеся следующими значениями коэффициента суровости: $< 0{,}07$ для слабоморозостойких сортов, $< 0{,}05$ для среднеморозостойких и 0,03 для сортов повышенной морозостойкости.

Персик как менее морозостойкий в группе косточковых культур плохо зимует в годы с относительно небольшими значениями коэффициента суровости. Если слива и вишня сильно подмерзают (выпад полускелетных и отдельных скелетных ветвей) в зимы с коэффициентом суровости 0,12—0,13, то персик — при коэффициенте суровости 0,09; сильное подмерзание (вымерзание большей части кроны или всей кроны) наблюдается соответственно при $K = 0{,}24$ и $K = 0{,}14... 0{,}15$.

Т. А. Побетовой (1981) установлена зависимость числа поврежденных плодовых почек от абсолютного минимума температуры воздуха и числа дней с температурой воздуха ниже 20 °С.

Глава 22

ВЫПРЕВАНИЕ, ВЫМОКАНИЕ, ЛЕДЯНАЯ КОРКА, ВЫПИРАНИЕ. ЗИМНИЙ НАГРЕВ И ИССУШЕНИЕ

22.1. Выпревание растений

Озимые культуры. Выпревание растений озимых культур происходит в результате длительного пребывания растений при температуре, близкой к 0 °С, без света, под мощным снежным покровом и неглубоком промерзании почвы.

И. И. Туманов (1940) в зависимости от господствующих физиологических процессов в ходе выпревания растений выделяет три качественно различных фазы: углеводное истощение, голодание и распад органических веществ и, наконец, гибель растений при развитии грибковых заболеваний.

Для *первой фазы выпревания* характерно углеводное истощение озимых растений. При температуре под снегом, близкой к 0 °С, озимые растения сохраняют заметную энергию дыхания и слабый рост. Ежедневные, даже слабые (при небольшом отрицательном значении температуры) расходы сахаров на дыхание в течение продолжительного периода пребывания растений под мощным снежным покровом суммируются и приводят в конце концов к истощению растений. Пополнение запасов сахаров в темноте под мощным снежным покровом невозможно из-за отсутствия фотосинтеза.

Гибель растений наступает не сразу по израсходовании запасов сахаров, а значительно позднее, так как растения способны в некоторой степени пополнять эти запасы за счет превращения крахмала в сахара. Но при этом происходит голодание растений (расход белков и распад тканей клеток растений) и наступает *вторая фаза выпревания озимых.* Растения начинают расходовать белки, когда у них остается всего 2—4 % сахаров. Это происходит обычно в конце зимы и в период снеготаяния. Расход белков является опасным для жизни растений еще и потому, что выделяющееся при этом тепло создает благоприятные условия для развития микроорганизмов и роста мицелия различных грибков. Последние, быстро и мощно развиваясь на голодающих растениях, резко ускоряют расход белков и приводят к гибели сначала листьев, касающихся почвы, затем основания побегов, а в дальнейшем и узлов кущения озимых.

Период развития снежной плесени на растениях, повреждения и гибели от нее растений является завершающей *третьей фазой выпревания* озимых. При благоприятных условиях для развития мицелия грибков (температура под снегом около 0 °С и выше и

влажность воздуха около 90 %) гибель растений наступает в течение нескольких дней. Если условия для развития снежной плесени весной оказываются плохими (снежный покров быстро сходит, температура воздуха значительно повышается, а относительная влажность понижается), то поражаются только листья и частично побеги.

В. А. Моисейчик (1963) установлено, что показателями агрометеорологических условий, при которых происходит выпревание озимых культур, являются: 1) высота и продолжительность периода залегания на полях снежного покрова, 2) глубина промерзания почвы, 3) минимальная температура почвы на глубине узла кущения.

За основной показатель при оценке условий выпревания озимых культур принята продолжительность залегания на полях снежного покрова высотой $\geqslant 30$ см при глубине промерзания почвы < 50 см. Количество сохранившихся растений после выпревания в значительной степени зависит также от состояния посевов после прекращения вегетации осенью.

Наиболее часто урожайность озимых при выпревании снижается в результате гибели значительной части стеблей у перезимовавших растений. Между количеством погибших стеблей и растений при выпревании существует довольно тесная связь ($r = = 0{,}91 \pm 0{,}03$).

Количество стеблей на 1 м^2 на 10-й день после возобновления вегетации весной зависит от продолжительности пребывания растений под мощным снежным покровом при слабом промерзании почвы (рис. 22.1 *а*). Как видно из рис. 22.1 *а*, количество сохранив-

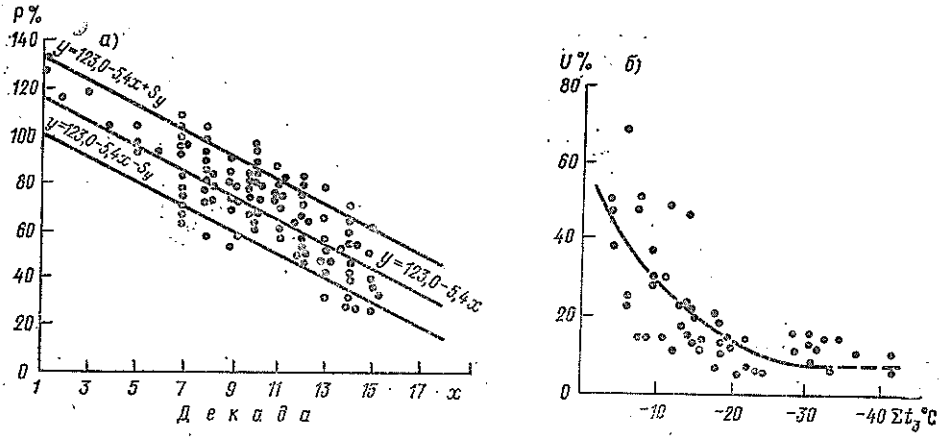


Рис. 22.1.

а) Зависимость количества стеблей у хорошо развитой озимой ржи весной P (% количества стеблей осенью) от продолжительности залегания на полях снежного покрова высотой $h \geqslant 30$ см (по В. А. Моисейчик, 1975).

б) Зависимость изреженности клевера весной U (%) от суммы минимальных (по декадам) температур почвы на глубине 3 см Σt_3 (по А. И. Страшной, 1988).

шихся за зиму стеблей у озимой ржи обратно пропорционально продолжительности залегания снежного покрова высотой $\geqslant 30$ см. При хороших условиях перезимовки, когда число декад со снежным покровом высотой $\geqslant 30$ см равно 8 и менее, количество стеблей весной у перезимовавших растений (независимо от степени их развития осенью) всегда больше, чем осенью.

Многолетние сеяные травы. Исследованиями А. И. Страшной (1988) установлено, что на изреженность трав весной также влияет продолжительность залегания снежного покрова и число декад с высоким снежным покровом. При этом повышенная изреженность трав (более 10 %) весной отмечается, если число декад с высоким снежным покровом составляет 10—11 и более.

Наиболее тесная связь изреженности посевов весной вследствие выпревания наблюдается с суммой минимальных температур почвы на глубине 3 см за зиму, что позволяет считать этот фактор определяющим в исходе зимовки трав в теплые многоснежные зимы (рис. 22.1 *б*).

Ожидаемую весной изреженность клевера первого года жизни, согласно И. И. Яшкиной (1982), можно рассчитать по уравнению

$$y = 9{,}47t_1 + 5{,}22K + 84{,}9, \qquad (22.1)$$
$$S_y = \pm 15\ \%,$$

где y — изреженность посевов клевера весной, %; t_1 — средняя за зиму минимальная температура почвы на глубине залегания корневой шейки, °С; K — коэффициент кустистости растений после прекращения вегетации.

22.2. Вымокание растений

Вымокание растений озимых культур (В. А. Моисейчик, 1975) наиболее часто происходит на тяжелых суглинистых почвах в результате затопления их талыми водами весной. Кратковременное переувлажнение почвы и даже затопление растений в течение 5—10 дней осенью и зимой не вызывают гибели растений. Н. Н. Яковлев (1966) считает, что наибольший вред растениям причиняется при затоплении одних и тех же посевов осенью и весной.

Затопленные растения попадают в условия, при которых у них нарушаются процессы дыхания и фотосинтеза.

И. И. Туманов (1940) считает, что основной причиной гибели растений при вымокании является недостаток кислорода в переувлажненной почве. Семена осенью в такой почве погибают от удушья в течение 18—20 дней.

В результате экспериментальных исследований В. П. Мосолов (1938) пришел к выводу, что основной причиной гибели растений при вымокании является недостаток не кислорода, а углекислого газа (CO_2). По его мнению, растения сравнительно долгое время могут выдерживать недостаток кислорода и при затоплении преимущественно гибнут от спиртового самоотравления. Поэтому

усиление энергии обмена, связанное с увеличением потребности в CO_2, при свете и повышенной температуре ускоряет гибель растений. У затененных, затопленных растений озимых в его опытах почти приостанавливался рост, и разрушение хлорофилла шло медленнее. На свету погибло 10,1 % стеблей и 35,4 % листьев, а в тени — 7,4 % стеблей и 28,0 % листьев. Этим объясняется, очевидно, что затопленные под снегом растения почти совсем не погибают.

Устойчивость растений озимых культур к затоплению в осенний, зимний и весенний периоды представлены в табл. 22.1. Как видно из данных табл. 22.1, во все сезоны и фазы развития от начала прорастания семян до выхода в трубку озимые рожь и ячмень при затоплении погибали быстрее, чем озимая пшеница.

Таблица 22.1

Устойчивость растений озимых культур к затоплению в осенне-зимний и весенний периоды (по Е. Д. Остаплюку, 1977)

Период проведения опыта	Продолжительность затопления при 15...16 °С дни	Количество живых растений, %		
		пшеницы	ржи	ячменя
Фаза двух листьев	6	89,3	67,2	54,6
Окончание осенней вегетации	8	93,4	73,6	69,4
После второй фазы закалки	8	100	100	84,7
Возобновление весенней вегетации	4	78,6	42,4	36,6
Начало выхода в трубку	3	82,7	39,4	30,6

При вымокании погибают сначала листья, а затем корни и в последнюю очередь — узел кущения. Вымокание посевов, так же как и выпревание, происходит прежде всего в пониженных местах рельефа, у кустарников и опушек леса.

Наиболее сильное вымокание озимых наблюдается при переувлажнении почвы осенью и выпадении большого количества осадков зимой, глубоком промерзании почвы и позднем ее оттаивании весной. При этих условиях период затопления растений весной оказывается длительным и глубина затопления растений большой. Вымокание озимых в такие годы бывает на большей площади.

При неглубоком промерзании почвы, после длительного залегания на полях мощного снежного покрова, растения уже до затопления талыми водами истощаются в результате выпревания. Такие растения подвергаются вымоканию значительно быстрее и погибают в течение меньшего периода затопления. В этих случаях причиной гибели озимых культур следует считать не только вымокание, но и *выпревание*.

Затопление растений в осенний и зимний периоды менее опасно, чем в ранневесенний период, когда растения ослаблены и вышли

из состояния зимнего покоя. При затоплении растений на неполную высоту (верхняя часть растений находится над водой) изреженность посевов бывает слабее.

Изреженность озимых в результате вымокания в пониженных местах рельефа определяется по продолжительности периода с полным затоплением растений n и средней за этот период температуре $t_в$ (°С). Это уравнение, полученное В. А. Моисейчик (1975), имеет вид

$$\overline{U} = 3{,}50n + 5{,}20\bar{t}_в - 22{,}62, \qquad (22.2)$$

где $\overline{U}$ — изреженность озимых в результате вымокания, %.

22.3. Вредное влияние на растения притертой к почве ледяной корки

Основными факторами формирования ледяной корки на озимых посевах являются: температура воздуха, число дней с оттепелью и их интенсивность, высота снежного покрова, глубина промерзания и степень увлажнения почвы, количество жидких осадков, а также число ясных дней за зимний период и рельеф полей (В. А. Моисейчик, 1975).

Притертая к почве *ледяная корка* смерзается с кристаллами льда, возникшими в верхнем слое почвы. Растения при длительном пребывании под ледяной коркой, покрывающей всю их надземную массу, повреждаются, а иногда и полностью погибают. Степень изреженности растений, как показали исследования А. А. Окушко (1958), В. М. Личикаки и Р. М. Шелудяковой (1964), зависит от толщины притертой ледяной корки и продолжительности ее залегания.

Ледяная корка других видов — подвешенная и в виде прослойки в снежном покрове — для озимых, как правило, не опасна. Лишь в отдельных случаях после схода снежного покрова солнечные лучи проникают под подвешенную ледяную корку и под ней, как под линзой, вызывают ожоги листьев.

Растения озимых культур гибнут под притертой к почве ледяной коркой, вследствие нарушения газообмена (недостатка кислорода и избытка углекислого газа). Это экспериментально подтверждено З. Г. Ракитиной (1970), которая показала, что лед очень слабо проницаем для O_2 и CO_2. Растения, полностью вмерзшие в ледяную корку, не имеют свободного доступа кислорода, количество его в тканях уменьшается, а углекислота, из-за отсутствия выхода, накапливается. По данным З. Г. Ракитиной, за одни сутки в тканях растений под ледяной коркой содержание углекислого газа возрастает с 2 до 20 %, а кислорода уменьшается с 20 до 8 %.

Ледяная корка небольшой толщины, при которой часть листьев или все листья находятся над ней, гибели растений не вызывает. При частичном вмерзании растений в лед озимые меньше повреждаются, чем полностью находящиеся под ледяной коркой. В опытах Е. Д. Остаплюка (1977) повреждение и гибель растений

в вегетационных сосудах при полном вмерзании в лед и температуре —2... —4 °С начинаются через 12—18 дней (табл. 22.2).

Таблица 22.2

Устойчивость озимых культур к полному вмерзанию в лед при температуре — 3 С (по Е. Д. Остаплюку, 1977)

Культура	Количество живых растений, %		
	12 дней	20 дней	30 дней
Рожь	100	56,49	50,57
Пшеница	100	32,43	15,43
Ячмень	91,62	15,11	15,43

Ледяная корка усиливает вредное действие продолжительных морозов. Гибель растений под ней наступает при более высокой температуре воздуха. И. И. Туманов (1940) объясняет это механическим давлением на протопласт клеток не только льда, образующегося в межклетниках, но также самой ледяной корки.

Под снегом вредное действие притертой к почве ледяной корки значительно уменьшается или совсем исключается.

На степень повреждения ледяной коркой растений влияет их состояние осенью (фаза развития, высота, степень кустистости и состояние конуса нарастания). Слаборазвитые и переросшие растения, у которых конус нарастания находится в конце II или в начале III этапа органогенеза и имеет большую, чем обычно, длину, повреждаются ледяной коркой значительно сильнее.

Связь между средней толщиной ледяной корки и гибелью озимой пшеницы (в %) выражается следующим уравнением (В. М. Личикаки, 1974):

$$y = 5{,}4 + 2{,}8x + 1{,}8x^2, \qquad (22.3)$$

где y — изреженность (гибель) озимых посевов, %; x — средняя толщина ледяной корки за период, см. Средняя квадратическая ошибка уравнения равна $\pm$ 10,5 %.

22.4. Выпирание растений

Выпирание растений озимых культур (В. А. Моисейчик, 1975) происходит в результате неоднократного оттаивания и замерзания верхнего слоя почвы. При значительном переувлажнении верхнего слоя почвы, особенно при интенсивных оттепелях зимой, сопровождающихся дождями и резкими похолоданиями, в нем образуются ледяные прослойки. Они приподнимают верхний слой почвы и находящиеся в нем части растений. При наступлении следующей

оттепели или повышении температуры воздуха весной почва оттаивает и оседает, а узел кущения и часть корневой системы растений остаются над ее поверхностью. Наблюдались (И. И. Туманов, 1940) случаи выпирания растений на высоту до 12 см. В дальнейшем они подсыхают, обезвоживаются и погибают вследствие влияния различного рода неблагоприятных факторов (морозов, механических повреждений ветром, ледяной коркой и т. п.).

Наиболее интенсивно повреждаются растения в результате выпирания на переувлажненных, поздно вспаханных тяжелых, бесструктурных почвах в тех случаях, когда между обработкой почвы и севом озимых проходит не более 10—20 дней. Выпиранию на таких почвах особенно подвержены растения со слаборазвитой корневой системой. Хорошо раскустившиеся озимые, имеющие большое количество горизонтально расположенных в почве корней, подвергаются выпиранию значительно реже. Корневая система их поднимается и опускается одновременно с выпучиванием и оседанием верхнего слоя почвы. Выпиранию многолетних сеяных трав способствует их широкая корневая шейка, к которой очень хорошо примерзает ледяная прослойка. Растения озимых, имеющие только один вертикальный зародышевый корешок или небольшие придаточные корни, при оседании почвы не возвращаются в свое прежнее положение. Силы давления образовывающегося в почве льда действуют на корни таких растений в направлении, способствующем большему выталкиванию их из почвы.

22.5. Зимний нагрев и иссушение растений

Озимые культуры. Зимой и ранней весной при отсутствии на полях снежного покрова озимые культуры могут страдать от недостатка влаги. Зимняя засуха возникает при замерзшей почве, из которой подача воды к наземным частям растений практически невозможна (В. А. Моисейчик, 1975).

При отсутствии на полях снежного покрова, повышении температуры воздуха днем до 0 °С и более или при интенсивной солнечной радиации в ясные дни создается большой градиент температуры в различных частях растений. Это приводит к усиленному испарению воды листьями и высыханию их, так как вода из мерзлой почвы не может поступать в необходимом растениям количестве. По данным И. И. Туманова (1940), содержание воды в растениях озимой пшеницы может понижаться с 88 до 26 % в течение 15 дней. В результате обезвоживания листьев повышается концентрация клеточного сока, сильное пересыхание тканей приводит к коагуляции белков в клетках, происходит сначала высыхание надземных органов, а затем и узлов кущения, и растения погибают. Особенно страдают от недостатка влаги при таких условиях слаборазвитые озимые, с небольшой корневой системой, не достигающей талых слоев почвы. Зимняя засуха часто сопутствует выпиранию и выдуванию озимых культур.

Плодовые культуры. Зимнее иссушение плодовых и ягодных культур — широко распространенный вид зимних повреждений. По поводу повреждений деревьев и кустарников зимним иссушением существуют разные мнения. Одни авторы считают, что иссушение происходит в результате усиленного испарения воды растением при затруднении или полном прекращении подачи ее из замерзшей почвы. Другие объясняют зимне-весенние повреждения однолетних ветвей и почек усиленной водоотдачей, вызванной повреждением слабо подготовившихся к зиме побегов низкими температурами, либо резкой сменой температур.

Общим при этом является вывод о повреждении и гибели растений в результате их реакции на сложившиеся неблагоприятные условия зимовки из-за сильной транспирации и потери большого количества влаги.

Зимующее растение в течение дня освещается неравномерно, и различные его органы получают неодинаковое количество радиации. В предгорной зоне, по наблюдениям Г. Г. Белобородовой (1982), в январе—феврале на южную освещенную часть ствола (на уровне 50—70 см от почвы) в полдень поступает 568—935 Вт/м^2 солнечной радиации, что на 147—489 Вт/м^2 больше, чем на подстилающую поверхность (снег). Отраженная радиация в рассматриваемом случае составляла 38—82 %. Наибольшее количество отраженной радиации растения получают в дни и периоды, когда подстилающая поверхность — чистый свежевыпавший снег. По мере его загрязнения и уплотнения процент отражения уменьшается.

В зимние ясные дни северная сторона получает в 4—6 раз меньше энергии, чем южная. В зависимости от характера подстилающей поверхности (свежевыпавший, грязный снег, почва) на северную сторону плодового дерева поступает 98—202 Вт/м^2 солнечной радиации. По данным Л. К. Константинова (1974), в условиях Подмосковья ткани коры дерева с северной стороны получают радиации в два раза меньше, чем с южной.

В соответствии с количеством солнечной радиации, падающей на поверхность деревьев, меняется и температурный режим коры. Пример радиационного нагрева коры ствола яблони диаметром 19,2 см приведен на рис. 22.2.

Максимальный нагрев плодовых деревьев в зимне-весенний период наблюдается при достаточно мощном притоке прямой солнечной радиации, отсутствии ветра и высокой отражательной способности снежного покрова. Кроме того, степень нагрева зависит и от толщины ствола. Результаты измерений температуры коры на глубине 0,2 см у разных по толщине стволов и ветвей яблони приведены в табл. 22.3, из которой видно, что толстые части деревьев нагреваются сильнее, чем тонкие ветви. Это происходит потому, что тонкие ветви имеют большую удельную поверхность теплоотдачи и поглощенное ими тепло они быстро отдают в атмосферу.

Наиболее сильно нагреваются ткани у стволов плодовых деревьев диаметром 35—50 мм. Вследствие увеличения толщины

Таблица 22.3

Зависимость температуры коры (°С) от толщины ствола яблони (по Л. К. Константинову, 1985)

Сторона	Диаметр ствола, см						
	0,5	1,1	2,7	10,2	16,8	22,0	27,0
Солнечная	—0,6	6,2	13,5	23,3	27,7	29,8	31,2
Теневая	—1,3	—0,8	—0,5	—1,1	—1,5	—2,0	—2,0

коры у более толстых ветвей степень нагрева тканей прикамбиальной зоны постепенно понижается. Возникновение повреждений коры от резких колебаний температуры в ясные зимние дни наиболее вероятно на стволах плодовых деревьев диаметром 35—50 мм, что примерно соответствует 4—7-летнему возрасту деревьев яблони или груши (Л. К. Константинов, 1985).

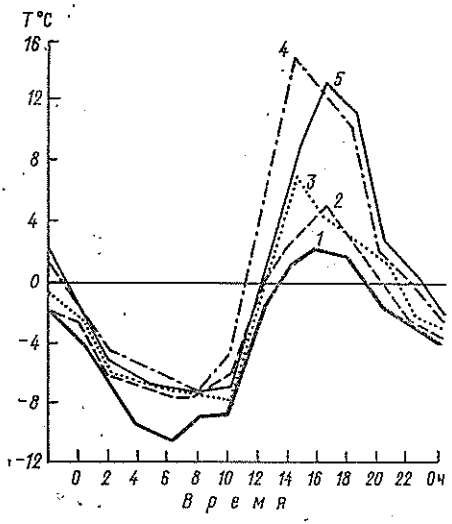


Рис. 22.2. Суточный ход температуры на поверхности коры ствола яблони; Московская обл., 26 марта 1967 г. (по Л. К. Константинову, 1985).

1 — температура воздуха; температура ствола: *2* — на северной стороне, *3* — на восточной, *4* — на южной, *5* — на западной.

Метеорологические условия, складывающиеся в зимы с оттепелями, обусловливают повышенную транспирацию растений и в результате способствуют зимнему иссушению.

По расходу воды в период зимовки плодовые культуры располагаются в следующем порядке (по мере возрастания): семечковые (яблоня) — 11 %, косточковые (слива, вишня, черешня) — 15—20 %, ягодные кустарники — 30—45 %.

Наиболее сильно транспирирующими являются смородина и особенно малина, у которой потери воды в 3—4 раза больше, чем у яблони. Снижение обводненности растений в зимний период происходит неравномерно по всем его частям. Наибольшие потери

влаги наблюдаются у однолетних веток, отсюда и большая повреждаемость их иссушением по сравнению с двух-трехлетними.

Повреждение и гибель надземной части растения от зимнего иссушения отмечается только при снижении обводненности тканей до определенного критического значения, которое неодинаково у разных видов растений и сортов.

По данным Г. Г. Белобородовой (1982), повреждения смородины (Алтайская десертная) наблюдались при влажности веток, составляющей в конце зимы 34—36 % сырой массы и ниже, у малины (Новость Кузьмина) при влажности 27—28 %, у яблони (Ранет, Апорт, Бурхардта) в возрасте не более 4—5 лет — 35 %, у вишни Любской — 38 %, у черешни (Багратион, Июньская ранняя) — 36—37 %.

Количественная зависимость между погодными условиями периода зимовки и состоянием растений можно выразить следующими уравнениями Г. Г. Белобородовой, 1982:

для смородины Алтайской десертной

$$y = 56{,}22 - 0{,}24x - 0{,}01x^2,\ S_{\bar{y}} = \pm 5{,}2; \qquad (22.4)$$

для слабоустойчивых к иссушению сортов яблони

$$y = 0{,}244 - 0{,}045x + 0{,}002x^2,\ S_{\bar{y}} = \pm 0{,}5. \qquad (22.5)$$

Здесь y — обводненность (%) однолетних веток на конец февраля для смородины и степень повреждения (баллы) для яблони; x — средняя испаряемость (мм) за январь—февраль; $S_{\bar{y}}$ — ошибка уравнения.

Семечковые и косточковые культуры устойчивее к зимнему иссушению и выдерживают большее напряжение неблагоприятных погодных условий, чем ягодные кустарники. Ветви малины отдают влагу быстрее и легче, чем ветви смородины, яблони, вишни, но выносят более глубокое обезвоживание тканей. По мере роста испаряемости, потери влаги ветвями возрастают и достигают значений, за которыми неизбежно следуют качественные изменения — повреждения.

22.6. Последствия зимних повреждений

Повреждения, вызванные истощением и частичным поражением органов или тканей растений зимой низкими температурами, длительным залеганием на полях мощного снежного покрова, ледяной коркой, затоплением посевов и другими неблагоприятными факторами, проявляются не только весной после схода снежного покрова с полей, но и значительно позже сроков возобновления весенней вегетации (через 15—20 дней и более).

При неблагоприятных зимних условиях чаще всего поражается надземная часть растений — листья и побеги. У некоторых побегов погибает также конус нарастания и зачаточные листья. Корневая система, как правило, сохраняется почти полностью.

Характер и степень зимних повреждений определяются агрометеорологическими условиями перезимовки. При вымерзании у полностью погибших растений все побеги имеют конус нарастания мутный, бурый, сморщенный, листья весной после оттаивания вследствие высыхания погибших тканей приобретают светло-бурый цвет. Если растение повреждено частично, то буреет и деформируется конус нарастания лишь у главного побега и у наиболее развитых боковых побегов. Корневая система (почти полностью) и конусы нарастания у молодых побегов, образовавшихся позже, сохраняются. Но у них, как и у побегов, вновь появившихся весной колос бывает короче, с меньшим количеством зерен.

У растений, поврежденных в результате выпревания, конус нарастания главного побега «израстает» — сильно вытягивается в длину, но не дифференцируется. В связи с этим он совсем не выколашивается или образует поврежденный укороченный колос.

Под притертой к почве ледяной коркой часть растений полностью погибает, у остальных растений листья, находящиеся над поверхностью льда, механически повреждаются ветром и отламываются, частично погибают побеги и корни, длительно находящиеся в корке. Механические повреждения побегов и корневой системы возможны также вследствие пыльных бурь. При вымокании у растений повреждаются не только надземные органы, но и корневая система.

Количество стеблей у сохранившихся хорошо развитых осенью растений озимой ржи Вятка при плохих условиях перезимовки уменьшается в среднем на 50 %, а у озимой пшеницы Мироновская 808 — на 20—40 %. Высота растений у сильно поврежденных зимой растений на 10—15-й день после возобновления вегетации весной бывает в среднем 6—8 см, у неповрежденных посевов 14—16 см.

В нечерноземной зоне при повреждении озимой ржи в результате выпревания под высоким снежным покровом ($h \geqslant 30$ см) количество стеблей у растений значительно уменьшается не только в зимний, но и в весенне-летний период.

Повреждение озимых посевов морозами, по данным Ф. М. Куперман, уменьшает количество выколосившихся растений на 20—50 %, величину колоса — на 20—40 % и массу зерна с одного растения — на 65—85 %.

В опытах И. И. Яшкиной и А. Я. Грудевой (1972), сильно поврежденные зимой морозами растения озимой пшеницы (при сохранении у них 25 % стеблей) весной быстро погибали. К уборке у менее поврежденных растений в среднем сохранялся один продуктивный стебель (у нормальных растений два стебля). Особенно отличались весной поврежденные растения от неповрежденных по площади листовой поверхности (за счет количества и размеров листьев). Отмечалось также большое отставание в формировании колоса. Конус нарастания у главных побегов отставал в развитии от неповрежденных растений на один этап органогенеза и до середины июня длина его составляла всего 30—40 % по сравнению

с размером у хорошо сохранившихся растений. Урожай озимой пшеницы в результате зимних повреждений и отставания в развитии весной и летом был равен 30—60 % урожая хорошо перезимовавших растений.

Установлено, что выход в трубку поврежденных в результате длительного (15—30 дней) затопления талыми водами растений наступает на 5—10 дней позже, чем контрольных. Отставание на 3—5 дней наблюдается также в наступлении фазы колошения. При повышенном увлажнении почвы сроки наступления восковой спелости озимой ржи, поврежденной при затоплении ее весной, задерживается на 6—10 дней, а в сухие годы — в среднем на 2 дня.

Продуктивность растений на затопляемых участках значительно ниже. При продолжительности затопления менее 10 дней озерненных стеблей наблюдается на 10—20 %, а при более длительном затоплении (20 дней) — на 30—40 % меньше, чем у растений на незатоплявшихся участках этого же поля. Масса зерна была также на 30 % меньше, чем у контрольных растений.

Биологический урожай в пониженных местах рельефа, где застой талых вод наблюдается в течение 10 дней, на 15—25 %, а при 20—25-дневном затоплении — на 50—70 % меньше, чем на контрольных возвышенных участках.

Таким образом, неблагоприятные условия перезимовки приводят к отставанию в развитии и росте поврежденных растений весной и летом, замедляют процессы формирования зачаточного колоса. У поврежденных растений весной может отмечаться рост и развитие (вытягивание нижнего междоузлия стебля). Однако в дальнейшем дифференциация генеративных органов у них проходит ненормально: нарушаются процессы формирования колоса, недоразвиваются цветки и приостанавливается рост верхних междоузлий главного стебля. Такие растения даже при оптимальных агрометеорологических условиях весной и летом значительно снижают продуктивность.

Последействие зимних повреждений сказывается на коэффициенте кустистости, высоте растений, числе выколосившихся растений, размерах колоса, числе и весе зерен в нем, а в конечном итоге на их продуктивности.

Глава 23
ПОГОДА И ВРЕДИТЕЛИ. БОЛЕЗНИ РАСТЕНИЙ

23.1. Влияние факторов внешней среды на развитие и размножение вредителей растений

Один из самых опасных вредителей овощных, пропашных культур, многолетних трав и пастбищ — *луговой мотылек*. Он теплолюбив, поэтому основной ареал его вредоносности расположен на

юге нашей страны — в степных и лесостепных районах, в более северных регионах интенсивные подъемы его численности наблюдаются лишь в годы с теплым вегетационным сезоном. Луговой мотылек холодостоек, во время зимовок его гусеницы выносят температуру до —30 °С, в связи с чем он широко распространен не только в Европейской, но и в Азиатской частях нашей страны. Мотылек — гигрофил и при высокой влагообеспеченности среды способен быстро увеличивать плотность популяций и площади их расселения.

Основным фактором динамики численности лугового мотылька является его плодовитость, которая находится в тесной зависимости от уровня температуры и влажности. Установлено (Л. А. Макарова, Г. М. Доронина, 1988), что вылет бабочек перезимовавшего поколения лугового мотылька начинается при прогревании воздуха до 15 °С, а массовый лет — при установлении температур порядка 17 °С. Эта связь прослеживается лишь при достаточной влажности среды (ГТК $>$ 0,9) в период окукливания перезимовавших гусениц, причем в отдельные годы интенсивный лет бабочек начинается даже на 10—15 дней раньше указанных сроков. В условиях засушливой весны (ГТК $<$ 0,6) бабочки перезимовавшего поколения появляются позже устойчивого перехода температуры воздуха через 17 °С на 10—15 дней и более.

Сроки массового лета его перезимовавшего поколения зависят не только от ГТК периода окукливания, но и от влагообеспеченности среды во время снижения температуры воздуха до 12 °С (порог развития вида) осенью предшествующего года и от высоты снежного покрова в феврале — марте.

Выделены три периода формирования плодовитости лугового мотылька. Первый период — питание гусениц. В это время происходит рост жировой ткани и накопление жировых резервов, от запаса которых зависит будущая плодовитость самок. Наибольшая упитанность гусениц и последующая высокая плодовитость бабочек наблюдаются при средней суточной температуре 19... 22 °С.

При температуре ниже 19 °С часть гусениц замедляет развитие, уходит в диапаузу и реактивируется, как правило, лишь весной следующего года.

При средней суточной температуре выше 25 °С, когда воздух в травостое прогревается днем до 30... 35 °С и более, снижается активность питания вредителя, он мигрирует в поисках оптимальных условий микроклимата, что неизбежно приводит к снижению плодовитости мотылька и его последующей численности.

Второй период — окукливание гусениц. Оптимальные условия для прохождения стадии куколки создаются при ГТК = 0,9... 1,9; неблагоприятные — при ГТК $<$ 0,9 и $>$2, экстремальные — при ГТК $<$ 0,5 и $>$2,5.

Реализация потенциальной плодовитости лугового мотылька наиболее полно осуществляется при температуре 20... 25 °С и ГТК периода массового лета бабочек $>$0,9. При таких условиях в размножении участвует не менее 70 % самок. Откладка яиц

начинается через 4—6 дней после их вылета, а фактическая плодовитость составляет в среднем 150—250 яиц на одну особь. При неблагоприятной тепло- и влагообеспеченности среды сокращается количество самок, откладывающих яйца (при ГТК = 0,6... 0,8 до 40—50 %, при ГТК ниже 0,5 до 10—20 %); период их созревания затягивается до 15—20 дней, а одна бабочка оказывается способной отложить не более 50 яиц.

При температуре ниже 17 °С отмечается почти полное бесплодие самок и резкое сокращение численности популяции.

Озимая совка — также широко распространенный и массовый вредитель всех овощных и пропашных культур. Вместе с тем при интенсивном подъеме численности она активно расселяется и на посевы озимых зерновых культур, вызывая их изреженность на 30—50 % и более.

Озимая совка принадлежит к умеренно теплолюбивым и достаточно влаголюбивым видам. Взрослые гусеницы выдерживают температуру до —11 °С. В зависимости от климатических особенностей зон ареала вредитель развивается в одном поколении (северные и северо-восточные районы ЕЧС), в двух поколениях (Украина и Молдова, Центрально-Черноземный район, Северный Кавказ, Среднее и Нижнее Поволжье) и в трех поколениях (Закавказье и Средняя Азия). Озимая совка отличается высоким биотическим потенциалом и при благоприятных экологических условиях быстро размножается на большой территории, образуя очаги со средней плотностью 20—40 гусениц на 1 м^2 (максимально до 100 и более). При теплой и умеренно влажной погоде (температура воздуха выше 15 °С, ГТК = 0,9... 1,9) для вылета бабочек перезимовавшей генерации достаточные суммы эффективных температур составляют около 200—210 °С.

Оптимальные условия для развития гусениц и накопления жировых запасов складываются при средней суточной температуре около 19... 25 °С. В этом случае потенциальная плодовитость бабочек может достигать 1,0—1,5 тыс. яиц на одну особь. Отрицательное воздействие оказывает температура ниже 16 °С в сочетании с обильными осадками, при которых плодовитость самок не превышает 100—150 яиц.

Неблагоприятная обстановка для нажировки гусениц складывается также при средней суточной температуре выше 25 °С, когда происходит увеличение числа бесплодных самок. Температура выше 30 °С ускоряет гибель гусениц от вирусной инфекции.

Благоприятные условия для прохождения стадии куколки складываются при ГТК = 0,9... 1,5. Избыточная влажность (ГТК > 2,5) увеличивает смертность куколок от грибной инфекции.

Благоприятные условия для размножения озимой совки создаются при температуре 18... 25 °С и ГТК = 1,1... 1,5. В такой ситуации откладка яиц проходит в сжатые сроки, а фактическая плодовитость одной самки составляет в среднем 500—800 яиц. При температуре ниже 16 °С и ГТК < 0,5 период созревания бабочек

затягивается до 15—20 дней и плодовитость снижается до 100—150 яиц. Низкая влагообеспеченность среды в сочетании с высокой температурой вызывает высыхание уже отложенных яиц и гусениц младших возрастов.

Ареал вредоносности *восточной луговой совки* в пределах страны ограничен сравнительно небольшой территорией, включающей южные районы Хабаровского края, Амурской области, западные районы Приморского края и Южного Сахалина. Она является здесь основным вредителем колосовых культур, кукурузы и пастбищ.

Наиболее благоприятные условия для нарастания ее численности создаются в годы с прохладным дождливым летом, особенно, если им предшествовали периоды засушливой погоды.

Исследования Л. И. Сверловой и Л. П. Бергер (1980) показали, что в условиях Дальнего Востока, Китая и Японии главной причиной массовых размножений вредителя служат миграции бабочек, переносу которых способствуют воздушные потоки циклонического происхождения.

Для рассматриваемого региона характерна активная циклоническая деятельность, которая в весенне-летний период направлена в большинстве случаев с юга на север. Она способствует интенсивному переносу на эту территорию луговой совки из постоянных очагов ее размножения. Интенсивность лёта бабочек и последующая плотность вредящих гусениц зависят от частоты прохождения циклонов и характера давления в их центральной зоне. Один-два циклона с давлением в центре 985—990 гПа обеспечивают формирование обширных очагов с плотностью гусениц 50—100 и более на 1 м^2 на фоне общей высокой их численности (10—30 экз/м^2). Максимальная численность может достигать 200—300 особей.

Высокие температуры (до 35 °С и более) и дефицит влаги (ГТК $<$ 0,7) приводят к снижению плодовитости самок и засыханию уже отложенных яиц; холодная дождливая погода (ГТК $>$ $>$ 2,5) способствует интенсивному развитию эпизоотий, смыву и вымоканию отродившегося потомства.

Вредная черепашка повреждает зерновые злаки, особенно пшеницу. Основной ареал ее вредоносности расположен в предгорной, степной и лесостепной зонах. Распространена на территории Европейской и Азиатской части. Вердная черепашка — теплолюбивый вид, при температуре —7 °С начинается гибель зимующих насекомых.

Весь ее жизненный цикл делят на два этапа — активный и пассивный. Активный этап включает следующие периоды: прилет перезимовавших клопов, откладка яиц, развитие личинок, питание клопов нового поколения. Пассивный этап условно подразделяют на три периода: «летовка», собственно зимовка и восстановительный. Первый период начинается с момента массового отлета черепашки в места зимовки и завершается во время устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 10 °С в сто-

рону ее понижения. Второй период — холодное оцепенение клопов протекает при отрицательных температурах. Он продолжается до весеннего потепления и прогревания лесной подстилки до 6... 7 °С. С этого времени начинается третий период, когда у перезимовавших клопов возобновляются обменные процессы. Завершается он при устойчивом переходе температуры воздуха через 12... 15 °С массовым перемещением черепашки на поля зерновых культур и переходом ее к активной жизнедеятельности.

Сроки прилета клопов на посевы зерновых культур зависят от количества «критических» декад за зиму, высоты снежного покрова в феврале — марте и ГТК месяца, предшествующего вылету. Критическими считаются декады со средней температурой воздуха ниже —7 °С и высотой снежного покрова, численное значение которой не больше уровня декадной температуры. Подобные условия приводят к вымерзанию вредителя.

После теплой или многоснежной зимы (менее 3 критических декад) и влажной весны (ГТК = 1,1... 2,0) массовый вылет черепашки происходит при устойчивом переходе средней суточной температуры воздуха через 12... 13 °С; при неблагоприятных условиях перезимовки и сухой или избыточно влажной весне (ГТК порядка 0,7—1,0 и более 2) массовый вылет черепашки наблюдается при 13... 14 °С.

Влияние температуры сохраняется и в период размножения. При средней суточной температуре воздуха около 15 °С самки откладывают в 2,0—2,5 раза меньше яиц, чем при температуре 23... 25 °С. При преобладании теплой и сухой погоды (ГТК менее 1,0, оптимально — менее 0,7) создается благоприятная обстановка для потенциальной плодовитости и сохранения яиц. При теплой сухой весне период яйцекладки длится 20—25 дней, а число яиц, отложенных в эффективный период, составляет не менее 60—70 %. Все это обеспечивает высокий коэффициент размножения вредителя (10—15 и более) и нарастание его численности.

При холодной дождливой погоде во время лёта и размножения вредителя (ГТК более 1,0, экстремально — более 1,5) плодовитость значительно снижается, продолжительность откладки яиц удлиняется до 40—50 дней, а общее их количество не превышает 20 %. При таких условиях отмечается массовая гибель первых кладок, а новое поколение формируется в основном за счет яиц, появившихся в более поздние сроки. В результате сокращается коэффициент размножения вредителя (до 5 и менее) и общий уровень его численности.

Благоприятная обстановка для развития личинок складывается при средней температуре воздуха за период отрождение — окрыление выше 19,5 °С, оптимальная — при температуре выше 20,5 °С. В таких условиях личинки развиваются дружно, в сжатые сроки (35—40 дней), благодаря чему большая часть особей успевает окрылиться до начала массовой уборки хлебов. Особенно неблагоприятные условия для вредной черепашки создаются при средней температуре периода отрождение — окрыление ниже 18,5 °С. В этом

случае к моменту уборки зерновых завершает развитие не более 30—40 % популяции, а среди зимующих клопов преобладают особи с плохим физиологическим состоянием, что приводит к большой гибели клопов уже в первые месяцы пассивной жизни.

Колорадский жук относится к числу наиболее опасных вредителей картофеля и других пасленовых культур. Основной ареал его распространения охватывает значительную территорию зоны возделывания товарного картофеля в стране. Все фазы развития колорадского жука (яйца, личинки, куколки, имаго — взрослые жуки) не отличаются высокой холодоустойчивостью (температура —7 °С в местах зимовки вызывает гибель большинства зимующих жуков, температура ниже —12 °С является для них летальной).

Весенний выход жуков из почв растянут по времени. Устойчивый выход совпадает с установлением средней суточной температуры воздуха, близкой к 10 °С (В. В. Вольвач, 1987).

Продолжительность периода созревания перезимовавших жуков (период от выхода до начала яйцекладки) определяется температурой воздуха и сроками выхода жуков из почвы. Она описывается следующим уравнением:

$$y = 94{,}6 + 0{,}221t^2 - 8{,}738t + 4{,}15\,\Delta\tau, \quad S_y = \pm 3{,}4 \text{ дня}, \quad (23.1)$$

где y — продолжительность периода созревания перезимовавших жуков, дни; t — средняя за период температура воздуха, °С; $\Delta\tau$ — показатель календарного срока выхода жуков из почвы в виде разности в часах между максимальной длиной дня (21 июня) и длиной дня на дату выхода жуков из почвы; S_y — ошибка уравнения.

Продолжительность развития яиц, личинок и куколок колорадского жука определяется в основном температурой воздуха. Наиболее благоприятные условия для развития вредителя создаются при температуре более 20 °С, но не выше 25... 26 °С, когда отмечается минимальная продолжительность периода развития поколения — до 29 дней. С понижением температуры продолжительность развития увеличивается и при 14... 15 °С достигает 60—68 дней. Анализ показал, что зависимость продолжительности периода развития яиц, личинок, куколок и поколения в целом от температуры воздуха с достаточной степенью точности можно выразить уравнениями параболы второго порядка. В табл. 23.1 приведены уравнения связи вида

$$y = at^2 - bt + c \quad (23.2)$$

и их статистические характеристики для основных фаз и периодов развития, сведения о сроках развития которых имеют практическое значение.

Колорадский жук относится к видам, способным за один вегетационный период давать от одного до трех поколений. Для созревания жуков летних поколений большое значение имеет продолжительность светового дня. Объясняется это тем, что жуки

Таблица 23.1

Уравнения для расчета основных фаз развития жука (по В. В. Вольвачу, 1975)

Фаза и период развития	Коэффициенты уравнения связи			$\pm S_y$, дни	Температурный предел, °С
	a	$-b$	c		
Яйцекладки (O_v)	0,109	—4,92	61,4	1,9	12...26
Личинки ($Л$)	0,135	—6,51	91,8	2,7	13...25
Куколки ($Р$)	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

восприимчивы к световой фазе. В связи с этим продолжительность периода созревания молодых жуков определяется не только температурой воздуха, но и длиной дня. В зависимости от сочетания и значения указанных факторов продолжительность периода изменяется от 6 до 20 и более дней. Следует отметить, что при коротком дне (15 ч и менее) и температуре около 20 °С и ниже интенсивность яйцекладки бывает очень низкой, и практического значения в увеличении численности или вредности эта часть популяции колорадского жука не имеет. Для расчета и прогноза сроков созревания молодых жуков для районов, где второе поколение вредителя успевает полностью завершить цикл своего развития (юг Украины, Молдова, Северный Кавказ) можно использовать уравнение (В. В. Вольвач, 1987):

$$y = 79{,}9 - 0{,}46t - 0{,}062\tau, \quad S_y = \pm 2{,}6 \text{ дня}, \qquad (23.3)$$

где t — средняя за период температура воздуха, °С; τ — длина дня (в минутах) на дату выхода жуков из почвы.

Оптимальные условия для жизнедеятельности имаго колорадского жука складываются при температуре около 25 °С и относительной влажности воздуха 60—75 %. Максимальное количество яиц самка жука откладывает при температуре 23... 25 °С. Неблагоприятными для размножения условиями являются температура выше 27 и ниже 14 °С и влажность воздуха выше 80 и ниже 40 %.

23.2. Влияние факторов внешней среды на появление и развитие болезней растений

Основными факторами внешней среды, определяющими появление, распространение и развитие болезней, является тепло- и влагосодержание среды (Л. А. Макарова, И. И. Минкевич, 1977).

Чаще всего эти факторы действуют в совокупности и в зависимости от значения одного из них меняется реакция патогена на уровень другого. Определенное сочетание температуры и влажности обусловливает сохраняемость инфекционного начала до наступления вегетационного периода, возможность контакта паразита и хозяина, заражение растений, продолжительность инкубационного периода, плодовитость патогена, скорость рассеивания спор, степень поражения растений и проявления болезни и т. д. Остальные элементы среды (свет, ветер, атмосферное давление и др.) в большинстве случаев лишь корректируют действие основных факторов, играя самостоятельную роль только в определенные периоды жизнедеятельности патогенов.

Тепло. Температура среды является одним из основных факторов, определяющих возможность возникновения заболевания растений и степень его вредоносности.

Влияние температуры на агрессивность грибов особенно проявляется с момента заражения растения. При этом первым этапом, предшествующим инфекции и в значительной мере определяющим ее активность, является период прорастания спор. Прорастание спор паразитических грибов возможно в широких пределах температуры — от 0... 5 до 30... 35 °С. Отдельные виды грибов отличаются специфической реакцией на уровень этого показателя. Так, нижний температурный порог прорастания спор ржавчинных грибов составляет 1... 2 °С, патогенов, вызывающих корневые гнили пшеницы, пирикуляриоз риса, фитофтороз картофеля — соответственно 5... 6 °С, 6 °С и около 8 °С. Оптимальная температура прорастания спор возбудителя фитофтороза картофеля — около 10... 15 °С, корневой гнили пшеницы — 22... 28 °С и т. д. (табл. 23.2).

Температура среды регулирует и скорость прорастания спор. Так, споры милдью винограда прорастают при 2... 3 °С в течение 10,5—11 ч, при 10 °С — 3 ч, при 18 °С — 50—55 мин, при 22 °С — 30 мин, при 30 С — 1,5 ч. Споры большинства фитопатогенных грибов прорастают только при наличии капельной влаги или при влажности воздуха, близкой к насыщению.

Температура среды влияет не только на интенсивность развития болезни, но и на восприимчивость растений к ней. Повышенная восприимчивость возникает преимущественно у ослабленных растений.

С повышением температуры усиливается устойчивость хлебных злаков против желтой ржавчины. Этим видом ржавчины поражаются прежде всего те растения, которые подвергались действию пониженных температур.

Устойчивость пшеницы к линейной ржавчине, наоборот, возрастает при более низких температурах среды. Так, если в период всходов и кущения посевов преобладают температуры ниже 15 °С, то пшеница длительное время оказывается маловосприимчивой к этому заболеванию; при температуре указанного периода 20... 22 °С и выше устойчивость растений резко снижается.

Таблица 23.2

Температурные показатели развития некоторых возбудителей болезни (по Л. А. Макаровой, И. И. Минкевичу, 1977)

Стадия развития возбудителя болезни	Температура, °С		
	нижний предел	оптимум	верхний предел
Линейная ржавчина пшеницы			
Прорастание спор	2	21...23	26...31
Заражение растений	10	23...25	30
Развитие в тканях растения	2	20	—
Бурая ржавчина пшеницы			
Прорастание спор	2	20	32
Развитие в тканях растения	2	25	35
Желтая ржавчина пшеницы			
Прорастание спор	1	9...13	23
Заражение растений	5	15...20	26
Развитие в тканях растения	3	12...15	20
Гельминтоспориозная корневая гниль пшеницы			
Прорастание спор	6	22...28	36
Развитие в тканях растения	8—9	18...25	—
Спороношение	5	22...26	35
Офиоболезная прикорневая гниль пшеницы			
Развитие в тканях растения	5—8	18...28	> 30
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
Милдью винограда			
Прорастание спор	—	10...15	—
Развитие в тканях растения	8	25	33
Фитофтороз картофеля			
Прорастание спор	6—8	10...15	20
Образование ростковых трубочек	4	25	30

Степень развития болезни зависит от того, в какой мере рассеивание патогена совпадает с теми фазами развития растения-хозяина, в которые оно наиболее восприимчиво к болезни, и с условиями среды, благоприятными для заражения. Совмещение этих факторов широко варьирует во времени и пространстве в зависимости от климатических особенностей района и погодных условий года. Это и служит одной из основных причин зональной и сезонной изменчивости вредоносности болезней.

Температурные условия среды определяют плодовитость патогена — количество инфекционного начала и продолжительность его действия. Так, наиболее обильное образование спор у возбудителя гельминтоспориозной корневой гнили пшеницы наблюдается при температуре 24... 28 °С, а при температуре ниже 16 и выше 28 °С оно не происходит совсем; оптимум для появления спор фитофторы картофеля создается при 18... 22 °С, при 23... 26 и 3 °С образование спор идет очень замедленными темпами, при температуре ниже 2 и выше 27 °С — оно отсутствует.

У большинства видов грибов спорообразование становится возможным лишь при определенной влажности окружающей среды, чаще всего при наличии капельной влаги или высокой влажности воздуха.

Влага. Влияние влагосодержания среды на появление и развитие болезней сказывается также на всех этапах патологического процесса.

Влагообеспеченность среды в значительной мере определяет продолжительность сохранения жизнеспособности патогена. Конидии фитофторы картофеля при влажности воздуха около 20—40 % теряют жизнеспособность через 1—2 ч, при влажности воздуха 50—80 % — только через 3—5 ч. Увлажнение среды влияет на ритм развития микроорганизмов и поражаемых ими растений, регулируя тем самым продолжительность совмещения их критических периодов.

Решающее значение фактор влажности имеет лишь в течение сравнительно короткого периода — от начала прорастания спор до проникновения патогена в растение. В то же время воздействие этого фактора на процесс заселения растения-хозяина столь велико, что оно нередко превосходит влияние температурных условий среды. Для большинства фитопатогенных грибов заражение растений становится возможным лишь при высокой влажности среды их обитания. Так, споры фитофторы картофеля, мильдью винограда, стеблевой ржавчины пшеницы, парши яблони, антракноза смородины, плодовой гнили и др. прорастают только при наличии капельной влаги; для прорастания спор бурой и желтой ржавчины требуется 100 %-ная влажность среды; споры бурой ржавчины ржи и корончатой ржавчины овса могут прорастать лишь при 98—99 %-ном содержании влаги; споры возбудителя церкоспороза сахарной свеклы при 100 %-ной влажности прорастают через 24 ч, при 90 %-ной — через 34 ч, при 70—80 %-ной — не прорастают и через 48 ч.

В условиях недостаточной влагообеспеченности среды заражение растений и накопление инфекции либо совсем прекращается, либо идет очень замедленными темпами.

Некоторые патогены лучше развиваются при повышенном влагосодержании почвы. Это — возбудитель рака и парши картофеля, килы крестоцветных культур, снежной плесени озимых, корневой гнили хлебных злаков и др. Так, поражение капусты килой при влажности почвы 45 % полной влагоемкости не происходило совсем, инфекция наступала лишь при 60 % и постепенно нарастала по мере увеличения влагообеспеченности почвы.

Однако для большинства грибов обильное увлажнение почвы оказывается вредным, поскольку это связано с ухудшением ее аэрации, интенсивным развитием грибов-антагонистов и ускоренным прохождением критического для заражения периода развития растения-хозяина. Поэтому оптимальные условия для прорастания спор пыльной и твердой головни овса создаются при 30 %-ной влажности почвы, при 60 %-ной прорастание спор замедляется, а при 80 % почти не происходит. При влажности почвы 40 % ПВ твердая головня заражает 55,3 % растений, при влажности почвы 80 % — только 10,7 %. То же явление отмечено для твердой и стеблевой головни пшеницы, головни кукурузы и сорго.

И наконец, существует группа грибов, прорастание спор которых почти не лимитируется влагосодержанием среды и может происходить даже в условиях засухи. Наиболее характерными представителями этой группы являются мучнисторосяные грибы: возбудитель мучнистой росы пшеницы хорошо развивается в широких пределах относительной влажности воздуха — от 30 до 100 %, мучнистой росы винограда — от 8 до 100 %; мучнистой росы табака — от 60 до 100 % и т. д. Отмечены случаи прорастания их спор при влажности воздуха, близкой к нулевому значению.

В засушливых районах с низкими значениями средней суточной относительной влажности воздуха прорастание конидий и заражение растений наиболее активно происходит в ночные часы, когда влажность воздуха возрастает до 75—80 % и более и в течение 4—7 ч наблюдается обильное выпадение росы.

Таким образом, повышенная влагообеспеченность среды является необходимым условием заражения растений и развития болезни. При этом важно не только наличие влаги, но и определенная продолжительность ее сохранения на растениях. Продолжительность увлажнения определяет интенсивность поражения — чем дольше сохраняются капельки влаги, тем большим оказывается количество зараженных растений.

После заражения растений и проникновения патогена в ткани растения-хозяина развитие болезни протекает сравнительно независимо от влажности окружающей среды.

Значение фактора влажности вновь возрастает ко времени завершения инкубационного периода, заканчивающегося спороношением. У большинства грибов образование спор происходит лишь

в условиях высокой влагообеспеченности среды. Особенно это относится к пероноспоровым грибам. Так, массовое спорообразование у возбудителя фитофтороза картофеля наблюдается при наличии капельной влаги в течение 4—5 ч, при относительной влажности воздуха ниже 75 % споры не появляются совсем.

Значение фактора влажности в развитии болезней определяется температурными условиями окружающей среды. При высокой температуре наибольшее количество зараженных растений наблюдается в условиях повышенной влажности среды; с уменьшением температуры происходит закономерное снижение оптимума влажности и максимальное количество больных растений отмечается при более низких значениях этого показателя.

Влияние других факторов среды более ограничено и локально. Их воздействие проявляется лишь на отдельных этапах развития патогена или в специфических условиях его существования. Из таких факторов наибольшее значение имеют свет и ветер.

Свет. Воздействие света на течение инфекционного процесса начинает сказываться еще до заражения растений.

Период заражения состоит из двух фаз, различающихся между собой по реакции на световой фактор. Первая из них — собственно прорастание спор, протекает в большинстве случаев независимо от наличия и интенсивности света; вторая — после прорастания спор, проходит наиболее активно при повышенной освещенности. Положительное действие света сказывается также на скорости развития патогена в растении-хозяине. Особенно четко это проявляется у ржавчинных грибов. Чем больше света, тем короче инкубационный период у линейной ржавчины пшеницы, желтой ржавчины ячменя, ржавчины льна и фасоли и т. д. Преобладание облачной погоды увеличивает продолжительность инкубационного периода ржавчины на злаках в среднем на 7—8 дней и более. Это сокращает число генераций гриба и снижает тем самым интенсивность поражения растений.

Однако основное значение света в развитии болезней состоит в формировании восприимчивости растений к заражению. Многие грибы, в том числе ржавчинные и мучнисторосяные, живут за счет непосредственных продуктов фотосинтеза. В условиях интенсивного освещения в растениях активизируются процессы ассимиляции, углеводного и белкового обмена, что в свою очередь стимулирует развитие паразитирующих на них патогенов. Заражение растений не происходит, если во время инфекции и в течение последующих 48 ч свет отсутствует. Наиболее интенсивно поражаются ткани и органы с повышенной энергией фотосинтеза, этиолированные растения не поражаются совсем или поражаются очень слабо. Указанная зависимость сохраняется и в отношении спороношения грибов.

Ветер. Ветер выступает одним из основных факторов распространения болезни главным образом путем переноса спор. Содержание спор в воздухе и их рассеивание имеют сравнительно четко выраженный сезонный и суточный ход. Наибольшее количество

спор в воздухе отмечается летом и осенью, в зимний период оно резко сокращается. Это связано с сезонным развитием грибов.

23.3. Моделирование жизненного цикла развития вредоносных организмов и скорости инфекционного процесса

Модель развития колорадского жука. Эта модель впервые была предложена В. В. Вольвачем (1979). Ее отличительной особенностью является учет физических факторов среды и их влияния на динамику численности вредителя и соответственно на основные характеристики жизнедеятельности особей — продолжительность развития, плодовитость и гибель за период активной

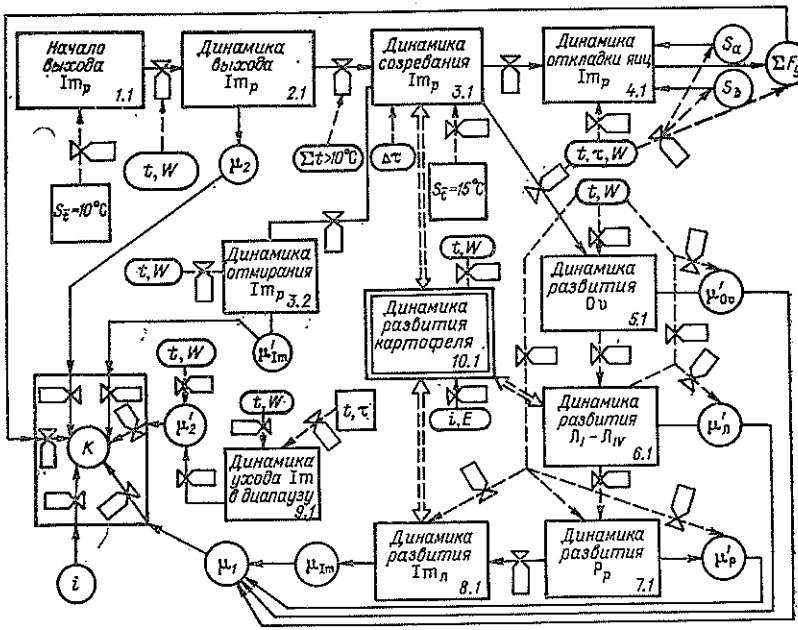


Рис. 23.1. Блок-схема концептуальной модели развития и динамики численности колорадского жука (по В. В. Вольвачу, 1987).

жизнедеятельности и зимовки. В онтогенезе вредителя рассматриваются четыре фазы: жуков (I_m), яиц (O_v), личинки (четыре возраста, $Л$) и куколок (P).

Блок-схема модели развития колорадского жука приведена на рис. 23.1. Для построения блок-схемы модели использовались обозначения системной динамики Форрестера. На схеме приняты следующие обозначения: прямоугольники — фазы развития колорадского жука; эллипсы — входные параметры внешней среды; круги — внутренние параметры модели; сплошные линии — переходы из одной фазы развития в другую; пунктирные линии — воздействия

параметров внешней среды; двойные пунктирные линии — воздействия вредителя на кормовое растение и кормового растения на вредителя; вентильные знаки — скорости перехода из одной фазы в другую под влиянием факторов среды и корма; квадраты — константы факторов среды и популяции.

Изменения численности популяций в два последовательных момента размножения можно выразить уравнением И. Д. Белановского (1936):

$$N_{t+1} = N_t O_i \left(1 - \frac{\theta_1}{100}\right)\left(1 - \frac{\theta_2}{100}\right) \ldots \left(1 - \frac{\theta_n}{100}\right), \quad (23.4)$$

где O — число яиц, отложенных одной самкой; i — половой индекс; $\theta_{1, 2, \ldots, n}$ — процент смертности особей под действием 1, 2, ..., n факторов.

В связи с тем, что в природных условиях трудно расчленять действие различных факторов на смертность, коэффициенты $\theta_{1, 2, \ldots, n}$ целесообразнее рассматривать как проценты гибели особей на различных стадиях их развития — яиц, личинок, куколок, имаго, а также за различные периоды жизнедеятельности — онтогенеза и зимовки.

Фундаментальным свойством, присущим любой популяциии и характеризующим ее способность к размножению, является приспособленность $[\omega(t)]$. Она определяется как удельная скорость роста численности N или как среднее число потомков, произведенных одной особью в единицу времени t:

$$\omega(t) = \frac{1}{N}\frac{dN}{dt}. \quad (23.5)$$

В случае исследования динамики не в непрерывном, а в дискретном времени приспособленность определяется как отношение ее размеров в последовательные моменты времени:

$$g(k) = \frac{N(k+1)}{N(k)}, \quad (23.6)$$

где g — приспособленность; k — момент времени, $k = 1, 2, 3, \ldots, n$.

После деления обеих частей уравнения (23.4) на N_t в левой его части получаем величину, являющуюся, согласно (23.6), показателем приспособленности популяции, динамика которой рассматривается в дискретном времени.

В том случае, если входящие в правую часть величины выражены в виде функций соответствующих факторов, отношение N_{t+1}/N_t может рассматриваться как функция, определяющая зависимость скорости роста популяции от всех влияющих на него факторов.

Применительно к колорадскому жуку уравнение изменения его численности представлено (В. В. Вольвач, 1979) в виде:

$$\frac{N_{t+1}}{N_t} = K = \int_{t_0}^{t_1} F(x_i)\, d\tau \left(1 - \frac{\mu_1(C)}{100}\right)\left(1 - \frac{\mu_2(z)}{100}\right) i, \quad (23.7)$$

где N_{t+1} и N_t — численность популяции вредителя в два последовательных момента размножения; $\int_{t_0}^{t_1} F(x_i)\,d\tau$ — средняя суммарная плодовитость одной самки как функция метеорологических факторов и длительности развития генерации; $\mu_2(z)$ — средний суммарный процент гибели особей за период развития генерации как функция погодных условий; i — суммарный процент гибели имаго за период зимовки как функция физиологического их состояния; i — половой индекс.

В этом случае показатель K можно рассматривать как экологический коэффициент размножения, численно равный приспособленности популяции в дискретном времени. Выражение (23.7) представляет собой обобщенную модель для описания изменений численности вредителя под влиянием колебаний метеорологических условий, в которой структурно объединены подмодели, описывающие основные характеристики динамики — размножение и гибель — также в связи с метеорологическими условиями.

Моделирование жизненного цикла вредителя начинается с выхода перезимовавших жуков из почвы. Динамика выхода имаго в конкретных погодных условиях достаточно удовлетворительно аппроксимируется уравнением

$$\gamma_\tau = \frac{1}{1 + e^{5{,}42 - 7{,}73\tau}}, \qquad (23.8)$$

где γ_τ — выход жуков из почвы в относительных единицах; τ — время в относительных единицах.

В качестве начала выхода принимается дата устойчивого перехода температуры воздуха через 10 °С, после которой ведется подсчет суточных сумм эффективных температур и по уравнению (23.8) определяется момент начала массового выхода имаго, который совпадает с максимумом первой производной зависимости (23.8).

С момента начала массового выхода имаго из почвы и до его окончания ($\tau_1 = 0{,}50$; $\tau_2 = 1{,}0$) большое значение в динамике численности вредителя играют миграции жуков, определяющие скорость и интенсивность заселения вредителем посевов картофеля в текущем вегетационном сезоне. Для оценки интенсивности миграций в это время используются срочные или максимальные значения температуры воздуха. Интенсивность и скорость заселения пропорциональны числу дней с благоприятными для полетов жуков условиями.

Скорость созревания жуков — суточные проценты развития — рассчитывается по преобразованному уравнению (23.1)

$$y^* = \frac{100}{0{,}221t^2 - 8{,}738t + 4{,}15\,\Delta\tau + 94{,}6},$$

где y^* — скорость развития, %.

В качестве начала откладки яиц принимается дата накопления суммы суточных процентов развития, равной 100 % (S_{ov}). При

нормальных сроках посадки картофеля, т. е. с момента перехода температуры почвы на глубине 10 см через 7 °С, всходы появляются раньше дат начала откладки яиц жуками массового выхода. В связи с этим срок их созревания может считаться началом периода продуктивной яйцекладки (S_{Ov}). К этому времени основная масса физиологически однородных имаго успевает выйти из почвы, расселиться на посадки картофеля текущего года и подготовиться к размножению. Дальнейшее поведение жуков и их размножение определяется плотностью заселения и погодными условиями. При плотности заселения имаго не выше 2 экз/м^2 интенсивность откладки яиц определяется уровнем температуры, влажностью воздуха и длиной дня. В это время картофельные растения находятся в фазе репродуктивного роста и имеют для вредителя максимальную питательную ценность.

Уравнение связи декадных сумм плодовитости самок колорадского жука с температурой и длиной дня имеет вид

$$\sum_{10} F_i = 4{,}87t_i + 156{,}7\tau_i - 4{,}77\tau_i^2 - 1313, \qquad (23.9)$$

$$R = 0{,}73,$$

где $\sum_{10} F_i$ — сумма яиц за i-ю декаду, t_i — средняя за i-ю декаду температура воздуха, τ_i — длина дня на начало i-й декады.

Расчет декадной плодовитости самок колорадского жука ведется по уравнению (23.9) с учетом температурных пределов яйцекладки. С этой целью программой предусмотрен расчет длины дня на дату начала массовой откладки яиц и последующие дни через каждую декаду. В качестве внутренней константы при расчетах принимается широта гидрометстанции.

Суммарная плодовитость для модели (23.7) вычисляется по выражению

$$\sum F_{\text{пр}} = \sum_{S^{*}_{O_v}}^{S^{**}_{O_v}} \sum_{10} F(t, \tau) \qquad (23.10)$$

как сумма декадных сумм яиц, откладываемых за период продуктивной яйцекладки.

Понятие продуктивной яйцекладки вводится из следующих соображений. Как указывалось раньше, самки колорадского жука откладывают яйца на протяжении довольно длительного периода времени, однако не из всех яйцекладок могут развиваться имаго, способные к перезимовке. Поэтому часть яиц, в ряде случаев весьма значительная, не играет никакой роли в увеличении численности вредителя в следующем году. Следовательно, продуктивная плодовитость всегда меньше общей. Для учета этой особенности в (23.7) и введены пределы $S^{*}_{O_v}$ и $S^{**}_{O_v}$. Предел $S^{*}_{O_v}$ зависит от срока выхода перезимовавших жуков и продолжитель-

ности их созревания. Предел $S^{**}_{o_v}$ является показателем конца периода продуктивной яйцекладки и определяется как дата той яйцекладки, из которой имаго появляются до перехода осенью температуры воздуха через 12 °С. В этом случае период преддиапаузного питания составит 10—15 дней и часть имаго сможет подготовиться к переживанию зимнего периода.

Расчет продолжительности развития полной генерации ведется по преобразованному уравнению (23.2) для имаго

$$y^* = \frac{100}{0{,}378t^2 - 18{,}54t + 253{,}7}.$$

При этом для получения осредненной продолжительности развития генерации в пределах временного интервала от $S^*_{o_v}$ до $S_{12\,°C}$ расчет ведется с последовательным сдвигом на одну декаду.

Осредненная продолжительность развития генерации ($O_v - Im_л$) вычисляется по выражению

$$Q = \frac{y_{\tau_0} + y_{\tau_1} + \ldots + y_{\tau_n}}{n}, \qquad (23.11)$$

где $y_{\tau 0}$ — продолжительность развития генерации вредителя из яйцекладок, отложенных в дату $S^*_{o_v}$; $y_{\tau_1} \ \ldots \ y_{\tau_{n-1}}$ — продолжительность развития генерации из яиц, отложенных спустя 1, 2, ..., $n - 1$ декаду после даты $S^*_{o_v}$; y_{τ_n} — продолжительность развития генерации вредителя из яиц, отложенных в дату $S^{**}_{o_v}$.

Размеры суммарной гибели колорадского жука за период развития от яиц до имаго определяются условиями увлажнения и длительностью периода развития генерации:

$$\mu_1 = 34{,}54 \ln Q + 20{,}291 \ln \sum W - 141{,}0, \qquad (23.12)$$

$$R = 0{,}89, \quad S_{\mu_1} = \pm 5\ \%,$$

где μ_1 — процент гибели особей за осредненный период ($O_v - Im_л$); Q — осредненная продолжительность развития генерации; $\sum W$ — сумма осадков за осредненный период ($O_v - Im_л$).

Для определения числа гибнущих особей колорадского жука за период их развития от яиц до имаго вычисляют среднее количество осадков, выпадающих за один день периода от начала массовой яйцекладки ($S^*_{o_v}$) до перехода температуры воздуха через 12 °С осенью. Среднее суточное количество осадков умножается на среднюю продолжительность развития генерации и по уравнению (23.12) вычисляется средний процент гибели μ_1.

Гибель имаго за период зимовки, зависящая от физиологического их состояния, определяется по уравнению

$$\mu_2 = 74 - 5{,}6\,(t - 17{,}3), \qquad (23.13)$$

где μ_2 — процент гибели, t — средняя температура периода дополнительного питания жуков в пределах 14 ... 20,5 °С.

Вычисляются средние за 10 дней преддиапаузного питания имаго температуры воздуха от выхода первых жуков летней генерации до $S_{12\,°C}$ с последовательным сдвигом на одну декаду. Процент гибели жуков за период зимовки вычисляется по выражению

$$\mu_{2_{ср}} = \frac{\mu_{2,1} + \mu_{2,2} + \mu_{2,n}}{n}, \qquad (23.14)$$

где $n = 1, 2, \ldots, n$ — число декадных сдвигов дат выхода имаго летней генерации. При расчетах по средним многолетним значениям метеорологических величин в качестве показателя гибели за период зимовки принимается $\mu_2 = 60$ %.

Алгоритмом предусмотрено вычисление сроков развития личинок II и IV возраста из яиц, откладываемых в период интенсивной яйцекладки.

Даты появления указанных фаз развития рассчитываются по преобразованным уравнениям, приведенным в табл. 23.1; преобразование их выполняется таким же образом, как и уравнения (23.2). Период между датами $S_{л\,II}$ и $S_{л\,IV}$ является наиболее эффективным для проведения химических обработок.

На заключительном этапе расчетов проводится вычисление по выражению (23.10) показателя изменения численности вредителя — экологического коэффициента размножения K. Коэффициент K может интерпретироваться как показатель среднего числа особей, развивающихся от одной самки за время, равное промежутку между последовательными размножениями, т. е. за год. С известным коэффициентом ε (удельной скоростью роста популяции) показатель K связан соотношением $\ln K = \varepsilon$.

Из структуры модели и определения экологического коэффициента размножения следует, что могут быть теоретически определены узловые значения K, при которых динамика изменений относительной численности вредителя имеет качественно различный характер. Такими узловыми значениями являются: $K = 1{,}0$; $K > 1{,}0$, $K < 1{,}0$. Значения $K = 1{,}0$ указывают на то, что численность вредителя между двумя последовательными моментами размножения не изменилась и осталась на постоянном уровне; значения $K > 1{,}0$ характеризуют рост численности и ее интенсивность, а значения $K < 1{,}0$, наоборот, указывают на снижение численности и отражают интенсивность этого снижения.

Моделирование развития болезней растений. Условия погоды влияют на все течение заболевания растений, начиная от внедрения патогена и кончая появлением на поверхности пораженной культуры репродуктивных органов паразита.

Взаимодействие растения, патогена и среды Я. Планк (1936) предлагает называть треугольником болезни. При этом основным показателем воздействия этих факторов служит скорость инфекции, т. е. увеличение количества (или доли) пораженной ткани за

единицу времени. Скорость инфекции, как указывает Планк, суммирует все показатели, влияющие на инфекционный процесс, — генетическую устойчивость хозяина, его возраст, плотность растительного покрова, вирулентность[1] и агрессивность патогена, величину и форму репродуктивных телец, количество осадков, относительную влажность и температуру воздуха и ряд других.

Для определения скорости течения эпифитотий в научных исследованиях и практической деятельности применяется математическое моделирование. Оно позволяет оценить значение отдельных факторов в динамике болезни и определить влияние на них комплекса агротехнических и защитных мероприятий.

Одной из наиболее широко распространенных моделей, отражающих ход эпифитотии, служит модель Я. Планка

$$dx/dt = rx\,(1 - x), \tag{23.15}$$

где dx/dt — скорость увеличения болезни за единицу времени; x — количество (доля) больной ткани растения; t — время течения болезни; $(1 - x)$ — количество (доля) здоровой ткани, доступной для заражения; r — скорость инфекции.

В этой формуле принимается условно, что скорость инфекции r остается постоянной в течение всего времени наблюдения r, а образование спор, заражение растений и нарастание болезни происходят непрерывно. Однако в природе это положение может служить скорее исключением, чем правилом. Поэтому в уравнение, предложенное Я. Планком, необходимо вводить поправки, обусловленные воздействием на инфекционный процесс внешних факторов и прежде всего погоды.

Относительную скорость инфекции r_1 за конкретный промежуток времени $t_2 - t_1$ можно определить по формуле

$$r_1 = \frac{1}{t_2 - t_1}\left(\log_e \frac{x_2}{1 - x_2} - \log_e \frac{x_1}{1 - x_1}\right), \tag{23.16}$$

где $\log_e \frac{x_2}{1 - x_2}$ и $\log_e \frac{x_1}{1 - x_1}$ натуральные логарифмы отношения доли зараженной ткани к доле здоровой соответственно во время t_2 и t_1.

Скорость инфекции, вычисленную по этой формуле, характеризует ее усредненный показатель за рассматриваемый промежуток времени.

Погодные условия служат решающим фактором ежегодных колебаний интенсивности развития болезней растений. Один тип погоды способствует вспышке эпифитотии, другой — подавляет ее.

Моделирование влияния повреждения растений болезнями на формирование урожая. В основу моделирования влияния повреждения растений болезнями на формирование урожая (А. Н. По-

[1] Вирулентность — совокупность болезнетворных свойств микробов — возбудителей заразных болезней.

левой, 1979) положен тот факт, что внедрение паразита в ткани растения-хозяина вызывает многочисленные изменения в физиологических функциях растения. Фотосинтетическая активность листьев больных растений значительно снижается по сравнению со здоровыми. Снижение интенсивности фотосинтеза зависит от ряда факторов — фазы развития растения-хозяина, степени поражения, состояния растения при заражении. Изменения интенсивности фотосинтеза, как правило, не проявляются в инкубационный период. Однако с появлением видимых признаков повреждения интенсивность фотосинтеза резко снижается, в ряде случаев — значительно (до 32 %).

При моделировании фотосинтеза влияние инфекции на этот процесс может быть введено через изменение угла наклона и плато световой кривой фотосинтеза:

$$\Phi^I_{i\,\mathrm{inf}} = \frac{\Phi_{\max\,\mathrm{inf}} a_{\Phi i\,\mathrm{inf}} Q^I_\Phi}{\Phi_{\max\,i\,\mathrm{inf}} + a_{\Phi i\,\mathrm{inf}} Q^I_\Phi}, \qquad (23.17)$$

где $\Phi_{i\,\mathrm{inf}}$ — скорость фотосинтеза i-го органа пораженного инфекцией растения, мг CO_2/(дм^2·г); $\Phi_{\max\,i\,\mathrm{inf}}$ — скорость фотосинтеза i-го органа пораженного инфекцией растения при световом насыщении, мг CO_2/(дм^2·ч); $a_{\Phi i\,\mathrm{inf}}$ — начальный наклон световой кривой фотосинтеза для i-го органа пораженного растения, мг CO_2/(дм^2·ч)/(Вт·м$^{-2}$).

При заболевании понижается устойчивость растений к неблагоприятным факторам внешней среды, максимум температурной кривой фотосинтеза пораженных инфекцией растений сдвигается в сторону более низких температур. Тогда влияние температуры воздуха на фотосинтез больного растения можно описать выражением

$$\Psi^I_{\Phi\,\mathrm{inf}} = 0{,}2\,\frac{T^i_d - T_{d_0}}{T_{d_{\mathrm{opt}}} - T_{d_0} - \Delta T_{\mathrm{inf}}}\left[6 - \left(\frac{T^i_d - T_{d_0}}{T_{d_{\mathrm{opt}}} - T_{d_0} - \Delta T_{\mathrm{inf}}}\right)^5\right], \qquad (23.18)$$

где ΔT_{inf} — температурная поправка, учитывающая изменение уровня оптимальной для фотосинтеза температуры воздуха при поражении растения инфекцией, °С.

Начиная с момента заражения интенсивность дыхания пораженных тканей значительно изменяется. Снижение интенсивности дыхания моделируется за счет снижения дыхания роста и дыхания поддержания. Дыхание больного растения R_{inf} описывается следующим образом:

$$R_{\mathrm{inf}} = \alpha_{R\,\mathrm{inf}} R, \qquad (23.19)$$

где $\alpha_{R\,\mathrm{inf}}$ — онтогенетическая кривая дыхания больного растения, безразмерная.

Повреждение растений болезнями приводит к уменьшению площади ассимилирующей поверхности и снижению количества функционирующей биомассы, что можно описать выражениями

$$L_{i\,\mathrm{inf}}^{l} = L_{i}^{l-1} k_{\mathrm{inf}}^{l}, \tag{23.20}$$

$$\tilde{m}_{i\,\mathrm{inf}}^{l} = m_{i}^{l-1} k_{\mathrm{inf}}^{l}, \tag{23.21}$$

где $L_{i\,\mathrm{inf}}$ — относительная площадь ассимилирующей поверхности i-го органа больного растения, м/м^2; $\tilde{m}_{i\,\mathrm{inf}}$ — функционирующая биомасса i-го органа больного растения, г/м^2; k_{inf} — параметр, характеризующий степень поражения растений, безразмерный. Снижение показателей фотосинтетической деятельности у растения при заболевании закономерно приводит к снижению урожая.

Раздел VII

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Глава 24

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ КУЛЬТУРЫ

24.1. Зерновые культуры

Озимая пшеница. Озимая пшеница — ценная продовольственная зерновая культура. На территории Украины, Молдовы, Северного Кавказа, центрально-черноземной зоны и Нижнего Поволжья сосредоточено более 80 % ее посевных площадей.

Семена озимой пшеницы начинают прорастать при температуре 1... 2 °С, но для дружного прорастания и появления всходов оптимальной считается температура 15... 20 °С (табл. 24.1). При такой температуре и хорошей влажности пахотного слоя почвы массовые всходы обычно появляются через 7—9 дней после сева. Температура выше 28 °С неблагоприятна для прорастания семян. При запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы менее 5 мм всходы не появляются.

Е. С. Улановой установлено, что наименьшая продолжительность периода посев — всходы (5—7 дней) наблюдалась при запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы 30—60 мм и температуре воздуха выше 14 °С. При уменьшении запасов влаги до 15 мм всходы появлялись через 12 дней, а при уменьшении до 6—7 мм — через 20—25 дней. При понижении температуры воздуха до 10 °С всходы появлялись через 10—12 дней, а при 7... 8 °С — через 17—20 дней.

При достаточном увлажнении почвы всходы озимой пшеницы появляются при накоплении от посева суммы эффективных температур воздуха (выше 5 °С), равной 67 °С.

Скорость наступления фазы начала кущения озимой пшеницы также находится в тесной зависимости от температуры и увлажнения почвы. Если увлажнение пахотного слоя почвы хорошее (более 30 мм продуктивной влаги), кущение озимой пшеницы начинается при накоплении от фазы всходов суммы эффективных температур (выше 5 °С), равной 67 °С. Наименьшая продолжительность периода всходы — кущение (8—10 дней) наблюдается при запасах влаги 30—50 мм в слое почвы 0—20 см и температуре воздуха 13... 18 °С. При такой же температуре, но при уменьшении запасов влаги до 15 мм период от всходов до кущения увеличивается до 16—18 дней, а при уменьшении запасов

Таблица 24.1

Температурные показатели (°С) роста и развития основных полевых сельскохозяйственных культур (по А. И. Коровину, 1984)

Культура	Прорастание семян				Появление всходов		Интервал активного роста и формирования наивысшего урожая	Отношение к весенним и летним заморозкам		
	интервал наибольшей всхожести	минимальная	оптимальная	максимальная	минимальная	оптимальная		переносятся без видимых повреждений	повреждающие	губительные
Озимая пшеница	2...30	0 (4)	22...28	34...38	4...5	15...20	8...23	Весной до —8, летом до —2	Весной до —9, —10, летом —3, —4	Весной —10...—12, летом —5
Озимая рожь	2...30 (26) 4...30 (26) 8...30 (26)	0 (2)	22...28	34...38	4...5	15...20	7...23	Весной до —8, летом до —2	Весной до —8, —10, летом —3, —4	Весной —10...—12, летом —5
Яровая пшеница	2...30 (26) 4...30 (26) 8...30 (26)	0 (5)	22...32	36...38	4...5 5...10	15...20 20...25	10...23	До —4	—5...—8	—9...—10
Яровой ячмень	2...30 (26) 4...26 (30) 8...26 (30)	0 (2)	20...30	34...38	4...5	15...22	10...23	До —5	—6...—8	—9...—11
Овес	4... 30 8...30 (26)	0 (3)	22...30	34...38	4...5	15...18	10...23	До —5	—6...—8	—9...—11
Кукуруза	20... 36	8 (10...12)	28	40	10...12	18...30	15...30	До —0,5	—4...—2	—3...—4
Просо	18 (26)...40 (30)	8 (10...12)	25...30	40...41	12...15	20...30	15...30			
Гречиха	6 (10)...32 (26)	4 (6...8)	18...26	34...36	10...12	15...22	15...22	До —2	—3, —4	—5, —6
Горох	8 (18)...34 (24)	0 (3)	22...30	34	4...5	15...25	10...20	До —3	—4, —2...—5	—6, —7
Соя	20...36 (34, 38)	8...10 (4...8)	20...34	33...40	6...7	12...16	15...22	До —0,5	—1, —2	—3, —4
Чечевица		0 (3)	20	34	4...5	10...25	12...25	До —3	—4, —5	—6, —8
Люпин		0 (3)	12...16	34	5...6...8	10...25	12...25	До —3	—4, —5	—6, —8
Вика яровая		0...3	15...25	35	10	12...16	15...20	До —3	—4, —5	—6, —7
Кормовые бобы		0...3	15...20	34	3...5	10...25	15...20	До —3	—4, —5	—6, —8
Чина		0...3	12...16	34	4...5	10...15	10...25	До —3	—4, —5	—6, —8
Лен		0...2	12...16	38	5...6	15...18	10...20	До —4	—5, —6	—7, —9
					2...3	18...20	10...25	До —4	—5, —6	—7, —9

Примечание. В скобках даются отклонения для отдельных сортов.

влаги до 6—8 мм кущение наступает только через 25—30 дней.

Наиболее благоприятная для кущения растений озимой пшеницы температура воздуха 9... 12 °С, а при температуре 1... 3 °С кущение прекращается. При запасах продуктивной влаги более 20 мм в пахотном слое почвы кущение идет наиболее интенсивно.

Активная вегетация озимой пшеницы прекращается после перехода температуры воздуха осенью через 5 °С (в сторону понижения). Однако в южных районах страны переход от осени к зиме происходит медленно и кущение пшеницы продолжается в период от даты перехода температуры воздуха через 5 °С до даты перехода ее через 3 °С. Во время длительных и интенсивных оттепелей также возможно продолжение кущения растений. При

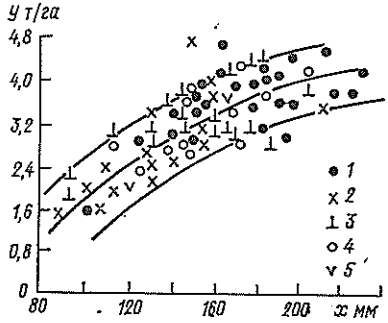


Рис. 24.1. Зависимость урожайности y (т/га) озимой пшеницы сорта Безостая 1 от весенних запасов влаги x (мм) в метровом слое почвы на полях колхозов весной (по Е. С. Улановой, 1975).

Число стеблей на 1 м² весной более 1000; предшественники: *1* — черный пар, *2* — кукуруза, *3* — озимая пшеница, *4* — горох, *5* — подсолнечник.

благоприятных условиях озимая пшеница оптимальных сроков сева формирует к концу осени 3—6 побегов на одном растении.

После весеннего возобновления вегетации озимая пшеница продолжает куститься при температурах от 3... 5 до 12... 15 °С. Высокая температура в весенний период и недостаток влаги в почве ухудшает весеннее кущение пшеницы.

В черноземных районах, где тепла бывает достаточно, запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы весной определяют будущие условия формирования урожая. По данным Е. С. Улановой, хорошими весенними запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы являются 150—200 мм, удовлетворительными — 120—150 мм, недостаточными — 100—120 мм и плохими — менее 100 мм (рис. 24.1).

В период выход в трубку — колошение у озимой пшеницы проявляется наибольшая потребность во влаге вследствие интенсивного роста (табл. 24.2). Наиболее высокие урожаи озимой пшеницы наблюдались в годы, когда в этот период запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы составляли 100—125 мм. При небольших запасах продуктивной влаги в почве весной урожайность озимой пшеницы в значительной степени зависит от выпадающих осадков. Количество осадков в мае 40—80 мм обеспечивает при этом хорошие условия для формирования урожая озимой пшеницы. Благоприятной для формирования крупного колоса с многоцветковыми колосками является температура 15... 20 °С.

Таблица 24.2

Показатели оценки запасов продуктивной влаги метрового слоя почвы в основные периоды весенне-летней вегетации озимой пшеницы в черноземных районах (по Е. С. Улановой, 1988)

Период	Запасы продуктивной влаги, мм			
	хорошие	удовлетворительные	недостаточные	плохие
Возобновление вегетации	150—200	120—150	100—120	< 100
Выход в трубку	140—180	100—140	80—100	⩽ 80
Колошение	80—140	60—80	40—60	⩽ 40
Налив зерна	80—100	40—80	30—40	⩽ 25

В период цветения и созревания увеличиваются требования растений к теплу. Однако при высокой температуре (выше 40 °С) в период цветения резко снижается жизнеспособность пыльцы, что приводит к снижению урожая. Минимальной температурой для цветения считается 6... 7 °С. При снижении относительной влажности воздуха до 30 % и ниже, повышении температуры до 25 °С и выше и скорости ветра 5 м/с и больше (при недостатке влаги в почве) отмечается пожелтение, скручивание и подсыхание листьев, щуплость зерна и череззерница. По данным С. А. Вериго, запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы 40 мм и более в среднем за период цветение — начало восковой спелости способствуют формированию хорошо выполненного зерна, а при запасах влаги менее 10 мм прирост зерна прекращается и оно начинает подсыхать.

Требования к свету меняются в зависимости от фазы развития растений. В целом продолжительность вегетационного периода сокращается в условиях длинного дня. Общая продолжительность вегетационного периода озимой пшеницы, включая зимний период, в зависимости от сорта и агрометеорологических условий колеблется от 275 до 330 дней.

Озимая пшеница хорошо использует осеннюю и весеннюю влагу и урожайность ее в значительно меньшей степени, чем яровых зерновых культур, зависит от весенне-летних осадков. У нее развивается мощная корневая система, глубоко проникающая в почву, в связи с чем она меньше страдает от засух и суховеев. Сев осенью и более ранняя (на 7—10 дней) уборка озимой пшеницы по сравнению с яровой пшеницей позволяет полнее и равномернее использовать труд и средства производства.

Озимая рожь. Эта культура — одна из важных продовольственных культур в нашей стране. Она может возделываться почти во всех почвенно-климатических зонах. Около 80 % ее посевов сосредоточено в нечерноземной зоне, отличающейся благоприятными для озимой ржи природными условиями.

Семена ржи при наличии влаги в почве начинают прорастать

при температуре 1... 2 °С. Оптимальная температура для их прорастания 22... 28 °С. Дружные всходы озимой ржи появляются через 6—8 дней после посева при температуре 15... 20 °С и хорошей влагообеспеченности.

Наименьшая продолжительность периода от всходов до кущения (до 10 дней) наблюдается при температуре выше 13 °С и запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы больше 30 мм. Продолжительность этого периода увеличивается до 15—20 дней при температуре 9... 11 °С и хороших запасах влаги или температуре выше 13 °С, но пониженных запасах влаги (15—20 мм в слое почвы 0—20 см).

Озимая рожь хорошо кустится при средней суточной температуре воздуха около 12 °С, хотя слабое кущение может продолжаться и при температуре около 5 °С. При наличии достаточных

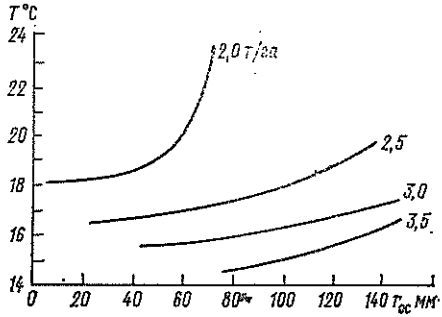


Рис. 24.2. Связь урожайности озимой ржи (т/га) с осадками r_{oc} и средней температурой воздуха T за три декады после колошения в опыте с длительным применением удобрений; ТСХА, 1945—1963 гг. (по М. С. Кулику, 1966).

запасов влаги в почве от посева до появления третьего побега кущения необходима сумма эффективных температур 200 °С, а до появления шестого побега кущения — 300 °С.

Весеннее возобновление вегетации озимой ржи происходит при температуре воздуха 5 °С. В период выхода в трубку благоприятна средняя суточная температура воздуха 11... 12 °С. В период колошения хорошие условия создаются при температуре 14... 15 °С, а для цветения и созревания необходима температура 16... 17 °С и выше.

Озимая рожь относится к числу сравнительно засухоустойчивых культур, что объясняется хорошим развитием ее корневой системы. Наибольший расход влаги у посевов озимой ржи отмечается в период быстрого роста растений — от выхода в трубку до колошения. Недостаток влаги в этот период вызывает образование мелких и малопродуктивных колосьев.

По данным М. С. Кулика, в нечерноземных районах наибольшие урожаи озимой ржи наблюдаются при температуре воздуха 15... 17 °С и сумме осадков более 80 мм за три декады после колошения (рис. 24.2).

Продолжительность вегетационного периода озимой ржи колеблется в зависимости от сорта, агрометеорологических условий и районов произрастания от 270 до 350 дней.

Яровая пшеница. Эта культура — одна из основных продовольственных культур в нашей стране. Способность яровой пшеницы развивать мощную корневую систему обусловливает наиболее широкое распространение ее в засушливых районах юго-востока ЕЧС, засушливых степных районах Казахстана и Сибири, т. е. в тех районах, которые характеризуются недостаточной влагообеспеченностью на фоне повышенной температуры и частых суховеев. Яровая пшеница по урожайности уступает озимой пшенице и заменяет ее лишь в тех районах, где суровые зимы не позволяют возделывать озимую пшеницу. Северная граница возделывания скороспелых сортов мягкой 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, а появление всходов возможно при 4... 5 °С, поэтому высеивается она в самые ранние сроки. Набухшие и наклюнувшиеся семена пшеницы могут без повреждений переносить кратковременные понижения температуры до —10... —13 °С. При температуре почвы на глубине заделки семян 5 °С всходы появляются на 20-й день, при 10 °С — на 9-й день, при 15 °С — на 7-й день. Всходы пшеницы переносят заморозки до —6... —8 °С.

Оптимальные условия увлажнения на первых этапах развития растений создаются при запасах продуктивной влаги в пахотном слое почвы 30—40 мм.

При хорошей влагообеспеченности начало кущения яровой пшеницы наблюдается при накоплении после всходов суммы эффективных температур (выше 5 °С) 67 °С. Хорошие условия для кущения растений создаются при температуре воздуха 13... 18 °С. В районах с засушливой весной и влажным летом (Северный Казахстан, Западная Сибирь) после прошедших дождей нередко развиваются поздние побеги кущения — подгоны, зерно которых чаще всего не вызревает ко времени уборочной спелости зерна главных стеблей.

Недостаток влаги в почве после выхода в трубку приводит к уменьшению количества развитых и увеличению бесплодных колосков. Выпадающие впоследствии даже обильные осадки не могут исправить положение. Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в этот период менее 80 мм не обеспечивают нормальное развитие растений.

Яровая пшеница — растение длинного дня. После выхода в трубку у яровой пшеницы начинают проявляться сортовые различия по требованию к теплу. Так, для прохождения периода выход в трубку — колошение для различных сортов требуется сумма эффективных температур (выше 5 °С), равная 283—400 °С, а от колошения до восковой спелости — 450—540 °С.

В период колошения и молочной спелости для роста и развития растений наиболее благоприятной считается температура 16... 23 °С. Из яровых пшениц наименьшие требования к теплу

в период созревания предъявляют сибирские сорта, созревающие при 10... 12 °С.

В период появления всходов — выхода в трубку повреждения заморозками интенсивностью —5... —7 °С приводит к снижению урожая на 10—30 % и удлинению периода вегетации до 2—8 дней (табл. 24.3).

Таблица 24.3

Последействие весенних повреждающих заморозков (°С) на урожай и длину вегетационного периода основных полевых культур (по А. И. Коровину, 1984)

Культура	Период отрастания озимых и появления всходов у яровых культур			Период кущение — выход в трубку, образование 2—3 листьев у незлаковых	
	интенсивность заморозка, °С	снижение конечного урожая, %	удлинение вегетационного периода, дни	снижение конечного урожая, %	удлинение вегетационного периода, дни
Озимая пшеница	—8... —10	10—25	3—6	10—30	4—8
Озимая рожь	—8... —10	10—25	3—5	10—30	4—8
Яровая пшеница	—5... —7	10—25	2—5	15—30	4—8
Яровой ячмень	—6... —8	10—20	2—5	12—25	4—7
Овес	—6... —8	10—20	2—5	12—25	4—6
Кукуруза	—1... —2	10—25	5—8	20—50	8—15
Гречиха	—3... —4	10—30	5—8	20—50	8—12
Горох	—4... —5	10—30	4—7	15—40	5—10
Соя	—1... —2	10—20	4—7	15—30	5—10
Чечевица	—4... —5	10—20	4—6	15—30	5—8
Люпин	—4... —5	10—20	2—6	15—30	5—8
Лен	—5... —6	10—30	2—5	10—30	5—10

В период цветения и налива зерна яровая пшеница повреждается заморозками интенсивностью —1... —2 °С. Чаще всего такие повреждения наблюдаются в северных подтаежных районах, где они являются одной из причин, определяющих северную границу распространения яровой пшеницы, а также в лесостепных и степных районах Сибири и Северного Казахстана. После наступления восковой спелости семенные качества сохраняются и при заморозках —5... —7 °С.

Почвенная и атмосферная засухи в период колошение — молочная спелость резко снижают урожай. Если в период интенсивных суховеев запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы снижаются до 10 мм, а в метровом — до 30 мм и меньше, то наблюдается сильное увядание, пожелтение и преждевременное отмирание листьев, а также прекращение роста растений. Наиболее благоприятными для растений в этот период являются запасы продуктивной влаги в почве в пределах 70—75 % наименьшей влагоемкости. При снижении относительной влажности воздуха до 10—12 % и температуре 40... 42 °С даже на орошаемых посевах зерно может созреть преждевременно и быть щуплым.

При наливе зерна во влажную и дождливую погоду может наблюдаться явление «стекания» (вымывание растворимых органических и минеральных веществ из зерна осадками), что вызывает щуплость зерна и ощутимо снижает урожай. Щуплость зерна может также отмечаться при наливе зерна во влажную погоду вследствие развития грибных болезней, особенно ржавчины.

Потребление влаги по фазам развития яровой пшеницы распределяется примерно следующим образом: в период всходов 5—7 %, в фазе кущения 15—20 %, при выходе растений в трубку и колошении 50—60 %, в фазе молочной спелости 20—30 % и в фазе восковой спелости 3—5 % общего потребления влаги за весь вегетационный период. Продолжительность вегетационного периода яровой пшеницы колеблется от 90 до 120 дней в зависимости от сорта и климатических условий.

Ячмень. Эта культура по посевным площадям и валовому сбору зерна в мировом земледелии занимает четвертое место. Это наиболее скороспелая и пластичная культура, возделываемая в нашей стране повсеместно. Основные посевы ярового ячменя сосредоточены на Украине, Северном Кавказе, в Поволжье, центрально-черноземной и нечерноземной зонах и в Казахстане. Посевы озимого ячменя сосредоточены в районах с мягкими зимами — в Крыму, Средней Азии, Азербайджане и на Северном Кавказе.

Семена ячменя начинают прорастать при температуре 1... 2 °С. Всходы его появляются при средней суточной температуре воздуха 8... 10 °С на 12—17-й день, а при 16... 18 °С — на 6—7-й день. Всходы ячменя начинают повреждаться при заморозках —7... —8 °С.

При хорошей влагообеспеченности кущение ярового ячменя начинается при накоплении суммы эффективных температур (выше 5 °С) от сева 134 °С. Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы весной >160 мм благоприятны для получения высоких урожаев, запасы влаги <80 мм — недостаточны.

Ячмень относится к растениям длинного дня, и при укороченном световом дне его колошение задерживается. Колошение ячменя начинается при накоплении суммы эффективных температур после выхода в трубку около 330 °С, а для периода колошение — восковая спелость требуется около 400 °С.

Благоприятными для формирования урожая ячменя в период колошения являются запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы 110—130 мм. Повышение средней суточной температуры воздуха сверх 23 °С в этот период неблагоприятно сказывается на урожайности ячменя. В то же время температура 38... 40 °С и выше в период налива зерна эта культура выносит лучше, чем пшеница.

Цветки и завязи ячменя повреждаются заморозками интенсивностью —1... —2 °С, а в период налива зерна опасны заморозки —1,5... —4 °С.

Ячмень считается одной из наиболее засухоустойчивых зерновых культур. По устойчивости к «захвату» и «запалу» зерна под действием суховеев он стоит на первом месте среди хлебных злаков. В то же время, будучи скороспелой культурой, яровой ячмень реже попадает под влияние засух и суховеев.

Продолжительность вегетационного периода ярового ячменя в зависимости от сорта и агрометеорологических условий колеблется от 80 до 115 дней.

Овес. Это растение умеренного климата. На территории нашей страны основные площади его посевов сосредоточены в нечерноземной зоне, лесной и лесостепной зонах Украины, в Западной Сибири и в Красноярском крае.

Семена овса начинают прорастать при температуре 2... 3 °С, поэтому высевают его в возможно ранние сроки. Всходы овса переносят кратковременные весенние заморозки интенсивностью —8... —9 °С. В период всходы — кущение наиболее благоприятной является температура 15... 18 °С.

При хорошей влагообеспеченности от посева до кущения сумма эффективных температур (выше 5 °С) должна составлять 134 °С (так же как и для яровой пшеницы и ячменя). Овес является влаголюбивым растением и не боится переувлажнения почвы.

Выметывание овса наступает после накопления суммы эффективных температур от выхода в трубку 378 °С. Период выход в трубку — выметывание является критическим по отношению к влаге. По мере развития растений их устойчивость к низким температурам уменьшается и в период цветения возможны повреждения при заморозках —1... —2 °С.

Для цветения овса наиболее благоприятна умеренно влажная погода (при температуре 18... 20 °С). Высокие температуры (38... 40 °С) и летние засухи овес переносит хуже яровой пшеницы и ячменя и сильнее их страдает от захватов и запалов.

Овес относится к растениям длинного дня, продолжительность его вегетационного периода колеблется от 90 до 129 дней.

Кукуруза. В различных почвенно-климатических зонах страны возделывается свыше 60 сортов и гибридов кукурузы. Основные посевы ее на зерно сосредоточены в южных районах страны, а в нечерноземной зоне, в Сибири и на Дальнем Востоке она возделывается преимущественно на силос.

Семена кукурузы начинают прорастать при температуре около 8 °С. Однако при такой температуре прорастание идет очень медленно, проростки загнивают и посевы изреживаются. Ю. И. Чирковым установлено, что при запасах продуктивной влаги >15 мм в слое почвы 0—10 см и температурах 11... 12 °С кукуруза всходит через 20—25 дней, а при 18... 22 °С — через 6—8 дней. При заделке семян на глубину 4 см всходы кукурузы появляются при накоплении суммы эффективных температур выше 8 °С, равной 83 °С. Эта сумма эффективных температур увеличивается на 7 °С на каждый сантиметр углубления при посеве семян на глубину 4—12 см. При запасах продуктивной влаги <8 мм в слое почвы

0—10 см продолжительность периода посев — всходы почти удваивается, соответственно возрастает и необходимая сумма эффективных температур. Весенние заморозки до —2... —3 °С повреждают всходы. На продолжительность периода посев — всходы сортовые различия заметного влияния не оказывают.

Уровень температуры определяет сроки появления очередных листьев кукурузы, а различия в продолжительности периода листообразования между раннеспелыми и позднеспелыми сортами достигает 20—30 дней. По данным Ю. И. Чиркова, нижний предел температуры 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. С повышением температуры выше 20 °С темпы развития растений начинают уменьшаться, и при средней суточной температуре выше 26... 28 °С развитие не ускоряется. В этих случаях возрастает значение балластных (не ускоряющих развитие растений) температур. При температурах 33... 36 °С прирост зеленой массы кукурузы обычно приостанавливается.

Очередной лист кукурузы в условиях нечерноземной зоны появляется при накоплении суммы эффективных температур (выше 10 °С), равной 30 °С. В южных районах для появления нового листа требуется большая сумма эффективных температур, так как в жаркие дни кукуруза использует тепло менее эффективно из-за балластных температур.

Раннеспелые сорта кукурузы образуют 11—12 листьев и поэтому требуют меньше тепла, чем позднеспелые, образующие 19—21 лист.

Влажность почвы существенно влияет на накопление растительной массы, но на скорость развития растений она оказывает слабое воздействие. Заметное торможение скорости развития отмечается только при уменьшении запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы ниже 40 мм. При значительном иссушении почвы выметывание метелки кукурузы задерживается на 4—6 дней.

Оптимальные условия для формирования урожая зеленой массы кукурузы создаются при средней декадной температуре воздуха 20... 24 °С и запасах продуктивной влаги 35—45 мм в пахотном слое подзолистых почв и 60—70 мм в полуметровом слое черноземных почв.

У кукурузы критический по отношению к влаге период начинается за 10 дней до выметывания метелки и длится около 30 дней. Недостаток влаги в этот период резко снижает урожай (рис. 24.3).

После выметывания метелки влияние сортовых особенностей на скорость развития кукурузы проявляется меньше, чем в период листообразования. При повышении температуры воздуха днем до 30... 35 °С, низкой относительной влажности и запасах продуктивной влаги менее 20—30 мм в слое почвы 0—50 см в период после

выметывания метелки значительно снижается озерненность початка.

Наиболее благоприятные условия для налива зерна складываются при средней суточной температуре воздуха 20... 24 °С и запасах продуктивной влаги 60—70 мм и более в полуметровом слое почвы. Осенние заморозки —2... —3 °С повреждают листья, а початки в период молочновосковой спелости могут переносить заморозки до —4... —5 °С.

Продолжительность вегетационного периода кукурузы в зависимости от сорта и агрометеорологических условий колеблется от 90 до 160 дней. Кукуруза является светолюбивым растением и

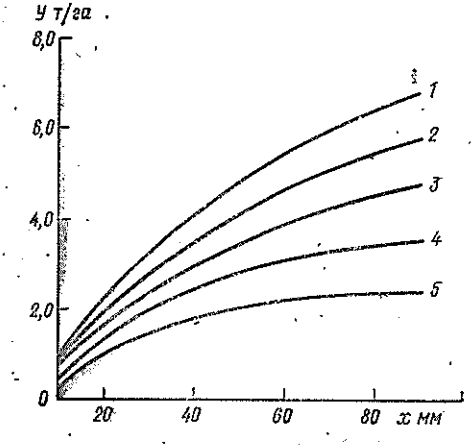


Рис. 24.3. Зависимость урожая зерна кукурузы *У* (т/га) от запасов продуктивной влаги *x* (мм) на фазу выметывания метелки при различной площади листовой поверхности (по Ю. И. Чиркову, 1969).

Площадь листовой поверхности: *1*) 30 тыс. м²/га; *2*) 25 тыс. м²/га; *3*) 20 тыс. м²/га; *4*) 15 тыс. м²/га; *5*) 10 тыс. м²/га.

требует интенсивного солнечного освещения. Загущение посевов приводит к снижению урожая зерна. Наибольшие урожаи зерна кукурузы наблюдаются при листовой поверхности 30—35 тыс. м²/га.

Кукуруза относится к сравнительно засухоустойчивым культурам, на образование единицы сухого вещества она потребляет меньше воды, чем яровые зерновые культуры. Однако на единицу площади кукуруза требует влаги больше, чем другие зерновые культуры, в связи с ее более высокими урожаями.

Кукуруза весьма отзывчива на орошение. Если влажность почвы во время роста и развития кукурузы поддерживается на уровне 70—80 % наименьшей влагоемкости, то урожаи зерна в степной зоне увеличиваются в 3—3,5 раза по сравнению с посевами, находящимися в условиях естественного увлажнения.

Просо относится к числу важнейших крупяных культур в нашей стране. Основные посевные площади его сосредоточены в Поволжском, Центрально-Черноземном, Северокавказском, Уральском, Западно-Сибирском экономических районах, на Украине и в Казахстане.

Просо принадлежит к теплолюбивым короткодневным растениям. Прорастание семян начинается при температуре почвы 6—

8 °С, но оптимальная температура прорастания 25... 30 °С. Поэтому просо принадлежит к числу культур относительно поздних сроков сева. Всходы проса появляются при накоплении суммы эффективных температур 150 °С и повреждаются заморозками —2... —3 °С.

Характерная особенность проса — медленный рост его в начале вегетации. Наиболее благоприятная температура для роста и развития растений 18... 24 °С. Выметывание проса наступает после накопления суммы эффективных температур 600 °С. Минимальная температура для цветения проса около 15 °С. Высокие температуры (35... 40 °С) просо переносит лучше, чем другие зерновые.

По засухоустойчивости просо занимает одно из первых мест среди других полевых растений, в связи с чем оно является незаменимой культурой в засушливых районах и широко используется как страховая культура для пересева погибших озимых или ранних яровых зерновых культур. Наибольшая потребность во влаге наблюдается у него в период выход в трубку — выметывание.

Просо хорошо использует осадки второй половины лета и может высеваться в качестве пожнивной культуры. Оптимальные влагозапасы почвы для формирования хорошего урожая составляют 60—80 % наименьшей влагоемкости в течение всего периода вегетации.

Вегетационный период разных сортов проса продолжается от 60 до 120 дней. Несмотря на высокую засухоустойчивость, просо очень отзывчиво на орошение и при поливе в засушливые годы его урожайность бывает в 6—7 раз выше по сравнению с урожаем на неполивных полях.

Гречиха. Эта культура относится к теплолюбивым крупяным культурам. Основные посевные площади ее сосредоточены в лесостепных районах Украины, в Центрально-Черноземном районе, на юге Центрального, Волго-Вятского, севере Поволжского районов и в Уральском экономическом районе. Значительные посевные площади находятся также в Казахстане и на юге Западной Сибири.

Семена гречихи начинают прорастать при температуре около 6 °С, но дружные всходы появляются на 5—7-й день при температуре 15... 20 °С. Всходы гречихи весьма чувствительны к заморозкам и повреждаются при понижении температуры воздуха до —1... —2 °С.

Гречиха отличается быстрым развитием: через 8—10 дней после появления всходов растения образуют бутоны, а через 25—30 дней они зацветают. При температуре ниже 12... 13 °С гречиха растет плохо. В период цветения благоприятны солнечная погода при средней суточной температуре воздуха 16... 20 °С и кратковременные слабые дожди. При температуре 10 °С и ниже в течение 4—6 ночей цветение и налив зерна гречихи прекращаются.

В период цветения гречиха плохо переносит температуру выше 30 °С и сухую погоду, которые приводят к неполному оплодотво-

рению и засыханию завязей. Неблагоприятны в этот период также продолжительные ливневые дожди и туманы. Заморозки до —1 °С повреждают цветки и листья, а до —2 °С вызывают гибель бутонов, цветков и листьев, сильно повреждают стебли растений.

Для формирования хорошего урожая гречихе необходимо большое количество воды, особенно в период цветения и образования зерна, что обусловлено высоким транспирационным коэффициентом (500—600). Возрастание количества осадков в период начало цветения — созревание от 40 до 100 мм вызывает значительное (в 2—3 раза) увеличение урожайности (рис. 24.4), хотя реакция

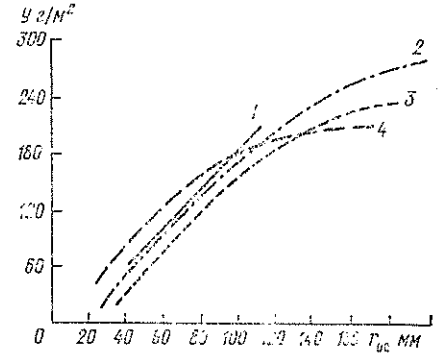


Рис. 24.4. Зависимость урожайности *У* (г/м²) гречихи от осадков r_{oc} (мм), выпавших от начала цветения до созревания; Майкопская опытная станция ВИРа (по В. А. Смирнову, В. А. Корнейчук, 1970).

Сорт гречихи: *1* — Богатырь, *2* — Большевик-4, *3* — Славянка, *4* — Стародубская.

различных сортов гречихи на одно и то же количество осадков различная.

Вегетационный период гречихи в зависимости от сортовых особенностей продолжается 50—90 дней. Короткий вегетационный период гречихи и возможность высева в поздние сроки позволяют использовать ее как страховую культуру для пересева погибших озимых и ранних яровых зерновых культур, а в южных районах — как пожнивную культуру.

Рис. Одна из важнейших зерновых культур мира — рис; по валовому сбору зерна рис занимает второе место после пшеницы. Посевы его сосредоточены в республиках Средней Азии и Закавказья, на юге Украины и Казахстана, на Северном Кавказе, в Нижнем Поволжье и на Дальнем Востоке.

Рис — очень теплолюбивая культура. Даже у сортов, районированных у северной границы ареала его возделывания, семена прорастают при температуре 11... 12 °С, а всходы появляются при температуре почвы и воды 14... 15 °С. В период кущения для риса необходима температура не ниже 15... 18 °С, а во время цветения — 18.. 20 °С. Наиболее благоприятная температура для роста и развития растений 25... 30 °С, но не более 40 °С. Цветение у риса при температуре 25 °С и выше открытое, а при температуре ниже 20 °С чаще бывает закрытым. При снижении температуры до 15 °С стерильность цветков на метелках достигает 30—40 %.

В период молочной спелости для риса требуется температура не ниже 15... 18 °С, а при наступлении восковой спелости — не ниже 12... 15 °С. При снижении температуры 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... 21,0 °С. Заморозки —0,5 °С уже опасны для риса, а снижение температуры до —1 °С повреждает растения во все фазы развития.

Рис — очень влаголюбивое растение и поэтому возделывается при постоянном затоплении водой от сева до молочной спелости или в условиях укороченного затопления. Транспирационный коэффициент риса изменяется в зависимости от сорта и условий выращивания от 230—290 до 980—1100.

Рис ускоренно развивается при коротком дне. Продолжительность вегетационного периода составляет от 85—100 дней у скороспелых сортов до 135—145 дней у позднеспелых.

Сорго. Это ценная зерновая культура многостороннего использования. Возделывается сорго в республиках Средней Азии, на юге Украины, в Нижнем Поволжье и на Северном Кавказе.

Сорго — очень теплолюбивое и светолюбивое растение. Зерно прорастает при температуре 11... 12 °С. Всходы сорго повреждаются заморозками —2... —3 °С. Растения хорошо растут и развиваются при температуре до 33 °С и переносят повышение температуры 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.

Среди зерновых культур сорго является одним из наиболее засухоустойчивых растений. В сухие и очень жаркие периоды его листья скручиваются и рост растений прекращается, а после выпадения дождей растения возобновляют рост.

Продолжительность вегетационного периода сорго зависит от скороспелости и составляет 90—150 дней. Транспирационный коэффициент сорго варьирует от 180 до 340. Будучи засухоустойчивым растением, сорго в то же время очень отзывчиво на хорошую влагообеспеченность и может давать при орошении 10—12 т/га зерна.

24.2. Зернобобовые культуры

Основной особенностью, определяющей народнохозяйственную ценность зернобобовых культур, является высокое содержание белка в их семенах, стеблях и листьях. Белки в семенах и вегетативных органах создаются в основном за счет азота воздуха. Обладая способностью использовать атмосферный азот (с помощью клубеньковых бактерий), зернобобовые растения обогащают почву азотом и повышают ее плодородие.

Горох. Горох — наиболее распространенная зернобобовая культура в нашей стране. Наиболее скороспелые его сорта можно возделывать до Полярного круга.

Прорастание семян гороха возможно при температуре, близкой к 0 °С, что позволяет сеять его в ранние сроки. С повышением температуры до 8... 10 °С семена прорастают за 4—6 дней. Всходы гороха появляются при накоплении сумм эффективных температур (выше 3 °С) 110 °С и без значительных повреждений могут переносить заморозки до —7... —8 °С. Оптимальная температура для роста и развития гороха 18... 25 °С.

Горох относится к влаголюбивым культурам. Для получения высоких урожаев необходима влажность почвы 70—80 % НВ. Транспирационный коэффициент зависит от сорта и погоды и колеблется от 300 до 600. Многие сорта хорошо переносят избыток влаги в почве, но близость грунтовых вод неблагоприятно влияет на рост и развитие растений. При хорошем развитии корневой системы посевы нормально переносят кратковременную почвенную засуху.

Горох относится к растениям длинного дня. Продолжительность вегетационного периода большинства его сортов составляет 2—3 месяца.

Соя. Основные посевы сои сосредоточены на территории Дальнего Востока. Благоприятные условия для ее возделывания имеются в достаточно увлажненных районах Северного Кавказа, Молдовы, Украины, Закавказья и Средней Азии. Соя занимает первое место среди других культур по разнообразию ее использования.

Соя — требовательное к теплу растение; для ее развития необходима продолжительность периода с температурой выше 15 °С 130—150 дней. Семена сои начинают прорастать при температуре 8 °С, но хорошие условия для прорастания семян создаются при температуре воздуха в период сева 15... 16 °С. При средней суточной температуре воздуха 19... 22 °С всходы сои появляются через 6—7 дней. Всходы начинают повреждаться при заморозках —3... —4 °С.

Продолжительность периода появление всходов — цветение в зависимости от температуры изменяется от 50 до 75 дней. Хорошие условия теплообеспеченности в этот период складываются при температуре 20... 21,5 °С. Период от появления первого боба на растении до максимального их числа составляет 20—30 дней. Появление цветков и плодов возможно в широком диапазоне температур воздуха (11,5... 27 °С), однако оптимальные условия теплообеспеченности складываются при температуре 23... 25 °С.

Корневая система растений имеет сравнительно небольшие размеры, поэтому соя предъявляет повышенные требования к влаге. В период цветения и формирования бобов потребность сои во влаге заметно увеличивается. Благоприятные условия для формирования урожая создаются, если за вегетационный период выпадает 350—450 мм осадков, а влажность почвы в период от всходов до цветения составляет 70 %, от цветения до образования плодов — 80 % и в период созревания — 60—70 % наименьшей влагоемкости.

Соя относится к растениям короткого дня, ее вегетационный период зависит от сорта и погодных условий и колеблется от 100 до 160 дней.

Чечевица — одно из древнейших культурных растений. Выращивается в Центрально-Черноземном, Уральском, Поволжском экономических районах, на Украине и в Ростовской области.

Семена чечевицы прорастают при температуре 4... 5 °С. Всходы хорошо переносят весенние заморозки до —4... —5 °С, а при температуре —7... —8 °С повреждаются лишь верхушки листьев, что позволяет высевать чечевицу в ранние сроки. Запаздывание с севом значительно снижает урожай зерна.

Потребность во влаге у чечевицы для набухания и прорастания семян высокая, но она отличается более высокой засухоустойчивостью, чем горох. В большинстве районов чечевица уступает гороху по урожайности.

Чечевица относится к растениям длинного дня. Продолжительность вегетационного периода составляет 75—110 дней. Требования к теплу у нее выше, чем у гороха, что ограничивает ее продвижение на север.

Фасоль. Эта культура возделывается для зернового, овощного и консервного использования. Основные площади посевов сосредоточены на Украине, в Молдове, на Северном Кавказе, в Закавказье и Средней Азии, в центрально-черноземной зоне и на Дальнем Востоке.

Фасоль — одна из наиболее теплолюбивых культур среди зернобобовых. Семена ее начинают прорастать при температуре 10... 12 °С, а всходы повреждаются при заморозках —1,0... —1,5 °С. Поэтому высевают фасоль после окончания весенних заморозков и устойчивом прогревании почвы до 12... 15 °С. Хорошие условия для роста и развития растений складываются при температуре 20... 25 °С.

Фасоль относится к влаголюбивым культурам, потребность во влаге особенно возрастает в период цветения и завязывания бобов, в то же время она плохо растет на тяжелых глинистых почвах с высоким уровнем грунтовых вод.

Фасоль хорошо переносит некоторое затенение, что позволяет возделывать ее в смешанных посевах с другими растениями. Вегетационный период у разных сортов фасоли колеблется от 75 до 120 дней и более.

Кормовые бобы. Это одна из древних культур земледелия. Посевы кормовых бобов сосредоточены в районах с достаточным увлажнением — в Прибалтике, Беларусии, на западе Украины и в других районах.

Прорастание семян кормовых бобов начинается при температуре 3... 4 °С, а всходы могут перенести кратковременные заморозки до —5... —6 °С. Требования к теплу при дальнейшем росте и развитии растений не отличаются от гороха.

Кормовые бобы предъявляют повышенные требования к влаге и в засушливых условиях дают низкие урожаи семян и силосной

массы. Продолжительность вегетационного периода при возделывании на зерно составляет 90—145 дней.

24.3. Прядильные и масличные культуры

Хлопчатник. Эта культура возделывается в Узбекистане, Туркмении, Таджикистане, где хлопководство является ведущей отраслью сельского хозяйства. В Киргизии, Южном Казахстане и Азербайджане доля хлопководства в сельском хозяйстве сравнительно невелика.

Хлопчатник — техническая культура, являющаяся сырьем для текстильной, химической, пищевой и комбикормовой промышленности.

Хлопчатник — теплолюбивая культура. В южных засушливых регионах страны он возделывается только в условиях орошаемого

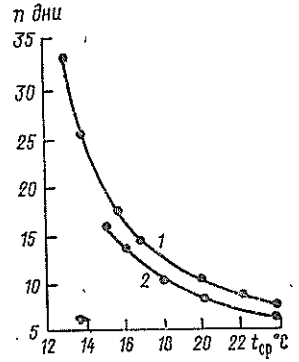


Рис. 24.5. Зависимость продолжительности периода сев — всходы (n) хлопчатника от средней температуры воздуха $t_{ср}$ за этот период при посеве опушенными (*1*) и оголенными (*2*) семенами (по Ф. А. Муминову, 1983).

земледелия. На протяжении вегетационного периода его требования к теплу и влаге не остаются постоянными.

Сев — всходы. В условиях хорошо обработанной и влажной почвы в апреле — начале мая происходит прорастание семян хлопчатника при средней суточной температуре 10... 11 °С. Появление всходов отмечается через 30—40 дней, однако в этих условиях растения оказываются ослабленными, часто поражаются корневой гнилью, а посевы изреженными. Продолжительность периода сев — всходы в условиях оптимальной влагообеспеченности зависит от средней суточной температуры воздуха (рис. 24.5).

Хорошими условиями для появления всходов считаются: средняя суточная температура воздуха 14 °С и выше и запасы продуктивной влаги на глубине заделки семян (0—5 см) 6—10 мм. Для появления всходов хлопчатнику необходима сумма средних суточных температур (выше 10 °С), равная 84 °С. Снижение запасов влаги в этом слое до 5 мм и ниже в условиях сухой и ветреной погоды задерживает появление всходов.

Для всходов хлопчатника большую опасность представляют поздние весенние заморозки на поверхности почвы (—0,5... —1,0 °С).

Всходы — бутонизация. После появления всходов скорость развития хлопчатника в условиях достаточной влагообеспеченности определяется температурой воздуха. От всходов (появление двух семядольных листьев) до начала бутонизации у хлопчатника растет главный стебель и очередные листья. Скорость их появления зависит от биологических особенностей сорта, степени благоприятности режимов температуры и увлажнения корнеобитаемого слоя, наличия и состава питательных веществ в почве.

Для наступления фаз очередных листьев у хлопчатника ташкентских сортов при нижнем пределе 10 °С необходимы следующие суммы эффективных температур от даты всходов:

Лист . . .	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
$\Sigma t_{эф}$, °С . .	115	165	220	270	320	370	420	480	530	575

В момент развертывания 7-го листа у хлопчатника среднеспелых сортов происходит массовая закладка плодовых (симподиальных) побегов, на которых развиваются бутоны, а в дальнейшем цветки и коробочки.

Продолжительность периода всходы — бутонизация варьирует от 22 до 50 дней в зависимости от температуры воздуха. Неблагоприятные условия складываются для хлопчатника при средней суточной температуре воздуха 30 °С и более, особенно в сочетании с низкой влажностью воздуха (воздушная засуха). В этих случаях проводится полив посевов хлопчатника: для нормального развития растений необходимо поддерживать запасы влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы не ниже 70 % ее наименьшей влагоемкости. К моменту бутонизации корневая система хлопчатника достигает глубины 40—50 см. Для наступления фазы бутонизации хлопчатнику необходима сумма средних суточных температур воздуха (выше 10 °С), равная 500 °С, рассчитанная от даты сева.

Бутонизация — цветение. В этот период (июнь — июль) растения значительно увеличиваются в размерах, начинается смыкание крон при рядовом посеве, корневая система достигает глубины 70—80 см. Условия погоды в этот период, как правило, стабильные, устанавливается характерное для южных районов сухое жаркое лето. Средняя суточная температура воздуха изменяется от 23 до 29 °С; продолжительность этого межфазного периода у среднеспелых сортов составляет 23—38 дней. В жаркие дни, когда температура повышается до 38 °С и более, ткани растений перегреваются, что сдерживает их развитие. В этот период особенно опасны для хлопчатника такие неблагоприятные явления, как воздушная засуха, суховеи, пыльные бури, град, сильный ветер.

В первой декаде периода на одном кусте накапливается в среднем около 15 % бутонов, во второй — 35 %, в третьей — 50 % бутонов от общего их числа, которое может накопиться в условиях достаточной влагообеспеченности посевов. При сниже-

нии запасов влаги до 55—65 % НВ общее количество бутонов снижается на 10—15 %, а при запасах влаги 45—50 % НВ — на 40—50 %.

Фаза цветения у скороспелых сортов наступает при накоплении суммы эффективных температур (выше 10 °С) 970 °С, у среднеспелых — 1000 °С, рассчитанных от даты сева, у позднеспелых тонковолокнистых сортов — 1100 °С.

Цветение — раскрытие первых коробочек. В этот период (август — сентябрь) происходит дальнейшее накопление плодоэлементов хлопчатника: закладка новых бутонов, цветение, формирование коробочек, созревание хлопкового волокна и семян. В условиях сухой и жаркой погоды при недостаточной влагообеспеченности посевов наблюдается опадение бутонов и только что сформировавшихся коробочек, что значительно сокращает конечный урожай хлопка-сырца; отмечается более раннее раскрытие коробочек, выход волокна из которых оказывается меньшим по сравнению с растениями, развивавшимися в нормальных условиях; сокращается продолжительность межфазного периода.

Избыточное увлажнение посевов, их загущенность, внесение повышенных доз удобрений способствуют удлинению межфазного периода и запаздыванию сроков раскрытия первых коробочек хлопчатника.

В сентябре темпы формирования коробочек значительно снижаются, а при средней суточной температуре воздуха 18 °С и ниже вовсе прекращаются. В этот межфазный период при среднем уровне агротехники для среднеспелых сортов хлопчатника необходима сумма средних суточных температур воздуха (выше 10 °С) 850—880 °С, для тонковолокнистых позднеспелых сортов — 1100 °С, для скороспелых сортов — 760 °С. Продолжительность этого периода (при средней агротехнике) зависит от температуры воздуха:

Средняя суточная температура, °С	23	24—25	26—27	28—29	30—31
Число дней	65	61—57	53—50	47—45	43—40

Количество сформировавшихся коробочек на кусте хлопчатника определяется биологическими особенностями сорта и комплексом агрометеорологических условий: режимом температуры, влагообеспеченностью посевов, наличием и продолжительностью неблагоприятных для хлопчатника явлений, а также уровнем агротехники. При изреженных посевах (до 70 тыс. растений на 1 га) в среднем на растениях за счет большей площади питания формируется большее число коробочек, чем при нормальной густоте (90—100 тыс. на 1 га). По средним многолетним данным у среднеспелых сортов хлопчатника на одном растении формируется по 10—12 коробочек, достигающих полной спелости.

Раскрытие коробочек и уборка урожая хлопка-сырца. В начале этого периода в растениях идет процесс высыхания створок у первых коробочек и одновременно формирование и созревание семян

и волокна в коробочках, образовавшихся позднее. Темпы раскрытия коробочек определяются температурой и влажностью воздуха и почвы, скоростью ветра, интенсивностью испарения и т. д.

К машинному сбору хлопка-сырца обычно приступают в период, когда доля опавших листьев после обработки посевов специальными химическими веществами — дефолиантами составляет 75—80 %, а число раскрывшихся коробочек достигает 70 % от сформировавшихся на растениях.

Дефолиация — предуборочное удаление листьев — создает более благоприятные микроклиматические условия для раскрытия коробочек. Скорость раскрытия коробочек на таких посевах на 20—30 % больше, чем на недефолиированных. Наиболее эффективное действие дефолиантов на растения отмечается при температуре воздуха 17... 18 °С, сумме положительных температур воздуха за 12 дней после дефолиации 200 °С и относительной влажности воздуха 50—70 %.

Ранние осенние заморозки (—1... —2 °С в будке), прекращающие вегетацию хлопчатника, сокращают период созревания зеленых коробочек, что снижает конечный урожай хлопка-сырца.

Лен. Эта культура относится к числу лучших лубоволокнистых растений. Лен-долгунец (высота растений 120 см и более), дающий наиболее ценное и прочное волокно, возделывается в нечерноземной зоне РСФСР, Прибалтике, на Украине. Более 60 % площади, засеваемой в мире этой культурой, находится в нашей стране.

Семена льна содержат 35—42 % масла, широко используемого в химической, льнокрасочной и пищевой промышленности; льняной жмых — хороший концентрированный корм для скота.

Лен-долгунец — растение длинного дня; он нетребователен к теплу и возделывается только в районах, хорошо обеспеченных влагой. Однако он плохо переносит избыточное увлажнение и высокий уровень стояния грунтовых вод. Скорость прорастания семян в условиях достаточного увлажнения зависит от температуры: при 18... 20 °С для прорастания необходимо 4—6 дней, при 7 °С — 11—13 дней, при 1... 3 °С — 25—30 дней; лучшей температурой для прорастания семян считается температура 10... 12 °С.

Всходы льна выдерживают понижение температуры воздуха до —2... —3 °С.

В период интенсивного роста растений (через 15—20 дней после всходов и до цветения) лен очень требователен к увлажнению почвы, его транспирационный коэффициент составляет 400—460. Оптимальная температура для этого периода 10... 15 °С; при достаточном увлажнении почвы в этих условиях быстро увеличивается высота растений и техническая длина волокна. При более высокой температуре воздуха (17... 25 °С) и высокой интенсивности солнечной радиации развитие растений ускоряется, но задерживается рост стебля, усиливается ветвление, что снижает техническую ценность волокна. Рост стебля у льна прекращается

с наступлением фазы цветения. Благоприятные условия для выращивания льна — умеренная температура воздуха летом и частые несильные дожди. Осадки ливневого характера с сильным ветром вызывают полегание посевов, в результате чего ухудшаются условия уборки льна, снижается качество его волокна.

Вегетационный период зависит от сорта и составляет 70—90 дней.

Лен-кудряш (рогач) — низкорослое растение (30—50 см), имеющее сильно ветвящийся у основания стебель и большое число коробочек (до 50 и более); возделывается как масличная культура в нашей стране в Средней Азии, Закавказье, Поволжье и на Украине. Этот вид менее требователен к влаге, но нуждается в большем количестве тепла.

Подсолнечник. Это однолетнее растение, важнейшая масличная культура.

В нашей стране подсолнечник на семена возделывается на Украине (до 40 % валового сбора семян этой культуры), Северном Кавказе, в центрально-черноземных областях, в Молдове, Поволжье, на Алтае, в Казахстане, в качестве силосной культуры — в нечерноземной зоне и в восточных районах страны.

Семена подсолнечника начинают прорастать при температуре 5—7 °С, оптимальной считается температура около 20 °С, при которой всходы появляются на 6—8-й день после посева при достаточном увлажнении почвы. Всходы легко переносят кратковременные заморозки до —3... —4 °С (отдельные сорта до —5... —6 °С).

От фазы всходов до цветения требования подсолнечника к теплу возрастают. Оптимальной является температура 25... 27 °С, угнетающее действие на растения оказывает температура воздуха 30 °С и более.

В период цветения заморозки —1... —2 °С оказываются губительными для всего растения.

Продолжительность вегетационного периода подсолнечника в зависимости от сорта варьирует от 80 до 160 дней, а сумма эффективных температур (выше 10 °С) — от 1400 °С для раннеспелых сортов до 2500 °С для позднеспелых сортов.

Подсолнечник считается засухоустойчивым растением, однако он потребляет большое количество воды. Наибольшая потребность во влаге отмечается в период образование корзинки — цветение: около 60 % всей необходимой растению влаги за весь период вегетации. Транспирационный коэффициент подсолнечника составляет 470—570. Благодаря мощной и глубокой корневой системе и опушению надземных вегетативных органов подсолнечник оказывается устойчивым к кратковременным засухам. Общий расход воды подсолнечника за вегетационный период в засушливые годы составляет 280—290 мм, во влажные — около 400 мм.

Устойчивость подсолнечника к весенним заморозкам и высокая потребность во влаге позволяет высевать эту культуру ранней весной, а в южных районах — под зиму, благодаря чему растения используют зимне-весенние запасы почвенной влаги.

Подсолнечник — светолюбивая культура. Продолжительная пасмурная погода или затенение молодых растений ослабляют его рост и развитие, снижают качество семян. Для возделывания подсолнечника лучшими почвами считаются черноземы и каштановые почвы.

Среди других масличных культур, имеющих хозяйственное значение, назовем коноплю, клещевину, сафлор, кунжут, горчицу, арахис.

24.4. Корнеплоды и клубнеплоды

Сахарная свекла. Она является основным источником сырья для сахарной промышленности в стране. Наибольшие посевные площади ее сосредоточены на Украине, Северном Кавказе, в центрально-черноземной зоне и в Поволжье. Сахарная свекла обладает широкой приспособленностью к почвенно-климатическим условиям и вышла далеко за пределы основной зоны свеклосеяния.

Свекловичные семена начинают прорастать при температуре 1... 4 °С, что позволяет сеять сахарную свеклу раньше, чем другие теплолюбивые культуры. Жизнеспособные всходы появляются при температуре 6... 7 °С. Поэтому хорошие условия для сева сахарной свеклы создаются, когда средняя суточная температура почвы на глубине 5—10 см достигает 5... 6 °С. С повышением температуры появление всходов ускоряется: при температуре 10... 12 °С они появляются через 12—14 дней, а при 15... 17 °С — через 7—8 дней. Проростки и семядоли сахарной свеклы гибнут при заморозках —3... —4 °С, а всходы переносят кратковременные понижения температуры до —6... —7 °С (табл. 24.4).

Рост корнеплодов начинается при накоплении суммы эффективных температур (выше 5 °С) 500 °С. Активный их рост и накопление сахара продолжаются до понижения средней суточной температуры воздуха осенью до 6 °С. Наиболее благоприятной для роста корнеплодов является температура около 20 °С. Угнетение растений начинается при температуре выше 30 °С. В годы с прохладными вёснами и при очень ранних сроках сева у некоторой части растений появляются цветоносные побеги в первый год жизни (цветушность). Сумма температур, используемая сахарной свеклой в основных районах свеклосеяния составляет 2200—2400 °С, в нечерноземной зоне и в Сибири — 1800—2000 °С, а на юге Киргизии — до 3000 °С.

Сахарная свекла во вторую половину вегетационного периода требовательна к свету. Недостаток света снижает урожайность и сахаристость корнеплодов. В условиях достаточной обеспеченности растений влагой сахаристость свеклы тем выше, чем больше солнечных дней в августе и сентябре.

Сахарная свекла относится к растениям, экономно расходующим воду. Но общий расход воды с 1 га из-за продолжительной вегетации значителен. Так, при урожае 40—50 т/га расход воды

Таблица 24.4

Температурные показатели (°С) роста и развития картофеля, овощных культур и сахарной свеклы (по А. И. Коровину, 1984)

Культура	Прорастание семян (клубней)				Появление всходов		Интервал активного роста и формирования высокого урожая	Заморозки, °С		
	интервал наибольшей всхожести	минимальная	оптимальная	максимальная	минимальная	оптимальная		переносятся без видимых повреждений	повреждающие	губительные
Картофель (формирование ботвы и клубней)	12... 20	4... 5	18... 20	31	7... 8	18... 20	10... 20	1... 2	—2... —3	—4... —5
Томаты	20... 30	14... 15	25	39	15... 18 (12... 14)	20... 30	15... 30	—1	—2... —3	—3... —5
Капуста белокочанная (рассада)	12... 20	—2	15... 20	30	4... 5 (5... 7)	12... 17 (12... 24)	12... 20 (12... 24)	—2	—3... —4	—6... —8
Капуста после высадки в грунт	—	—	—	—	—	—	12... 20	—2	—3... —5	—7... —9
Салат огородный	12... 20	3... 4	15... 22	27... 30	5...7	15... 22	12... 22	—2... —3	—4... —5	—6... —7
Свекла	—	5... 8	18... 20	25... 30	8...10	15... 18 (12... 25)	12... 22	—1... —3 (—2... —3)	—3... —4	—6... —8
Морковь	—	6... 10	18... 25	30... 35	8...12	15... 18 (15... 25)	12... 22	—2... —3 (—3... —4)	—3... —4	—5... —6
Редька, репа, турнепс, брюква	—	4... 5	15... 20	27... 30	7... 8	15... 18	12... 22	—2... —3	—3... —4	—5... —6
Сахарная свекла	—	1... 2	15... 20	30... 35	6... 7	15... 20	15... 23	—3... —4	—4... —6	—7... —8

Примечание. Для томатов заморозкоустойчивость дается после высадки рассады в грунт. В скобках даются отклонения для отдельных сортов.

составляет 3500—4000 м³. Наибольшее количество воды свекла расходует в июле и августе.

Потребность во влаге у сахарной свеклы высокая. Она увеличивается по мере роста растений и достигает максимальных размеров в восьмую декаду вегетации, а затем снова снижается. В то же время сахарная свекла отличается высокой засухоустойчивостью.

Хорошие условия для формирования урожая сахарной свеклы складываются при запасах продуктивной влаги в метровом слое почвы больше 100 мм в период до начала роста корнеплодов и больше 70 мм в период роста корнеплодов.

Выкопанные и неукрытые корнеплоды повреждаются заморозками —2 °С и после этого непригодны для зимнего хранения.

Картофель принадлежит к числу важнейших сельскохозяйственных культур разностороннего использования и возделывается почти во всех районах нашей страны — от Заполярья до крайних южных и восточных границ. Но основные площади его сосредоточены в нечерноземной, черноземной и лесостепной зонах.

Прорастание почек клубней картофеля в почве начинается при температуре 4... 5 °С, но идет при таких условиях крайне медленно. При температуре 10... 12 °С всходы картофеля появляются на 23-й день. Повышение температуры почвы до 18... 25° сокращает продолжительность периода от посадки до всходов до 12—13 дней. Дальнейшее повышение температуры почвы задерживает появление всходов. Яровизированные клубни могут дать всходы на 6—8-й день.

Всходы и взрослые растения повреждаются при кратковременных заморозках —2... —3 °С, однако с наступлением благоприятных температур побеги образуются из спящих почек. Клубни картофеля гибнут при —2 °С и теряют способность к прорастанию.

Ботва картофеля начинает расти при температуре воздуха выше 7 °С. Повышение температуры до 30 °С вызывает ослабление, а у раннеспелых сортов почти полную приостановку роста ботвы. Наиболее благоприятная температура для роста стеблей, листьев и цветения картофеля 20... 21 °С.

Для клубнеобразования оптимальная температура почвы 16... 18 °С. В период клубнеобразоваиия температурный оптимум для среднеспелых сортов картофеля более высокий (17... 19 °С), чем для раннеспелых (15... 17 °С (рис. 24.6). При повышении температуры до 29 °С или ее снижении до 2 °С рост клубней прекращается. Высокие температуры не только задерживают рост клубней, но и вызывают их экологическое вырождение. При средней суточной температуре 24 °С вырождение клубней достигает 50 % и более. Растения из таких клубней дают мелкие, больные клубни, что приводит к резкому снижению урожая. Поэтому в Средней Азии предпочитают ранневесенние посадки скороспелых сортов картофеля, которые позволяют собрать урожай до наступления жары. В южных районах рекомендуются также летние по-

садки картофеля с тем, чтобы период клубнеобразования приходился на сентябрь — октябрь, когда температура понижается.

Потребность во влаге у картофеля до появления всходов и в период после их появления невелика. По мере роста стеблей и листьев потребность во влаге возрастает и максимум отмечается в период цветения и начала клубнеобразования. Наиболее благоприятные условия для формирования хорошего урожая картофеля

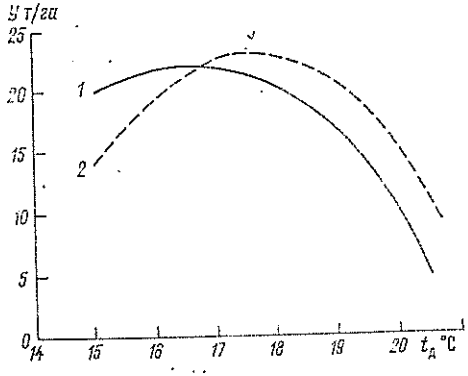


Рис. 24.6. Влияние дневных температур $t_д$ в период клубнеобразования на урожай картофеля (по А. Н. Полевому, 1970).

1 — раннеспелые сорта, *2* — среднеспелые.

создаются при влажности почвы около 80 % наименьшей влагоемкости и хорошей освещенности.

Прирост клубней картофеля независимо от температуры практически прекращается при запасах продуктивной влаги в почве меньше 20 мм в слое почвы 0—50 см. Наибольший прирост наблюдается при запасах влаги в полуметровом слое почвы 60—70 мм и температуре 16... 18 °С. Переувлажнение почвы приводит к быстрому загниванию клубней.

Картофель сравнительно экономно расходует влагу, его транспирационный коэффициент в среднем составляет 400—650. Вегетационный период картофеля в зависимости от скороспелости сорта колеблется от 60 до 180 дней.

24.5. Овощные и бахчевые культуры

В группу овощных и бахчевых сельскохозяйственных культур входят травянистые растения, принадлежащие к различным семействам. На территории нашей страны в различных почвенно-климатических зонах районированы сотни сортов разнообразных овощных культур. Каждая культура, каждый сорт характеризуется определенным набором требований к условиям освещенности, продолжительности светового дня, температурному режиму, условиям увлажнения, минерального и органического питания и т. д.

Капуста белокочанная — одно из основных пищевых растений стран умеренных широт. Наиболее благоприятными для ее возделывания считаются центральные и северо-западные районы

с умеренно теплым и влажным климатом. Вегетационный период раннеспелых сортов капусты составляет около 100 дней, позднеспелых — 200.

Капуста — холодостойкое растение, выращиваемое в основном рассадой. В период выращивания рассады оптимальной является температура 12... 24 °С. При температуре 30... 31 °С у капусты формируются уродливые листья. Всходы капусты погибают при —3 °С. Весной рассада, высаженная в открытый грунт, выдерживает до —3... —7 °С. В фазу технической спелости капуста выдерживает осенние заморозки до —8 °С. Резкие колебания температуры воздуха с переходом через 0 °С неблагоприятны для этой культуры. Нормальное формирование кочанов происходит при температуре 12... 20 °С, но не останавливается и при снижении ее до 5... 10 °С.

Капуста — влаголюбивое растение. Недостаток влаги в почве в любой межфазный период сдерживает развитие кочана. После высадки рассады в грунт необходимо поддерживать высокий уровень увлажнения почвы (70—80 % полной полевой влагоемкости). Капуста отзывчива на условия хорошей аэрации почвы. Поскольку капуста относится к растениям длинного дня, она нуждается в хорошем и продолжительном освещении.

Капуста — двухлетнее растение, цветение ее происходит на второй год при температуре 20... 25 °С. Более высокая температура тормозит рост как в первый, так и во второй год ее жизни. В южных районах страны вредное влияние высоких температур на капусту не снижается даже при обильных поливах. Поэтому раннеспелые сорта высаживаются в грунт весной, а позднеспелые — во второй половине лета. Урожай капусты в северных и центральных районах страны, как правило, больше, чем на юге.

Томаты. Это однолетняя теплолюбивая культура. Северной границей возделывания томатов в открытом грунте (высадка рассадой) считается изолиния суммы эффективных температур (выше 10 °С) 1500 °С. В открытом и защищенном грунте томаты культивируются во всех сельскохозяйственных районах страны, занимая из всех овощных культур второе место после капусты. Как рассадная культура томаты почти не подвергаются воздействию заморозков. На ранних стадиях развития растения выдерживают понижения температуры до —1... —2 °С, но при этом урожайность их впоследствии снижается на 30—50 %, а период созревания наступает на 8—10 дней позднее. Заморозки —3 °С сильно повреждают растения.

Рассаду высаживают в грунт в сроки, когда вероятность возврата весенних заморозков становится менее 20 %. В этот период в центрально-черноземных областях средняя суточная температура обычно достигает 12... 14 °С. От сроков высадки рассады в грунт в значительной мере зависит урожай томатов.

Оптимальные условия для активного развития и роста томатов складываются при температуре 15... 25 °С. При средней суточной температуре 10 °С и ниже рост побегов прекращается, а соцветия

опадают. Образование соцветий наступает при температуре выше 15 °С. 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 весенние и ранние осенние заморозки опасны для этой культуры.

Потребность в воде у томатов высокая, хотя их и относят к растениям сравнительно засухоустойчивым. Лучшая влажность воздуха для томатов 40—60 %, для почвы 70—80 % полной полевой влагоемкости.

Урожайность томатов зависит от уровня тепло- и влагообеспеченности. При снижении средней многолетней суммы активных температур (выше 10 °С) от 2000 до 1700 °С урожайность уменьшается на 35 %; при снижении этой суммы до 1500 °С урожайность уменьшается на 66 %.

Огурцы — однолетние растения, очень требовательны к теплу и хорошему увлажнению. Эта овощная культура широко распространена практически во всех основных земледельческих районах страны. Северная граница возделывания огурцов проходит около 62° с. ш. Более точной их северной агроклиматической границей является изолиния сумм эффективных температур (выше 10 °С) 1600 °С (один сбор раннеспелых сортов обеспечен в открытом грунте в 50 % лет); изолиния сумм эффективных температур 1900 °С ограничивает территорию, где обеспеченность сбора огурцов составляет 90 %.

Оптимальная температура прорастания семян 25... 30 °С. В условиях хорошего увлажнения почвы прорастание семян начинается при температуре 12... 15 °С. Снижение температуры до 0 °С губительно для растений. Если температура почвы понижается до 10 °С на сутки и более, корни огурцов быстро загнивают под влиянием патогенных микроорганизмов. Даже в случае выживания растений урожай огурцов будет очень низким.

Оптимальной для огурцов считается температура 25 °С; температура выше 35 °С угнетает растения и способствует снижению урожая. При средней декадной температуре воздуха 13... 15 °С растения повреждаются и погибают примерно на 20 % (от недостатка тепла), при средней декадной температуре 11... 12 °С погибает до 80 % растений. Вегетационный период огурцов длится 60—80 дней. Накопленная за это время сумма эффективных температур (выше 10 °С) составляет 1600—2000 °С.

Продолжительность межфазных периодов развития огурцов находится в тесной зависимости от температуры воздуха.

Оптимальная относительная влажность воздуха 90—95 %, влажность почвы — не ниже 80 % полной полевой влагоемкости.

Дыни и арбузы. Бахчевые культуры возделываются в Средней Азии, Южном Казахстане, Закавказье, на Северном Кавказе, Украине, в Среднем и Нижнем Поволжье и в Молдове. Северной границей их ареала является 52—53° с. ш. Дыни и арбузы — однолетние теплолюбивые растения. Даже низкие положительные температуры воздуха губительны для тканей растений. Снижение

температуры почвы до 10 °С в течение 24—30 ч вызывает повреждение корней, а температура воздуха 4 °С 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 энергетическом балансе растений, приводящим к разрушению клеток.

Арбузы и дыни — светолюбивые растения, хорошо развиваются на супесчаных черноземах и суглинистых почвах. Во влажной почве семена арбузов прорастают при температуре 16... 17 °С. Всходы у арбузов появляются на 8—10-й день, у дынь — на 9—16-й день при запасах влаги в слое почвы 0—20 см 20—30 мм и температуре почвы 14... 16 °С. Для появления всходов арбузов и дынь необходимо, чтобы суммы эффективных температур (выше 15 °С) составляли 30—70 °С в зависимости от их сортовых особенностей. Наиболее благоприятной температурой для роста стеблей и листьев является 20... 22 °С.

Продолжительность периода всходы — созревание плодов варьирует у различных по скороспелости сортов от 68 до 119 дней. Оптимальной температурой для развития плодов считается 25... 30 °С. При температуре выше 35 °С в период плодообразования опадают завязи. Цветение у дынь наступает при накоплении сумм эффективных температур (выше 15 °С) от даты всходов 240—400 °С, у арбузов 290—490 °С. Большой диапазон сумм температур связан с сортовыми особенностями этих культур. В период сев — созревание плодов дынь сумма эффективных температур должна составлять 770—1170 °С, плодов арбузов — 870—1240 °С.

Дыни и арбузы засухоустойчивы. При выращивании в условиях избыточного увлажнения плоды менее сахаристы с худшими вкусовыми качествами.

24.6. Плодово-ягодные культуры

Природные условия нашей страны позволяют почти повсеместно возделывать большое количество плодово-ягодных культур и их сортов. Большинство этих культур является многолетними растениями.

Плодовые и ягодные растения требовательны к условиям освещения. При недостатке света в условиях даже частичного затенения снижается интенсивность фотосинтеза, что приводит к опаданию завязей и уменьшению урожая. Качество плодов ухудшается. Они формируются более мелкими и слабо окрашенными, ухудшаются аромат и вкусовые достоинства. Из основных плодово-ягодных культур наиболее требовательны к освещению персик, абрикос и виноград, менее требовательны черешня, айва, груша, слива, яблоня и вишня.

Наиболее требовательны к теплу лимон, апельсин, мандарин, персик, несколько меньше — виноград, абрикос, черешня, айва и

зимние сорта груши. Далее идут в порядке убывающей требовательности: зимние сорта яблони, поздние сорта сливы, осенние сорта груши, яблони, ранние сорта сливы, вишни, летние сорта груши и яблони. Общая потребность различных сортов яблони в тепле, выраженная суммами активных температур (выше 10 °С), составляет 1800—2300 °С, винограда — 2200—4000 °С, цитрусовых — не менее 3500 °С за вегетационный период. Самые высокие урожаи винограда наблюдались в республиках Средней Азии в годы, когда сумма активных температур за период вегетации составляла 4500—5000 °С, а в Грузии — 3900—4300 °С. Недостаток тепла и влаги в период вегетации замедляет вегетативный рост, созревание урожая и ухудшает подготовку растений к зиме.

Хорошие условия влагообеспеченности плодово-ягодных культур складываются при запасах влаги в почве 70—80 % НВ. Наибольшая потребность во влаге у плодовых деревьев наблюдается в период цветения и активного роста и остается высокой до созревания плодов. Недостаток влаги в этот период отрицательно сказывается на урожае следующего года и подготовке деревьев к зиме, ведет к ослаблению их роста, уменьшению облиственности, образованию мелких недоразвитых листьев. При снижении запасов влаги в почве до 30 % НВ рост побегов прекращается. В период засухи листья, начиная снизу, свертываются, желтеют и усыхают, опадают недозревшие плоды. В то же время избыток влаги в почве в большей степени, чем ее недостаток, отрицательно сказывается на росте и развитии плодовых деревьев. Нормальные условия влагообеспеченности, например, яблони, складываются при равномерном выпадении в течение года осадков не менее 750—800 мм.

Независимо от возраста все многолетние плодово-ягодные культуры имеют ежегодно повторяющийся цикл развития, состоящий из двух периодов — вегетации и покоя.

Видимая вегетация надземной части древесины и кустарниковых растений начинается после перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С, когда начинается набухание почек. При температуре воздуха около 10 °С и выше почки начинают распускаться. С повышением температуры скорость развития растений увеличивается. Наиболее интенсивный рост побегов и соцветий происходит при температуре 23... 28 °С.

Наиболее важным периодом для плодово-ягодных культур является цветение. У абрикоса оно наступает при накоплении суммы эффективных температур (выше 5 °С) 88 °С, у груши и сливы — 125 °С, вишни — 150 °С, большинства сортов яблони — 185 °С.

В сухую и жаркую погоду цветение проходит быстро — примерно за 7 дней, а во влажную и прохладную продолжается 14—20 дней. Для цветения вишни и сливы наиболее благоприятна температура 10... 18 °С, яблони и груши — 15... 20 °С, персика — 18... 20 °С. Понижение температуры воздуха до 10... 12 °С и ниже неблагоприятно для цветения и оплодотворения, так как из-за слабого выделения нектара пчелы редко посещают цветущие деревья.

Отрицательно влияет на процесс опыления и оплодотворения температура 30 °С и выше.

В период цветения наиболее благоприятна относительная влажность воздуха 70—80 %, а при влажности воздуха ниже 25 % затрудняется опыление. Сильные ветры и продолжительные осадки также затрудняют опыление цветков. Заморозки —0,6... —3,0 °С повреждают цветки и завязи плодов. Средняя суточная температура воздуха ниже 14... 15 °С в первые дни после цветения уменьшает продуктивность плодовых культур.

В период образования завязей для большинства плодовых культур хорошие условия складываются при температуре 17... 18 °С, а в период роста плодов — при температуре 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, а температура выше 40 °С способствует засыханию ягод винограда.

В период созревания урожая температура выше 20 °С и сухая погода способствует быстрому накоплению сахаров и снижению кислотности плодов и ягод. После завершения формирования урожая благоприятной для подготовки растений к зиме является теплая и умеренно влажная погода. Такие условия способствуют накоплению в тканях пластических веществ и вызреванию древесины. Чем лучше прошло вызревание древесины, тем более низкую температуру может выдержать растение в зимний период.

24.7. Многолетние сеяные травы и пастбищная растительность

Сеяные травы. Они возделываются в полевых и кормовых севооборотах на обычных, орошаемых и осушаемых землях практически во всех экономических районах страны. Посевы многолетних трав в нашей стране располагаются почти на 40 % пашни, занятой кормовыми культурами.

Клевер красный и клевер розовый. В сельскохозяйственном производстве широкое распространение получили две разновидности клевера красного: позднеспелый, или одноукосный (северный), и раннеспелый, или двуукосный (южный). Возделывается также клевер розовый.

Семена клевера прорастают в условиях достаточного увлажнения почвы (70—80 % наименьшей влагоемкости) при температуре воздуха 1... 20 °С (табл. 24.5), причем чем выше температура, тем короче период от сева до всходов. Сумма эффективных температур воздуха (выше 5 °С) для этого периода составляет 65—75 °С.

Возобновление вегетации перезимовавших посевов клевера происходит, как и у большинства сеяных трав, при устойчивом переходе средней суточной температуры воздуха через 5 °С.

Таблица 24.5

Температурные показатели (°С) роста и развития основных многолетних кормовых трав (по А. И. Коровину, 1984)

Культура	Прорастание семян			Появление всходов			Интервал активного роста	Морозоустойчивость, °С		
	интервал наибольшей всхожести	температура		температура				переносят без видимых повреждений	повреждающие температуры	губительные температуры
		минимальная	оптимальная	максимальная	минимальная	оптимальная				
Клевер красный одноукосный	6... 28	0... 2	18... 20	32... 34	4... 5	15... 20	8... 22	—10... —12 (—8... —10)	—12... —15 (—10... —13)	—18... —20 (—20... —22)
Люцерна	18... 26	1... 2	20... 24	32... 34	5... 6	15... 22	8... 25	—10... —12 (—14... —15)	—12... —15 (—16... —18)	—18... —20 (—20... —22)
Тимофеевка	18... 32	4... 10	18... 28	32... 34	6... 7	15... 22	8... 22	—12... —16	—18... —20	—22... —24
Овсяница	18... 30	2... 10	18... 26	32... 34	5... 10	15... 25	8... 25	—12... —16	—18... —20	—22... —24
Ежа сборная	—	—	—	—	—	—	—	—	—18... —20	—22... —24
Житняк	12... 25	2... 4	18... 26	35... 40	5... 8	15... 25	9... 26	—12... —16	—18... —20	—22... —24
Костер безостый	—	2... 4	18... 22	32... 34	5... 8	15... 25	8... 25	—12... —16	—18... —20	—22... —24
Пырей безостый	12... 22	8... 10	18... 22	26... 30	10... 12	15... 24	10... 24	—12... —16	—18... —20	—22... —24

На растениях первого года посева в фазе кущения в пазухах настоящих листьев образуются боковые укороченные побеги. Через 35—40 дней после возобновления вегетации у клевера одноукосного наступает фаза стеблевания, двуукосный клевер вступает в эту фазу развития на 8—12 дней раньше.

Северные формы клевера красного очень чувствительны к интенсивности света до фазы бутонизации: скорость развития растений увеличивается с удлинением светового дня. При средней суточной температуре воздуха 15 °С наступает фаза бутонизации.

На второй год жизни клевера двуукосного период от возобновления вегетации до массового цветения охватывает 50—80 дней (суммы положительных температур 650—1000 °С), у клевера одноукосного этот период на 15 дней больше (сумма положительных температур 1000—1200 °С).

Для различных сортов клевера одноукосного в ареале его возделывания суммы эффективных температур (выше 5 °С) за период от возобновления вегетации до начала цветения должны составлять 430—620 °С, для сортов клевера двуукосного — 400—470 °С. Эти суммы температур получены для клеверов, развивающихся в условиях достаточного увлажнения — запасы влаги в метровом слое почвы 100 мм и более. В засушливых условиях (60—70 мм влаги) фаза цветения наступает раньше, при наборе сумм эффективных температур на 50—60 °С меньше.

Обильные летние осадки задерживают цветение клеверов и способствуют увеличению продолжительности периода линейного роста растений. В условиях засушливой жаркой погоды формируются низкорослые клевера. После первого укоса максимальный линейный прирост наблюдается в первые две-три декады. При температуре воздуха около 10 °С средний прирост клевера в высоту составляет 2—4 см за декаду, при больших температурах скорость роста значительно увеличивается, достигая 10—15 см (возможно до 24 см) за декаду в условиях достаточного увлажнения. Однако при средней декадной температуре воздуха выше 16... 19 °С линейный прирост побегов резко снижается (у различных сортов этот предел разный).

Продолжительность периода цветение — созревание семян у клевера составляет 28—66 дней в зависимости от температуры воздуха и количества осадков; сумма положительных температур варьирует от 560 до 910 °С; чем выше температура, меньше осадков и суше воздух, тем быстрее созревают семена. Благоприятной температурой считается 17 °С и выше.

Для формирования урожая зеленой массы клеверов наибольшее значение имеют условия влагообеспеченности. Высокие устойчивые урожаи клеверов получают в районах, где за лето выпадает 250—300 мм осадков (годовая сумма 400—500 мм и более); в условиях Западной Сибири клеверу требуется 350—400 мм осадков в год. В то же время клевер плохо переносит затопление — через 7—10 дней его посевы погибают.

Наилучшие условия для формирования высоких урожаев

(сена) клеверов складываются при выпадении 110—125 мм осадков за два первых месяца вегетации: в среднем при увеличении осадков на каждые 10 мм (в диапазоне 70—110 мм) урожай сена возрастает на 0,9 т/га.

Люцерна. Ареал возделывания различных сортов этой культуры очень широк. Это связано с такими качествами люцерны, как высокая зимостойкость и засухоустойчивость, которые при правильной агротехнике обеспечивают долговечность ее посевов без снижения урожайности на протяжении многих лет.

Прорастание семян люцерны начинается при температуре 2... 3 °С, всходы появляются 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. Дружные всходы отмечаются при температуре 17... 22 °С.

Сумма эффективных температур за период сев — всходы составляет 310—340 °С. От всходов до цветения люцерне первого года жизни необходимо около 1200 °С при средней температуре воздуха выше 14 °С, при более низкой температуре — до 1500 °С. В условиях прохладной погоды со средней температурой ниже 12 °С люцерна не цветет.

Весеннее возобновление вегетации люцерны после перезимовки на юге начинается в первой декаде марта после устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С.

От момента весеннего отрастания до фазы цветения необходима сумма положительных температур 700—900 °С, до фазы созревания семян — 1200—1600 °С.

При средней суточной температуре воздуха 16 °С сумма положительных температур за период весеннее отрастание — цветение составляет 800 °С, а за период отрастание после укоса — цветение — 700 °С.

Сроки проведения укосов люцерны обычно связывают с наступлением фазы массовой бутонизации и начала цветения.

На юге страны люцерна выращивается на поливе, что позволяет в производственных условиях проводить 3—4 и даже 5 укосов, а в опытном порядке до 7—8 (9) укосов за вегетационный период.

В Европейской части страны люцерна выращивается в основном на неорошаемых землях. Наилучшие условия для развития, роста и формирования высоких урожаев зеленой массы люцерны создаются при влажности почвы 70—80 % наименьшей влагоемкости, а для люцерны, оставленной после цветения на семена, наилучшие условия складываются при влажности 60—65 %. Но прохладная и дождливая погода способствует израстанию люцерны, полеганию ее побегов, ухудшает условия цветения и опыления. Избыточная влажность почвы, затопление посевов более чем на 10—15 дней приводит к их изреживанию и гибели от вымокания.

Злаковые травы. Многолетние злаковые травы обычно высеваются в виде травосмесей с бобовыми травами. Особенно хорошо такие смеси трав развиваются во влажном климате.

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 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 % НВ) образуется лишь 3—5 побегов. Наибольший рост стеблей происходит при температуре 16... 18 °С, максимальный прирост за сутки может быть более 5 см.

Колошение злаков начинается при средней суточной температуре воздуха выше 15 °С. Чем больше продолжительность периода возобновление вегетации — колошение, тем больше высота злаков. Цветение у злаков длится всего 6—12 дней.

Цветение трав наступает при накоплении следующих сумм эффективных температур (выше 5 °С) от даты возобновления вегетации: тимофеевки — 470 °С, овсяницы луговой — 450 °С, мятлика лугового и ежи сборной — 400 °С, лисохвоста лугового — 350 °С. Сроки уборки трав на сено 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 и влажности почвы и воздуха. Так, например, близкое залегание грунтовых вод (на глубине 100—120 см) обеспечивает влагой пырей корневищный, высота которого достигает 115—120 см; при глубине залегания грунтовых вод более 180 см высота этого растения не превышает 80—85 см.

У тимофеевки высокие урожаи сена (2—3 т/га) формируются 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 урожай тимофеевки не превышает 0,5—1,0 т/га. Хорошие урожаи зеленой массы тимофеевки ($>$20 т/га) отмечаются при средней температуре воздуха 10... 11 °С и ГТК = 1,5... 1,7; у овсяницы луговой наибольшие урожаи ($>$18 т/га) получают при средней температуре воздуха за период отрастание — колошение 9,5... 10,5 °С и ГТК = 1,4... 1,7.

Даты наступления первого укоса тимофеевки и овсяницы луговой в Европейской части страны соответствуют времени накопления суммы положительных температур 600 °С при подсчете их от даты устойчивого перехода температуры через 5 °С.

Пастбищная растительность. Естественная пастбищная и сенокосная растительность широко распространена на территории страны: от зоны тундры на севере до зоны пустынь на юге, а в горных районах от пустынностепного пояса (предгорья) до альпийских лугов (высокогорья). В различных природно-сельскохозяйственных зонах естественные кормовые угодья распределены

Таблица 24.6

Распределение естественных кормовых угодий по природно-сельскохозяйственным зонам и основные агроклиматические показатели зон (по Н. Н. Пельту, Д. И. Шашко и др., 1967)

Природно-сельскохозяйственные зоны	Всего естественных кормовых угодий, млн. га	Удельный вес в общесоюзном фонде кормовых угодий, %	Сумма осадков за год, мм	Сумма температур воздуха (выше 10 °С), °С	Коэффициент годового атмосферного увлажнения
Полярно-тундровая, лесотундровая и среднетаежная	5,2	1,4	150—400 (до 700 в горах)	400—1200 (1600)	0,49—1,33
Южнотаежная лесная	32,0	8,6	400—650	1400—2600	0,77—1,33
Лесостепная	12,1	3,2	100—600	1700—3000	0,67—1,16
Степная	26,2	7,0	350—500	2000—3500	0,40—0,77
Сухостепная	34,7	9,3	250—350	2200—3500	0,33—0,55
Полупустынная и пустынная	188,7	50,8	100—250	2400—4000	0,11—0,33
Горная	73,3	19,7	250—1000	4000—5200 в предгорьях; 4000—4400 в среднегорье	1,00—1,33

неравномерно. Агроклиматические условия для произрастания пастбищно-сенокосной растительности представлены в табл. 24.6.

Продуктивность пастбищной и сенокосной растительности зависит от количества тепла и влаги, их соотношения или степени соразмерности.

Наивысшая продуктивность растительного покрова характерна для зоны лиственных лесов. К северу от этой зоны в связи с уменьшением количества тепла и к югу из-за сокращения количества осадков продуктивность растительной массы снижается. Наименьший годичный прирост отмечается в холодной избыточно увлажненной тундре и в сухих жарких среднеазиатских пустынях.

В зоне лиственных лесов выпадает за год такое количество осадков, которое примерно соразмерно с испаряемостью, что создает оптимальные условия для формирования урожая пастбищно-сенокосной растительности. Для формирования высоких урожаев благоприятен теплый май и равномерное распределение осадков в апреле — июне.

В лесостепной зоне испаряемость превышает годовую сумму осадков. Максимум урожая злаково-разнотравных травостоев приходится обычно на конец июля, что совпадает с наиболее высокими температурами года.

Основное влияние на формирование урожаев трав оказывают осадки апреля — июня и средний дефицит влажности воздуха за

май. Чем больше дефицит влажности воздуха, тем ниже урожай трав.

Степная зона характеризуется дальнейшим сокращением количества осадков, повышением температуры и общей засушливости климата. Максимум накопления растительной массы наблюдается в конце июня, в июле. В условиях повышения засушливости климата все большую роль в формировании урожаев трав приобретают атмосферные осадки осенне-зимнего периода. Валовой урожай растительной массы определяется количеством осадков, выпавших за период с октября предшествующего года по июнь текущего.

В полупустынной зоне еще более увеличивается несоответствие между количеством тепла и влаги; засушливость и континентальность климата становятся главными его чертами. Возрастает доля позднеосенних и зимних осадков, соответственно снижается их количество в теплое время года. Максимум урожая трав приходится на июнь. Основным факторов формирования урожая трав является количество осадков зимне-весенне-летнего периода.

В пустынной зоне диспропорция между количеством тепла и осадков достигает максимальных значений. При общем незначительном годовом количестве осадков распределяются они по сезонам года неравномерно: максимум приходится на весну, лето сухое и знойное. Урожай растительной массы в основном определяется весенними запасами продуктивной влаги в корнеобитаемых горизонтах почвы. Связь урожая с количеством осадков несколько хуже, чем в предыдущей зоне, так как значительная часть осадков в зимне-весенний период расходуется на испарение или сток в условиях пустынно-горного рельефа.

Особенностью горных районов является их вертикальная зональность или поясность. Географы различают в горах следующие пояса (снизу вверх): предгорная пустыня, степной пояс, луговостепной, лесной (субальпийский), альпийский, гляциальный (ледниковый). Оптимальные условия для формирования урожаев горной сенокосно-пастбищной растительности складываются в лесном (субальпийском) поясе. В альпийском поясе за счет увеличения абсолютной высоты над уровнем моря теплообеспеченность растений снижается, а благодаря значительному увеличению солнечной радиации в летний период (по сравнению с более низкими поясами) сокращается длительность периода вегетации; в этом поясе формируется низкорослый альпийский растительный покров.

Ниже субальпийского пояса теплообеспеченность растений возрастает, но уменьшается количество осадков, что также определяет более низкие урожаи растительной массы, чем в субальпийском поясе.

Природные условия горных районов чрезвычайно разнообразны и контрастны, что связано с высотой над уровнем моря, различной ориентацией склонов, режимом горно-долинной циркуляции атмосферы и другими факторами.

Глава 25

ПОГОДА И АГРОТЕХНИКА

В агрометеорологическом аспекте агротехника рассматривается как комплекс практических способов воздействия на компоненты радиационного, теплового и водного балансов припочвенного слоя воздуха и почвы с целью обеспечения максимального соответствия условий среды потребностям сельскохозяйственных культур (А. П. Федосеев, 1979). Способы воздействия могут быть прямыми и косвенными. К прямым средствам воздействия, регулирующим водно-воздушно-тепловой режим почвы и воздуха и световой режим посевов, следует отнести обработку почвы, орошение и осушение, агролесомелиорации, снежные мелиорации, нормы посева и другие приемы. К косвенным — приспособление сроков сельскохозяйственных работ и некоторых агротехнических приемов к ритмам и особенностям климатических и погодных условий.

С целью возможного уравновешивания жизненно важных факторов, например тепла и влаги, комплекс агротехнических и агромелиоративных мероприятий может быть направлен как на увеличение недостающего фактора (орошение, приемы снегонакопления и задержания стока, увеличение влагоемкости и водопроницаемости почвы, использование чистых паров, снижение непродуктивного испарения и транспирации растений, утепление почвы с помощью различных агротехнических приемов, размещение посевов с учетом рельефа местности и т. п.), так и на ограничение или уменьшение избыточного (осушение, увеличение затрат тепла на испарение, возделывание культур только во влажный прохладный период года и т. п.).

Теоретические положения агрометеорологического обоснования дифференциации агротехнических приемов (дифференцированной агротехники) возделывания сельскохозяйственных культур в зависимости от условий погоды сформулированы М. С. Куликом (1967) и А. П. Федосеевым (1979).

25.1. Агрометеорологические условия и сев зерновых культур

Сроки посева оказывают большое влияние на качество и величину урожая. С ними неразрывно связаны условия роста и развития растений, устойчивость к неблагоприятным метеорологическим явлениям, условия уборки урожая, эффективность других агротехнических мероприятий: борьба с сорной растительностью, вредителями и болезнями, эффективность удобрений.

Путем выбора тех или иных сроков посева представляется возможность помещать растения в условия различной длины светлого времени суток, температуры и влажности воздуха и почвы.

Оптимальные сроки посева определяются биологическими особенностями возделываемых культур и их сортов и агрометеорологическими условиями.

Сроки сева ранних яровых культур. Средние оптимальные сроки сева ранних яровых культур, при которых урожай зерна бывает максимальным, различны по территории и зависят от агроклиматических условий.

На рис. 25.1 показана динамика урожайности яровых хлебов в зависимости от сроков сева. За 100 % приняты урожаи зерна при первом возможном сроке посева (при наступлении мягкопластичного состояния почвы — спелости «крошения»).

Оптимальные сроки сева ранних яровых зерновых культур на территории ЕЧС — в основном ранние сроки. Однако отклонение от ранних сроков в сторону более поздних в различных частях территории сказывается на снижении урожаев неодинаково (см. рис. 25.1). Здесь прослеживается следующая закономерность: чем короче период от перехода температуры воздуха через 0 °С до перехода ее через 10 °С весной, тем больше потери урожая при опо-

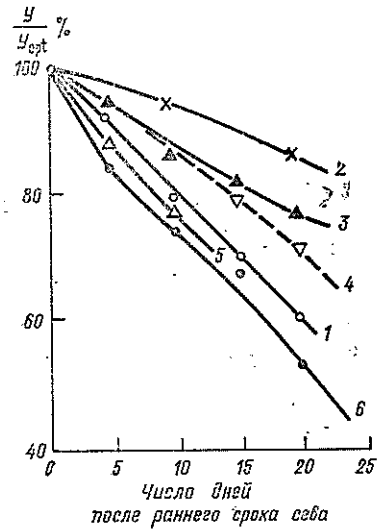


Рис. 25.1. Зависимость средней урожайности (% максимальной) ранних яровых колосовых культур от сроков сева (по А. П. Федосееву, 1979).

1 — Центральный нечерноземный район, *2* — районы Прибалтики, *3* — северная часть Уральского района, *4* — средняя и южная части Уральского района, *5* — Центральный черноземный район, *6* — Юго-Восток.

здании с посевом и тем короче, более сжатым, должен быть период сева.

При отклонении сроков сева от оптимальных ритм метеорологических условий перестает соответствовать биологическим требованиям культуры. Иногда при изменении сроков сева лишь на несколько дней критические периоды развития растений проходят в совершенно различных условиях погоды.

Особенности изменения условий среды при смещении сроков сева от возможно ранних к поздним определенным образом сказываются на уровне урожая и его структуре (табл. 25.1). При запаздывании с севом ранних яровых культур в условиях нечерноземной зоны ЕЧС понижается продуктивная кустистость растений, убывает плотность продуктивного стеблестоя, число зерен в колосе и абсолютная масса зерна. Кроме того, поздние посевы сильнее повреждаются скрытостебельными вредителями (см. табл. 25.1).

Посевы ранних сроков более отзывчивы на удобрения. Запаздывание с посевом на 20—30 дней вызывает снижение эффективности удобрений на 37—44 %. Затягивание сроков сева сказы-

Таблица 25.1

Урожайность и отдельные показатели структуры урожая яровых зерновых культур в зависимости от сроков посева; нечерноземная зона ЕЧС (по А. П. Федосееву, 1979)

Показатель	Ранний (оптимальный) срок посева	Срок посева позже оптимального, дни			
		5	10	15	20
Урожай зерна, ц/га	26,6	24,6	21,9	21,4	20,2
Число продуктивных стеблей на 1 м²	625	—	580	545	—
Число зерен в колосе	17,8	16,7	16,4	15,6	—
Масса 1000 зерен, т	43,0	43,3	41,8	39,9	—
Кустистость					
общая	1,98	2,00	2,16	2,17	—
продуктивная	1,62	1,41	1,34	1,26	—
Число поврежденных стеблей, %	12	20	28	43	—
Влажность зерна при уборке, %	19	18	—	24	—

вается на снижении эффективности фосфорно-калийных удобрений. Заметное снижение эффективности азотных удобрений наблюдается в годы с быстрым нарастанием температур, тогда как в холодные, затяжные весны их эффективность при различных сроках сева более устойчива. Запоздание с севом нередко сказывается на качестве зерна — на 1—3 % снижается содержание белка.

В северной и северо-восточной частях нечерноземной зоны поздние посевы могут попадать под осенние заморозки. В условиях влажной осени задерживается физиологическое дозревание семян, усложняется уборка и последующее хранение зерна. Уборочная влажность зерна поздних посевов возрастает (см. табл. 25.1), что связано с созреванием семян в условиях более пониженных температур и повышенного увлажнения.

Сроки сева озимой пшеницы и ржи. Основа будущего урожая озимых культур закладывается при установлении оптимальных сроков сева. Считается, что сев озимой ржи и пшеницы в благоприятных условиях увлажнения следует проводить за 45—60 дней до прекращения осенней вегетации, при переходе суточной температуры воздуха через 14... 17 °С. За этот период накапливается примерно 450—550 °С положительных температур, а растения формируют три-шесть побегов. Обычно наибольший урожай получается на тех посевах последнего срока, на которых растения к концу вегетации успевают достигнуть этапа готовности формирования зачаточного колоса и затем выколоситься в наиболее раннюю дату. Растения более ранних сроков сева хотя и проходят эти стадии, но их продуктивность снижается при перезимовке из-за сильного поражения болезнями и вредителями, израстания,

недостаточной закалки. Растения поздних сроков сева не успевают достигнуть этапа готовности к переходу в генеративную стадию. Весной они продолжают вегетативный рост, а генеративная стадия проходит при более высокой температуре, худшей влагообеспеченности и длинном дне. Все это снижает продуктивность колоса.

Оптимальные сроки сева для разных сортов озимой пшеницы в одном и том же климатическом районе не совпадают. Это обусловливается их фотопериодической реакцией. Сорта с сильно выраженной фотопериодической реакцией следует сеять в более ранние сроки. Так, осенью в условиях постепенно укорачивающегося дня морозостойкие сорта сильнее, чем слабозимостойкие, реагируют на короткий день задержкой своего развития и должны высеваться раньше. Наиболее поздно могут высеваться зимующие мексиканские короткостебельные сорта со слабой фотопериодической реакцией.

Биологически наилучший срок сева озимых культур определяется в основном оптимальным числом побегов к прекращению вегетации.

А. Я. Грудевой (1970) были установлены связи темпов побегообразования у различных сортов озимой ржи и пшеницы в зависимости от суммы положительных температур за период начало кущения — прекращение вегетации (табл. 25.2).

Таблица 25.2

Сумма положительных температур за период начало кущения — прекращение вегетации, обеспечивающая образование определенного количества побегов (по А. Я. Грудевой, 1970)

Влагообеспеченность посевов	Темп кущения	Сумма положительных температур, °С									
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Достаточная	Высокий	1,4	2,1	3,0	3,8	4,7	5,5	6,4	7,2	8,1	8,9
	Средний	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
	Низкий	1,8	2,3	2,7	3,1	3,5	4,0	4,4	4,8	5,2	5,7
Недостаточная	Озимая пшеница в целом	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6

Оптимальные сроки сева озимых культур в агрометеорологическом аспекте определяются условиями увлажнения и «тепловой емкостью» периода сев-прекращение вегетации. Чем продолжительнее осенний период с теплой и влажной погодой, тем более поздними будут оптимальные сроки сева озимых.

Зависимость урожая от сроков сева носит характер одновершинной кривой с двумя минимумами (рис. 25.2). Средние оптимальные сроки сева озимой ржи и пшеницы сдвигаются с севера на юг с начала августа на конец сентября. Чем короче (и холоднее) или суше осенний период, тем более ограничен период опти-

мальных условий для сева. Чем продолжительнее, теплее и влажнее осень, тем продолжительность периода оптимальных условий для сева озимых больше.

При отклонении сроков сева от оптимальных на 15—20 дней урожайность озимых падает на 15—35 % в зависимости от почвенно-климатического района (см. рис. 25.2).

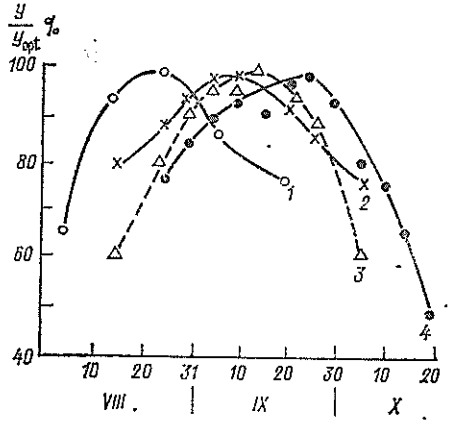


Рис. 25.2. Зависимость средней урожайности (%) озимой пшеницы от сроков сева для территории ЕЧС (по А. П. Федосееву, 1979).

1 — Центральный черноземный район, *2* — лесостепная зона, *3* — степная зона, *4* — сухостепная зона.

Растения оптимальных сроков сева более зимостойки и продуктивны. При поздних сроках сева продуктивный стеблестой получается разреженным, уменьшается абсолютная масса зерен, снижается продуктивная кустистость (табл. 25.3). В годы с благо-

Таблица 25.3

Структура урожайности и другие показатели озимой пшеницы в зависимости от сроков сева (по А. П. Федосееву, 1979)

Показатель	Срок							
	раньше оптимального на			оптимальный	позже оптимального на			
	30 дней	20 дней	10 дней		10 дней	20 дней	30 дней	40 дней
Число продуктивных стеблей, м²	390	390	430	425	395	330	250	240
Масса 1000 зерен, г	32,9	37,4	37,3	37,9	36,2	—	34,7	—
Продуктивная кустистость	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5
Количество сохранившихся растений за зиму, %	64	69	78	87	82	69	67	—
Повреждение скрытостебельными мухами, %	—	41	20	8	6	—	7	0
Поражение ржавчиной, %	42	37	26	23	24	33	44	—
Содержание белка в зерне, %	—	13,1	13,7	14,0	13,5	13,5	12,1	—

приятными агрометеорологическими условиями весеннего периода хорошо кустящиеся сорта (например, Мироновская 808) частично способны восполнить редкий стеблестой за счет весеннего кущения. Растения очень ранних или очень поздних сроков сева менее устойчивы к неблагоприятным условиям зимовки. Их сохранность за зиму в среднем на 20 % ниже, чем растений оптимальных сроков. У растений ранних сроков сева узел кущения формируется ближе к поверхности почвы. Полнота всходов у ранних сроков сева из-за сухости верхних слоев почвы в среднем несколько ниже, а у поздних — равна или несколько выше, чем на посевах оптимальных сроков. Посевы ранних сроков сильнее повреждаются шведской и гессенской мухами, ранних или поздних сроков — более подвержены поражению ржавчиной. Зерно посевов оптимальных сроков отличается повышенным содержанием белка (табл. 25.3).

Наибольшая эффективность удобрений по озимым культурам проявляется на посевах оптимальных сроков сева, когда продолжительность периода сев — окончание осенней вегетации составляет в среднем 46—55 дней (табл. 25.4).

Таблица 25.4

Зависимость эффективности удобрений (NPK = 120... 180 кг/га) под озимую пшеницу и рожь от продолжительности периода сев — переход температуры осенью через 5 °С (по А. П. Федосееву, 1979)

Продолжительность периода, дни	Средняя прибавка урожая	
	ц/га	%
<25	4,2	66
25—35	5,9	92
36—45	6,1	95
46—55	6,4	100
56—65	5,9	92
66—75	5,9	92
76—86	5,3	83

Нормы сева. Рациональное размещение растений в посеве — один из самых главных и старых вопросов земледелия. Он содержит несколько аспектов: биологический (потенциальная продуктивность сортов, скороспелость, кустистость, устойчивость к полеганию и т. п.), агротехнический (внесение удобрений, предшественники, срок и способы посева и др.), природный (естественное плодородие почвы, физико-химические свойства почвы, местоположение поля по рельефу и т. д.), хозяйственный (засоренность полей, назначение посевов — на зерно, на зерно с подсевом трав, на семена, на зеленую массу, качество семян и т. д.), агрометеорологический (обеспеченность светом, теплом и влагой в течение

вегетационного периода в соответствии с меняющимися в онтогенезе потребностями растений).

Эксперименты, проведенные А. П. Федосеевым и Д. В. Козинец (1972), показали, что в годы с нормальным и избыточным увлажнением при пониженных температурах (7... 11 °С) периода сев — всходы прослеживается тенденция к снижению полевой всхожести семян при увеличении норм сева. В годы с недостаточной влажностью верхних слоев почвы и повышенной температурой за период (11... 17 °С) полнота всходов с увеличением норм сева возрастает.

Способность зерновых злаков к кущению — существенный фактор, в сильной степени корректирующий нормы сева. Кущение

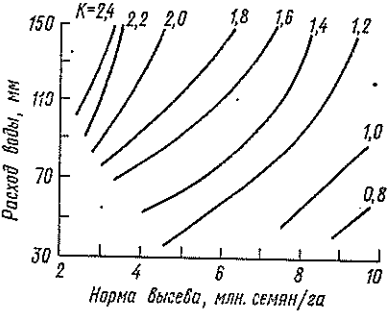


Рис. 25.3. Зависимость продуктивной кустистости *К* ячменя (сорт Винер и Московский 121) от норм высева и суммарного расхода влаги из полуметрового слоя почвы за период начало кущения — колошение; дерново-подзолистые суглинистые почвы среднего уровня плодородия Центрального нечерноземного района (по А. П. Федосееву, 1979).

эффективно, если оно проходит дружно и в ранние сроки, если дополнительные побеги хорошо обеспечены влагой и питательными веществами. Обычно различают *общую* (количество всех стеблей на одно растение) и *продуктивную кустистость* (количество продуктивных — колосоносных стеблей на одно растение).

Как видно из рис. 25.3, густота стояния растений и уровень влагообеспеченности посевов обладают взаимокомпенсационным воздействием на *коэффициент продуктивной кустистости* (КПК) ячменя. Так, преимущественно одностебельные посевы (КПК = = 1,0... 1,2) формируются при средних нормах посева, но небольших расходах влаги за период кущение — колошение ($\leqslant$40 мм) или при высоких нормах посева и различной влагообеспеченности. В последнем случае КПК = 1,2 может наблюдаться при высоких расходах влаги (более 100 мм). При средней и низкой влагообеспеченности на высоких нормах сева КПК снижается до 0,8—1,0. Область наибольших показателей КПК лежит в левой верхней части графика, соответствующей низким нормам сева, высокой и средней влагообеспеченности. Таким образом, приведенная зависимость четко указывает на необходимость учета уровня увлажнения при выборе оптимальных норм сева в конкретном году.

Средняя сохранность числа растений от всходов до уборки ячменя 80—90 %. Но в различные по метеорологическим условиям годы она колеблется от 100 до 41—50 % и реже до 30—40 %.

При высоком увлажнении (расход влаги за период начало кущения — колошение 100—140 мм) и при повышенных нормах сева (более 6 млн. семян/га) наблюдается снижение сохранности растений. При среднем увлажнении (расход влаги 60—90 мм) высокая сохранность растений (90—95 %) наблюдается почти при всех испытанных нормах сева (до 8 млн. семян/га).

Наибольшие урожаи зерна при недостаточном увлажнении имели место при нормах сева 3—4 млн. семян/га, при среднем — 5—6 млн. семян/га, для расходов влаги 100—120 мм — при 7—9 млн. семян/га. При высоких расходах влаги (более 130 мм) происходит сдвиг зоны оптимальных норм вновь в сторону низких норм сева (3—4 млн. семян/га). Это объясняется интенсивным полеганием посевов в условиях высокого увлажнения и больших норм сева. У сортов, устойчивых к полеганию, подобного сдвига может и не быть.

25.2. Погода и работы по уходу за посевами

Уход за посевами включает разнообразные работы и приемы. К ним относятся послепосевное прикатывание почвы, снежные мелиорации, задержание или отвод талых вод, разрушение почвенных корок, весеннее боронование озимых, подкормки посевов удобрениями, борьба с сорняками, полеганием посевов, вредителями и болезнями. Условно к этим работам можно отнести подсев или пересев поврежденных посевов озимых культур.

Прикатывание почвы и боронование посевов. Одним из приемов ухода за яровыми и озимыми культурами является предпосевное или послепосевное прикатывание почвы. При предпосевном прикатывании выравнивается и уплотняется почва, что способствует более равномерной заделке семян. Так, при севе в рыхлую пашню в оптимальный слой почвы попадает в среднем всего около 50 % семян, при севе в предварительно прикатанную почву в оптимальный слой заделывается около 80—90 % семян.

Прикатывание создает лучший контакт частиц почвы с семенами, способствует подтягиванию влаги из нижних слоев и повышает температуру верхних слоев почвы. По многочисленным опытным данным, запасы влаги в пахотном слое почвы при прикатывании возрастали в среднем на 2—10 мм, температура почвы повышалась в среднем на 1—3 °С.

Более благоприятные водно-физические условия, создаваемые при уплотнении верхних слоев пахотного горизонта, на 5—8 % повышают полевую всхожесть семян, обеспечивают более раннее (на 1—3 дня) появление всходов, что положительно влияет на развитие надземных и подземных органов растений, густоту продуктивного стеблестоя и урожай.

Осеннее прикатывание озимых посевов оказывает положительное влияние на их перезимовку. Прибавка урожая в результате прикатывания почвы составляет в среднем 1,0—2,5 ц/га зерна.

Прикатывание бесструктурных заплывающих почв нецелесообразно. Почвы, уже имеющие в период сева оптимальную плотность сложения пахотного слоя около 1,2—1,3 г/см^3, в прикатывании не нуждаются. Недопустимо прикатывание переувлажненных почв. Уплотнение избыточно влажной почвы ухудшает ее воздушный режим и вызывает образование плотной корки. Если запасы доступной влаги в пахотном слое почвы более 50 мм, то прикатывание не рекомендуется.

Нередко после сева на поверхности почвы образуется корка, ухудшающая условия произрастания семян и дальнейшее развитие растений. В этом случае проводится довсходовое или послевсходовое боронование. Температура почвенных слоев под коркой на 1—2 °С выше, чем на разрыхленном поле. Температура самой корки (на глубине 3—4 мм) на 2—3 °С ниже рыхлой поверхности поля. Через корку идет интенсивное испарение воды. Влажность пахотного слоя суглинистой почвы со сравнительно небольшой коркой (толщина корки 4 мм, уплотненный подкорковый слой 8 мм) на ячмене и картофеле была на 8 мм ниже, чем почвы с разрушенной коркой. Если образование твердой или плотной поверхностной корки происходит в период сев — появление всходов, то рекомендуется довсходовое боронование поля.

Во время появления всходов бороновать посевы нельзя. Если корка образовалась после появления всходов, то боронование проводится позже, когда растения окрепнут, укоренятся — примерно в начале кущения. Почва при бороновании должна быть мягкопластичной. При липком состоянии почвы боронование откладывается на более позднее время.

При рекомендации послевсходового боронования надо обращать внимание на густоту всходов. По изреженным всходам (менее 300 растений на 1 м^2) боронование не проводится. Кроме боронования в начале вегетации яровых посевов практикуется боронование озимых культур после зимовки. Весеннее боронование (рыхление) озимых применяется для разрушения почвенной корки, улучшения аэрации, активизации микробиологических процессов в почве, удаления погибших растений и листьев и уничтожения сорняков. Раннее боронование способствует улучшению условий формирования зачаточного колоса.

Эффективность минеральных удобрений в связи с климатическими и погодными условиями. Эффективность удобрений определяется сложным комплексом условий: почвенным плодородием, биологическими особенностями сельскохозяйственных культур и их сортов, агротехникой, способами, сроками, количеством и качеством вносимых удобрений, климатическими и погодными условиями. Последние часто имеют решающее значение (А. П. Федосеев, 1979). Связь эффективности удобрений с увлажненностью почвы и ее плотностью сложения приведена на рис. 25.4.

Известно, что параметры структуры и плотности почвы достаточно хорошо отражают условия жизни растений, а именно ком-

ния увеличивают (но не выше определенного для заданного уровня урожайности верхнего предела дозы).

Рассчитанное на запланированный урожай количество фосфорных и калийных удобрений корректируют в соответствии с дозами азотных удобрений.

При ожидании засушливого лета (по прогнозу) соотношение между азотом, фосфором и калием изменяется в сторону увеличения доли фосфорно-калийных удобрений.

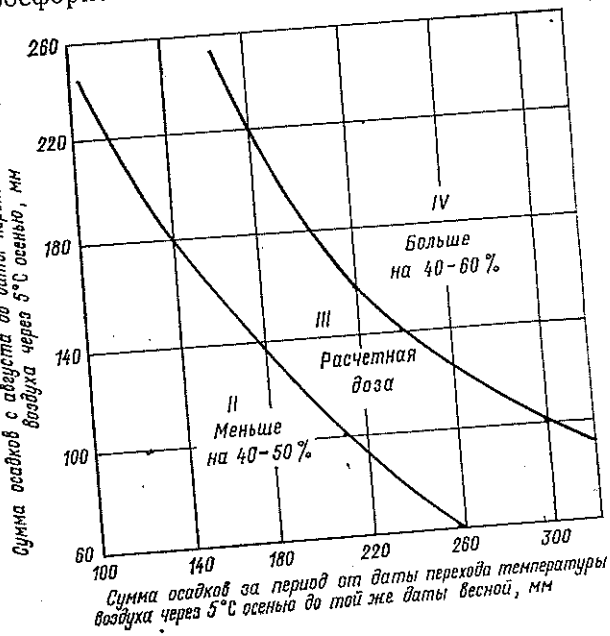


Рис. 25.6. Поправки к установленным дозам азотных удобрений по фону $P_{40-80}K_{40-80}$ под ранние яровые колосовые культуры в зависимости от количества осадков за осенне-зимний период по занятым парам и непаровым предшественникам; нечерноземная зона ЕЧС (по А. П. Федосееву, 1985).

Оптимизация доз азотных подкормок зерновых культур висимости от условий погоды. Для полного обеспечения рас элементами пищи во все периоды их развития необходимо вильно сочетать различные способы внесения удобрений: до ное, припосевное и послепосевное (подкормки). Весьма э тивна ранняя весенняя подкормка озимых культур азо удобрениями. Для других культур подкормки целесооб в зоне достаточного увлажнения, в условиях орошения, на ных почвах.

Эффективность подкормок в большой степени зависит бенностей агрометеорологических условий. Их учет позвол высить целесообразность и экономичность использования

рений. Сигналом наступления оптимального срока весенней подкормки озимых культур служат дата перехода температуры почвы через 9,5 °С или дата накопления суммы средних суточных температур 200 °С от даты ее перехода через 0 °С. Азотную подкормку проводят до даты накопления суммы положительных температур 260 °С от даты ее перехода через 0 °С, так как в это время начинается интенсивное потребление азота растениями. Установлено, что поздняя подкормка азотными удобрениями зерновых культур в период колошение — цветение повышает содержание белка в зерне и в отдельных случаях урожай зерна. Эффект от такой подкормки наблюдается не ежегодно и зависит от условий погоды. Азот может попасть в зону деятельных корней только с водой, поэтому эффективность подкормки зависит от влажности верхних слоев почвы и продолжительности бездождного периода после внесения азотных удобрений.

Величина прибавки протеина зависит от влажности почвы в слое 0—20 см. При увлажнении <10 и >90 % НВ подкормка бесполезна, а иногда и вредна (изменение содержания протеина в зерне колеблется от —0,6 до 0,2 %). При влажности почвы в день подкормки 20—50 % НВ величина прибавки зависит от последующих осадков и срока их выпадения. Влажность почвы 50—80 % НВ обеспечивает прибавку более 1 %. Избыточное увлажнение во время подкормки и после снижает величину прибавки. Зависимость прибавки протеина $\Delta П$ от влажности почвы при летней подкормке зерновых культур можно описать уравнением (З. А. Шостак, 1974)

$$\Delta П = 0{,}058\,\frac{W}{\text{НВ}} - 0{,}000005\left(\frac{W}{\text{НВ}}\right)^3 - 0{,}55, \qquad (25.1)$$

$$S_{\Delta П} = \pm 0{,}6,$$

где $W/\text{НВ}$ — влажность почвы во время подкормки, % НВ.

Летняя подкормка рекомендуется в том случае, если влажность почвы равна 50—80 % НВ (мягкопластичное состояние почвы). Следует иметь в виду, что осадки, выпадающие после подкормки, особенно более 20 мм за сутки, могут снизить ее эффективность. Если влажность почвы составляет 25—50 %, то подкормку можно рекомендовать сразу после дождя 5 мм, прошедшего до фазы цветения.

Обычно если основное удобрение вносится под вспашку в достаточном количестве, а при посеве в рядки добавляется суперфосфат, то в этих случаях потребность яровых зерновых культур в минеральном питании обеспечивается полностью. При недостаточном их внесении рекомендуются весенние подкормки.

Весенняя подкормка усиливает кущение растений, увеличивает плотность продуктивного стеблестоя, способствует формированию большей площади биомассы и повышает в среднем на 20 % фотосинтетический потенциал посевов. Вносимая накануне формирования колосков подкормка вызывает увеличение числа зерен в ко-

лосе и их абсолютной массы, дает прибавку урожая зерна в среднем 3 ц/га.

Для ячменя признаком целесообразности весенних подкормок служат размеры почвенных запасов влаги на начало кущения (обычно третья декада мая — первая декада июня).

В силу значительной инерционности почвенных запасов влаги можно по запасам влаги в период кущения с определенной вероятностью судить об уровне влагообеспеченности посевов яровых в последующий период вегетации. Как правило, высокие исходные влагозапасы в климатических условиях Центрального нечерноземного района РСФСР исключают возможность длительной почвенной засухи во второй половине вегетации, особенно на суглинистых почвах. Наоборот, при небольших запасах влаги в фазу кущения (порядка 60—70 мм в полуметровом слое почвы) велика вероятность последующего недостатка почвенной влаги (почвенной засухи) в течение трех декад и более (за декаду с почвенной засухой принимается декада с влажностью почвы в слое 0—20 см ниже 10 мм).

Подсчитано, что учет условий увлажнения в целях дифференцированного подхода к установлению оптимальных доз азотных удобрений обеспечивает экономию в среднем 10 % азотных туков, способствует повышению урожайности и снижению возможного загрязнения окружающей среды (главным образом рек и водоемов) избыточными химическими веществами.

25.3. Агрометеорологическое обоснование программирования урожаев

Программирование урожаев представляет собой расчет урожайности по заранее составленной программе с учетом физико-географических, экономических, почвенно-климатических, погодных условий и биологических особенностей растений (И. С. Шатилов, 1976; А. П. Федосеев, 1985).

Рассмотрим основные положения по учету агрометеорологических условий при программировании урожаев, реализованные А. П. Федосеевым (1985) на примере отдельных областей Европейской части страны применительно к культуре ярового ячменя.

Первоначально учитываются потенциальные возможности сорта при идеальных климатических условиях. Затем значения расчетной урожайности ограничиваются неблагоприятными климатическими факторами, находящимися в минимуме, недостатком питательных веществ в почве, возможным несоблюдением агротехники, воздействием сорняков, вредителей и болезней и др. Такой подход позволяет рассчитывать планируемый урожай на фактический или задаваемый уровень факторов для конкретного поля. При этом принимается следующая классификация категорий урожаев, являющаяся развитием системы, предложенной Х. Г. Томингом (1977), Е. Е. Жуковским (1982) и др.

Потенциальный теоретический урожай $У_п$ — обеспеченный при-

ходом фотосинтетически активной радиации (ФАР), используемой на теоретически возможном уровне (5—7 %) при оптимальном режиме других метеорологических факторов, оптимальном минеральном питании, идеальной почве, высоком уровне агротехники и максимальном уровне биологического потенциала сорта.

Климатически обеспеченный урожай $У_к$ — действительно возможный урожай (по Тоомингу) — отличается от потенциального урожая учетом лимитирующего действия различных метеорологических факторов (как правило, влаго- и теплообеспеченности) в конкретных климатических условиях.

Урожай, обеспеченный имеющимся плодородием почвы $У_{пп}$, который может быть получен на конкретном поле в реальных климатических условиях с учетом фактического плодородия почвы и достигнутого уровня потенциальной продуктивности современных сортов и гибридов.

Планируемый урожай $У_{пл}$, на который практически целесообразно ориентироваться при планировании агротехнических и мелиоративных мероприятий при задаваемом уровне культуры земледелия, возможном уровне минерального питания, достигнутом потенциале продуктивности сортов и гибридов.

Фактический урожай в производстве $У_ф$ — обычно несколько заниженный по сравнению с урожаями $У_п$, $У_к$ и $У_{пл}$ вследствие неоптимальности агротехники, потерь от вредителей и болезней и при уборке.

Определение потенциального урожая. Для приближенной оценки потенциального урожая используется формула Х. Г. Тооминга и Б. И. Гуляева (1975)

$$У_п = \eta Q_ф / q, \tag{25.2}$$

где $Q_ф$ — суммарный приход ФАР за период вегетации, η — потенциальный коэффициент использования ФАР посевов, q — калорийность единицы сухого органического вещества.

Определение климатически обеспеченного урожая. В действительности потенциальный урожай $У_п$ ограничивается отклонением метеорологических факторов от оптимальных значений, что при определении климатически обеспеченных урожаев $У_к$ отражается функцией снижения урожая водным дефицитом, недостатком теплового или других метеорологических факторов, находящихся в минимуме.

Условия теплообеспеченности вегетационного периода оцениваются по формуле

$$K_т = e^{-a\left(\frac{T-T_{opt}}{10}\right)^2}, \tag{25.3}$$

где T — средняя месячная температура воздуха, T_{opt} — оптимальная температура воздуха;

$$a = \begin{cases} 1 \text{ при } T \leqslant T_{opt}, \\ 2 \text{ при } T > T_{opt}, \end{cases}$$

$T_{opt} = 18\,^{\circ}C$ в июне, $T_{opt} = 19\,^{\circ}C$ в июле.

Влияние влагообеспеченности на продуктивность зерновых учитывается с помощью следующего коэффициента:

$$K_W = 1 - \left(\frac{W}{НВ} - 1\right)^2, \tag{25.4}$$

где W — средние за вегетационный период запасы продуктивной влаги в слое почвы 0—100 см, НВ — наименьшая влагоемкость.

Примечательно, что структура формулы (25.4) позволяет оценивать отрицательное влияние не только недостатка влаги, но и переувлажнения почв.

Климатически обеспеченный урожай при ограниченной влагообеспеченности рассчитывается по формуле

$$У_к = У_п K_W. \tag{25.5}$$

Территориальное распределение величины $У_к$ более сложно, чем распределение $У_п$. Основным фактором формирования территориальных различий $У_к$ являются запасы влаги.

При оценке максимальной урожайности, обеспечиваемой ресурсами климата, необходимо учитывать биологический потенциал сорта, который выражается относительным коэффициентом биологической продуктивности $K_б$, изменяющимся от 0 до 1.

Определение урожая, обеспеченного почвенным плодородием. Реализация потенциальной продуктивности растений и климатических ресурсов значительно корректируется уровнем плодородия почв. Последний оценивался по фактическим запасам подвижных форм фосфора, обменного калия и показателя кислотности почвы pH.

С помощью функции снижения продуктивности дефицитом питательных веществ и неоптимальностью кислотности почвы рассчитывается коэффициент фактического плодородия почв $K_п$:

$$K_п = K_N K_P K_K K_{pH}, \tag{25.6}$$

где

$$K_N = \frac{N}{N_0} e^{(1-N/N_0)}, \tag{25.7}$$

$$K_P = \frac{P}{P_0} e^{(1-P/P_0)}, \tag{25.8}$$

$$K_K = \frac{K}{K_0} e^{(1-K/K_0)}, \tag{25.9}$$

$$K_{pH} = pH/pH_0; \tag{25.10}$$

N, P и K — фактические запасы в почве азота, фосфора и калия; N_0, P_0, K_0 — оптимальные для данной культуры и заданной урожайности $У_к$ нормы азота, фосфора и калия, кг/га; pH и pH_0 — фактическая и оптимальная для данной культуры реакция почвенной среды ($pH_0 = 6{,}5$).

Вычисленный по уравнению (25.6) коэффициент фактического плодородия $K_п$ позволяет оценить в единой числовой шкале естественные запасы азота, фосфора и калия в почве.

Количество доступного азота из гумуса определяется по выражению

$$N = ГhQK, \tag{25.11}$$

где $Г$ — запасы гумуса в пахотном слое почвы, %; h — глубина пахотного слоя, см; Q — объемная масса пахотного слоя почвы, г/см^3; K — коэффициент усвоения азота из гумуса, равный в среднем 0,08 %.

Оптимальные для заданной урожайности нормы азота, фосфора и калия рассчитываются следующим образом:

$$N_о = C_N У, \tag{25.12}$$

$$P_о = C_P У, \tag{25.13}$$

$$K_о = C_K У, \tag{25.14}$$

где C_N, C_P, C_K — содержание питательного вещества (соответственно азота, фосфора и калия) в единице урожая полезной продукции, кг/ц; $У$ — планируемый урожай, ц/га.

Таким образом, урожай, обеспеченный климатическими условиями, биологическим потенциалом сорта и имеющимся плодородием почвы без внесения удобрений, рассчитывается по формуле

$$У_{пп} = У_к K_о K_п. \tag{25.15}$$

Определение планируемого урожая. Расчет различных уровней планируемой урожайности осуществляется по следующей схеме:

$$У_{пл} = У_к K_о K'_{NPK} K_{pH} K_а K_{пвб} K_{вс}, \tag{25.16}$$

где K'_{NPK} — коэффициент, отражающий реальное плодородие поля, который рассчитывается следующим образом:

$$K'_{NPK} = \frac{N}{N_0} e^{(1-N'/N_0)} \frac{P}{P_0} e^{(1-P'/P_0)} \frac{K'}{K_0} e^{(1-K'/K_0)}, \tag{25.17}$$

где

$$N' = N + x_N, \tag{25.18}$$

$$P' = P + x_P, \tag{25.19}$$

$$K' = K + x_K; \tag{25.20}$$

x_N, x_P, x_K — дозы внесенных соответственно азотных, фосфорных и калийных удобрений. Остальные обозначения те же, что и в формуле (25.6).

$K_а$ — коэффициент соблюдения агротехники. При отклонении сроков сева яровых зерновых культур от оптимальных на 10 дней значения $K_а$ составляют: для районов Прибалтики 0,92, для районов нечерноземной зоны РСФСР 0,80—0,82, Среднего Поволжья

0,76; при запаздывании с севом озимых культур на 10 дней — для северо-западных районов нечерноземной зоны — 0,92, для центральных районов 0,84, для Украины 0,90—0,92, для районов Среднего Поволжья 0,82. После наступления полной спелости зерна при 5-дневном перестое хлебов значение $K_а$ составляет в среднем 0,93, при 10-дневном перестое — 0,88, при 15-дневном — 0,83 и при 20-дневном — 0,79;

$K_{пвб}$ — коэффициент потерь от вредителей и болезней. Растениеводческая продукция на всех этапах технологического процесса постоянно испытывает влияние фитопатологических факторов, приводящих к потерям продукции на 20—30 %. Недобор зерна только от таких болезней, как головня, корневые гнили и др. составляет 10—15 %. В настоящее время служба защиты растений обеспечивает сохранение около 12 % всей получаемой продукции;

$K_{вс}$ — коэффициент вредоносности сорняков. На засоренных полях недобор зерна может достигать 0,2—0,3 т/га. Сорняки при средней степени засоренности используют 40—50 кг/га азота, 15—20 кг/га фосфора и 40—60 кг/га калия, т. е. количество, способное обеспечить урожай 2,0—2,5 т/га зерна.

Необходимым элементом программирования урожаев является правильное определение *доз удобрений*. Дозы должны быть такими, чтобы, с одной стороны, полностью удовлетворялись потребности растений и обеспечивалось сохранение почвенного плодородия, а с другой — исключалось отрицательное влияние удобрений на урожай и не происходило загрязнение грунтовых вод и водоемов.

25.4. Влияние агрометеорологических условий на работу сельскохозяйственных машин и орудий

Сельскохозяйственные машины и орудия работают при изменяющихся агрометеорологических условиях, которые оказывают влияние на них, вызывая нестабильность в работе, снижая производительность и качество работ, увеличивая расход горючего (М. Г. Лубнин, 1983). Число внешних факторов, оказывающих влияние на сельскохозяйственный агрегат, изменяется в зависимости от типа машин.

Солнечная радиация. Оценивать влияние солнечной радиации на сельскохозяйственную технику весьма сложно. Установлено, что металлические конструкции при ясном небе нагреваются до 60 °С при температуре окружающего воздуха не выше 18 °С. Разность между температурой листового железа и температурой воздуха днем может достигать 50 °С.

Солнечная радиация, кроме теплового, оказывает и фотохимическое воздействие на сельскохозяйственные машины и орудия. Резина камер и покрышек, лакокрасочные покрытия тракторов и сельскохозяйственных машин и орудий подвержены воздействию ультрафиолетовой части лучистой энергии.

Температура, плотность и давление. Это основные физические параметры, характеризующие воздух как среду, в которой происходит работа сельскохозяйственных машин и орудий. Температура и плотность воздуха влияют на силу тяги двигателей, расход топлива и скорость тракторов и сельскохозяйственных машин. Для сохранения тяги при изменении температуры и прочих равных условиях необходимо уменьшить или увеличить обороты двигателя.

При изменениях температуры окружающего воздуха от 40 до —40 °С расход бензина снижается на 20—30 %. Однако расход бензина зимой всегда больше, чем летом, из-за дополнительного расхода на прогрев холодного двигателя.

Большое влияние температура окружающего воздуха оказывает на вязкость смазывающих масел. Она определяет способность масла поступать в зоны трения механизмов и уменьшать их трение. При низкой температуре вязкость моторных масел, а следовательно, и смазка работающих механизмов значительно ухудшается.

Снижение температуры окружающей среды от 20 до —35 °С при работе двигателя на номинальном часовом расходе топлива и нормальном тепловом режиме вызывает увеличение износа вкладышей коленчатого вала в 1,8 раз, коренных и шатунных шеек в 1,9 раза, поршневых колец, втулок верхних головок шатунов, сопряжений гильзакольца и поршней более чем в 2 раза. Суммарный износ деталей увеличивается в 2,2 раза.

Влажность воздуха. Повышенная влажность воздуха отрицательно сказывается на хранении машин и орудий, а также определяет условия работы машин, обрабатывающих надземную часть сельскохозяйственных растений. Особенно чувствительны к наличию влаги в воздухе косилки, жатки и комбайны. Так, например, из-за повышенной влажности воздуха нагрузка на зерноуборочный комбайн повышается, так как увлажненная масса растений хуже обрабатывается.

Получено уравнение для расчета производительности комбайна:

$$\omega = 1{,}27\,d + 7{,}5, \qquad (25.21)$$

где ω — производительность комбайна, т/день; d — дефицит влажности воздуха, гПа.

Температура почвы. Температура почвы также влияет на работу сельскохозяйственных агрегатов. При пахоте, культивации, бороновании или прикатывании почвы изменяется плотность поверхностного слоя. Поскольку плотность почвы определяет ее теплофизические характеристики, то значит, что обработка ее оказывает определенное влияние на тепловой режим.

Влажность почвы. Влажность поверхностных слоев почв определяет условия перекатывания и сцепления ходовой части машин и орудий, а влажность более глубоких пахотных слоев влияет на удельное тяговое сопротивление при их обработке. Коэффициенты трения зависят от механического состава и влажности

почвы. Установлено, что с изменением количества воды в почве изменяется сила сцепления почвенных частиц друг с другом.

Текучее состояние почвы наблюдается при влажности, большей максимальной капиллярной влагоемкости. При текучем состоянии почвы машины и орудия под влиянием собственной массы вязнут, почва заплывает: обработка ее практически невозможна. Почва в липком состоянии налипает на колеса и другие части машин и орудий. Требует больших тяговых усилий, пахота получается неровная, заделка семян плохая. Как только в капиллярных порах почвы образуются свободные от воды просветы, наступает созревание ее для обработки, т. е. почва переходит в мягкопластичное состояние, состояние, когда при ее обработке наблюдается образование структурных зерен — зернение почвы.

С. А. Вериго и Л. А. Разумова (1963) указывают, что нижний предел мягкопластичного состояния почвы (нижний предел зернения) связан с максимальной гигроскопичностью следующим уравнением регрессии:

$$W_{пм} = 1{,}28W_{мг} + 9{,}9, \qquad (25.22)$$

где $W_{пм}$ — нижний предел мягкопластичного состояния, %; $W_{мг}$ — максимальная гигроскопичность почвы, % абсолютно сухой почвы.

Дальнейшее высыхание почвы, при котором вода остается лишь в самых тонких капиллярах и в стыках почвенных частиц друг с другом, увеличивает сцепление почвенных частиц друг с другом, почва переходит в твердопластичное состояние. В твердопластичном состоянии почва еще обрабатывается относительно хорошо.

Влажность почвы, при которой теряется пластичность, связана с максимальной ее гигроскопичностью. Уравнение связи имеет вид

$$W_{пс} = 0{,}72W_{мг} + 2{,}1, \qquad (25.23)$$

где $W_{пс}$ — нижний предел слабо увлажненного (твердопластичного) состояния, %.

Таким образом, благоприятные условия для хорошей производительности машин и орудий при обработке почвы создаются, как правило, при ограниченном диапазоне влажности почвы: от влажности почвы, достигшей наименьшей влагоемкости, до влажности, близкой к максимальной гигроскопичности. При влажности почвы выше указанных значений качество и производительность машин ухудшаются в результате перехода почвы в липкое и текучее состояние, при влажности почвы ниже указанных значений — вследствие перехода почвы в твердопластичное или твердое состояние.

Осадки. Работа сельскохозяйственных машин и орудий при выпадении осадков связана с значительными трудностями. При выпадении осадков увлажняются почва, растения и рабочие поверхности машин, вследствие чего ухудшаются условия работы и ее качество. Исследования, проведенные Н. А. Зубаревым (1957) показали, что дожди продолжительностью 15—45 мин, которые дают сумму осадков до 5 мм, не оказывают существенного влия-

ния на работу сельскохозяйственных машин и орудий. Дожди продолжительностью 1—5 ч и суммой осадков 1—5 мм затрудняют работу сельскохозяйственной техники в поле. При более интенсивных и продолжительных дождях полевые работы значительно осложняются, а иногда и прекращаются.

Ветер. С помощью ветра осуществляется вентиляция нагретых поверхностей сельскохозяйственных агрегатов. При скорости ветра 5—15 м/с теплоотдача в окружающую среду возрастает в 2—3 раза. При этом изменяется не только теплоотдача, но и возникает дополнительная ветровая нагрузка. В результате последней наблюдаются дополнительное сопротивление, колебание и вибрация.

25.5. Погода и эффективность труда в земледелии

Учет погодных условий при оценке результатов труда должен повышать заинтересованность работников сельского хозяйства в получении максимально возможной продуктивности как в благоприятные, так и в неблагоприятные годы. Практически это может быть достигнуто, если нормативный или плановый показатель уровня продуктивности, за превышение которого работники земледелия поощряются, корректируется по метеорологическим условиям данного года. Причем в благоприятный год эти показатели должны повышаться, в неблагоприятный год — понижаться. Поправка может быть внесена путем использования коэффициента, отражающего особенности погоды данного года. Эти коэффициенты в настоящее время принято (Е. К. Зоидзе, 1987) называть *погодными.*

Установление погодных коэффициентов должно входить в компетенцию экономистов, а задача агрометеорологов заключается в том, чтобы оценить степень благоприятности погодных условий для формирования урожайности сельскохозяйственных культур. Однако не всегда возможно четкое разграничение. Поэтому на практике значения погодных коэффициентов устанавливаются совместно экономистами и агрометеорологами.

Согласно определению (Е. К. Зоидзе, 1987), погодный коэффициент K рассчитывается по формуле

$$K = \frac{y_{ij}}{\bar{y}^{\text{пк}}_{ij}}, \quad \begin{matrix} i = 0,\ 1,\ \ldots,\ n, \\ j = 0,\ 1,\ \ldots,\ m, \end{matrix} \tag{25.24}$$

где y_{ij} — погодные ресурсы урожайности i-й сельскохозяйственной культуры по j-му району в конкретном году; $\bar{y}^{\text{пк}}$ — почвенно-климатические ресурсы урожайности i-й сельскохозяйственной культуры по j-му району в тех же абсолютных единицах.

Е. К. Зоидзе (1983) совместно с сотрудниками института экономики сельского хозяйства были установлены погодные коэффициенты для трех регионов — Поволжья, Северного Кавказа и ЦЧО (табл. 25.5).

Таблица 25.5

Погодные коэффициенты при различной степени благоприятности погодных условий в различных зонах (по Е. К. Зоидзе, 1987)

Характеристика погодных условий	Поволжье	Северный Кавказ	ЦЧО	Алтайский край и Новосибирская обл.	
				яровые зерновые	растениеводство в целом
Очень неблагоприятные условия	0,2—0,5	0,4—0,6	0,3—0,5	до 0,4	до 0,3
Неблагоприятные условия	0,51—0,9	0,61—0,8	0,51—0,7	0,41—0,8	0,31—0,6
Средние условия	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Благоприятные условия	1,1—1,5	1,2—1,4	1,3—1,5	1,1—1,5	1,1—1,4
Очень благоприятные условия	>1,5	>1,4	>1,5	0,51—1,9	1,41—1,7

Хотя в большинстве случаев низкая урожайность объясняется влиянием неблагоприятных условий погоды, все же в годы с такой урожайностью труд земледельца оценивается и в материальном и в моральном отношениях гораздо скромнее, чем в годы с высокой урожайностью.

Известно, что в сельском хозяйстве применяются различные системы оплаты труда. В связи с этим приемы учета погодных условий при конкретной системе оплаты труда могут быть разными. При аккордно-премиальной системе оплаты труда в расценки за продукцию, рассчитанные для формирования аккордного фонда, вводятся уточнения, учитывающие в конкретном году погодные условия, т. е. расценки за единицу продукции делятся на погодный коэффициент.

При оплате труда по шкале возрастающих аккордных расценок за продукцию показатели фактической урожайности уточняются с помощью погодных коэффициентов: расценка за продукцию, соответствующая фактически полученной урожайности, делится на установленный в конкретном году погодный коэффициент.

Глава 26

ПОГОДА И ЖИВОТНОВОДСТВО

Проблеме зависимости выпасаемого поголовья от климатических и погодных условий посвящены исследования, выполненные А. П. Федосеевым, А. С. Утешевым, Е. К. Балакиревым, Н. А. Конюховым, А. И. Чекересом, А. М. Могилевой и др. Ими разработаны научные основы зоометеорологической оценки условий летнего и зимнего выпаса скота, перегона животных, их стрижки,

окота и других мероприятий, осуществляемых в животноводческих районах страны. Предложенные этими исследователями методы оценки, широко используются при оперативном гидрометеорологическом обеспечении пастбищного животноводства.

26.1. Тепловой баланс животных

Термические условия среды непосредственным образом влияют на жизненные функции животных, определяя их активность и деятельность в возникающих ситуациях. Все физиологические процессы животных находятся под воздействием термических условий. Они особенно отчетливо влияют на обмен веществ, потребление пищи, двигательную активность и размножение. Многие животные проявляют периодизм жизнедеятельности, связанный с цикличностью температуры среды.

Лежащий в основе жизненных процессов обмен веществ сопровождается постоянным теплообменом организма с окружающей средой. Теплообмен направлен на сохранение температуры тела в определенных, довольно ограниченных пределах, обеспечивающих нормальный ход биохимических реакций и физиологических процессов. Благодаря постоянству температуры тела физиологические процессы протекают с одинаковой активностью, что позволяет животным жить и давать продукцию в самых разнообразных климатических условиях. Здесь следует иметь в виду, что сельскохозяйственные животные относятся к теплокровным (гомойотермным), у которых температура тела остается почти неизменной, благодаря способности к терморегуляции. Температура тела у некоторых теплокровных животных составляет 38 °С (лошадь, олень), 39 °С (корова), 40 °С (овца, коза).

Считается, что при снижении температуры тела до значений менее 24 °С или повышения до уровня более 44 °С наступает гибель животного.

Постоянство температуры тела достигается уравновешиванием теплообразования и теплоотдачи (продуцируемое непрерывно во всех органах и тканях тепло выделяется в окружающую среду, лишь часть его остается в организме).

Для составления уравнения теплового баланса организма необходимо знать количество тепла, вырабатывающееся в нем, и просуммировать все потоки тепловой энергии между организмом и окружающим пространством.

Обозначим физиологическую теплопродукцию через W, поток тепла проведением в шерстном покрове через $T_ш$, радиационные потери тепла (эффективное излучение) через $E_э$, турбулентный поток тепла между поверхностью организма и приземным слоем воздуха через Q, затрату тепла на испарение с поверхности органов дыхания через LE_p (L — скрытая теплота испарения, E_p — испарение с поверхности органов дыхания), затрату тепла на испарение с поверхности тела через LE_d (E_d — испарение с поверхности тела) и затрату тепла на нагревание выдыхаемого воздуха

через C. Так как все другие члены теплового баланса организма обычно значительно меньше перечисленных потоков тепла, то в первом приближении уравнение теплового баланса тела животного, температура которого поддерживается на нормальном уровне, можно записать в форме (В. А. Ярошевский, 1968):

$$W = T_{ш} + E_{э} + Q + LE_{p} + LE_{d} + C, \qquad (26{\cdot}1)$$

где величины без индексов характеризуют суммы тепла за рассматриваемый период времени. При этом величина W всегда положительна, а все остальные величины положительны, если они характеризуют расход тепла.

Тепловые потоки в шерстном покрове у ягнят и овец определяются двумя факторами: градиентом температуры и теплопроводностью шерсти в ее естественном состоянии. Чем больше разность температуры поверхности руна и поверхности кожи, чем тоньше слой шерсти, тем большее количество тепла отдает или получает поверхность кожи.

В летние ночи температура поверхности руна мало отличается от температуры окружающего воздуха и всегда значительно ниже температуры поверхности кожи. При таких условиях поток тепла в шерстном покрове направлен от поверхности кожи к поверхности руна. Происходит отдача тепла во внешнюю среду.

В дневное время лучистая энергия, поглощенная деятельной поверхностью руна, превращается в тепловую энергию и повышает температуру этой поверхности до 60—70 °С. При таких условиях поток тепла в шерстном покрове направлен от нагретой поверхности руна к поверхности кожи и в сумме образует экзогенную тепловую нагрузку проведением. Расчет интенсивности тепловых потоков в шерстном покрове может быть произведен с помощью зависимости

$$T'_{ш} = \lambda \frac{\theta_{ш} - \theta_{к}}{h}, \qquad (26.2)$$

где $\theta_{ш}$ и $\theta_{к}$ — температура поверхности руна и кожи соответственно, h — длина шерсти.

Эффективное излучение и турбулентный теплообмен имеют самостоятельное значение для определенной части поверхности тела овцы, на которой шерстный покров не создает препятствий для лучистых и турбулентных потоков с открытой поверхности кожи. Несмотря на ограниченности этой поверхности (уши, челюсти и отчасти конечности), она играет заметную роль в процессе теплового обмена организма с окружающей средой.

Эффективное излучение и турбулентный теплообмен являются важными факторами, участвующими в формировании теплового состояния деятельной поверхности.

Эффективное излучение с поверхности кожи, лишенной шерсти описывается формулой

$$E_{э} = E^{0}_{э} + (k\sigma\theta^{4}_{\omega} - k\sigma\theta^{4}), \qquad (26.3)$$

где $E^{0}_{э}$ — эффективное излучение при безоблачном небе без учета

разности температуры деятельной поверхности и воздуха; k — коэффициент, характеризующий отклонение излучения данной поверхности от излучения черного тела; σ — постоянная Стефана — Больцмана; θ_ω — температура поверхности; θ — температура воздуха.

Различие температуры деятельной поверхности тела овцы и окружающего воздуха весьма значительно, особенно в ночное время. Это позволяет ожидать над такой поверхностью достаточно интенсивного потока тепла, зависящего от разности температуры деятельной поверхности и воздуха и скорости ветра. Для расчета интенсивности этого потока применяется уравнение М. И. Будыко (1956), выражающее связь теплообмена с разностью температуры поверхности нагретого (или охлажденного) тела и воздуха:

$$Q = \rho c_p D_{0-200} (\theta_\omega - \theta), \tag{26.4}$$

где ρ — плотность воздуха у земной поверхности; c_p — удельная теплоемкость воздуха; D_{0-200} — интегральная характеристика условий вертикального турбулентного переноса между деятельной поверхностью и атмосферой, называемая коэффициентом внешней диффузии; θ_ω — температура деятельной поверхности; θ — температура воздуха.

Важными составляющими расходной части уравнения теплового баланса организма являются затраты тепла на испарение с поверхности органов дыхания и кожи.

Количество воды, выделяемое при дыхании (испарение с поверхности органов дыхания), можно вычислить, умножая разность массовой доли водяного пара выдыхаемого и вдыхаемого воздуха Δq на массу воздуха V_m, проходящую через органы дыхания в единицу времени:

$$E_p = \Delta q V_m. \tag{26.5}$$

Скорость испарения с поверхности кожи у овец можно выразить уравнением

$$E_d = \rho D' (q_d - q_0), \tag{26.6}$$

где D' — коэффициент диффузии в шерстном покрове; q_d, q_0 — массовая доля водяного пара у поверхности кожи и в приземном слое воздуха соответственно.

Наряду с выносом из организма животного тепла, затраченного на испарение с поверхности органов дыхания, выдыхаемый воздух удаляет тепло, затраченное на его нагревание. Количество этого тепла C будет пропорционально массе выдыхаемого воздуха V_m и разности температуры наружного воздуха и воздуха, прошедшего через дыхательные пути животного $\Delta\theta$ в единицу времени:

$$C = C_p \Delta\theta V_m. \tag{26.7}$$

В теплообмене между поверхностями руна и кожи ведущее значение принадлежит проведению тепла через шерстный покров (табл. 26.1).

Таблица 26.1

Тепловой баланс организма у тонкорунных овец в условиях обеспеченной терморегуляции (по В. А. Ярошевскому, 1964)

Составляющие теплового баланса	Ночь		День	
	Вт/м²	%	Вт/м²	%
Тепловая нагрузка				
Измеренная теплопродукция	$108{,}7 \cdot 10^4$	100	$108{,}7 \cdot 10^4$	88
Экзогенная тепловая нагрузка	—	—	$15{,}5 \cdot 10^4$	12
Общая тепловая нагрузка	$108{,}7 \cdot 10^4$	100	$124{,}8 \cdot 10^4$	100
Теплоотдача				
Проведение через шерстный покров	$24{,}2 \cdot 10^4$	22	—	—
Эффективное излучение	$7{,}8 \cdot 10^4$	7	$6{,}9 \cdot 10^4$	6
Турбулентная теплоотдача	$6{,}3 \cdot 10^4$	6	$2{,}9 \cdot 10^4$	3
Испарение с поверхности органов дыхания	$18{,}5 \cdot 10^4$	17	$27{,}5 \cdot 10^4$	23
Нагревание выдыхаемого воздуха	$6{,}5 \cdot 10^4$	6	$2{,}7 \cdot 10^4$	2
Испарение с поверхности тела	$45{,}1 \cdot 10^4$	42	$77{,}6 \cdot 10^4$	66

Метеорологические условия	Ночь	День
Радиационный баланс, Вт/м²	—41,8	515,8
Температура воздуха, °С	21,2	32,6
Скорость ветра, м/с	1,2	1,4

В ночное время теплоотдача проведением через шерстный покров составляет до 22 % выделяемого организмом тепла.

Температура поверхности кожи изменяется в небольших пределах, летом она удерживается около 39 °С; температура поверхности шерстного покрова подвержена весьма значительным колебаниям (например, в летний период ночью она незначительно отличается от температуры воздуха, а в ясные солнечные дни достигает 60... 73 и даже 78... 85 °С). При высоком тепловом напряжении окружающей среды потоки тепла направлены от поверхности руна к телу животного. В результате возникают экзогенные тепловые нагрузки (величина их находится в обратной зависимости от облачности и скорости ветра).

Теплоотдача с поверхности кожи, лишенной шерстного покрова, осуществляется в основном путем эффективного излучения и тур-

булентного переноса тепла. На эффективное излучение приходится лишь 6—7 % выделяемого организмом тепла, т. е. в тепловом балансе большой роли оно не играет. Турбулентный теплообмен в зависимости от температуры воздуха при ветре 1,4 м/с колеблется от 3 до 6 % общего расхода тепла. Интенсивность его и значимость в тепловом балансе возрастает с уменьшением температуры воздуха и увеличением скорости ветра.

Незначительное количество тепла (особенно в жаркие дни) расходуется на нагревание выдыхаемого воздуха (3—6 %).

В тепловом балансе организма овец существенная роль принадлежит расходу тепла на испарение с поверхности тела. Считается, что этот путь теплоотдачи является ведущим в условиях значительного теплового напряжения окружающей среды. Испарение следует считать самым важным средством рассеяния тепла. Испарение с поверхности тела составляет 42—66 % общего расхода тепла. На испарение с поверхности органов дыхания приходится 17—23 % выделяемого организмом тепла.

26.2. Энергетические потребности животных

Взаимодействие особи с окружающей средой определяется главным образом необходимостью удовлетворения тех или иных потребностей животного. Дисбаланс потребностей в пище и количества реально добываемой пищи определяет в значительной мере динамику изменения численности популяции.

Потребности организма в пище обусловлены главным образом следующими основными факторами (М. А. Ханин, Н. Л. Дорфман, 1978):

1) энергетическими потребностями, обусловленными теплоотдачей в окружающую среду;

2) энергетическими потребностями, связанными с совершением механической работы;

3) энергетическими потребностями, связанными с сохранением минимальной функциональной активности важнейших органов и систем в состоянии покоя;

4) потребностями в веществе, связанными с ростом организма и выкармливанием потомства;

5) потребностями в веществе, связанными с поддержанием целостности тканей.

Рассмотрим энергетические потребности, обусловленные теплоотдачей в окружающую среду. Энергетические потребности гомойотермного животного, находящегося в состоянии покоя и натощак, в некоторой определенной области температур внешней среды, не включающей так называемую термонейтральную зону (рис. 26.1), определяются в основном необходимостью поддержания постоянной температуры тела и связанной с этим теплоотдачей организма в окружающую среду:

$$W = K_0 S (T_S - T_e), \qquad (26.8)$$

где W — тепловая мощность организма, S — площадь поверхности тела животного, T_S — средняя температура поверхности тела животного, T_e — температура окружающей среды, K_0 — коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи учитывает конвективный, лучевой и кондуктивный механизмы теплоотдачи. При увеличении температуры среды и ее приближении к температуре тела возрастает роль теплоотдачи, обусловленной испарением с внешней поверхности тела и поверхности легких, а также периодическим выносом нагретой массы воздуха при дыхании.

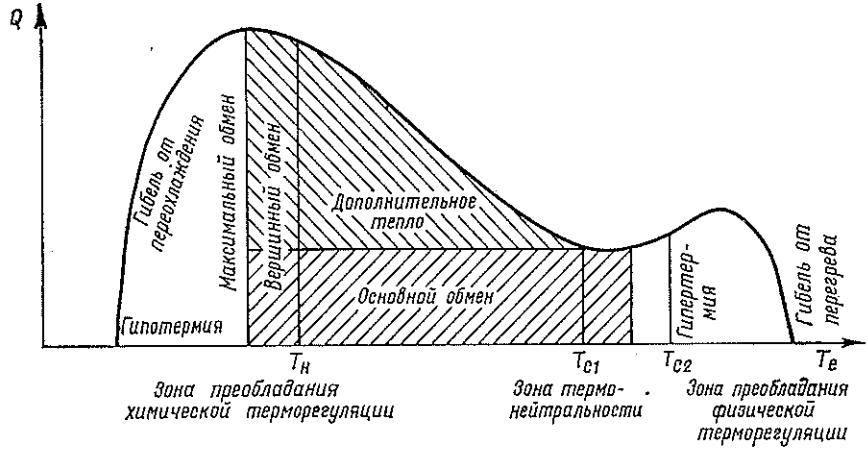


Рис. 26.1. Качественная зависимость интенсивности метаболизма гомойотермных животных от температуры окружающей среды (по М. А. Ханину, Н. Л. Дорфману, 1978).

Q — величина, характеризующая интенсивность метаболизма (теплопродукция, скорость потребления кислорода); T_e — температура среды.

При экспериментальных исследованиях зависимости тепловой мощности (газообмена, потребления кислорода) от температуры окружающей среды (рис. 26.1) установлено, что линейная зависимость тепловой мощности от температуры среды, описываемая выражением (26.8), наблюдается только в некоторой области температур, определяемой условием $T_н < T_e \leqslant T_{c1}$, где $T_н$ — температура среды, ниже которой длительное существование гомойотермного животного невозможно, T_{c1} — нижняя граница термонейтральной зоны.

Температуры $T_н$ и T_{c1} являются видоспецифическими величинами, изменяющимися в широких пределах. Например, у голубого песца $T_{c1} = -40\,°C$, а у мыши $+33\,°C$. При температурах среды, находящихся в пределах $T_{c1} \leqslant T_e \leqslant T_{c2}$, тепловая мощность организма слабо зависит от температуры среды и приближенно ее можно считать постоянной. Интервал температур $[T_{c1}, T_{c2}]$ назы-

вается *термонейтральной зоной.* Для животного данного вида и возраста тепловая мощность в указанном интервале температур минимальна и называется *основным обменом.*

Экстраполируя линейную зависимость (26.8) на область температур $T_e > T_{c1}$, легко видеть, что тепловая мощность основного обмена W существенно превышает потребности организма, связанные с поддержанием постоянной температуры тела. Это означает, что основной обмен, т. е. тепловая мощность в термонейтральной зоне, определяется не теплоотдачей, а эндогенными факторами. Таким образом, терморегуляция в термонейтральной зоне предотвращает повышение температуры тела сверх нормы и осуществляется удалением избыточного тепла $W_0 - K_0 S (T_S - T_e)$, выделяющегося в организме. В области температур $T_e < T_{c1}$ терморегуляция предотвращает уменьшение температуры тела ниже нормы и осуществляется выделением в организме дополнительной тепловой мощности $K_0 S (T_S - T_e) - W_0$ за счет усиления метаболизма.

В термонейтральной зоне сброс избыточного тепла физиологически осуществляется увеличением коэффициента теплоотдачи при повышении температуры среды (за счет вазомоторного расширения кровеносных сосудов вблизи поверхности тела, изменения геометрии элементов наружных покровов и др.), а также усилением потоотделения.

Следует заметить, что увеличение коэффициента теплоотдачи сверх наблюдаемого при $T_e < T_{c1}$ значения K_0 (не зависящего от T_e) имеет определенный предел. Кроме того, наряду с эффективным удалением избыточного тепла, усиление потоотделения сопровождается дополнительным выделением тепла в организме. В результате, начиная с некоторой температуры среды, а именно при $T_e > T_{c2}$ система терморегуляции перестает справляться с задачей теплоотдачи и температура тела начинает повышаться, что в свою очередь приводит к усилению метаболизма и соответствующему дополнительному тепловыделению. Вследствие дополнительного выделения тепла за счет потоотделения и повышения температуры тела при температурах среды, превышающих верхнюю границу термонейтральной зоны T_{c2} тепловая мощность организма с ростом температуры среды возрастает (см. рис. 26.1).

Таким образом, повышение температуры окружающей среды T_e выше T_{c2} ведет к управляемой, а затем и к неуправляемой гипертермии и, наконец, к смерти от перегрева. В дальнейшем мы будем рассматривать лишь диапазон температур среды, при которых выполняется условие $T_e < T_{c2}$.

Рассмотрим область температур среды, удовлетворяющую условию $T_e < T_{c1}$, т. е. вне термонейтральной зоны. Тогда тепловую мощность гомойотермного животного в состоянии покоя (натощак) можно представить в виде

$$W = W_0 + W_t, \tag{26.9}$$

где W_t — дополнительная тепловая мощность, необходимая для

сохранения постоянной температуры тела вне термонейтральной зоны.

При $T_e = T_{c1}$, согласно (26.8) и определению основного обмена, можно записать

$$W = W_0 = K_0 S (T_S - T_{c1}). \tag{26.10}$$

Подставляя $K_0 S = W_0/(T_S - T_{c1})$ в (26.8), находим тепловую мощность при $T_e < T_{c1}$ в виде

$$W = W_0 \frac{T_S - T_e}{T_S - T_{c1}} = W_0 + W_0 \frac{T_{c1} - T_e}{T_S - T_{c1}}. \tag{26.11}$$

Таким образом

$$W_t = \begin{cases} W_0 \dfrac{T_{c1} - T_e}{T_S - T_{c1}}, & T_e < T_{c1}, \\ 0, & T_e \geqslant T_{c1}. \end{cases} \tag{26.12}$$

26.3. Моделирование влияния факторов внешней среды на продуктивность животных

Рассмотрим моделирование влияния погодных условий летнего периода на продуктивность овец. В основу динамической модели продуктивности овцы (И. Г. Грингоф, С. А. Даниелов, 1988) положено уравнение энергетического баланса биологической особи, выражающего процесс динамики суммарных энергетических потребностей животного в течение его индивидуального развития за счет потребляемой пищи:

$$\Pi C_{\text{п}} \varphi_{\text{п}} = W_0 + W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = \sum_{i=0}^{4} W_i, \tag{26.13}$$

где Π — масса потребляемой пищи; $C_{\text{п}}$ — средняя удельная калорийность пищи; $\varphi_{\text{п}}$ — коэффициент усвоения пищи; W_0 — основной обмен особи; W_1 — энергетические затраты на поддержание постоянной температуры тела; W_2 — мощность, развиваемой особью при передвижении и выполнении механической работы при добывании пищи; W_3 — энергетические затраты на калоригенический эффект; W_4 — затраты мощности связанные с процессом роста особи.

В процессе роста и развития животным присущи и другие виды энергетических затрат (например, рост шерсти), однако по сравнению с перечисленными выше они невелики и в первом приближении в расчет не приняты. Затраты мощности, связанные с ростом особи вычисляются по формуле

$$W_4 = \frac{C_0}{\eta} \frac{dP}{d\tau}, \tag{26.14}$$

где $dP/d\tau$ — изменения массы особи P за время τ; C_0 — средняя удельная калорийность тела особи; η — энергетический КПД в процессе роста.

Принимается, что средняя удельная калорийность тела особи не зависит от возраста ($C_o = \text{const}$). Величина η выражает долю энергетических потерь в процессе роста тканей животного. В общем виде она является функцией скорости роста и должна определяться с помощью экспериментальных данных.

Представим уравнение (26.13) с учетом (26.14) в виде

$$\frac{C_o}{\eta}\frac{dP}{d\tau} = \Pi C_n \varphi_n - (W_0 + W_1 + W_2 + W_3). \qquad (26.15)$$

Разделив обе части уравнения на C_o/η, получим

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{\eta}{C_o}[\Pi C_n \varphi_n - (W_0 + W_1 + W_2 + W_3)]. \qquad (26.16)$$

Уравнение (26.16) позволяет на основе расчета его составляющих (отдельных энергетических затрат) определить динамику изменения массы тела животного (овцы) в процессе его жизнедеятельности.

Определим составляющие (26.16). Основной обмен W_0 представляет собой затраты энергии овцы, находящейся в состоянии полного покоя за единицу времени, отнесенные к массе тела животного. Следовательно, основным обменом овцы является тепловая мощность, вырабатываемая животным в состоянии покоя в условиях, когда отсутствуют калоригеническое воздействие пищи и внешние (экзогенные) перегрузки. Он описывается уравнением

$$W_0 = \chi (P)^{0,75}, \qquad (26.17)$$

где χ — константа, свойственная виду животного, P — масса животного.

Величина W_1 выражает количество энергии, затрачиваемое животным на терморегуляцию. Механизмы терморегуляции направлены на поддержание постоянной температуры тела и обеспечивают выделение тепла из организма путем испарения через органы дыхания и потоотделения с поверхности тела, проведения тепла в шерстном покрове, эффективного излучения, турбулентного теплообмена между кожей, шерстным покровом и воздухом.

В работах В. А. Ярошевского (1968) предложены методы оценки воздействия метеорологических условий на тепловой обмен животных на основе использования уравнений радиационного и теплового баланса.

Теплообмен овцы включает в себя следующие компоненты (26.1):

$$W_1 = T_ш + E_э + Q + LE_p + LE_d + C,$$

где $T_ш$ — поток тепла в шерстном покрове, $E_э$ — эффективное излучение, Q — турбулентный обмен, L — скрытая теплота испарения, E_p — испарение с поверхности тела, E_d — испарение с поверхности органов дыхания, C — нагревание вдыхаемого воздуха.

Расчет составляющих уравнения теплового баланса животного рассматривается в параграфе 26.1.

Помимо обеспечения основного обмена и тепловой мощности, необходимой для сохранения постоянства температуры тела, животное расходует энергию на передвижение и добывание пищи. В основу расчета мощности, развиваемой овцой при передвижении и кормлении (W_2), положена модифицированная формула вычисления механической работы животного (М. Т. Гермогенов, А. Н. Полевой, И. Г. Грингоф, 1987)

$$W_2 = \frac{d_v \psi_\omega P l K_p}{l_н} \eta, \tag{26.18}$$

где d_v — вертикальное смещение центра тяжести тела при одном шаге; ψ_ω — параметр, характеризующий сопротивляемость среды передвижению; l — расстояние, проходимое овцой в сутки; K_p — коэффициент, характеризующий рельеф местности; $l_н$ — длина шага; η — коэффициент полезного действия мышц, учитывающий неизбежные потери.

Расстояние, проходимое овцой в сутки, является функцией состояния кормовой базы и погодных факторов. Обозначим через v'_{max} максимальную скорость передвижения овцы при благоприятных погодных условиях при средней плотности кормов. Тогда в любой i-й день средняя скорость передвижения v_i будет определяться как

$$v_i = k_1 v'_{max}, \tag{26.19}$$

где k_1 — коэффициент, характеризующий влияние погодных условий на скорость передвижения.

Поскольку скорость передвижения овцы в каждый час при максимальной продолжительности выпаса будет отличаться от средней скорости в день с меньшей продолжительностью выпаса, определим k как некоторую функцию от $t_{вып}$, где $t_{вып}$ — продолжительность дневного выпаса. В свою очередь $t_{вып}$ является некоторой характеристикой погоды данного дня, поскольку под воздействием жарких условий животные днем пасутся более короткий период времени или переводятся на ночной выпас.

Величину v_{max} можно определить по формуле

$$v'_{max} = k_2 v_{max}, \tag{26.20}$$

где v'_{max} — максимальная скорость передвижения овцы при благоприятных погодных условиях и достаточном количестве корма; k_2 — коэффициент, зависящий от плотности корма.

Функции $k_1(t_{вып})$ и $k_2(y)$ определяются экспериментально. Полагая $k_1 k_2 = k_v$, запишем (26.19) в виде

$$v_i = k_v v_{max}. \tag{26.21}$$

При сделанных предположениях количество потребляемой пищи в сутки будет составлять

$$П = v' y k v_{max} t_{вып}, \tag{26.22}$$

где v' — коэффициент использования кормовой базы, y — плотность кормов.

Рассматривая энергетические затраты животных на калориге-нический эффект, примем

$$W_3 = k_\omega W_0, \tag{26.23}$$

где K_ω — параметр, характеризующий долю основного обмена, приходящегося на калоригеническую деятельность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрометеорология. — Сборник материалов Международных учебных курсов. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 351 с.

2. Алпатьев А. М. Влагооборот культурных растений. — Л.: Гидрометеоиздат, 1954. — 247 с.

3. Алпатьев А. М. Влагообороты в природе и их преобразования. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 322 с.

4. Белобородова Г. Г. Агрометеорологические основы повышения продуктивности плодоводства. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 164 с.

5. Берлянд М. Е., Красиков П. Н. Борьба с заморозками и их предсказание. — Л.: Гидрометеоиздат, 1960. — 147 с.

6. Бихеле З. Н., Молдау Х. А., Росс Ю. К. Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 223 с.

7. Бихеле И. Г., Молдау Х. А., Росс Ю. К. Субмодель распределения ассимилятов и роста растения при водном дефиците. — Тарту, 1980. — 23 с.

8. Бондаренко Н. Ф. Физические основы мелиораций почв. — Л.: Колос, 1975. — 257 с.

9. Будаговский А. И. Испарение почвенной влаги. — М.: Наука, 1964. — 242 с.

10. Венцкевич Г. З. Агрометеорология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1958.— 376 с.

11. Вериго С. А., Разумова Л. А. Почвенная влага и ее значение в сельскохозяйственном производстве. — Л.: Гидрометеоиздат, 1963. — 288 с.

12. Винтер А. К. Заморозки и их последействия на растения. — Новосибирск: Наука, 1981. — 150 с.

13. Вольвач В. В. Моделирование влияния агрометеорологических условий на развитие колорадского жука. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 239 с.

14. Вопросы агрометеорологии (сборник кратких сообщений под редакцией Ф. Ф. Давитая, М. С. Кулика). — М.: Гидрометеоиздат (отделение), 1958.— 90 с.

15. Воронин А. Д. Основы физики почв. — М.: Издательство МГУ, 1986.— 244 с.

16. Галямин Е. П. Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 272 с.

17. Генкель П. А., Кушниренко С. В. Холодостойкость растений и термические способы ее повышения.— М.: Наука, 1966. — 222 с.

18. Гильманов Т. Г. Математическое моделирование биогеохимических циклов в травяных экосистемах. — М.: изд. МГУ, 1978.— 167 с.

19. Гойса Н. И., Олейник Р. Н., Рогаченко А. Д. Гидрометеорологический режим и продуктивность орошаемой кукурузы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 230 с.

20. Горбачев В. А. Математическое моделирование водно-теплового режима корнеобитаемого слоя почвы. — Обзорная информация ВНИИГМИ — МЦД. Серия «Гидрология суши», 1982, вып. 1. — 47 с.

21. Горбачев В. А. Математическое моделирование углекислотного режима сельскохозяйственных посевов. — Обзорная информация ВНИИГМИ — МЦД. Серия «Метеорология», 1983, вып. 10. — 44 с.

22. Грингоф И. Г. Пастбищные растения Кызылкума и погода. — Труды САНИГМИ, 1967, вып. 34(49).

23. Грингоф И. Г., Попова В. В., Страшный В. Н. Агрометеорология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 310 с.

24. Гудзон Н. Охрана почвы и борьба с эрозией. М.: Колос, 1974. — 304 с.

25. Давид Р. Э. Сельскохозяйственная метеорология. — М.: Сельхозгиз, 1936. — 406 с.

26. Дубов А. С., Быкова Л. П., Марунич С. В. Турбулентность в растительном покрове. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 180 с.

27. Дьяченко А. Е., Брысова Л. П., Голубев И. Ф., Чечаев А. Е. Агролесомелиорация. — М.: Колос, 1979. — 205 с.
28. Ефимов М. В. Физиология растений в криоаридном климате. — Новосибирск: Наука, 1988. — 160 с.
29. Ефимова Н. А. Радиационные факторы продуктивности растительного покрова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 215 с.
30. Зайдельман Ф. Р. Режим и условия мелиорации заболоченных почв. — М.: Колос, 1975. — 319 с.
31. Зайдельман Ф. Р. Гидрологический режим почв Нечерноземной зоны. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 328 с.
32. Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай/Под ред. А. И. Руденко. — Л.: Гидрометеоиздат, 1958. — 206 с.
33. Зоидзе Е. К. Погода, климат и эффективность труда в земледелии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 224 с.
34. Зубенок Л. И. Испарение на континентах. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 263 с.
35. Клещенко А. Д. Оценка состояния зерновых культур с применением дистанционных методов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 190 с.
36. Колпаков В. В., Сухарев И. П. Сельскохозяйственные мелиорации. — М.: Колос, 1981. — 327 с.
37. Константинов А. Р. Испарение в природе. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 532 с.
38. Константинов А. Р., Астахова Н. И., Левенко А. А. Методы расчета испарения с сельскохозяйственных полей. — Л.: Гидрометеоиздат, 1971. — 126 с.
39. Константинов А. Р., Струзер Л. Р. Лесные полосы и урожай. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974. — 212 с.
40. Константинов А. Р., Зоидзе Е. К., Смирнова С. И. Погода, почва и урожай озимой пшеницы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 263 с.
41. Константинов Л. К. Защита сада от резких колебаний температуры и заморозков. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 112 с.
42. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 215 с.
43. Коровин А. И. Роль температуры в минеральном питании растений. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. — 281 с.
44. Коровин А. И. Растения и экстремальные температуры. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 271 с.
45. Кулик М. С. Погода и минеральные удобрения. — Л.: Гидрометеоиздат, 1966. — 138 с.
46. Культиасов И. М. Экология растений. — М.: изд. МГУ, 1982. — 381 с.
47. Куперман Ф. М., Ржанова Е. И. Биология развития растений. — М.: Высшая школа, 1963. — 423 с.
48. Куперман Ф. М., Чирков Ю. И. Биологический контроль за развитием растений на метеорологических станциях. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 144 с.
49. Курсанов А. Л. Транспорт ассимилятов в растении. — М.: Наука, 1976. — 646 с.
50. Куртенер Д. А., Чудновский А. Ф. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почв. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 230 с.
51. Куртенер Д. А., Усков И. В. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 230 с.
52. Куртенер Д. А., Усков И. Б. Управление микроклиматом сельскохозяйственных полей. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 263 с.
53. Лархер В. Экология растений. — М.: Мир, 1978. — 384 с.
54. Лекции по сельскохозяйственной метеорологии/Под ред. М. С. Кулика и В. В. Синельщикова. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. — 340 с.
55. Литвинов И. В. Формирование и преобразование атмосферных осадков на подстилающей поверхности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 231 с.
56. Личикаки В. М. Перезимовка озимых культур. — М.: Колос, 1974. — 205 с.

57. Лубнин М. Г. Влияние агрометеорологических условий на работу сельскохозяйственных машин и орудий. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 117 с.
58. Макарова Л. А., Минкевич И. И. Погода и болезни культурных растений. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 142 с.
59. Макарова Л. А., Доронина Г. М. Агрометеорологическое обоснование оптимизации и защиты зерновых культур от вредной черепашки. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 144 с.
60. Макарова Л. А., Доронина Г. М. Агрометеорологические предикторы прогноза размножения вредителей сельскохозяйственных культур. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 212 с.
61. Максимов Н. А. Избранные работы по засухоустойчивости и зимостойкости растений. Том 1. — М.: Изд-во АН СССР, 1952. — 575 с.
62. Мельник Ю. С. Климат и произрастание подсолнечника. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. — 143 с.
63. Методы проектирования водного режима осушаемых земель в Нечерноземной зоне/Под ред. С. И. Харченко, А. И. Климко. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 75 с.
64. Мичурин Б. Н. Энергетика почвенной влаги. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 139 с.
65. Мищенко З. А. Биоклимат дня и ночи. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 279 с.
66. Моделирование продуктивности агроэкосистем//Н. Ф. Бондаренко, Е. Е. Жуковский, И. Г. Мушкин, С. В. Нерпин, Р. А. Полуэктов, И. Б. Усков.— Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 264 с.
67. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур/Под ред. Ф. В. Пеннинга де Фриза и Х. Х. ван Лаара. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 320 с.
68. Моисейчик В. А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 295 с.
69. Моисейчик В. А., Шавкуиова В. А. Агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая озимой ржи. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 164 с.
70. Муминов Ф. А. Тепловой баланс и метеорологический режим картофельного поля. — Л.: Гидрометеоиздат, 1963. — 150 с.
71. Най П. Х., Тинкер П. Б. Движение растворов в системе почва — растение. — М.: Колос, 1980. — 366 с.
72. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Энерго- и массообмен в системе растение — почва — воздух. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 357 с.
73. Ничипорович А. А., Строганова Л. Е., Чмора С. Н., Власова М. П. Фотосинтетическая деятельность растений в посевах.— М.: Изд-во АН СССР, 1961. — 135 с.
74. Одум Ю. Экология. Т. 1. — М.: Мир, 1986. — 328 с.
75. Одум Ю. Экология. Т. 2. — М.: Мир, 1986. — 376 с.
76. Палагин Э. Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 190 с.
77. Пасечнюк Л. Е., Сенников В. А. Агроклиматическая оценка суховеев и продуктивность яровой пшеницы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 128 с.
78. Пасов В. М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 152 с.
79. Платонов В. А., Чудновский А. Ф. Моделирование агрометеорологических условий и оптимизация агротехники. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984.— 279 с.
80. Плюснин И. И. Мелиоративное почвоведение. — М.: Колос, 1971. — 413 с.
81. Полевой А. Н. Агрометеорологические условия и продуктивность картофеля в Нечерноземье. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 117 с.
82. Полевой А. Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 175 с.
83. Полевой А. Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 318 с.

84. Полуэктов Р. А., Пых Ю. А., Швытов И. А. Динамические модели экологических систем. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 169 с.
85. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. VII. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 304 с.
86. Просвиркина А. Г. Агрометеорологические условия и продуктивность проса. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 160 с.
87. Раунер Ю. Л. Тепловой баланс растительного покрова. — Л.: Гидрометеопздат, 1972. — 209 с.
88. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 287 с.
89. Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. — Л.: Гидрометеоиздат, 1965. — 663 с.
90. Романова Е. Н., Мосолова Г. Н., Береснева И. А. Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 244 с.
91. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 341 с.
92. Руднев Г. В. Агрометеорология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1964. — 277 с.
93. Сабинин Д. А. Физиология развития растений. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 195 с.
94. Саноян М. Г. Агрометеорологические и агрофизические принципы и методы управления влагообеспеченностью посева. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 296 с.
95. Свисюк И. В. Погода и урожайность озимой пшеницы на Северном Кавказе и в Нижнем Поволжье. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 207 с.
96. Свисюк И. В. Погода, интенсивная технология и урожай озимой пшеницы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 226 с.
97. Серякова Л. П. Агрометеорология. — Учебное пособие. Ленинградский ордена Ленина Политехнический институт им. М. И. Калинина, 1978. — 158 с.
98. Сельскохозяйственная гидрометеорология (агрогидрометеорология)/Под ред. А. В. Федорова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1938. — 233 с.
99. Слейчер Р. Водный режим растений. — М.: Мир, 1970. — 365 с.
100. Синицина Н. И., Гольцберг И. А., Струнников Э. А. Агроклиматология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973. — 344 с.
101. Сиротенко О. Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 167 с.
102. Смирнов В. А., Корнейчук В. А. Гречиха и климат. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 68 с.
103. Страшная А. И. Агрометеорологические условия перезимовки и формирования урожая семян многолетних сеяных трав на Европейской части СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 156 с.
104. Строганова М. А. Математическое моделирование формирования качества урожая. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 151 с.
105. Судницын И. И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. — М.: Изд-во МГУ, 1979. — 252 с.
106. Суховеи, их происхождение и борьба с ними. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 367 с.
107. Сытник К. М., Брайон А. В., Гордецкий А. В. Биосфера. Экология. Охрана природы (справочное пособие). — Киев: Наукова думка, 1987. — 523 с.
108. Троян П. Факториальная экология. — Киев: Выща школа, 1989. — 232 с.
109. Тооминг Х. Г. Солнечная радиация и формирование урожая. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 200 с.
110. Тооминг Х. Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 264 с.
111. Торнли Дж. Г. М. Математические модели в физиологии растений. — Киев: Наукова Думка, 1982. — 310 с.
112. Уланова Е. С. Методы агрометеорологических прогнозов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1959. — 280 с.

113. Уланова Е. С. Агрометеорологические условия и урожайность озимой пшеницы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 302 с.
114. Уланова Е. С. Методы оценки агрометеорологических условий и прогнозов урожайности зерновых культур. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 53 с.
115. Устойчивость зерновых культур к факторам среды/Под ред. В. С. Шевелухи. — Минск: Ураджай, 1978. — 191 с.
116. Федоров В. Д., Гильманов Т. Г. Экология.— М.: Изд-во МГУ, 1980. — 462 с.
117. Федосеев А. П. Агротехника и погода. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 239 с.
118. Федосеев А. П. Погода и эффективность удобрений. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 144 с.
119. Федченко П. П., Кондратьев К. Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 230 с.
120. Физика почвенных вод. — М.: Наука, 1981. — 208 с.
121. Физика среды обитания растений/Под ред. А. М. Глобуса. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 303 с.
122. Физиология сельскохозяйственных растений. Т. IV./Отв. ред. П. А. Генкель. — М.: Изд-во МГУ, 1969. — 554 с.
123. Физиология приспособления растений к почвенным условиям/Отв. ред. В. Ф. Альтергот. — Новосибирск: Наука, 1973. — 203 с.
124. Франс Дж., Торили Дж. Х. М. Математические модели в сельском хозяйстве. — М.: Агропромиздат, 1987. — 309 с.
125. Ханин М. А., Дорфман Н. Л., Бухаров И. В. и др. Экстремальные принципы в биологии и физиологии. — М.: Наука, 1978. — 256 с.
126. Харченко С. И. Гидрология орошаемых земель. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 372 с.
127. Хэнкс Р. Дж., Ашкрофт Дж. Л. Прикладная физика почв. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 150 с.
128. Цубербиллер Е. А. Суховеи, их агрометеорологическая сущность и пути борьбы с ними. — М.: Колос, 1966. — 110 с.
129. Чекерес А. И. Погода, климат и отгонно-пастбищное животноводство. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973. — 174 с.
130. Чирков Ю. И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 251 с.
131. Чирков Ю. И. Агрометеорология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 293 с.
132. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. — М.: Наука, 1976. — 351 с.
133. Шатилов И. С., Чудновский А. Ф. Агрофизические, агрометеорологические и агротехнические основы программирования урожая. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 318 с.
134. Шевелуха В. С. Периодичность роста сельскохозяйственных растений и пути ее регулирования. — Минск: Ураджай, 1977. — 423 с.
135. Шульгин А. М. Агрометеорология. — М.: Издательство МГУ, 1961. — 131 с.
136. Шульгин А. М. Климат почвы и его регулирование. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. — 340 с.
137. Шульгин И. А. Растение и солнце. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973. — 251 с.
138. Шульгин А. М. Агрометеорология и агроклиматология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 200 с.
139. Ярошевский В. А. Погода и тонкорунное овцеводство. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 202 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5
В.1. Предмет и методы сельскохозяйственной метеорологии . . —
В.2. Связь сельскохозяйственной метеорологии с другими науками. Деление на научные дисциплины 8
В.3. Основные задачи сельскохозяйственной метеорологии . . . 9
В.4. Краткий очерк истории развития сельскохозяйственной метеорологии 11
В.5. Понятие об агроэкосистеме и системе почва — растение — атмосфера 15
Раздел I. РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА . . 19
Глава 1. Радиационное поле в растительном покрове . . . . . —
1.1. Показатели геометрической структуры растительного покрова . . . . . —
1.2. Основные показатели радиационного режима посевов . . . 23
Глава 2. Пропускание радиации растительным покровом 25
2.1. Пропускание прямой солнечной радиации в растительном покрове . . . . . —
2.2. Пропускание рассеянной радиации неба растительным покровом 29
2.3. Пропускание суммарной радиации растительным покровом 31
2.4. Альбедо растительного покрова 37
2.5. Формулы для поглощенной в растительном покрове ФАР 40
2.6. Особенности радиационного баланса растительного покрова 41
Раздел II. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА 45
Глава 3. Тепловой баланс растительного покрова . . . . . —
3.1. Тепловой баланс растительного покрова и его составляющие . . . . . —
3.2. Суточный и вегетационный ход составляющих теплового баланса РП по экспериментальным данным 46
3.3. Температура почвы под растительным покровом 50
Глава 4. Тепловой режим в приземном слое воздуха 56
4.1. Теплообмен в растительном покрове . . . . . —
4.2. Температура воздуха в растительном покрове 58
4.3. Суточный ход теплового баланса листа. Уравнение энергетического баланса листа 62
4.4. Разность температур листа и воздуха 64
Раздел III. ВОДНЫЙ РЕЖИМ СИСТЕМЫ ПОЧВА — РАСТЕНИЕ — АТМОСФЕРА 67
Глава 5. Передвижение влаги в почве . . . . . —
5.1. Состав и водные свойства почв . . . . . —
5.2. Потенциалы почвенной влаги 76
5.3. Механизмы передвижения влаги в почве 70
5.4. Движение влаги в насыщенной влагой почве 80
5.5. Движение влаги в ненасыщенной влагой почве 82
5.6. Движение парообразной воды в почве 85
Глава 6. Закономерности формирования запасов продуктивной влаги в почве 87
6.1. Агрогидрологические свойства почвы . . . . . —
6.2. Запасы продуктивной влаги в почве 90
6.3. Водный баланс почвы 93
6.4. Формирование запасов почвенной влаги в холодный период 97
6.5. Изменение запасов продуктивной влаги в теплый период 99
6.6. Типы годового хода запасов продуктивной влаги в почве 103

Глава 7. Испарение почвенной влаги. Влажность воздуха в растительном покрове. Осадки 105
7.1. Закономерности тепло- и влагообмена испаряющей поверхности с приземным воздухом . . . . . —
7.2. Испарение воды почвой 106
7.3. Влажность воздуха в растительном покрове 110
7.4. Взаимодействие выпадающих частиц осадков с растительным покровом 114
7.5. Методы расчета суммарного испарения 116

Раздел IV. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И РЕЖИМ CO_2 В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ 121

Глава 8. Турбулентность в растительном покрове . . . . . —
8.1. Аэродинамические параметры растительного покрова . . . —
8.2. Уравнения, описывающие турбулентный режим в растительном покрове 125
8.3. Турбулентный режим в растительном покрове 131

Глава 9. Углекислотный режим в растительном покрове. Воздушный режим почвы 135
9.1. Уравнение плотности потока турбулентного переноса CO_2 в растительном покрове . . . . . —
9.2. Профиль концентрации CO_2 в растительном покрове . . . 137
9.3. Суточный ход потоков CO_2 в посевах 138
9.4. Диффузионный перенос газов в почве 140
9.5. Воздушный режим почвы 142

Раздел V. АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ВАЖНЕЙШИЕ ПРОЦЕССЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАСТЕНИЙ 145
Глава 10. Агрометеорологические условия и онтогенез высших растений . . —
10.1. Общая характеристика онтогенеза высших растений . . . —
10.2. Фенологические фазы развития роста растений, возрастные периоды их жизненного цикла 147
10.3. Этапы органогенеза в онтогенезе высших растений . . . 149

Глава 11. Агрометеорологические условия существования растений 154
11.1. Условия существования растений. Экологические факторы —
11.2. Закон оптимума, лимитирующие факторы и взаимодействие факторов среды 157
11.3. Температурные пределы жизни растений. Суммы температур 162
11.4. Классификация растений по их отношению к световому фактору. Фотопериодизм 168
11.5. Классификация растений по их потребности в воде . . . 169

Глава 12. Агрометеорологические условия и водный обмен растений . . 171
12.1. Движение воды через растение . . . . . —
12.2. Водный баланс растения 178
12.3. Суточный ход транспирации 179
12.4. Зависимость транспирации от факторов внешней среды 180
12.5. Потребность посевов в воде 183

Глава 13. Агрометеорологические условия и углеродный обмен растений 191
13.1. CO_2-газообмен растений . . . . . —
13.2. Регулирование газообмена устьичным аппаратом 196
13.3. Фотосинтетическая способность и активность дыхания . . 198
13.4. Влияние факторов внешней среды на фотосинтез и дыхание растений 201
13.5. Уравнение баланса CO_2 206

Глава 14. Агрометеорологические условия и обмен минеральных веществ 208
14.1. Перенос питательных веществ в почве вблизи корневых поверхностей . . . . . —
14.2. Поглощение растворенных веществ растениями 212

14.3. Транспорт минеральных веществ в растении 217
14.4. Усвоение минеральных веществ в растении 218

Глава 15. Агрометеорологические условия и фотосинтетическая продуктивность посевов сельскохозяйственных культур 220
15.1. Общая характеристика продукционного процесса . . . . —
15.2. Эффективность использования солнечной радиации фитоценозами 223
15.3. Потенциальный и действительно возможный урожай посевов 226
15.4. Уравнения роста и функции распределения ассимилятов 228

Раздел VI. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАСТЕНИЙ 234

Глава 16. Засухи и суховеи . . . . . —
16.1. Понятие о засухах и суховеях . . . . . —
16.2. Ход составляющих теплового баланса листа, транспирации, фотосинтеза и продуктивности растений в засушливых условиях 236
16.3. Критерии оценки засух 239
16.4. Агрометеорологические показатели суховеев 243
16.5. Засушливые условия и урожай 245

Глава 17. Переувлажнение 250
17.1. Изменение воднофизических свойств почв при переувлажнении и заболачивании . . . . . —
17.2. Оценка состояния избыточного увлажнения почв по их агрогидрологическим свойствам 253
17.3. Влияние переувлажнения на периодичность роста и продуктивность растений 255
17.4. «Стекание» зерна, прорастание на корню и в валках . . . 258

Глава 18. Пониженные температуры 261
18.1. Холодостойкость растений . . . . . —
18.2. Влияние пониженных температур на водный режим и минеральное питание растений 262
18.3. Воздействие пониженных температур на фотосинтез и дыхание растений 264
18.4. Влияние пониженных положительных температур на развитие и продуктивность растений 267

Глава 19. Заморозки 270
19.1. Ночное выхолаживание приземного слоя воздуха. Типы заморозков . . . . . —
19.2. Механизм повреждения растений при заморозке. Классификация растений по их устойчивости к заморозкам . . . 275
19.3. Влияние повреждения растений заморозком на продуктивность посевов 282

Глава 20. Сильные ливни и ветры. Град 285
20.1. Водная эрозия почв . . . . . —
20.2. Ветровая эрозия почв 289
20.3. Полегание посевов 291
20.4. Градобитня 297

Глава 21. Вымерзание растений 299
21.1. Зимостойкость растений. Агрометеорологические условия, определяющие закалку и состояние зимнего покоя растений . . . . . —
21.2. Влияние осеннего состояния растений на их зимостойкость 301
21.3. Изменение морозостойкости растений в зависимости от условий периода закалки и зимовки 305
21.4. Вымерзание зимующих культур 310

Глава 22. Выпревание, вымокание, ледяная корка, выпирание. Зимний нагрев и иссушение 315
22.1. Выпревание растений 315
22.2. Вымокание растений . . . . . —
22.3. Вредное влияние на растения притертой к почве ледяной корки 315
22.4. Выпирание растений 321
22.5. Зимний нагрев и иссушение растений 324
22.6. Последствия зимних повреждений 326

Глава 23. Погода и вредители. Болезни растений . . . . . —
23.1. Влияние факторов внешней среды на развитие и размножение вредителей растений 332
23.2. Влияние факторов внешней среды на появление и развитие болезней растений 338
23.3. Моделирование жизненного цикла развития вредоносных организмов и скорости инфекционного процесса 347

Раздел VII. АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА . . . . —

Глава 24. Агрометеорологические условия и сельскохозяйственные культуры . . . . . —
24.1. Зерновые культуры 360
24.2. Зернобобовые культуры 363
24.3. Прядильные и масличные культуры 368
24.4. Корнеплоды и клубнеплоды 371
24.5. Овощные и бахчевые культуры 374
24.6. Плодово-ягодные культуры 376
24.7. Многолетние сеяные травы и пастбищная растительность 383

Глава 25. Погода и агротехника 404
25.1. Агрометеорологические условия и сев зерновых культур 405
25.2. Погода и работы по уходу за посевами 409
25.3. Агрометеорологическое обоснование программирования урожаев 412
25.4. Влияние агрометеорологических условий на работу сельскохозяйственных машин и орудий 416
25.5. Погода и эффективность труда в земледелии . . . . . —

Глава 26. Погода и животноводство . . . . . —
26.1. Тепловой баланс животных . . . . . —
26.2. Энергетические потребности животных . . . . . —
26.3. Моделирование влияния факторов внешней среды на продуктивность животных . . . . . —

Список литературы . . . . . —

Учебник

Полевой Анатолий Николаевич

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

Редактор Н. С. Смирнова. Художник А. В. Васильев. Художественный редактор Б. А. Бураков. Технический редактор Н. В. Морозова. Корректор И. А. Динабург.

ИБ № 2138

Сдано в набор 27.03.92. Подписано в печать 10.08.92. Формат 60 × 90¹/₁₆. Бумага книжная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 26,5. Кр.-отт. 26,5. Уч.-изд. л. 30,22. Тираж 2000 экз. Индекс ПРЛ-39. Заказ № 68. Гидрометеоиздат, 199397. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

Типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени ГПО «Техническая книга» Минниформпечати РФ. 190000, г. Санкт-Петербург, Прачечный пер., 6.