

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н.И. Толмачева, Л.С. Шкляева

КОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

2-е издание, исправленное и дополненное

*Допущено методическим советом Пермского государственного
национального исследовательского университета в качестве учебного
пособия для студентов и магистрантов географических
факультетов, обучающихся по направлению подготовки
"Гидрометеорология" и специальности "Метеорология"*

Пермь 2012

УДК 551.507.362

ББК 26.23

Т 52

Толмачева, Н.И.

Т 52 Космические методы экологического мониторинга:
учеб. пособие / Н.И. Толмачева, Л.С. Шкляева; Перм. гос. нац.
иссл. ун-т. – 2-е изд., испр. и доп. – Пермь, 2012. – 296 с.

ISBN 978-5-7944-1878-1

Излагаются теоретические вопросы, касающиеся исследования атмосферы с использованием космических систем для оценки состояния окружающей природной среды и выявления потенциальной экологической опасности. Анализируются основные понятия дисциплины, вопросы физико-технического характера и методические основы проведения экологического мониторинга. Подробно рассматриваются вопросы создания инфраструктур космического экологического мониторинга и разработки экологической системы контроля в обеспечении безопасности окружающей среды. Описываются примеры оперативной обработки космической информации для оценки широких возможностей ее применения в экологическом мониторинге окружающей среды.

Издание предназначено для преподавателей, аспирантов, магистров географического факультета и студентов, обучающихся по специальности «Метеорология». Может быть использовано студентами специальностей «Гидрология», «География», «Природопользование».

УДК 551.507.362

ББК 26.23

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Пермского государственного национального исследовательского университета

Рецензенты: д-р геогр. наук, проф. Казан. гос. ун-та **Ю.П. Переведенцев**;
начальник АМСГ ФГУП «Пермские авиалинии», канд. геогр. наук, доц.
О.Ю. Булгакова

ISBN 978-5-7944-1878-1

© Толмачева Н.И., Шкляева Л.С., 2006

© Толмачева Н.И., Шкляева Л.С., 2012, с изменениями

© Пермский государственный национальный
исследовательский университет, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	8
Глава 1. Концепция мониторинга состояния окружающей среды	16
1.1. Основные понятия, определения и задачи	16
1.2. Масштабы экомониторинга	19
1.3. Нормативные документы по обеспечению государственного экологического мониторинга	22
1.3.1. Федеральные законы и кодексы, регламентирующие государственный экологический мониторинг	26
1.3.2. Нормативные документы, регламентирующие экологический мониторинг	27
1.3.3. Государственные стандарты и нормативы по состоянию атмосферы	29
1.4. Единая государственная система экологического мониторинга	31
1.5. Методы и технические средства контроля источников загрязнения атмосферы	38
1.6. Малозатратные технологии мониторинга качества атмосферы	46
1.7. Организация контроля источников загрязнения атмосферы	48
1.8. Система управления воздухоохранной деятельностью в Российской Федерации и оценка качества атмосферного воздуха	53
1.9. Экологический мониторинг Пермского края	60
Глава 2. Информационные технологии и ресурсы космического экологического мониторинга	65
2.1. Спутниковый экологический мониторинг	66
2.2. Наземная инфраструктура мониторинга	68
2.3. Сетевая инфраструктура мониторинга	69
2.4. Компьютерные методы обработки спутниковых данных	71
2.5. Электронная библиотека космического мониторинга	74
Глава 3. Физические основы получения метеорологической информации из космоса	78
3.1. Общая характеристика методов дистанционного зондирования	80
3.2. Основные понятия теории излучения	86
3.2.1. Электромагнитное излучение и его трансформации	86
3.2.2. Взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой	91

3.3. Теория излучения. Уравнение переноса	94
3.3.1. Основные законы излучения	94
3.3.2. Вывод уравнения переноса излучения	97
3.3.3. Коэффициенты поглощения, рассеяния и ослабления	100
Глава 4. Космические системы дистанционного зондирования	102
4.1. Космические системы мониторинга Земли и атмосферы	102
4.2. Обзор систем дистанционного зондирования	113
Глава 5. Наземный комплекс приема, обработки и распространения спутниковой информации Росгидромета	127
Глава 6. Экоинформационные системы как инструмент космического мониторинга окружающей среды	137
6.1. Базы данных и системы управления базами данных	139
6.2. Internet и гипертекстовые технологии	147
6.3. Обработка данных экологического мониторинга	151
6.3.1. Электронные таблицы	152
6.3.2. Пакеты для инженерных и научных расчетов	156
6.3.3. Пакеты программ для статистического анализа данных мониторинга	164
6.4. Статистические экспертные системы для обработки данных экологического мониторинга	166
Глава 7. Геоинформационные системы экологического мониторинга	173
7.1. Структура геоинформационных систем	173
7.2. Цифровые карты	176
7.3. Принципы географического анализа экологической информации	181
7.4. Особенности работы с ГИС	184
7.4.1. ГИС ARC/INFO	184
7.4.2. ГИС MapInfo	187
7.4.3. ГИС IDRISI	188
7.5. Геоинформационное обеспечение дистанционного мониторинга атмосферы	191
7.5.1. Геоинформационные задачи регионального мониторинга атмосферы	192
7.5.2. Вопросы организации ГИС	197
7.5.3. Применение региональных ГИС	209
7.5.4. Перспективы развития ГИС-центров	215
Глава 8. Примеры использования космической информации в экологии природной среды	218
8.1. Мониторинг загрязнения окружающей среды	218

8.1.1. Мониторинг воздействия на окружающую среду нефтяных и газовых разработок	219
8.1.2. Изменение антропогенной нагрузки в окрестностях города по данным спутникового зондирования	221
8.1.3. Информационные технологии и методы дистанционного зондирования для построения космического экологического мониторинга мегаполисов	230
8.1.4. Оценка ареалов загрязнения снежного покрова по космическим сканерным изображениям	238
8.2. Космический мониторинг водных ресурсов	251
8.2.1. Измерение температуры водных поверхностей прибором AVHRR спутника NOAA	253
8.2.2. Исследование загрязнения водной поверхности с использованием космической информации	257
8.2.3. Радиолокационный мониторинг ледовой обстановки	262
8.3. Контроль состояния растительности	264
8.3.1. Мониторинг лесных массивов по данным дистанционного зондирования	268
8.4. Мониторинг чрезвычайных ситуаций	275
8.4.1. Мониторинг наводнений	275
8.4.2. Наблюдение за лесными пожарами	278
8.5. Исследование долговременных изменений природной среды	289
8.5.1. Мониторинг опустынивания	289
Список литературы	292

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из важных как в научном, так и в прикладном плане задач современной экологии является мониторинг окружающей среды. Для его осуществления необходимы:

- наблюдения за факторами негативного воздействия и состоянием окружающей среды;
- контроль и оценка фактического состояния, прогноз изменения состояния окружающей природной среды под воздействием природных и антропогенных факторов;
- выявление потенциальной экологической опасности, включая оценку природных и техногенных факторов возникновения возможных чрезвычайных ситуаций с негативными экологическими последствиями.

Проведение указанных мероприятий невозможно без применения космических методов исследования в рамках экологического мониторинга. Экологический мониторинг рассматривается как система наблюдений и оценки состояния окружающей среды, а также как средство информационного обеспечения процесса подготовки и принятия управленческих решений. Новейшие научно-технические направления в экологии потребовали знания детальных пространственных и временных характеристик атмосферы, что привело к необходимости разрабатывать и использовать новые средства измерений. В настоящее время достаточно успешно применяются космические методы для оценки состояния окружающей природной среды.

Поскольку изложение сведений об основных космических методах экологического мониторинга требует использования сложного математического аппарата, физических методов исследования и вызывает определенные трудности в усвоении материала студентами, был разработан теоретический курс и написано данное учебное пособие. Современные учебники по средствам измерения загрязнения окружающей среды не дают знаний по актуальным в настоящее время космическим методам экологического мониторинга природной среды и не содержат сведений о возможностях применения спутниковой информации для оценки экологической опасности, необходимых студентам-метеорологам. Поэтому в настоящее время актуален выпуск пособия по данной тематике.

Основу пособия составили переработанные разделы курсов «Гидрометеорологические основы охраны окружающей среды», «Космические методы исследований в метеорологии», «Дистанционные методы исследования мезометеорологических процессов», «Методы

контроля загрязнения окружающей среды», «Основы промышленной экологии», «Мониторинг фонового загрязнения атмосферного воздуха», «Методы и средства гидрометеорологических измерений» читаемых авторами в течение 10 лет и более на географическом факультете Пермского университета студентам–метеорологам. Большое количество космических систем и методов исследования окружающей среды, а также сложности, связанные с разнообразием средств обработки информации, обуславливают необходимость тщательного изучения соответствующих вопросов. В пособии рассмотрены современные методы и приборы космического мониторинга, определены основные требования к эксплуатации и возможности их выбора при выполнении экологических исследований.

ВВЕДЕНИЕ

В результате интенсивного использования природных ресурсов происходит мощное разрушение и загрязнение природных систем. Еще в 1972 г. на I Международной конференции ООН по оценке состояния природной среды (Стокгольм) было признано, что экологическое состояние природной среды в промышленных странах стало угрожать не только здоровью населения, но и самому существованию человечества. Решению этих проблем, возникающих в результате катастрофического ухудшения окружающей природной среды, отводится центральное место при выработке стратегии экологически устойчивого социально-экономического развития промышленно развитых стран, в том числе и России. В последние годы при фундаментальных исследованиях проблем экологии территории России широко используются космические методы контроля состояния экосистем.

Разработка передовых информационных технологий стала новым этапом в развитии космического экологического мониторинга. Особенностью нового этапа является широкое использование телекоммуникационной инфраструктуры, а также гипертекстовых и интерактивных информационных технологий, которые чрезвычайно перспективны в дистанционном мониторинге состояния окружающей среды. Актуальна проблема интегрирования национальных информационных ресурсов по окружающей среде, создание региональных баз данных по результатам космического экологического мониторинга.

Проблема получения адекватной информации о состоянии окружающей среды тесно связана с задачей обеспечения устойчивого развития общества, что особенно важно для экономики России в переходном периоде. В этой ситуации развитие технологий наблюдения из космоса, создание инфраструктур спутникового экологического мониторинга регионов России наряду с разработкой экологической системы контроля в реальном масштабе времени призваны сыграть ключевую роль в обеспечении безопасности окружающей среды и устойчивого развития экономики России.

В системе управления природоохранной деятельностью существенная роль и место отведены формированию системы государственного экологического мониторинга как источника комплексной объективной информации о состоянии окружающей среды и природных ресурсов. В период 2003–2006 гг. нормативно-правовая база в области государственного экологического мониторинга получила дальнейшее

развитие. В настоящее время она сформировалась как действующая система.

Во исполнение ст. 1, 5, 63 Федерального закона «Об охране окружающей среды» Правительством Российской Федерации принято постановление от 31.03.2003 г. № 177 «Об организации и осуществлении государственного мониторинга окружающей среды (государственного экологического мониторинга)». В государственном экологическом мониторинге задействованы ряд министерств и ведомств, а на Министерство природных ресурсов (МПР) России возложена задача координации деятельности федеральных органов исполнительной власти по его организации и осуществлению, согласованию методических и нормативно-технических документов в этой области. Для эффективного выполнения этих функций в МПР проведена реорганизация специализированных инспекций аналитического контроля, на базе которых создана система лабораторий анализа и мониторинга окружающей среды.

Согласно ст. 3 Федерального закона от 10.01.2002 г. №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» основными принципами хозяйственной и иной деятельности органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, юридических и физических лиц, оказывающей воздействие на окружающую среду, должны являться:

- соблюдение права человека на благоприятную окружающую среду;
- обеспечение благоприятных условий жизнедеятельности человека;
- охрана, воспроизводство и рациональное использование природных ресурсов как необходимые условия обеспечения благоприятной окружающей среды и экологической безопасности;
- платность природопользования и возмещение вреда окружающей среде;
- презумпция экологической опасности планируемой хозяйственной и иной деятельности;
- наличие документов по оценке воздействия на окружающую среду при принятии решений об осуществлении хозяйственной и иной деятельности;
- допустимость хозяйственной и иной деятельности только на основе соблюдения требований в области охраны окружающей среды;
- обеспечение снижения уровня негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в соответствии с

нормативами в области охраны окружающей среды, на основе использования наилучших существующих технологий, с учетом экономических и социальных факторов;

- соблюдение права каждого на получение достоверной информации о состоянии окружающей среды, а также участие граждан в принятии решений, касающихся их прав на благоприятную окружающую среду в соответствии с законодательством;

- ответственность за нарушение законодательства в области охраны окружающей среды;

- международное сотрудничество Российской Федерации в области охраны окружающей среды.

Для реализации указанных принципов необходимы:

- наблюдения за факторами негативного воздействия и состоянием окружающей среды;

- контроль и оценка фактического состояния, прогноз изменения состояния окружающей природной среды под воздействием природных и антропогенных факторов;

- выявление потенциальной экологической опасности, включая оценку природных и техногенных факторов возникновения возможных чрезвычайных ситуаций с негативными экологическими последствиями;

- проведение нормирования состояния окружающей среды и снижение негативного экологического воздействия.

Все указанные мероприятия не возможны без проведения экологического мониторинга, в том числе космического.

Под *экологическим мониторингом*, или мониторингом окружающей среды, понимается комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Мониторинг окружающей среды, осуществляемый органами государственной власти Российской Федерации и органами государственной власти субъектов Российской Федерации, является государственным экологическим мониторингом (государственным мониторингом окружающей среды).

Приведем некоторые определения и понятия, знание которых необходимо для изучения курса.

Государственный мониторинг окружающей среды (государственный экологический мониторинг) — мониторинг окружающей среды, осуществляемый органами государственной власти Российской

Федерации и органами государственной власти субъектов Российской Федерации.

Доктрина — целостная совокупность принципов, используемых в качестве основы программы действия.

Загрязнение окружающей среды — поступление в окружающую среду вещества и (или) энергии, свойства, местоположение или количество которых оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

Загрязняющее вещество — вещество или смесь веществ, количество и (или) концентрация которых превышают установленные для химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов нормативы и оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

Источник воздействия на окружающую среду — ограниченная в пространстве область, к которой могут быть отнесены все характеристики определенного воздействия на окружающую среду, например: технологическое оборудование и сооружения, выбросные и вентиляционные трубы и шахты, канализационные и ливневые коллекторы, места размещения и захоронения отходов, промплощадки и производственные корпуса, промышленные зоны и селитебные территории в целом.

Класс — совокупность однородных элементов, предметов, отношений, выделенных по определенному признаку, представляемая как единое целое.

Класс опасности загрязняющего вещества (атмосфера, воды):

- 1-й класс — вещества чрезвычайно опасные;
- 2-й класс — высокоопасные;
- 3-й класс — опасные;
- 4-й класс — умеренно опасные.

Класс опасности загрязняющего вещества (почвы):

- 1-й класс — вещества высокой опасности;
- 2-й класс — вещества умеренно опасные;
- 3-й класс — вещества малоопасные;
- 4-й класс — неопасные.

Классификация — распределение предметов, явлений и понятий по классам, разделам, разрядам в зависимости от их общих признаков. Целью научной классификации является установление связей между элементами (объектами) в отдельно взятой области знаний или человеческой деятельности и определение места каждого элемента (объекта) в общей системе (совокупности).

Кодекс — единый систематизированный законодательный акт, объединяющий правовые нормы, относящиеся к единой отрасли права.

Контроль в области охраны окружающей среды (экологический контроль) — система мер, направленная на предотвращение, выявление и пресечение нарушения законодательства в области охраны окружающей среды, обеспечение соблюдения субъектами хозяйственной и иной деятельности требований, в том числе нормативов и нормативных документов, в области охраны окружающей среды.

Контроль загрязнения атмосферы — совокупность свойств атмосферы, определяющая степень воздействия физических, химических и биологических факторов на людей, растительный и животный мир, а также на материалы, конструкции и окружающую среду в целом.

Критерий классификации — количественные или качественные градации, ранжирующие состояние элементов (объектов) внутри групп (классов, подклассов), образованных на основе классификационных признаков.

Нормативы допустимого воздействия на окружающую среду — нормативы, которые установлены в соответствии с показателями воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и при которых соблюдаются нормативы качества окружающей среды.

Нормирование — установление меры воздействия на окружающую среду, гарантирующей сохранение (поддержание, не нарушение) количественных и качественных характеристик среды.

Нормы качества воды — установленные значения показателей качества воды для конкретных видов водопользования.

Окружающая среда — совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов, а также антропогенных объектов.

Опасные для почвы вещества — вещества, которые вследствие их свойств, количества и концентраций отрицательно влияют на функции почв и их использование.

Постановление Правительства РФ — акт управления общенормативного содержания, издаваемый Правительством РФ в пределах его компетенции, на основе и во исполнение Конституции РФ, федеральных конституционных законов, федеральных законов и указов Президента РФ. Постановление подписывается Председателем Правительства РФ.

Почва — верхний слой земной коры, состоящий из минеральных частиц органического вещества, воды, воздуха и животных организмов.

Предельно допустимая концентрация примеси в атмосфере (ПДК) — максимальная концентрация примеси в атмосфере, отнесенная к определенному времени осреднения, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного действия, включая отдаленные последствия, и на окружающую среду в целом.

Предельно допустимый выброс (ПДВ) — научно-технический норматив, устанавливаемый из условия, чтобы содержание загрязняющих веществ в приземном слое воздуха от источника или их совокупности не превышало нормативов качества воздуха для населения, животного и растительного мира.

Принцип классификации — выбор и обоснование системы классификационных признаков.

Распоряжение — в конституционном праве акт управления, издаваемый главой государства и органами исполнительной власти в рамках их компетенции.

Статистика — отрасль общественных наук, имеющая целью сбор, упорядочивание, анализ и сопоставление фактов, относящихся к самым разнообразным массовым явлениям.

Федеральный закон — закон, принимаемый федеральным парламентом по вопросам, отнесенным Конституцией к исключительной компетенции Федерации, а также к совместной компетенции Федерации и ее субъектов. Общим принципом, закрепляемым конституциями всех федеративных государств, является верховенство такого закона по отношению к законам субъекта Федерации.

Используемые сокращения и обозначения

ГН — гигиенический норматив
ГОСТ — государственный стандарт
ГОСТ Р — государственный стандарт российский
ИСО — международный стандарт
ИСЗ — искусственный спутник Земли
КС — космическая система
КХА — количественный химический анализ
МВИ — методика выполнения измерения
МР — методические рекомендации
МУ — методическое указание
МСЗ — метеорологический спутник Земли
ОБУВ — ориентировочно безопасный уровень воздействия
ОДК — ориентировочно допустимая концентрация

ОСТ — отраслевой стандарт
ПВ — промышленные выбросы
ПДВ — предельно допустимый выброс
ПДК — предельно допустимая концентрация
ПНД Ф — природоохранные нормативные документы федеральные (отраслевой стандарт)
РД — руководящие документы (отраслевой стандарт)
СанПиН — санитарные правила и нормы
ФПА — федеральный перечень методик выполнения измерений
— атмосферный воздух

Сокращенные наименования федеральных органов
исполнительной власти, используемые в тексте

Госатомнадзор России — Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности

Госгортехнадзор России — Федеральный горный и промышленный надзор России

Госкомстат России — Государственный комитет Российской Федерации по статистике

Госстандарт России — Государственный комитет Российской Федерации по стандартизации и метрологии

Госстрой России — Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу

МИД России — Министерство иностранных дел Российской Федерации

Минатом России — Министерство Российской Федерации по атомной энергии

Минздрав — Министерство здравоохранения Российской Федерации

Минобороны России — Министерство обороны Российской Федерации

Минпромнауки России — Министерство промышленности, науки и технологии Российской Федерации

Минсвязи России — Министерство Российской Федерации по связи и информатизации

Минсельхоз России — Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Минэнерго России — Министерство энергетики Российской Федерации

МПР России — Министерство природных ресурсов Российской Федерации

МЧС России — Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

ПЦГМС — Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Росавиакосмос — Российское авиационно-космическое агентство

Росгидромет — Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Росземкадастр — Федеральная служба земельного кадастра России

Роскомзем — Комитет Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству

Роскомнедра — Комитет Российской Федерации по геологии и использованию недр

Ростехнадзор — Федеральная служба по экологическому технологическому и атомному надзору. Представителем Ростехнадзора в регионе является, например, Пермское межрегиональное управление по технологическому и экологическому надзору

Глава 1. КОНЦЕПЦИЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

1.1. Основные понятия, определения и задачи

Термин и понятие мониторинга окружающей среды, или экомониторинга, начал употребляться в научной литературе в начале 70-х гг. прошлого столетия. Идеология мониторинга возникла после решения Стокгольмской конференции ООН (1972 г.) и Международного совещания в Найроби в 1974 г. Появилось множество определений экомониторинга в зарубежных источниках, а также и в России.

Главным идеологом экомониторинга является академик Ю.А. Израэль, который разработал современную концепцию, широко используемую на территории РФ и опубликованную в многочисленных научных трудах. В них отмечается, что в последнее время весьма значительными стали изменения состояния биосферы под влиянием антропогенных факторов. Причем эти изменения, происходящие под влиянием человеческой деятельности, за несколько лет будут сравнимы с результатами естественных изменений, происходящих за целые исторические эпохи. В настоящее время естественные изменения, как кратковременные, так и длительные, большей частью фиксируются существующими в разных странах геофизическими службами (метеорологической, гидрологической, агрометеорологической, сейсмической, ионосферной, гравиметрической, магнитометрической). С целью выделения антропогенных изменений на фоне естественных природных изменений была предложена организация специальных наблюдений за изменением состояния биосферы под влиянием человеческой деятельности.

Систему повторных наблюдений одного или более элементов окружающей природной среды (ОПС) в пространстве и времени с определенными целями в соответствии с заранее подготовленной программой принято называть мониторингом. По мнению Ю.А. Израэля, под мониторингом целесообразно понимать систему наблюдений, позволяющую выделить изменения в состоянии биосферы под влиянием человеческой деятельности. Такую систему следует называть *мониторинг антропогенных изменений окружающей природной среды*.

Для проведения даже приближенных оценок и анализа состояния среды требуется огромное количество разнообразной информации. И.П. Герасимов дает следующее определение: *мониторинг — это система наблюдения и прогноза состояния окружающей среды, осуществляемая в различных масштабах, в том числе в глобальном; в то*

же время мониторинг — часть системы управления качеством природной среды. Он указывает, что «наблюдение», «контроль» и «управление» окружающей средой (ОС) должны быть целеустремленны, взаимосвязаны, эффективны. Однако выполнение этих требований зависит прежде всего от уровня научной теории, степени совершенства методов и наличия соответствующих технических средств современного мониторинга ОС. Статья была написана И.П. Герасимовым в 1977 г., но она не потеряла своей актуальности и в XXI в. По-прежнему компоненты мониторинга еще не достаточно разработаны. Сегодня невозможно осуществлять мониторинг ОС в полной форме, т.е. по всей цепи: наблюдение–контроль–управление. В статье автор указывает две наиболее возможные «опасности» его толкования. Во-первых, оно дает возможность включить в подобную систему разнообразные и разноцелевые мероприятия или службы наблюдения. Во-вторых, при использовании его в качестве глобальной системы неопределенным остается соотношение в общей системе мониторинга национальных и интернациональных мероприятий.

Первую из этих опасностей легко пояснить на примере гидрометеорологической службы и службы контроля загрязнений. И та и другая службы имеют прямое отношение к ОС (прогноз погоды, регистрация сейсмических явлений), однако каждая из них имеет еще и определенные собственные и независимые друг от друга задачи. Объединение их в одну систему мониторинга в принципе возможно (все это относится к ОС), но вряд ли будет оправданно в теоретическом и практическом отношениях. Их соединение дает лишь пестрый и мало связанный между собой конгломерат разнообразных мероприятий. Поэтому И.П. Герасимов считает правильным предложение Ю.А. Израэля *«называть мониторингом систему наблюдений, позволяющую выделить изменения состояния биосферы под влиянием человеческой деятельности»*. В соответствии с этим определением необходимо использовать при организации последнего не только опыт и материалы, но и методы различных существующих служб наблюдения над природными явлениями (т.е. вне антропогенного мониторинга).

Так, В.Д. Утехин считает, что окружающая нас природа складывается из экосистем, где все компоненты тесно связаны между собой. Поэтому он соглашается с более широким пониманием трактовки определения экомониторинга, приведенное Ю.А. Израэлем: *«Экомониторинг — это слежение за динамикой состояния природы как единого целого, т.е. слежения за экосистемами»*. Ю.А. Анохин, давая определение экомониторинга, руководствуется так называемыми метакритериями, под которыми понимает, в частности, благополучие или

неблагополучие существующего или прогнозируемого состояния экологической системы, наличие и мощность «экологического резерва». Он дает весьма широкое определение экологического мониторинга, понимая по ним надлежащим образом организованную систему, включающую:

- наблюдения за состоянием ОПС;
- обработку этих наблюдений;
- соответствующую подсистему прогнозирования возможных состояний природной среды;
- анализ и оценку прогнозируемых состояний с помощью некоторых метакритериев.

При таком понимании мониторинга допустимая нагрузка загроизнения ОПС при всей сложности и неоднозначности ее определения является существенно внутренней величиной системы мониторинга.

Основные задачи экомониторинга:

- организация широких наблюдений за изменением состояния биосферы, особенно, обусловленными деятельностью человека;
- обнаружение источников воздействия, а также причин этих изменений;
- оценка наблюдаемых изменений, выявление антропогенных эффектов;
- прогноз и определение тенденций в изменении состояния биосферы.

Ответы на вопросы при решении этих задач позволяют принимать решения для предотвращения отрицательных последствий в экстремальных случаях, выработать стратегию оптимальных отношений человека с окружающей его природной средой. Для организации системы наблюдения и контроля состояния ОПС, позволяющих выделять изменения, вызываемые антропогенными причинами, необходима детальная информация о естественных колебаниях и изменениях состояния среды; осуществление мониторинга предусматривает наличие такой исходной информации.

Мониторинг включает в себя следующие основные элементы:

- наблюдение за факторами, воздействующими на окружающую природную среду, и за состоянием среды;
- оценку фактического состояния природной среды;
- прогноз состояния ОПС и оценку этого состояния.

Таким образом, мониторинг *включает* в себя наблюдение, оценку и прогноз состояния ОПС и *не включает* управление качеством окружающей среды и деятельности человека. Для правильной организа-

ции управления качеством ОПС совершенно необходимым условием является организация системы мониторинга.

1.2. Масштабы экомониторинга

В зависимости от масштабов выделяются следующие виды мониторинга: локальный, глобальный, национальный.

Локальный мониторинг охватывает отдельные районы, *глобальный* — земной шар в целом, причем основной особенностью системы глобального мониторинга является возможность на основании данных этой системы оценить состояние биосферы в глобальном масштабе.

Национальным мониторингом (НМ) называется система мониторинга в рамках одного государства, такая система отличается от глобального мониторинга не только масштабами, но и тем, что основной задачей НМ является получение информации и оценка состояния ОС в национальных интересах. Так, повышение уровня загрязнения в отдельных городах или промышленных районах может не иметь существенного значения для оценки состояния биосферы в глобальном масштабе, но является важным обстоятельством для принятия национальных мер. Это означает, что НМ не обязательно должен быть подсистемой глобального мониторинга, организованного на территории какого-либо государства, или полностью совпадать с системами национального мониторинга. Термин «международный мониторинг» обычно употребляется в отношении систем мониторинга, используемых в интересах нескольких государств.

М.О. Френкель выделяет региональный и даже межрегиональный уровень. Он считает, что межрегиональный уровень необходим для решения крупномасштабных экологических задач в рамках больших регионов (бассейн Волги, Северо-Запад России, Урал, Сибирь и др.). И.П. Герасимов общую структуру мониторинга представляет в виде различных степеней и блоков. При таком подразделении следует исходить из существа предмета наблюдения и его значения во всей системе мониторинга ОС. С этой точки зрения, вряд ли некоторые из существующих предложений соответствуют этому принципу. Так, выделение геофизического, геохимического, физико-географического и биологического мониторинга, будучи правильным по методам наблюдений, не подчинено вышеуказанному предмету современного «антропогенного» мониторинга. Общим предметом экологического мониторинга (ЭМ) является многокомпонентная совокупность природных явлений, подверженная многообразным естественным динамическим

изменениям и испытывающая разнообразное воздействие со стороны человека.

По мнению И.П. Герасимова, первой (исходной) ступенью, или блоком, современного ЭМ должен являться *биоэкологический* (санитарно-гигиенический) мониторинг. Его назначение — наблюдения за состоянием ОС с точки зрения влияния среды прежде всего на состояние здоровья человека и населения в целом (т.е. человеческой популяции). Это обусловлено целью проведения ЭМ — экологическая безопасность человека.

Для слежения за состоянием здоровья населения в зависимости от состояния ОС должна использоваться система показателей, отражающих основные типы экологических реакций человека на ОС. Наиболее общими показателями для всех типов являются заболеваемость (т.е. количество заболеваний) и смертность в человеческой популяции. Наиболее «доработанными» в настоящее время для массового использования в системе биоэкологического мониторинга — *токсикологические* показатели загрязнения воздушной и водной среды, так называемые ПДК — предельно допустимые концентрация определенных химических веществ, вносимых в ОС.

Геоэкологический или *геосистемный* мониторинг. Второй ступенью (блоком) общего мониторинга ОС является геосистемный или геоэкологический мониторинг ОС: наблюдения за изменением тех главных геосистем (в том числе природных экосистем), из которых состоит ОС, а также за преобразованием их в природно-технические (агросистемы, города, среда индустриальных районов и т.д.) Геоэкологический мониторинг является необходимым дополнением к биоэкологическому:

- позволяет выявить генезис и взаимную связь тех явлений в ОС, которые служат индикаторами биоэкологического мониторинга (в частности, ПДК загрязнителей);

- углубляет содержание биоэкологического мониторинга, так как позволяет предусмотреть стихийные изменения ОС и появление тех явлений, которые ухудшают жизненную среду обитания людей и всей биоты в целом;

- расширяет границы ЭМ, включая в свой предмет естественные ресурсы ОС, используемые человеком в его хозяйственной деятельности.

Биосферный мониторинг. Третьей ступенью (блоком) ЭМ является биосферный мониторинг (БМ). Он должен обеспечивать наблюдение, контроль и прогноз всевозможных изменений уже не в региональном (геосистемном), а в глобальном масштабе, т.е. в отношении

биосферы в целом как среды жизни всего человечества и ее изменений, вызванных его же деятельностью. Таким образом, биосферный мониторинг, опираясь и дополняя биоэкологический и геоэкологический, завершает всю систему слежения за ОС в целом.

Основная задача биосферного мониторинга — наблюдение за главными параметрами современной биосферы с целью достоверного констатирования различных периодических или непериодических изменений в ней, оценки экологического значения этих изменений прежде всего для существования и жизнедеятельности человечества и выявления их причин (прежде всего антропогенных). Состав этих параметров (показателей) начинается с геофизических характеристик солнечной радиации как главной энергетической базы всех биосферных процессов. Эти характеристики должны включать в себя сведения наблюдений за состоянием озонового экрана, а также за условиями прохождений радиационной энергии через атмосферу. Главное внимание в этой системе наблюдений обращено на роль возрастающего запыления атмосферы и изменения ее газового состава. С другой стороны, в состав параметров БМ должны также входить показатели наблюдений и изменений глобальной биологической продуктивности суши и вод Мирового океана. Самое важное значение в биосферном мониторинге придается глобальному эффекту антропогенного воздействия на климат, особенно на газовый состав атмосферы (выделение CO_2 в результате сжигания топлива, изменение потребления последнего в процессе фотосинтеза). В задачи БМ должны войти наблюдения над изменением общих уровней радиоактивности в биосфере, вызываемых использованием атомной энергии в мирных целях. БМ должен основываться на данных наблюдений своих станций, расположенных в особых географических условиях.

Изложенная выше общая схема современного мониторинга ОС имеет лишь общее ориентировочное значение. Практическая реализация этой схемы требует еще большей и всесторонней разработки. Важное место в ней занимают вопросы эффективного использования (в интересах био-, геоэкологического и биосферного мониторинга) различных существующих служб наблюдения: гидрометеорологической, санитарно-гигиенической и эпидемиологической, земле- и лесоустроительной, ветеринарной и защиты растений, рыбохозяйственной и др., а также более специальных геофизических служб (сейсмической, вулканической, ионосферной, гравиметрической, и др.). Каждая существующая служба должна получить определенные программы наблюдений, методики, а также способы обработки и выдачи информации, вытекающие из задач той или иной службы всего мониторинга.

Цели экологического мониторинга названы в статье «Концепция системы экологического мониторинга России» (авторы Кимстач В.А., Фридман И.Д., Дмитриев Е.С., Язвин Л.С., Нейман Е.А.; см.: Метеорология и гидрология. 1992. № 10). В качестве примера изложения теории экологического мониторинга можно привести учебное пособие, разработанное в Казанском университете в 2004 г., «Гидрометеорологические основы охраны окружающей среды», авторы Переведенцев Ю.П., Хабутдинов Ю.Г., Николаев А.А.

1.3. Нормативные документы по обеспечению государственного экологического мониторинга

Правовые, нормативные и методические документы, регламентирующие разработку, организацию и функционирование систем экологического мониторинга, контроль состояния и химическую загрязненности охраны окружающей среды, обеспечивают единство законодательно-правовой и методической базы государственного экологического мониторинга, экологического контроля, производственного и санитарно-гигиенического мониторинга. Для обеспечения правильности и объективности измерений, сопоставимости полученных результатов экологический мониторинг должен проводиться в соответствии с федеральными нормативными законодательными актами, государственными, международными и отраслевыми стандартами, гигиеническими нормативами, санитарными нормами и правилами.

Перечень документов состоит из двух частей:

1. Нормативные законодательные акты, регламентирующие ведение государственного экологического мониторинга.
2. Нормативные и методические документы по государственному экологическому мониторингу.

Структура перечня приведена в табл. 1.1. В разделе 1 представлены нормативные законодательные акты, требования которых необходимо соблюдать при организации и функционировании систем экологического мониторинга всех уровней: государственного, ведомственного, территориального, производственного. Типы этих нормативных законодательных актов образуют следующий иерархический ряд законодательства:

- федеральные законы и кодексы,
- указы, доктрины и другие нормативные документы Президента, постановления Государственной думы РФ и Правительства РФ, постановления, положения, приказы и письма федеральных ведомств, ведомственные нормы и правила, руководства, методики и инструк-

ции. Законодательные акты каждого нижерасположенного уровня подчиняются документам вышеразположенного уровня.

Таблица 1.1

Структура перечня нормативных и методических документов по обеспечению государственного экологического мониторинга

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНЫХ И МЕТОДИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА		
1. Нормативные законодательные акты, регламентирующие ведение государственного экологического мониторинга		
1.1. Федеральные законы и кодексы.		
1.2. Указы, доктрины и другие нормативные документы Президента РФ, постановления Правительства и Государственной думы РФ.		
1.3. Прочие нормативные законодательные акты, регламентирующие экологический мониторинг.		
2. Нормативные и методические документы по государственному экологическому мониторингу		
2.1. Атмосфера	2.2. Вода	2.3. Почва
2.1.1. Атмосфера. Государственные, международные и отраслевые стандарты (ГОСТ, ГОСТ Р, ИСО, ОСТ)	2.2.1 Воды. Государственные, международные и отраслевые стандарты (ГОСТ, ГОСТ Р, ИСО, ОСТ)	2.3.1. Почвы. Государственные, международные и отраслевые стандарты (ГОСТ, ГОСТ Р, ИСО, ОСТ)
2.1.2. Атмосфера. СанПиН, СНиП, ГН, методические указания, рекомендации и прочие нормативные документы по организации элементов экологического мониторинга	2.2.2. Воды. СанПиН, СНиП ГН, методические указания, рекомендации и прочие нормативные документы по организации элементов экологического мониторинга	2.3.2. Почвы. СанПиН, СН, ВСН и прочие нормативные документы по организации элементов экологического мониторинга
2.1.3. Атмосфера. Отраслевые стандарты и методические документы (МУК, МУ, МУ МЗ, РД, ПНД Ф и пр.)	2.2.3. Воды Отраслевые стандарты и методические документы (МУК, МУ, МУ МЗ, РД, ПНД Ф и пр.)	2.3.3. Почвы. Отраслевые стандарты и методические документы (МУК, МУ, МУ МЗ, РД ПНД Ф и пр.)
Объекты мониторинга		
Атмосферный воздух Воздух рабочей зоны Выбросы	Вода питьевая Вода природная Вода сточная Вода сточная очищенная	Почва Донные отложения

При разработке законодательства всегда учитываются требования международных конвенций, деклараций и соглашений.

Раздел 1 содержит подразделы:

1.1. Федеральные законы и кодексы.

1.2. Указы, доктрины и другие нормативные документы Президента Российской Федерации, постановления Государственной думы Российской Федерации и постановления Правительства Российской Федерации.

1.3. Прочие нормативные законодательные акты, регламентирующие экологический мониторинг.

В подраздел 1.3 входят приказы МПР России, приказы Росгидромета, приказы МЧС, постановления Госгортехнадзора, приказы Минздрава, а также прочие неотмененные ведомственные и иные законодательные акты, регламентирующие федеральный экологический мониторинг.

Следует отметить, что проведение экологического мониторинга в субъектах Российской Федерации может и должно регулироваться совместно федеральным законодательством и законодательством субъекта Российской Федерации, потому что согласно классификатору правовых актов, утвержденному указом Президента РФ от 15.03. 2000 г. № 511 (СЗ РФ. 2000. №12. Ст. 1260), законодательные нормативные акты об охране окружающей среды относятся к нормативным правовым актам о природных ресурсах и охране окружающей среды (раздел 110.000.000). Законодательство об охране окружающей среды, как и земельное, водное, лесное законодательство и законодательство о недрах (о природных ресурсах) в соответствии со ст. 72 Конституции РФ относится к предмету совместного ведения Российской Федерации и субъектов РФ. По предметам совместного ведения издаются федеральные законы и принимаемые в соответствии с ними законы и иные нормативные правовые акты субъектов РФ (ст. 76 Конституции РФ).

В разделе 2 представлены нормативные и методические документы, регламентирующие мониторинг состояния и загрязнения окружающей природной среды, государственные стандарты (ГОСТ), российские государственные стандарты (ГОСТ Р), международные стандарты (ИСО), отраслевые стандарты (ОСТ), гигиенические нормы (ГН), санитарные правила и нормы (СанПиН), а также отраслевые стандарты: методические рекомендации (МР), нормативно-методическая документация, касающаяся количественного химического анализа (КХА), методические указания (МУ, МУК), руководящие документы (РД), федеральные природоохранные нормативные доку-

менты (ПНД Ф) и др. Приведенные в разделе 2 документы актуальны на территории Российской Федерации на декабрь 2003 г.

Аттестация МВИ проводится государственными научными метрологическими центрами, органами государственной метрологической службы или аккредитованными метрологической службой организациями, имеющими ведомственное подчинение. Представлены действующие, применяемые для экологического мониторинга методические документы, большинство из которых прошли метрологическую аттестацию в соответствии с ГОСТ Р 8.563–96.

Аббревиатура РД 52 указывает на то, что данный методический документ входит в «Руководящий документ. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей среды», который утверждается Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, ведется НПО «Тайфун». Методические документы в системе Росгидромета также разрабатываются информационными центрами ГТО, ГХИ, ГОИН, НПО. Информационными центрами в части разработки и аттестации методик по экологическому мониторингу атмосферы являются организации: НИИ «Атмосфера»; Институт экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун»; Институт глобального климата и экологии; Главная геофизическая обсерватория.

Материал в разделе 2 разделен по природным средам в виде трех блоков:

1. Нормативные и методические документы по государственному экологическому мониторингу атмосферы.
2. Нормативные и методические документы по государственному экологическому мониторингу вод.
3. Нормативные и методические документы по государственному экологическому мониторингу почв.

Каждый из блоков содержит по три подблока:

- государственные, международные и отраслевые стандарты (ГОСТ, ГОСТ Р, ИСО, ОСТ);
- СанПиН, СНиП, ГН, методические указания, рекомендации и прочие нормативные документы по организации элементов экологического мониторинга;
- отраслевые стандарты и методические документы (МУК, МУ, МУ МЗ, РД, ПНД Ф и др.).

В основу экологического мониторинга в Российской Федерации заложены гигиенические нормативы, поэтому общие требования и приемы при организации и проведении экологического мониторинга

аналогичны требованиям и приемам санитарно-гигиенического мониторинга.

Третий подблок блока 2.1 содержит нормативные и методические документы по государственному экологическому мониторингу атмосферы, включает в себя информацию по следующим объектам мониторинга:

- атмосферный воздух;
- воздух рабочей зоны;
- выбросы.

1.3.1. Федеральные законы и кодекс, регламентирующие государственный экологический мониторинг

«Об охране окружающей природной среды» от 10.01.02 г. № 7-ФЗ.

«Об экологической экспертизе» от 23.11.95 г. № 174-ФЗ (в ред. от 15.04.98 г.).

«Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.99 г. № 96-ФЗ.

«О гидрометеорологической службе» от 19.07.98 г. № 113-ФЗ (ред. от 25.06.20 г.).

«О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 21.12.94 г. № 68-ФЗ (ред. от 28.10.02 г.).

«Об отходах производства и потребления» от 24.06.98 г. № 89-ФЗ (ред. от 10.01.03 г.).

«О лицензировании отдельных видов деятельности» от 08.08.01 г. № 128-ФЗ (ред. от 11.03.03 г.).

«О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.99 г. № 52-ФЗ (ред. от 30.06.03 г.).

«О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ (ред. от 10.01.03 г.).

«О космической деятельности» от 20.08.93 г. № 5663-1 (ред. от 10.01.03 г.).

«О плате за землю» от 11.10.91 г. № 1738-1 (ред. от 25.07.02 г., с изм. от 24.12.02 г.).

«О государственном земельном кадастре» от 02.01.2000 г. № 28-ФЗ (принят ГД ФС РФ 24.11.99 г.).

«Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.95 г. № 33-ФЗ (ред. от 30.12.01 г.).

«О безопасном обращении с пестицидами и агрохимикатами» от 19.07.97 г. № 109-ФЗ (ред. от 10.01.03 г.).

«О природных лечебных ресурсах, лечебно-оздоровительных местностях и курортах» от 23.02.95 г. № 26-ФЗ.

«О радиационной безопасности населения» от 09.01.96 г. № 3-ФЗ.

«Об уничтожении химического оружия» от 02.05.97 г. № 76-ФЗ (ред. от 10.01.03 г.).

«Обоеспечении единства измерений» от 27.04.93 г. № 4871-1 (ред. от 10.01.03 г.).

«Об информации, информатизации и защите информации» от 20.02.95 г. № 24-ФЗ (ред. от 10.01.03 г.).

«Об участии в международном информационном обмене» от 04.07.96 г. № 85-ФЗ (ред. от 30.06.03 г.).

Градостроительный кодекс Российской Федерации от 07.05.98 г. № 73-ФЗ (ред. от 10.01.03 г.).

1.3.2. Нормативные документы, регламентирующие экологический мониторинг

Указ Президента РФ «О государственной стратегии Российской Федерации по охране окружающей среды и обеспечению устойчивого развития» от 04.02.94 г. № 236.

Руководящий документ Президента РФ «Доктрина информационной безопасности РФ» от 09.09.2000 г. № Пр-1895.

Распоряжение Правительства РФ «Об экологической доктрине Российской Федерации» от 31.08.02 г. № 1225-р.

Приказ Госкомэкологии РФ «Об утверждении заключений экспертных комиссий Государственной экологической экспертизы экологического обоснования лицензий на отдельные виды деятельности в области охраны окружающей среды на территории Российской Федерации» от 30.05.97 г. № 246.

Постановления Правительства РФ

«Об организации и осуществлении государственного мониторинга окружающей среды (государственного экологического мониторинга)» от 31.03.03 г. № 177.

«О федеральном органе исполнительной власти, ответственном за выполнение соглашения о сотрудничестве в области экологического мониторинга» от 22.01.01 г. № 46.

«О федеральной целевой программе «Экология и природные ресурсы России (2002–2010 гг.)» от 07.12.01 г. № 860.

«Об утверждении положения о государственном контроле за охраной атмосферного воздуха» от 15.01.2001 г. № 31.

«Об утверждении положения о государственном учете вредных воздействий на атмосферный воздух и их источников» от 21.04.2000 г. № 373.

«О нормативах выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух и вредных физических воздействий на него» от 02.03.2000 г. № 183.

«О порядке установления и пересмотра экологических и гигиенических нормативов качества атмосферного воздуха, предельно допустимых уровней физических воздействий на атмосферный воздух и государственной регистрации вредных (загрязняющих) веществ и потенциально опасных веществ» от 02.03.2000 г. № 182.

«О специально уполномоченном федеральном органе исполнительной власти в области охраны атмосферного воздуха» от 24.11.99 г. № 1292 (ред. от 17.12.01).

«О специально уполномоченных государственных органах Российской Федерации в области охраны окружающей природной среды» от 30.12.98 г. № 1594 (ред. от 17.12.01 г.).

«Об утверждении положения о порядке проведения государственной экологической экспертизы» от 11.06. 96 г. № 698.

«О порядке разработки и распространения ежегодного государственного доклада о состоянии окружающей природной среды» от 24.01.93 г. № 53.

«О концепции развития космической ядерной энергетики в России» от 02.02.98 г. № 144.

«О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации» от 15.04.02 г. № 240.

«Об утверждении положения о Федеральной службе России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» от 20 05.99 г. № 555 (ред. от 07.07.03 г.).

«Об утверждении положения о государственной санитарно-эпидемиологической службе Российской Федерации и положения о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании» от 24.07.2000 г. № 554.

«Об утверждении положения о социально-гигиеническом мониторинге» от 01.06.2000 г. № 426 (ред. от 29.04.02 г.).

«О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» от 05.11.95 г. № 1113 (ред. от 10.04.02 г.).

«О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 13.09.96 г. № 1094.

«О заключении соглашения между Правительством Российской Федерации и Правительством Соединенных Штатов Америки о сотрудничестве в области охраны окружающей среды и природных ресурсов» от 16.06.94 г. № 678.

«О составе межведомственной комиссии по радиационному мониторингу окружающей природной среды» от 07.03.97 г. № 261.

«О создании и ведении единого государственного фонда данных о состоянии окружающей природной среды, ее загрязнении» от 21.12.99 г. № 1410.

«Об информационных услугах в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения окружающей природной среды» от 15.11.97 г. № 1425.

«О порядке сбора и обмена в Российской Федерации информацией в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 24.03.97 г. № 334.

Приказы МПР РФ

«О совершенствовании работы по ведению государственного экологического мониторинга» от 28.10.03 г. № 957.

«О реализации постановления Правительства Российской Федерации от 15.04.02 г. № 240 «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации» от 05.06.02 г. № 343.

«О совершенствовании деятельности МПР России по реагированию на экстремальные ситуации природного и техногенного характера с вредным воздействием на природную среду» от 10.11.01 г. № 809.

1.3.3. Государственные стандарты и нормативы по состоянию атмосферы

Государственные стандарты, касающиеся атмосферы

ГОСТ 17.0.0.01-76 Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов. Основные положения.

ГОСТ 17.2.1.01-76 Охрана природы. Атмосфера. Классификация выбросов по составу.

ГОСТ 17.2.1.02-76 (СТ СЭВ 1365-78) Охрана природы. Атмосфера. Выбросы двигателей автомобилей, тракторов, самоходных сельскохозяйственных и строительно-дорожных машин. Термины и определения.

ГОСТ 17.2.1.04-77 (СТ СЭВ 3403-81) Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения, промышленные выбросы. Термины и определения.

ГОСТ 17.2.3.02-78 Охрана природы. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями.

ГОСТ 17.2.4.02-81 (СТ СЭВ 2598-80) Охрана природы. Атмосфера. Общие требования к методам определения загрязняющих веществ.

ГОСТ 17.2.4.05-83 Охрана природы. Атмосфера. Гравиметрический метод определения взвешенных частиц пыли.

ГОСТ 17.2.1.03-84 Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения.

ГОСТ 17.2.2.01-84 Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерений.

ГОСТ 17.2.2.04-86 Охрана природы. Атмосфера. Двигатели газотурбинные самолетов гражданской авиации. Нормы и методы определения выбросов загрязняющих веществ.

ГОСТ 17.2.3.01-86 Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов.

ГОСТ 17.2.6.01-86 Охрана природы. Атмосфера. Приборы для отбора проб воздуха населенных пунктов. Общие технические требования.

ГОСТ 17.2.2.03-87 Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы измерений содержания окиси углерода и углеводородов в отработавших газах автомобилей с бензиновыми двигателями. Требования безопасности

ГОСТ 17.0.0 04-90 Охрана природы / Экологический паспорт промышленного предприятия. Основные положения.

Санитарные правила и нормы

СанПиН 2.1.6.574-96 Гигиенические требования к охране атмосферного воздуха населенных мест.

СанПиН 2.1.6.1032-01 Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест

Гигиенические нормативы

ГН 2.1.6.1338-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

ГН 2.1.6.1339-03 Ориентировочные безопасные уровни (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест от 17 мая 2001 г.

Методические указания, рекомендации

по организации элементов экологического мониторинга (табл. 1.2)

№ 2297а-81 Методические указания по определению степени загрязнения атмосферного воздуха и ее оценке.

№ 2630-82 Методические указания по установлению ОБУВ для атмосферного воздуха.

№ 2656-82 Методические указания по санитарной охране атмосферного воздуха в районах размещения предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

№ 4681-88 Временные методические указания по обоснованию предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.

№ 5174-90 Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве.

Таблица 1.2

Методические документы по контролю параметров воздуха

№ п/п	Обозначение документа	Название документа
1	МУК 4.1.591-96-4.1.645-96; 4.1.662-97-4.1.666-97	Определение концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.
2	РД 52.04 306-96	Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха.
3	РД 52.04. 186-89	Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Ч. I.

1.4. Единая государственная система экологического мониторинга России

Возрождение России, ее включение в мировой процесс, ориентирующийся на модель устойчивого развития, сопряжены с реализацией ряда стратегических требований, сформулированных в «Декларации Рио-де-Жанейро» и в «Повестке дня на XXI век», принятых на Конференции ООН по окружающей среде и развитию (1992 г.).

В состав целевых параметров устойчивого развития, включающих социальную, экономическую и экологическую компоненты, должны быть включены макропоказатели, характеризующие состояние природной среды и ее изменения под влиянием антропогенных факторов. В связи с этим одним из необходимых условий достижения устойчивого развития является получение объективной информации о состоянии окружающей среды. Вопросы информации в области охраны окружающей среды, сбора и обмена экологическими данными как на национальном, так и на международном уровнях нашли отражение в гл. 40 («Информация для принятия решений») «Повестки дня на XXI век», Программе действий в области охраны окружающей среды для стран Центральной и Восточной Европы (Люцерн, 1993 г.), Декларации министров охраны окружающей среды (Орхус, 1998 г.).

Особое значение приобретают вопросы информационной поддержки принятия решений, расстановки приоритетов в области природоохранной деятельности с целью выработки экономической политики, адекватно учитывающей экологические факторы. Основой такой поддержки являются данные мониторинга, собираемые различными ведомственными сетями сбора данных, их обработка, анализ, прогноз развития ситуаций. Все это невозможно без тесной межведомственной координации.

Обоснование необходимости создания единой государственной системы экологического мониторинга (ЕГСЭМ). Одной из основных проблем России в области экологической информации является ведомственная разобщенность, аппаратно-программная несовместимость ведомственных систем сбора и наблюдения за состоянием окружающей природной среды. Следует отметить, что существующие ведомственные службы наблюдения за состоянием окружающей среды, включая наиболее развитые сети мониторинга Росгидромета, Санэпиднадзора, других ведомств, не были ориентированы на задачи поддержки конкретных управленческих решений в природоохранной области. Необходимым является принципиальный пересмотр системы показателей качества окружающей среды с точки зрения ориентации на показатели экологического нормирования и экологических нагрузок на территорию в отличие от сложившейся системы санитарно-гигиенических нормативов.

К основным предпосылкам создания ЕГСЭМ относят:

– разнородность, аппаратно-программную и методическую несовместимость ведомственных систем наблюдения за состоянием окружающей природной среды;

– дублирование работ разными ведомствами, слабую степень автоматизации процессов получения, передачи, обработки и доведения информации до потребителя;

– отсутствие комплексной, достоверной и своевременной информации о состоянии и тенденциях изменения природной среды, отсутствие экосистемного подхода к организации системы мониторинга;

– ограниченные возможности использования существующей информации в процедурах принятия решений органами государственного управления в области охраны окружающей среды.

С целью интеграции существующих в России ведомственных служб наблюдения за состоянием окружающей среды (включая службы наблюдения Роскомгидромета, МПР, Роскомзема, Роскомлеса), а также их методологического, метрологического и информационного сопряжения Правительством Российской Федерации в ноябре 1993 г. принято постановление «О создании Единой государственной системы экологического мониторинга». На Министерство природных ресурсов Российской Федерации возложена задача координации деятельности министерств, ведомств, предприятий и организаций в области мониторинга окружающей природной среды, ведение баз и банков данных по окружающей среде, обеспечение создания и функционирования экологических информационных систем.

Цель создания ЕГСЭМ — информационное обеспечение управления в области охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов, экологически безопасного устойчивого развития страны и ее регионов.

ЕГСЭМ является принципиально новой системой:

– информационно обеспечивает конкретные задачи управления экологической обстановкой в России и ее регионах и несет ответственность за качество и оперативность этого обеспечения;

– информационное обеспечение управления экологической обстановкой предусматривает использование как санитарно-гигиенических, так и экологических критериев и нормативов;

– большую часть работ всей системы выполняют ее территориальные подсистемы, информационно обеспечивая приоритетные для регионов задачи управления экологической обстановкой. Федеральный уровень ЕГСЭМ осуществляет информационное обеспечение задач, вытекающих из федеральных программ управления экологической обстановкой и международных обязательств России; координирует деятельность территориальных подсистем, обеспечивая снижение общих финансовых и трудовых затрат за счет исключения дублирования работ, выполняемых подсистемами;

– является научно-производственной структурой, организующей и проводящей научные исследования для обоснования и оптимизации программ мониторинга.

ЕГСЭМ создается на базе и с максимальным использованием потенциала существующих ведомственных служб мониторинга окружающей среды, включая службу наблюдения за загрязнением окружающей среды Росгидромета, службу мониторинга водных объектов и мониторинга геологической среды Министерства природных ресурсов Российской Федерации, службу мониторинга лесов Роскомлеса. ЕГСЭМ функционирует на двух основных уровнях: федеральном и субъектов Российской Федерации (территориальный уровень). По территориальному признаку в составе ЕГСЭМ могут быть образованы региональные и локальные подсистемы, решающие задачи нескольких субъектов Российской Федерации.

Территориальные подсистемы ЕГСЭМ. С усилением процесса суверенизации субъектов Российской Федерации акцент в создании ЕГСЭМ в последние годы был перенесен с федерального на территориальный уровень.

В целях отработки и обеспечения единого научно-методического подхода при создании региональных систем экологического мониторинга, развития территориальных систем экологического мониторинга, практической отработки принципов управления природоохранной деятельностью осуществляется большой объем работ по созданию региональных систем ЕГСЭМ на территории Пермской, Оренбургской, Курганской, Калужской, Иркутской, Свердловской, Челябинской, Вологодской областей, Ямало-Ненецкого, Ханты-Мансийского автономных округов, республик Мордовия, Чувашия, Алтай, Адыгея, Татарстан, эколого-курортного региона Кавказские минеральные воды, определенных приказами природоохранных структур экспериментальными территориями ЕГСЭМ.

В настоящее время в субъектах Российской Федерации развернуты работы по созданию территориальных подсистем ЕГСЭМ. В 22 регионах созданы региональные информационно-аналитические центры (РИАЦ), оснащенные современными компьютерными технологиями (включая ГИС-технологии), налаживается обмен информацией между территориальными ведомственными службами наблюдения и контроля.

В ряде областей и республик постановление «О создании ЕГСЭ» реализуется успешно: приняты решения, разработаны концепции, определены источники финансирования — как первый этап реализации ЕГСЭМ. Некоторыми ведомствами начата работа по проекти-

рованию негосударственных систем экологического мониторинга для их дальнейшей интеграции в ЕГСЭМ. Очевидно, что формирование ЕГСЭМ только за счет средств госбюджета, федеральных и территориальных экологических фондов не представляется возможным. Более того, практика показывает, что на территориях, сравнительно благополучных в финансовом отношении, системы экологического мониторинга разного уровня создаются в настоящее время в основном за счет бюджетов регионов и средств предприятий (отраслей).

Мониторинг источников антропогенного воздействия и мониторинг биоты. Одним из приоритетных направлений экологического мониторинга сегодня является организация мониторинга источников антропогенного воздействия на окружающую среду и мониторинга животного и растительного мира (кроме лесов).

Элементы подсистемы мониторинга источников антропогенного воздействия в настоящее время отрабатываются в рамках взаимодействия Госкомэкологии России с Минтопэнерго России, с РАО «Газпром». Конкретная апробация и внедрение элементов подсистемы источников антропогенного воздействия осуществляется в ряде регионов (республики: Мордовия, Татарстан, Чувашия; области: Астраханская, Пермская, Челябинская). Высокую оценку на заседании Коллегии Госкомэкологии России (1998 г.) получил опыт природоохранных структур Пермской области по созданию базовой подсистемы мониторинга источников антропогенного воздействия. В соответствии с утвержденным планом мероприятий по его распространению на другие территории Российской Федерации проведен первый установочный семинар для специалистов территориальных природоохранных органов (г. Пермь, май 1998 г.).

Работы по организации биомониторинга как подсистемы комплексного экологического мониторинга развернуты в ряде регионов. Так, в Калужской области ведутся широкомасштабные биомониторинговые исследования, выполнена оценка экологического состояния территории области методом биоиндикации. Работа, проводимая в Тюменской области в части экологического мониторинга биогеоценозов, может стать основой для организации системного мониторинга биогеоценозов и отдельных их элементов в целом по России. В Амурской области функционирует подсистема мониторинга растительного и животного мира в части редких и охраняемых видов. Аналогичные работы ведутся и в Пермской области.

Развитие методов мониторинга биоты является крайне важным с точки зрения реализации экосистемного подхода к организации эко-

логического мониторинга и развитию интегральных методов оценки качества окружающей среды.

Международная деятельность. «Регионализация» работ по созданию ЕГСЭМ требует решения новых методологических и технических задач, которые обеспечат синтез региональных подсистем в общую национальную систему экологического мониторинга. Особое значение при этом приобретают специальные *средства космических наблюдений и обработки их результатов* — в качестве интегрирующих блоков ЕГСЭМ.

Важнейшим аспектом международной деятельности по гармонизации измерений в области охраны окружающей среды, развития национальных и международных систем мониторинга является разработка практических рекомендаций в отношении скоординированного, согласованного сбора данных и их оценки на национальном и международном уровне.

В рамках обсуждения на очередных сессиях Межгосударственного совета стран СНГ было решено считать приоритетным следующие направления сотрудничества стран с переходной экономикой:

- разработка принципов устойчивого развития и экономических методов управления окружающей средой;

- развитие систем экологического мониторинга окружающей среды, создание Межгосударственной системы экологического мониторинга, объединение усилий стран по интеграции в глобальную систему экологического мониторинга.

С целью гармонизации измерений в области охраны окружающей среды в рамках «Декларации Рио-де-Жанейро» предложено укрепить существующие учреждения и такие программы, как глобальная система мониторинга окружающей среды (ГСМОС) и глобальная база данных о природных ресурсах (ГРИД/ЮНЕП). ГРИД — это международная система, обеспечивающая современной информацией об окружающей среде планирующие организации в рамках ООН, принимающие важные управленческие решения, которые могут влиять на состояние нашей планеты. Система ГРИД была предложена как инструмент реализации программы ГСМОС/ЮНЕП и предназначена для сбора цифровых данных об окружающей среде из различных источников (картографических, аэрокосмических, статистических материалов, данных натурных наблюдений), их хранения в базах данных, обеспечения доступа к этим данным стран — участников международного сообщества (в первую очередь развивающихся стран) для оценки региональных экологических проблем, анализа и синтеза данных на гло-

бальном, региональном и национальном уровнях исследования в целях реализации природоохранных проектов, программ и мероприятий.

С целью интеграции в Международные эколого-информационные системы Минприроды РФ в 1991 г. обратилось в правительство с инициативой подключения к системе ГРИД/ЮНЕП, что было поддержано директивными органами. В настоящее время Госкомэкология России проводит мероприятия по созданию Российского национального центра ГРИД/Москва. Проводится координация работ в рамках сопряжения и интеграции в систему CORINE/ЕС, ориентированную на сбор информации о почвенном покрове и землях, в том числе с использованием спутниковой информации и интеграции ее в ГИС-оболочку.

Многие крупнейшие предприятия космических отраслей и ведомств внесли предложения по созданию *глобальной космической системы экологического мониторинга*. Под руководством Госкомэкологии России и Российского авиационно-космического агентства предпринимаются шаги в направлении объединения этих проектов в единую систему. В то же время следует отметить, что в России так же, как в европейских странах, только начинает формироваться механизм координации требований пользователей в области охраны окружающей среды к программам космического мониторинга с использованием искусственных спутников Земли. В рамках проходивших в 1993–1996 гг. встречах Российско-американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству вопрос экологического мониторинга с использованием космических средств активно обсуждался, был выработан ряд программных документов по сотрудничеству в этой области, включая проект «Глобальный экологический мониторинг стихийных бедствий и катастроф».

В условиях глобального проявления экологической угрозы чрезвычайно важно углублять знания о природных системах Земли для эффективного реагирования на последствия, вызванные антропогенными причинами. Исходя из наметившихся темпов возрастания антропогенных воздействий на окружающую среду актуализируется научная и практическая задача — создание международной системы глобального экологического мониторинга (сочетающей наземные измерения с дистанционным зондированием) с использованием мощных наземных компьютерных комплексов сбора и обработки информации для поддержки принятия природоохранных и, более широко, хозяйственных решений как на национальном, так и на международном уровне.

В настоящее время накоплен большой опыт в области: 1) сотрудничества России, США и Европы в направлении совместных кос-

мических исследований для решения глобальных экологических задач (сотрудничество с НАСА по проектам «Миссия к Планете Земля», «Науки о Земле», создание распределенной информационной системы EOSDIS (Earth Observing System), в которой управление экспериментом на орбите, базы данных системы EOS и информация, получаемая другими системами, интегрируются в общую информационную сеть); 2) использования спутниковых данных для целей глобального экологического мониторинга в рамках ряда проектов Рабочей группы по окружающей среде Российско-американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству; 3) выполнения ряда проектов и программ по экологическому мониторингу отдельных регионов России под эгидой Министерства природных ресурсов и Роскомоборонпрома.

С учетом поддержки администрациями субъектов Российской Федерации работ по созданию ЕГСЭМ, высокой оценки экспертами ОЭСР («Экологические информационные системы Российской Федерации, оценка ОЭСР», 1996 г., Париж) указанной деятельности следует считать развитие ЕГСЭМ наиболее перспективным путем развития экологических информационных систем в Российской Федерации. В целях развития механизмов координации систем мониторинга, сбора и обработки экологических данных в европейском регионе, интеграционной политики в области экологической информации стран целесообразно создать Координационный комитет по экологическому мониторингу Европейского региона; совместный проект «Экспериментальные подсистемы экологического мониторинга на тестовых территориях Европы и России с использованием *космических и наземных данных*».

1.5. Методы и технические средства контроля источников загрязнения атмосферы

Осуществление мероприятий по контролю промышленных выбросов является одной из необходимых мер по их снижению. В основе этих мероприятий лежит система государственных и отраслевых стандартов, регламентирующих нормы содержания загрязняющих веществ в выбросах, методы и средства измерения.

В настоящее время основной объем данных о количественном составе выбросов в атмосферу получают на основе измерений с помощью инструментально-лабораторных методик или газоанализаторов (переносных или стационарных). Как правило, газоанализаторы используются для определения приоритетных газовых примесей (SO_2 ,

NO_x, CO) и наиболее важных специфических загрязняющих веществ (NH₃, H₂S, фториды, меркаптаны, галогены и др.). Однако уже сейчас количество веществ, подлежащих контролю, достигло нескольких сотен, что делает невозможным создание автоматических приборов для каждого из загрязняющих веществ. Таким образом, в ближайшие годы, очевидно, сохранится ведущая роль инструментально-лабораторных методов как источников получения информации о выбросах в атмосферу и основных средств контроля за соблюдением технических нормативов и нормативов ПДВ. В этой связи особое значение приобретают создание и внедрение в практику контроля наиболее эффективных лабораторных методов с учетом современных требований к методикам выполнения измерений.

Государственными нормативными актами определено, что при контроле источников загрязнения атмосферы можно использовать только методики, отвечающие предъявляемым к ним требованиям и согласованные в установленном порядке. В настоящее время функции согласующих ведомств выполняют Министерство природных ресурсов и Госстандарт России. В России создан Государственный реестр методик количественного химического анализа и оценки состояния объектов окружающей среды, допущенных для целей государственного экологического контроля и мониторинга, в который включены методики контроля промышленных выбросов. Контроль промышленных выбросов осуществляется средствами измерения физических параметров газовых потоков и концентраций загрязняющих веществ. К измеряемым параметрам газовых потоков относятся температура, давление (разрежение), влажность и скорость газа в газоходе. Все технические средства, применяемые для измерения физических параметров газовых потоков промышленных выбросов, должны быть аттестованы, внесены в Государственный реестр средств измерений и иметь методическое обеспечение.

Выполнение измерений вышеперечисленных физических параметров газовых потоков технически осуществляется с помощью давно существующих и широко применяемых средств измерений (термометры, термопары, барометры, манометры, психрометры, пневмометрические трубки и др.). Действующие государственные стандарты детально регламентируют проведение измерений скорости, давления и температуры газопылевых потоков. Особняком стоит выполнение измерений влажности газопылевых потоков. Вода не является загрязняющим веществом, однако неучет влажности может приводить к значительным завышениям значений массовых выбросов. Это объясняется тем, что скорость газового потока измеряется в реальных условиях (температу-

ра, избыточное давление (разрежение), влажность), а концентрации загрязняющих веществ приводятся к нормальным условиям (0 °С, 101,3 КПа, сухой газ).

Выполнение измерений массовых концентраций загрязняющих веществ физико-химическими методами технически обеспечивается общелaborаторным оборудованием и приборами, которые применяются при анализе не только промышленных выбросов, но и всех других сред. Схема проведения измерений концентраций загрязняющих веществ в выбросах с помощью лабораторно-инструментальных методах обычно состоит из следующих этапов:

- отбор проб отходящих газов на источнике промышленных выбросов;
- транспортировка отобранной пробы в аналитическую лабораторию (хранение пробы);
- анализ пробы (подготовка пробы, перевод ее в аналитическую форму и получение аналитического сигнала);
- контроль точности выполненных измерений;
- оформление результатов измерений.

При выполнении измерений концентраций загрязняющих веществ, находящихся как в газовой, так и в аэрозольной фазах, применяются все известные физико-химические методы (атомная абсорбция, спектрофотометрия, газовая и жидкостная хроматография, полярография, потенциометрия и т.д.). Различие между анализом газовой и аэрозольной фазы лежит в основном в отборе проб. Для анализа аэрозолей необходимо проводить отбор проб с соблюдением условий изокинетичности, тогда как при отборе газовых компонентов выполнения этого условия не нужно. Отбор газовых проб регламентируется для каждого конкретного загрязняющего вещества в конкретной методике. Однако можно выделить несколько основных способов отбора проб:

- отбор проб в газовые пипетки, стеклянные шприцы или полимерные емкости. Преимущество этого метода состоит прежде всего в простоте отбора: нет необходимости поддерживать или точно измерять скорость отбора газа и, соответственно, измерять объем отбираемой пробы, температуру и давление в процессе отбора. Однако этот метод применим только для малореакционных газов, таких как СО, легкие углеводороды и др. При этом срок хранения пробы, за исключением оксида углерода, ограничен;
- отбор проб в жидкостные поглотители (абсорбция, хемосорбция). Преимущества метода: достаточно высокая эффективность, возможность подобрать поглотительный раствор практически для любых компонентов. Недостатки метода: необходимость строгого контроля

условия отбора (температура, давление или разрежение в газоходе и скорость отбираемого газа), ограничение применения при отрицательных температурах для водных растворов и неудобство транспортировки;

– отбор проб на твердые сорбенты (адсорбция на полимерных сорбентах, на силикагелях или на различных активированных углях, сажах, волокнистых углеродистых сорбентах) или на пленочные сорбенты (обычно хемосорбция). Недостатки те же, что и при отборе проб в жидкостные поглотители, и, кроме того, обычно более жесткие условия к соблюдению рекомендуемой скорости отбора, учитывающие возможность проскока. К преимуществам следует отнести удобство транспортирования пробы, возможность работы при отрицательных температурах и в большинстве случаев более длительные сроки хранения отобранных проб.

Отбор проб аэрозолей осуществляется двумя методами: внутренней фильтрации (фильтрующий элемент находится внутри газохода) и внешней фильтрации (фильтрующий элемент находится вне газохода). Оба этих метода имеют свои достоинства и недостатки. Однако предпочтение следует отдавать методу внутренней фильтрации. В качестве фильтрующих элементов используются бумажные фильтры (различные фильтры на основе целлюлозы), фторопластовая, стеклянная или, для очень высоких температур, кварцевая вата. Особо следует отметить необходимость соблюдения условий изокINETичности при отборе проб аэрозолей. Условия изокINETичности означают, что скорость газового потока и скорость отбираемой пробы на входе в пробоотборный зонд равны.

Измерение концентраций загрязняющих веществ в выбросах может проводиться с помощью газоанализаторов. Однако при выборе и применении газоаналитической техники ситуация значительно сложнее. В настоящее время на рынок газоаналитической техники поступило значительное количество многокомпонентных и однокомпонентных газоанализаторов, как отечественных, так и импортных, основанных на различных физико-химических принципах. Основными методами являются электрохимические, оптические (абсорбционные в УФ, ИК и видимой областях спектра и эмиссионные) и пламенно-ионизационный.

В основе работы многокомпонентных приборов лежат измерения ряда компонентов (CO , SO_2 , NO_x , O_2 и пр.) малоселективными датчиками, обсчет по заданной программе аналитических сигналов от каждого датчика с учетом взаимовлияния компонентов и последующей выдачей данных. В основе работы однокомпонентных приборов

лежат измерения селективными датчиками. Диапазоны измеряемых концентраций, указываемые в инструкциях по эксплуатации, устанавливают диапазоны измеряемых концентраций с учетом только приборной погрешности и не учитывают влияния на погрешность измерения концентраций неизмеряемых компонентов, а также других эксплуатационных погрешностей. Анализ парка газоанализаторов показывает, что практически все газоанализаторы, применяемые для выполнения измерений концентраций загрязняющих веществ, внесены в Государственный реестр средств измерений РФ. Однако только для некоторых газоанализаторов разработаны и аттестованы в установленном порядке методики выполнения измерений, соответствующие действующим государственным стандартам или другим нормативным документам. В большинстве случаев потребители пользуются инструкциями по эксплуатации приборов, при этом не обращают внимания на указания области их применения и диапазона концентраций, в которых может применяться газоанализатор, что приводит к получению ложной информации.

Пределы допускаемой относительной (суммарной) погрешности измерений массовой концентрации загрязняющих веществ с помощью автоматических и полуавтоматических газоанализаторов в рабочих условиях (с учетом основной и дополнительных погрешностей) должны составлять не более 25 % от измеренной величины во всем диапазоне измерений. Для газоаналитической техники в большинстве случаев установлена основная приведенная погрешность (погрешность измерения, отнесенная к верхнему значению диапазона измерений).

Парк приборов, предлагаемых потребителям, имеет различные метрологические, эргонометрические и технические характеристики. В связи с этим важное значение отводится государственному регулированию и контролю за соблюдением закона России о единстве измерений. Механизмом реализации этого закона является проведение государственными органами сертификации аналитической аппаратуры экологического назначения и внесением данного типа приборов в государственный реестр средств измерений.

Сертификация аппаратуры заключается в определении соответствия технических и метрологических характеристик сертифицируемого оборудования государственным стандартам. На основании испытаний готовится пакет документации для регистрации данного оборудования в Госреестре России. Сертификация аппаратуры выполняется органами Госстандарта. Неотъемлемой частью рассматриваемого пакета документов является акт об экологической экспертизе сертифицируемой аппаратуры. Экологическая экспертиза заключается в опре-

делении области применения аппаратуры – для контроля промышленных выбросов и области использования приборов в тех или иных технологических процессах различных отраслей промышленности. Экспертиза осуществляется путем либо анализа документации по метрологической аттестации, либо опытной эксплуатации сертифицируемых приборов на реальных объектах в различных отраслях производств. В результате экологической экспертизы было определено, например, что приборы, основанные на электрохимическом принципе измерения, могут быть предназначены только для измерения выбросов в процессе горения природного топлива и не могут быть использованы для контроля выбросов химического производства.

Экологическую экспертизу проводят органы Министерства природных ресурсов России. Сертификацию и экологическую экспертизу проводят как для типа приборов, так и для единичного образца или отдельной партии аппаратуры. Использование аналитических приборов и комплексов потребителями возможно лишь при наличии сертификата установленного образца и номера в Государственном реестре средств измерений. При этом область применения должна соответствовать области, указанной в акте экологической экспертизы.

Передвижная обсерватория мониторинга природной среды. В состав передвижной обсерватории входят два специализированных вагона: обсерватория и химическая лаборатория. Ее назначение:

- мониторинг газового и аэрозольного состава атмосферы (парниковые, озоноразрушающие, токсичные и др. соединения), ее радиационных и метеорологических характеристик;
- определение природных и антропогенных источников атмосферных примесей, направлений их переноса и особенностей химической трансформации;
- мониторинг химического состава и загрязнения вод, почвы и растительности.

Области применения передвижной обсерватории мониторинга природной среды:

- контроль исполнения Международных экологических соглашений (Киотский и Монреальский протоколы, конвенции о трансграничном переносе загрязнений, ограничении производства устойчивых органических соединений и др.);
- калибровка наземных наблюдательных сетей, валидация данных космического мониторинга природной среды;
- выявление и прослеживание за экстремальными ситуациями и техногенными воздействиями на окружающую среду;

– решение фундаментальных научных проблем, связанных с глобальными изменениями природной среды и климата Земли;

– оценка влияния работы железнодорожного транспорта на экологическое состояние окружающей территории.

Разработчиками обсерватории являются Институт физики атмосферы РАН (ИФА РАН), ВНИИ железнодорожного транспорта, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии.

Передвижная лаборатория предназначена для измерения содержания в воздухе газовых и аэрозольных примесей, термодинамических, радиационных и метеорологических характеристик атмосферы. Обсерватория размещается в специализированном железнодорожном вагоне. В ее измерительный комплекс входят:

– газоанализаторы, газовые хроматографы: непрерывные измерения концентрации и газов O_3 , NO , NO_2 , CO , CO_2 , SO_2 , CH_4 ;

– счетчики, нефелометры, аэломеры: непрерывные измерения концентрации и микрофизических свойств аэрозолей;

– спектрофотометры, радиометр, поляризационный фотометр: дистанционное зондирование содержания O_3 , NO_2 , CO_2 , CH_4 и аэрозолей в атмосфере;

– пробоотборники разных типов, рентгеновский спектрометр, газовые хроматографы: отбор, анализ воздуха и аэрозолей на элементный, химический и изотопный состав;

– измерители солнечной радиации, термодинамических и метеорологических параметров;

– измерители интегральной и УФ радиации, измерители скоростей фотодиссоциации O_3 и NO_2 , измеритель профиля температуры в слое 0–1200 м, акустический анемометр, метеопроборы.

В обсерватории используются сетевые приборы и международные калибровочные средства, достигается высокое качество данных и привязка их к мировой сети мониторинга атмосферы. Оптимальный набор измеряемых параметров позволяет контролировать текущее фотохимическое состояние атмосферы и прогнозировать его изменения, что важно в экстремальных экологических ситуациях.

Трансконтинентальные наблюдения за состоянием атмосферы. В международных экспериментах TROIKA (Transcontinental Observations into the Chemistry of the Atmosphere) отработаны методики и средства наблюдений различных характеристик атмосферы с подвижной платформы. Первые наблюдения содержания озона, окислов азота, солнечной радиации и метеопараметров были выполнены специалистами ИФА РАН от Москвы до Хабаровска в ноябре-декабре 1995 г. Наблюдения продемонстрировали высокую эффективность работы

лаборатории в изучении состава атмосферы над обширными континентальными пространствами.

Эксперименты ТРОИКА проводились ежегодно, в 2001 г. присоединилась группа специалистов из Лаборатории мониторинга и диагностики климата, США. Шесть экспедиций проведено по Транссибу (Москва-Хабаровск или Москва-Владивосток). В 2000 г. выполнена сложная научная программа наблюдений на Кольском полуострове, в Центральном районе и в горах Северного Кавказа в весенний период, когда фотохимическая система атмосферы переходила от зимнего режима к летнему. Это позволило разделить антропогенные и природные биогенные источники CH_4 , CO , CO_2 , летучих органических соединений. Проводились измерения от Мурманска до Кисловодска.

Наблюдения O_3 и NO_2 в стратосфере и валидация спутниковых данных. Комплекс аппаратуры передвижной лаборатории предназначен также для дистанционного зондирования и исследования содержания химических и климатически активных газов во всей толще атмосферы. В задачи дистанционного контроля верхней атмосферы, решаемые передвижной лабораторией входят:

- измерения вертикальных распределений озона, двуокси азота и физико-химических свойств аэрозоля до высоты 45–50 км в районах, не охваченных стационарной сетью глобального мониторинга атмосферы, и получение их пространственных разрезов;

- валидация спутниковых данных о содержании озона, окислов азота и парниковых газов и аэрозоля приборами TOMS, GOME, OMI, SAGE III, SCIAMACH, GOMOS и др. над обширными континентальными территориями;

- калибровка приборов дистанционного зондирования, действующих на стационарных сетях GAW, NDSC, EUROTRAC и др.

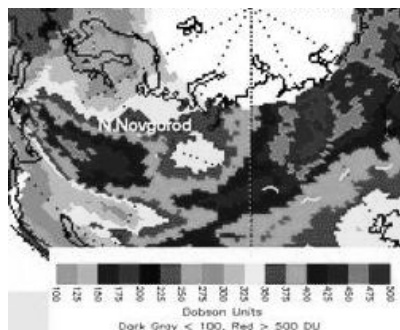


Рис. 1.1. Общее содержание озона по данные спутникового прибора TOMS, ТРОИКА-4, линии – замеры озона

В результате экспедиции TROIKA-4 (Н.Новгород–Хабаровск) продемонстрирована возможность использования приборов и методик измерения вертикальных распределений озона и двуокиси азота, действующих на стационарных станциях, для наблюдений с подвижной платформы и для валидации спутниковых данных (рис. 1.1).

1.6. Малозатратные технологии мониторинга качества атмосферы

Рассматриваются пути снижения стоимости информации о степени загрязнения атмосферы. Наиболее эффективными являются: использование автоматических пробоотборников, частичный переход на суточный отбор проб и использование пассивных пробоотборников для определения средневзвешенных за длительный промежуток времени концентраций. Описываются твердые, жидкие и газообразные образцы веществ, в том числе устойчивые образцы нестойких соединений.

Одной из важнейших задач при мониторинге загрязнения атмосферы является получение необходимого объема достоверной информации о концентрациях приоритетных примесей в атмосфере в наблюдаемых пунктах при минимальной ее стоимости. Цикл исследований, проводившихся химическими подразделениями отдела исследований и мониторинга загрязнения атмосферы ГГО (ОИМЗА), позволил усовершенствовать отбор проб воздуха при определении ряда примесей путем замены громоздких и хрупких абсорберов барботажного типа, заполненных жидкостью, на разработанные компактные и прочные сорбционные трубки (СТ), содержащие пленочный хемосорбент, нанесенный на слой стеклянных гранул. Прочность, небольшие масса и габариты СТ существенно упростили транспортировку и хранение отобранных из воздуха проб в пределах населенного пункта, что также позволило пересылать их по почте. Это создало предпосылки для организации наблюдений в населенных пунктах без строительства в них аналитических лабораторий. Отобранные в этих пунктах пробы пересылались для анализа в кустовые или централизованные лаборатории. Кроме того, использование сорбционных трубок способствовало повышению точности измерений, экономии реактивов и уменьшению трудозатрат на проведение анализа. Переход на суточный отбор проб позволяет не только существенно уменьшить трудозатраты на получение информации, но и

обеспечивает большую точность результатов измерений благодаря накоплению в пробе большей массы определяемого вещества.

В последние годы в ОИМЗА большое внимание уделялось разработке разных вариантов конструкций сравнительно нового средства отбора проб воздуха — пассивных (диффузионных) пробоотборников (далее ДИФОТ). Эти устройства основаны на принципе молекулярной диффузии анализируемого вещества к сорбенту через пустую трубку или через проницаемую мембрану. Трубки или мембраны являются диффузионными сопротивлениями, которые имеют постоянную для данной конструкции величину. Их назначение — обеспечить такую скорость поступления к сорбенту определяемого вещества, которая пропорциональна его концентрации в воздухе.

Пассивный отбор проб имеет следующие преимущества перед активным отбором:

- низкая стоимость требующихся устройств, определяемая простотой конструкции;
- малые вес и габариты;
- отсутствие потребности в электроэнергии;
- возможность проведения отбора проб в течение длительных промежутков времени (от часов до месяцев) без наблюдения оператора, что делает весьма низкими эксплуатационные расходы на осуществление непрерывных наблюдений;
- возможность определения средневзвешенных за время экспозиции концентраций без измерения объема пробы воздуха.

Эти преимущества пассивного отбора проб особенно проявляются при использовании длительных экспозиций (от двух недель до месяца и больше).

Возможность проведения непрерывного контроля при редкой замене ДИФОТ в точке отбора пробы делает организацию таких наблюдений особенно привлекательной в населенных пунктах, которые не имеют своих лабораторий контроля загрязнения атмосферы. Особенно полезным он может быть в местах, где нет оснований ожидать резких изменений концентрации примесей в атмосферном воздухе, например в курортных городах. В других случаях пассивный пробоотбор может использоваться для получения дополнительной информации о средних концентрациях примесей в существенно большем числе пунктов, чем это возможно организовать с использованием стационарных постов наблюдения.

Весьма перспективным направлением использования пассивного пробоотбора является сравнительная оценка загрязненности атмосферного воздуха на разных улицах одного населенного пункта.

Низкая стоимость ДИФОТ и возможность их установки практически в любом представляющем интерес месте позволяют получать информацию, необходимую для принятия обоснованных управленческих решений, с минимальными финансовыми затратами. Параллельный отбор во всех пунктах наблюдений дает возможность минимизировать влияние внешних факторов, например изменения температуры, на надежность сравнительных измерений.

В настоящее время нами разработаны проекты методик выполнения измерений с использованием ДИФОТ для определения диоксидов азота и серы, аммиака и хлорида водорода.

1.7. Организация контроля источников загрязнения атмосферы

Контроль источников загрязнения атмосферы (ИЗА) является частью единого механизма управления воздухоохранной деятельностью предприятий, включающего инвентаризацию загрязняющих веществ и источников, экологический учет и отчетность предприятий, нормирование выбросов, принятие мер долгосрочного и оперативного характера по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, в том числе совершенствование технических характеристик технологического оборудования и газоочистных устройств.

Система контроля источников загрязнения атмосферы представляет собой совокупность организационных, технических и методических мероприятий, направленных на выполнение требований законодательства в области охраны атмосферного воздуха, в том числе на обеспечение действенного контроля за соблюдением нормативов предельно допустимых выбросов.

Концепция контроля промышленных выбросов основана на том положении, что предприятие должно самостоятельно проводить контроль за имеющимися на предприятии источниками загрязнения атмосферы. При проведении государственного контроля осуществляется проверка достоверности данных о выбросах, представляемых предприятием, в том числе с помощью инструментально-лабораторных методов, сравнение данных о выбросах, полученных при контроле, с нормативными значениями, анализируются причины превышения нормативных значений выбросов и принимаются решения о необходимых мерах по устранению этих превышений.

Структура контроля ИЗА выстраивается во взаимодействии производственного и государственного экологического контроля. Все основные элементы, обеспечивающие информационное наполнение и функционирование системы контроля ИЗА, сосредоточены на уровне

производственного экологического контроля. Приоритет производственного контроля в общей системе экологического контроля обусловлен практикой осуществления непосредственного мониторинга и регулирования выбросов. Невозможно получить реальные результаты в изменении вредного воздействия на окружающую среду на территориальном и федеральном уровнях, не достигнув их на уровне отдельного предприятия. Сущность производственного экологического контроля сформулирована в ст. 67 нового Федерального закона «Об охране окружающей среды»: «Производственный контроль в области охраны окружающей среды (производственный экологический контроль) осуществляется в целях обеспечения выполнения в процессе хозяйственной и иной деятельности мероприятий по охране окружающей среды, рациональному использованию и восстановлению природных ресурсов, а также в целях соблюдения требований в области охраны окружающей среды, установленных законодательством».

Современный производственный экологический контроль формировался на основе ведомственного контроля советских времен, когда основные правила осуществления контроля промышленных выбросов для типовых производств вырабатывались головными отраслевыми институтами. Институты разработали и утвердили отраслевые инструкции по организации контроля за промышленными выбросами на предприятиях. Одним из преимуществ работы составителей этих инструкций было профессиональное видение процессов эмиссии загрязняющих веществ как неотъемлемой составляющей производства и понимание технологических возможностей для обеспечения должного уровня контроля выбросов и их сокращения. Изменчивость выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в значительной степени обусловлена изменчивостью параметров технологического процесса, генерирующего эти выбросы. Многочисленные попытки совместить технологический контроль и контроль за промышленными выбросами дали очень скромные результаты в виде расчетных методик и удельных показателей. На законодательном уровне решен вопрос об установлении технических нормативов выбросов для стационарных, передвижных и иных источников, технологических процессов и оборудования, которые отражают допустимую массу выбросов в окружающую среду в расчете на единицу выпускаемой продукции.

Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха» закрепляет, в частности, следующие важные положения и понятия в сфере контроля промышленных выбросов:

– двухступенчатость системы контроля ИЗА (государственный и производственный контроль);

– обязательное применение технических нормативов выбросов, соответствие которым подтверждается выдаваемыми сертификатами для технических, технологических установок, двигателей и транспортных средств при их производстве и использовании на территории Российской Федерации;

– запрещение размещения и эксплуатации объектов хозяйственной деятельности, не имеющих предусмотренных правилами охраны атмосферного воздуха средств контроля за выбросами.

Производственный контроль промышленных выбросов осуществляется соответствующими службами предприятия или ведомства на основе нормативно-методической документации, утвержденной или согласованной Министерством природных ресурсов России.

Государственный контроль проводят комитеты природных ресурсов России как на уровне предприятий и населенных пунктов, так и на уровне субъекта Федерации в необходимых случаях. Нормативным актом, на основании которого осуществляется государственный контроль, является «Положение о государственном контроле за охраной атмосферного воздуха». В развитие этого документа в НИИ «Атмосфера» была подготовлена «Инструкция по осуществлению государственного контроля воздухоохранной деятельности предприятий», в которой детально рассмотрены права и обязанности государственного инспектора, порядок осуществления государственного контроля воздухоохранной деятельности предприятий, оформление результатов проверки, контроль за выполнением предписаний. Инструкция предназначена для оказания помощи государственному инспектору по охране атмосферного воздуха при осуществлении государственного экологического контроля и проверке организации производственного экологического контроля воздухоохранной деятельности предприятий.

В связи с разработкой технических нормативов выбросов, которые введены в практику нормирования выбросов законом «Об охране атмосферного воздуха», необходима модернизация системы контроля. Поскольку при контроле технических нормативов выбросов приходится иметь дело непосредственно с технологическими агрегатами – источниками выделения, необходимо более глубоко включать экологические службы предприятия в производственные процессы. «Положение о государственном контроле за охраной атмосферного воздуха» предусматривает осуществление контроля за соблюдением установленных нормативов выбросов, а также за наличием выданных в установленном порядке сертификатов, подтверждающих соответствие содержания загрязняющих веществ в выбросах технологических устано-

вок техническим нормативам выбросов, однако не регламентирует порядка проведения контроля.

При разработке нормативно-методической документации по порядку проведения контроля установленных технических нормативов выбросов необходимо придерживаться следующих положений. Министерство природных ресурсов устанавливает порядок разработки и утверждает технические нормативы выбросов. При этом целесообразно вести разработку и определять порядок контроля в сотрудничестве с соответствующими отраслевыми проектными и научными организациями; соблюдение технических нормативов выбросов является необходимым условием при установлении нормативов допустимых выбросов ПДВ и ВСВ; система контроля технических нормативов выбросов, являясь составной частью производственного экологического контроля, должна быть совместимой с системами технологического контроля производственных процессов предприятия. Основные требования и рекомендации по организации системы контроля промышленных выбросов в атмосферу в отраслях промышленности регламентированы в «Типовой инструкции» и в ОНД-90. Конкретные условия организации контроля ИЗА сформулированы в проекте нормативов ПДВ предприятия и включаются в выдаваемое предприятию разрешение на выброс.

В связи с этим уместно обратить внимание на опыт и существующие тенденции в области охраны окружающей среды стран Западной Европы и США. Разрешения на загрязнение окружающей среды, подготавливаемые официальными органами власти для данной компании, содержат широкий комплекс требований, которые становятся активными регуляторами природоохранной деятельности предприятий. В разрешения могут включаться, например, помимо установления ограничений на выбросы и сроков их действия, определенные требования к организации системы измерений. В то же время негибкая командно-контролирующая система природоохранного регулирования признается недостаточно эффективной. Предписывающая система природоохранного регулирования ведет к быстрому неоправданному росту затрат на защиту окружающей среды в США. Экологическая политика перестраивается и смещает акценты в сторону саморегулирующегося управления состоянием окружающей среды. Это достигается путем сотрудничества фирм с Агентством по охране окружающей среды США. Разработаны программы сотрудничества, оптимизирующие управление в области охраны окружающей среды. Выгоды от общественного признания и потенциальные возможности избежать издержек ответственности, связанных с необходимостью выполнения и соответствия обязательным нормативным актам, создают мощные

стимулы для участия в данной программе. Программы способствовали добровольным шагам фирм по снижению уровня загрязнения.

Объединение стран Западной Европы позволяет устанавливать единые требования для промышленных предприятий. Директива ЕС 96/61 «Интегрированное предотвращение загрязнения и контроль» декларирует общеевропейскую систему разрешений для средних и крупных промышленных объектов в странах ЕС. Интегрированное разрешение на деятельность устанавливает предельно допустимые значения эмиссий во все три природные среды (воздух, воду, почву), принимая во внимание воздействие промышленных объектов на окружающую среду в целом. Проявляя серьезную ответственность за состояние окружающей среды и вводя эффективный экологический менеджмент, компании могут получать разрешение на свою деятельность без подробных предписаний, что позволяет им выбрать свой способ соблюдения экологических нормативов. В Нидерландах действует практика заключения долгосрочных договоров с некоторыми отраслями и отдельными компаниями о мерах и сроках сокращения выбросов отдельных загрязняющих веществ. Договоры отвечают концепции взаимной выгоды, они вносят определенность в отношении долгосрочных действий, необходимую для разработки инвестиционных планов компаний. Теперь в центре внимания уже не удовлетворение отдельных требований разрешения, а обеспечение необходимого уровня общей природоохранной деятельности.

Важным инструментом обеспечения экологической эффективности являются системы природоохранного управления, которые вводятся и функционируют в компаниях. Так, фирма «Siemens» относит свои достижения в области природоохранной деятельности на счет глубокого экологического аудирования производств, перехода на энерго- и ресурсосберегающие технологические процессы, создания экологических служб на предприятиях, способствующих разработке и внедрению современных, интегрированных в производственные процессы природоохранных технологий и установок. Большинство предприятий фирмы сертифицированы в соответствии с требованиями международных стандартов по экологическому менеджменту.

Директива Европейского сообщества 1836/93 «О добровольном участии предприятий в системе экологического менеджмента и аудита (EMAS)», введение международных норм ISO-14000 становятся важным фактором повсеместного перехода предприятий к экологически ориентированным системам управления при поддержке системы экономических, финансовых и моральных стимулов со стороны государств-участниц.

В России продублированы основные стандарты серии ISO-14000 в виде ГОСТ Р ИСО-14000 под общим названием «Системы управления окружающей средой» (СУОС). В связи с этим актуализируется задача совмещения существующего производственного экологического контроля с элементами внедряемых на предприятиях СУОС: от выполнения измерений, контроля и оценки собственной экологической эффективности до принятия руководством предприятия управленческих решений по снижению уровня загрязнения окружающей среды на основе учета полученной информации.

1.8. Система управления воздухоохранной деятельностью в Российской Федерации и оценка качества атмосферного воздуха

В Российской Федерации регулирование качества атмосферного воздуха определено федеральными законами «Об охране окружающей среды» (2002 г.), «Об охране атмосферного воздуха» (1999 г.), «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (1999 г.), рядом постановлений Правительства Российской Федерации и другими законодательными документами. Таким образом, основополагающие способы реализации системы управления качеством атмосферного воздуха законодательно регламентированы, однако организационный механизм управления, а также обеспечивающее его функционирование нормативно-методическое обеспечение разработано не в полном объеме, что серьезно сдерживает реализацию мероприятий по снижению объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Существуют три метода управления качеством окружающей среды — гигиенический, технологический, экологический. В Российской Федерации в полном объеме (т.е. законодательно и нормативно-методически) реализован гигиенический принцип управления окружающей средой. Эта система, разработанная сотрудниками Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и образованного в 1992 г. Научно-исследовательского института охраны атмосферного воздуха, является основой системы управления качеством атмосферного воздуха. Показательно, что за последние годы во многих наиболее развитых странах с переходной экономикой интенсивность выбросов некоторых загрязняющих веществ продолжала уменьшаться. Это означает, что начавшийся экономический рост не сопровождался аналогичным масштабом роста объемов выбросов. Таким образом, нашей стране предоставлена реальная возможность замены старых технологий на новые, экологически чистые, с низкими затратами. Совершенствование воздухоохранной деятельности в Российской Федерации

невозможно без оптимизации госучета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

В настоящее время в России учет и «обобщение» выбросов загрязняющих веществ в атмосферу предприятиями производится по отраслевому принципу. Этот принцип был сформирован в период централизованного управления промышленностью и служил целям централизованного финансирования природоохранных мероприятий (по министерствам). В связи с разгосударствлением собственности в России отраслевой принцип утратил значение. Поэтому, очень важно для целевого финансирования воздухоохраных работ определить, какие технологические процессы наиболее загрязняют атмосферу. Для этого необходима соответствующая информационная база о выбросах загрязняющих веществ (ЗВ) в результате различных технологических процессов, которая в России сегодня отсутствует.

Необходимо совершенствовать российскую систему государственного учета выбросов ЗВ в атмосферу и перестраивать ее от отраслевого принципа к технологическому, как это принято в большинстве стран Европы, США и Канаде. Это позволит получать отечественные данные о выбросах, совместимые с аналогичными данными развитых зарубежных стран, а также создать информационную базу для работ по техническому нормированию.

Для решения задачи совершенствования системы госучета необходима разработка системы документов по сбору, учету и представлению информации о выбросах загрязняющих веществ в атмосферу, отвечающих требованиям нового закона «Об охране атмосферного воздуха», и создание системы государственного учета источников ЗВ в атмосферу по технологическому принципу на базе принятого в развитых зарубежных странах классификатора технологических процессов SNAP (Source Nomenclature Atmosphere Pollutions).

Работы по нормированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу с установлением нормативов предельно допустимых и временно согласованных выбросов (ПДВ и ВСВ) ведутся у нас в стране уже в течение многих лет. При расчете этих значений исходят из фактического объема выбросов, состояния загрязнения атмосферного воздуха в районе расположения источника и степени негативного воздействия выбросов из данного источника на атмосферный воздух. Действующая в настоящее время общегосударственная система нормирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферу ориентирована на соблюдение требований о непревышении гигиенических критериев качества атмосферного воздуха населенных мест.

В рамках этих работ для объектов, имеющих источники загрязнения атмосферы и дающих более 80–85% выбросов от общего поступления в атмосферу, разработаны нормативы ПДВ и ВСВ. Однако количество предприятий, для которых разработаны нормативы ПДВ, не превышает во многих городах 50%. Это обусловлено трудностями оптимального выбора путей и мероприятий по снижению негативного воздействия выбросов предприятий на атмосферный воздух как с экологической, так и экономической точек зрения. Среди них можно указать на следующие:

- отсутствие оценок «экологичности» технологических процессов и оборудования;
- недостаточная обоснованность устанавливаемых величин выбросов в зависимости от режимов работы производств, объема и ассортимента выпускаемой продукции, используемого вида сырья и топлива;
- отсутствие обоснованных на экспериментальном материале с оценкой его качества или на балансовых схемах значений удельных технологических нормативов выделений (выбросов).

Повышению эффективности работ по нормированию выбросов будет способствовать реализация положений Федерального закона «Об охране атмосферного воздуха», касающихся технических нормативов выбросов (ТНВ). Этот закон, принятый в мае 1999 г., предусматривает введение технических (удельных) нормативов выбросов для технологических процессов, оборудования, транспортных и иных передвижных средств и установок в расчете на единицу материальных показателей (используемого сырья, выпускаемой продукции, единицы пробега). Эта мера, уже принятая во многих странах, стимулирует применение наиболее совершенных с экологической точки зрения технологий. Следует отметить, что в ряде экономически развитых стран ТНВ являются основными нормативами. Например, в США ТНВ, утвержденные на государственном уровне Национальным агентством по охране окружающей Среды (ЕРД), называются МРЕ (Maximal permissible emissions). Перечень производств, для которых по довольно ограниченному числу вредных веществ установлены МРЕ, довольно широк. Значения МРЕ устанавливаются на уровнях, соответствующих современным техническим достижениям. Списки МРЕ периодически пополняются и уточняются.

Учитывая, что разработка ТНВ весьма трудоемка и требует проведения большого объема инструментальных измерений содержания вредных веществ и балансовых оценок на всех стадиях технологических процессов, необходимо провести детальный учет и ранжирование

технологических установок и процессов на предприятиях, вносящих преобладающий вклад в формирование уровней приземных концентраций. В настоящее время работы по установлению ТНВ для ряда производств проводятся в России при методическом руководстве НИИ «Атмосфера». При этом классификация производств и технологических установок на предприятиях Российской Федерации должна быть максимально приближена к используемой в стране ЕЭК и мировому уровню. Комиссии Европейских сообществ итоговые величины выбросов загрязняющих веществ в атмосферу представляются ежегодно в рамках следующей разбивки по категориям источников:

1. Государственные электростанции и тепловые установки спутным получением электроэнергии.

2. Установки сжигания в организациях, учреждениях, жилищно-бытовые.

3. Промышленное сжигание.

4. Промышленные процессы.

5. Добыча и распределение ископаемого топлива.

6. Использование растворителей.

7. Дорожный транспорт.

8. Другие передвижные источники и механизмы.

9. Обработка и удаление отходов.

10. Сельскохозяйственная деятельность.

11. Природные источники.

Использование ТНВ, отнесенных к единице сырья, топлива, продолжительности работы оборудования и др., позволит проводить сравнение технологий, применяемых в РФ и за рубежом, с точки зрения их экологичности и соответствия передовому научно-техническому уровню. Внедрение ТНВ в широкую практику природоохранной работы должно сопровождаться развитием методических подходов к определению показателей технических нормативов выбросов с учетом специфики конкретных источников и технологических процессов, к выбору источников и вредных веществ, для которых такие нормативы должны разрабатываться в первую очередь, как и перечень нормирующих материальных показателей для различных производств.

В настоящее время действуют два перечня: перечень методик измерения концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах и перечень технических средств контроля промышленных выбросов. Они являются важными информационными документами, которыми руководствуются природоохранные службы предприятий, организаций и территориальных комитетов природных ресурсов при

контроле источников загрязнения атмосферы. Методики, включенные в перечень допущенных к применению, соответствуют требованиям действующих государственных стандартов России и других нормативно-технических документов в области охраны атмосферного воздуха от загрязнения. Большинство методик имеет свидетельство Госстандарта России о метрологической аттестации. Технические средства контроля промышленных выбросов, допущенные к применению, также прошли Государственную метрологическую аттестацию и имеют сертификат Госстандарта России.

Таблица 1.3

Города с наибольшей степенью загрязнения атмосферы

№ п/п	Город	Вещества, определяющие уровень загрязнения атмосферного воздуха
1	Бийск	формальдегид, бенз(а)пирен, диоксид азота
2	Кемерово	сероуглерод, бенз(а)пирен, формальдегид
3	Краснодар	фенол, формальдегид, бенз(а)пирен
4	Липецк	аммиак, формальдегид, бенз(а)пирен
5	Магнитогорск	сероуглерод, бенз(а)пирен, формальдегид
6	Москва	диоксид азота, формальдегид, аммиак, бенз(а)пирен
7	Новокузнецк	формальдегид, бенз(а)пирен, фтористый водород, диоксид азота
8	Новороссийск	взвешенные вещества, диоксид азота, формальдегид
9	Омск	ацетальдегид, формальдегид, аммиак
10	Ростов-на Дону	диоксид азота, формальдегид, взвешенные вещества
11	Хабаровск	бенз(а)пирен, формальдегид, диоксид азота, аммиак
12	Чита	взвешенные вещества, формальдегид, бенз(а)пирен
13	Южно-Сахалинск	сажа, диоксид азота, формальдегид

Состояние качества атмосферного воздуха и характеристики источников загрязнения атмосферы. Во многих городах России неблагоприятная экологическая обстановка связана с повышенным уровнем загрязнения атмосферного воздуха выбросами промышленных предприятий и транспорта. Самыми распространенными загрязняющими веществами, поступающими в атмосферу в наибольших количествах, составляют выбросы следующих веществ: твердые вещества, диоксид серы, оксид углерода, оксиды азота и летучие органические соединения (ЛОС). Специфические загрязняющие вещества составляют около 2% общего количества всех загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу. Следует отметить, что, несмотря на незначительные объемы поступления специфических загрязняющих веществ в атмосферу, их вклад в загрязнение приземного слоя атмосферы в городах и регионах РФ может быть весьма ощутимым, так как большинст-

во из них отличается высокой токсичностью (сероводород, сероуглерод, серная кислота, метилмеркаптаны, бенз(а)пирен, свинец и др.).

В Российской Федерации из 253 городов, контролируемых Росгидрометом, ежегодно составляется список городов с самой высокой степенью загрязнения атмосферы. Из них 13 входят в течение 5 лет в «приоритетные списки» (табл. 1.3).

Таблица 1.4

Выбросы основных загрязняющих веществ в атмосферу
на территории Российской Федерации (млн т)

Загрязняющие вещества	Годы				
	1996	1997	1998	1999	2000
Твердые					
Мп	3,5	3,2	3,1	2,9	3,1
Диоксид серы					
Мп	6,3	6,1	5,7	5,6	5,4
Оксид углерода					
Мп	5,0	4,8	4,6	4,8	5,2
Ма	10,3	11,1	11,7	11,8	11,8
М	15,3	15,9	16,3	16,6	17,0
Диоксид азота					
Мп	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7
Ма	1,1	1,1	1,2	1,2	1,4
М	3,1	3,0	3,0	3,0	3,1
ЛОС					
Мп	3,5	3,4	3,4	3,6	3,6
Ма	1,8	2,0	2,1	2,2	2,1
М	5,3	5,4	5,5	5,8	5,7
Ма /М (%)	38,8	42,1	44,7	44,7	44,7
Всего					
Мп	20,8	19,8	18,9	19,2	19,4
Ма	13,2	14,4	15,3	15,5	15,7
М	34,0	34,2	34,2	34,7	35,1

Условные обозначения: Мп — выбросы от промышленных предприятий, Ма — от автотранспорта, М — суммарные (Мп + Ма).

Атмосфера городов главным образом загрязнена высокими концентрациями взвешенных веществ, бензапирена, диоксида азота, сероуглерода и формальдегида. В большинстве субъектов Российской Федерации есть города, в которых максимальная концентрация какого-либо вещества в течение года превышала 10 ПДК, всего таких городов 40. В 99 городах индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) превышает 7, т.е. уровень загрязнения воздуха характеризуется как высокий и очень

высокий, что на 9 городов больше, чем в 1999 г. Очень высокий уровень загрязнения воздуха (ИЗА = 14 и более) зафиксирован в 2000 г. в 30 городах (1999 г. — 25 городов), в том числе в таких крупных городах и промышленных центрах, как Братск, Владимир, Екатеринбург, Иркутск, Кемерово, Краснодар, Липецк, Магнитогорск, Норильск, Омск, Саратов, Sterлитамак, Томск, Тюмень, Череповец. В Москве высокий уровень загрязнения воздуха отмечен лишь в отдельных крупных районах. По состоянию на 2000 г. на территории Российской Федерации суммарные выбросы от промышленных предприятий составили 19,4 млн т (55,3%), от автотранспорта — 15,7 млн т (44,7%), всего по территории России — 35,1 млн т.

Представление о динамике выбросов за период 1996–2000 гг. на территории Российской Федерации можно получить из данных, помещенных в табл. 1.4. Суммарный объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу начиная с 1997 г. имеет тенденцию к незначительному, но постоянному росту за счет автотранспорта, что обусловлено увеличением количества единиц индивидуального транспорта: выбросы автотранспорта составляют почти 45% всех загрязняющих атмосферу веществ. Они дополняются выбросами воздушного, железнодорожного и водного транспорта, машинно-тракторного парка.

Сумма выбросов автотранспорта на территории Российской Федерации изменяется в широких пределах. Самые большие объемы выбросов в 2000 г. отмечены (тыс. т) в Краснодарском крае (1325,0), Московской области (1114,7), республике Башкортостан (752,8), в Ханты-Мансийском а.о. (672,5), в Новосибирской области (669,8). Среди городов по выбросам автотранспорта выделяются Москва (1654,0), Новосибирск (201,0), Омск (198,0), Краснодар (192,4), Санкт-Петербург (185,4). Существенно отстают от мирового уровня экологические показатели отечественных автотранспортных средств и используемых моторных топлив, а также развитие и техническое состояние улично-дорожной сети. Средний возраст автомобильного парка остается значительным и составляет в целом по стране около 10,5 лет, а в отдельных регионах России — от 9,4 до 13,6 лет.

Из 19,4 млн т загрязняющих веществ от стационарных источников предприятия семи основных отраслей промышленности России (электроэнергетика, металлургия черная и цветная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная, строительных материалов, химическая и нефтехимическая, топливная, машиностроение и металлообработка) в 2000 г. на долю отраслей электроэнергетики, топливной и металлургической приходится 13,5 млн т (69%). Следует отметить, что выбросы загрязняющих веществ от промышленных предприятий за

период с 1996 по 1999 г. на территории России снизились на 7%. Это обусловлено сокращением объемов производств за этот период, что привело к сокращению объемов промышленных выбросов и способствовало улучшению качества воздуха. По данным регулярных наблюдений на станциях Росгидромета за пятилетний период (1996–1999 гг.) средние за год показатели концентрации взвешенных веществ, диоксида серы, аммиака, фторида водорода, сажи и сероуглерода снизились. В 2000 г. наблюдался небольшой рост объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от промышленных предприятий (0,2 млн т) и от автотранспорта (0,2 млн т) по сравнению с 1999 г. Увеличение объемов выбросов от промышленности связано, очевидно, с небольшим ростом промышленного производства в 2000 г. Наибольшее воздействие на окружающую природную среду оказывают предприятия энергетической, цветной и черной металлургии, топливной промышленности.

1.9. Экологический мониторинг Пермского края

Работы по созданию Единой территориальной системы экологического мониторинга (ЕТСЭМ) Пермского края начаты во исполнение постановления Правительства РФ от 24.11.1993 №1229 и в соответствии с постановлением администрации Пермской области от 09.11.1995 № 338 «О системе экологического мониторинга на территории области».

Единая территориальная система экологического мониторинга Пермского края функционирует и развивается с целью информационного обеспечения управления в сфере охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов, обеспечения экологически безопасного, устойчивого развития, ведения государственного фонда данных о состоянии окружающей среды и экосистем, природных ресурсов, источников и процессов антропогенного воздействия на территории области и является составной частью информационной системы Пермского края.

ЕТСЭМ Пермского края создана на основе территориально-ведомственного принципа построения и включает в себя государственную и ведомственную системы мониторинга состояния окружающей среды, источников антропогенного воздействия, природных ресурсов, экосистем и социально-гигиенического мониторинга.

На территории Пермского края экологический мониторинг осуществляют:

- территориальные органы и учреждения федеральных ведомств;
- исполнительные органы государственной власти области;
- подразделения по охране окружающей среды органов местного самоуправления городов и районов области;
- областные учреждения;
- муниципальные лаборатории (г. Чайковский и Лысьва);
- промышленные предприятия.

Мониторинг источников антропогенного загрязнения. На территории Пермского края около 30 промышленных предприятий разработали и утвердили программы ведомственного мониторинга источников антропогенного воздействия и зон их воздействия (ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез», ОАО «Азот», ОАО «Ависма», ОАО «Сода», ОАО «Сильвинит» и др.).

Основная цель разработки программ — развитие и совершенствование системы производственно-экологического мониторинга для обеспечения экологической безопасности производства, окружающей среды и здоровья населения. Программы мониторинга позволяют унифицировать информацию о проведении наблюдений за источниками загрязнения окружающей среды.

Формирование ведомственной наблюдательной сети и проведение наблюдений в районе расположения предприятий за счет их финансов позволяет экономить средства на проведение экологического мониторинга за счет федерального и местного бюджетов. В 2000 г. на тиражирование и распространение методологии создания системы мониторинга источников антропогенного воздействия на окружающую среду Пермского края получен грант Агентства Международного развития США.

Перспективным направлением организации мониторинга источников антропогенного воздействия являются автоматизированные системы контроля качества окружающей среды. Например, на ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» введен в эксплуатацию опытный участок сети передачи данных от датчика производства фирмы Draeger, установленного на границе санитарно-защитной зоны. При этом впервые в Пермском крае реализован методический подход к созданию систем контроля качества атмосферного воздуха на основе выделения маркерных веществ с учетом выбора контрольных точек на границе санитарно-защитной зоны предприятий, что требует существенно меньших финансовых затрат за счет уменьшения количества необходимых дорогостоящих датчиков ав-

томатического контроля. Для ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» маркерным веществом являются суммарные углеводороды (бензин).

Расчетные методы оценки состояния загрязнения атмосферного воздуха. В 8 городах Пермского края (635 предприятий, более 16 тысяч источников выбросов) используется новый подход к расчетной оценке степени загрязнения атмосферного воздуха и нормированию выбросов, основанный на результатах сводных (комплексных) расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ всех предприятий города.

Исходными данными для проведения расчетной оценки состояния загрязнения атмосферы служат базовая информация, содержащаяся в инвентаризациях источников выбросов предприятий, проектах нормативов предельно допустимых выбросов, рабочих проектах строительства новых предприятий, прошедших государственную экологическую экспертизу, а так же результаты государственного контроля, сведения о фоновых концентрациях (полученные по данным натурных измерений проводимых ПЦГМС), об утвержденных границах санитарно-защитных зон.

Мониторинг экосистем. К этой категории мониторинга относится мониторинг состояния почв, животного и растительного мира.

Подсистема «Леса». Работы по созданию и функционированию базовой подсистемы «Леса» Пермского края выполняются Западным федеральным государственным унитарным лесоустроительным предприятием (г. Брянск) с 1995 г. В ходе работ проведено полевое лесопатологическое и таксационное обследование Пермской области, заложены стационары контроля за состоянием лесов, разработаны программы ведения мониторинга лесов. Созданная система мониторинга лесов позволила выявить в период с 1995 по 2005 г. процесс ухудшения состояния елово-пихтовых и сосновых лесов Пермской области и динамику ухудшения состояния деревьев на одну-две категории.

Зоологический мониторинг. Работа выполняется по договору с кафедрой зоологии позвоночных и экологии Пермского государственного университета. В результате полевых исследований выбрано семь площадок, где проведены учеты модельных видов и зарегистрированы их репродуктивные показатели. Результаты исследований показали относительную стабильность модельных видов животных и рост численности в целом по области трех видов, занесенных в Красную книгу.

В 2006 г. продолжалось наблюдение за видами-индикаторами состояния окружающей природной среды на семи мониторинговых площадках. Проведены учеты численности и наблюдения за репродуктивными показателями редких и исчезающих животных, а также за

видами, замыкающими трофические цепи и трофические пирамиды (накапливающие различные поллютанты) – рыбаками и хищными птицами. Для подавляющего большинства видов характерны естественные колебания численности и относительно стабильные показатели размножения. В целом по области наблюдается устойчивый рост численности сапсана и его репродуктивных показателей, а также орлана-белохвоста.

Интегрированный банк природоохранных данных Пермского края. В настоящее время развитие ЕТСЭМ на территории Пермского края осуществляется в направлении создания единой информационной системы сбора информации по всем функциональным подсистемам путем создания интегрированного банка экологических данных Пермского края, который представляет собой модульную распределенную систему, состоящую из: типового центрального блока (основан на использовании системы управления базами данных (СУБД) Oracle), расположенного и ведущегося в Управлении по охране окружающей среды Пермского края, Комитете природных ресурсов по Пермскому краю и ОГУ «Аналитический центр»; распределенных территориальных модулей, установленных в подразделениях по охране окружающей среды органов местного самоуправления Пермского края.

Модули, входящие в состав интегрированного банка, позволяют вводить, хранить и анализировать информацию по стандартным формам статистической отчетности: 2ТП (воздух), 2ТП (водхоз), 2ТП (радиоактивность), 2ТП (радиоактивные вещества). Помимо этого, в базу данных вводится и в ней хранится значительное количество другой информации: по учету и оценке отходов производства и потребления, выданным разрешениям на выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух, платежам предприятий природопользователей за загрязнение окружающей среды, справочник по загрязняющим веществам, выбрасываемым в атмосферу, справочник по загрязняющим веществам, сбрасываемым в водные объекты, справочник отходов и т.д.

Методическое руководство и координацию работ по текущему содержанию (администрированию) и развитию интегрированного банка экологических данных осуществляет Управление по охране окружающей среды Пермского края. Управление взаимодействует с подразделениями по охране окружающей среды органов местного самоуправления Пермского края, обеспечивая поток информации с мест получения данных на уровень субъекта Российской Федерации.

Сбор, обработка, хранение, анализ и отображение пространственно распространенных данных осуществляется с использованием компьютерных технологий — географических информационных сис-

тем (ГИС). Основой применения ГИС являются цифровые топографические карты (ЦТК), полученные в Роскартографии. Использование единой топоосновы позволило снять технические и организационные проблемы совместимости и интеграции данных. В настоящее время в Пермском крае активно ведутся работы по созданию географической информационной системы для органов государственной власти Пермского края (ГИС ОГВ). В рамках ЕТСЭМ создается экологический блок ГИС ОГВ, включающий тематические слои: особо охраняемые природные территории и объекты; заповедники и ландшафтные заказники; площадки мониторинга состояния лесов; квартальная сеть, границы лесхозов и лесничеств Гослесфонда Пермской области; точечно-символьный слой предприятий природопользователей Пермской области; гидрохимические условия водоносных горизонтов с привязкой банка данных по водозаборным скважинам (водозаборам); места размещения промышленных и бытовых отходов, могильники высокотоксичных отходов в Пермском крае; электронная основа геоэкологической карты Пермской области М 1:500 000.

Созданные базы данных и слои ГИС используются при экспертизе проектов на строительство и реконструкцию, анализе эффективности природоохранных мероприятий по снижению выбросов, разработке предупредительных мероприятий и оценке последствий чрезвычайных ситуаций, оценке антропогенной нагрузки на территории. По результатам конкурсного отбора, с учетом результатов по созданию Единой территориальной системы экологического мониторинга Пермский край выбран в качестве пилотного региона для отработки принципов создания региональных систем экологического мониторинга в рамках проекта «Системы экологического мониторинга в России». Основная цель проекта — создание эффективной структуры управления для экологического мониторинга на федеральном и региональном уровнях на основе стандартов и норм для мониторинга окружающей среды, сочетающихся с европейскими, разработанными Европейским агентством окружающей среды. Для развития ЕТСЭМ необходимо: заключать соглашения между ведомствами — участниками ЕТСЭМ о взаимодействии при организации, проведении и информационном обеспечении экологического мониторинга; создавать территориальный информационно-аналитический центр ЕТСЭМ; продолжать работу по созданию муниципальных баз данных о состоянии окружающей среды города, района; создавать геоинформационные системы для органов государственной власти Пермского края и информационно-телекоммуникационной системы специального назначения.

Глава 2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РЕСУРСЫ КОСМИЧЕСКОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В результате интенсивного использования природных ресурсов происходит разрушение природных систем и интенсивное загрязнение среды, что приводит к возникновению масштабных трудноразрешимых противоречий между интересами развития производства и сохранением природы. Еще в Стокгольме на I Международной конференции ООН по оценке состояния природной среды в 1972 г. было признано, что экологическое состояние природной среды в промышленных странах стало угрожать не только здоровью населения, но и самому существованию человечества. Решение этих проблем, возникающих в связи с катастрофическим ухудшением окружающей природной среды, занимает сейчас центральное место при выработке стратегии экологически устойчивого социально-экономического развития промышленно развитых стран, в том числе и России. В последние годы при фундаментальных исследованиях широко используются космические методы контроля состояния экосистем.

Появление глобальной компьютерной сети Интернет и разработка передовых информационных технологий открыли новый этап в развитии космического экологического мониторинга. Особенностью этого этапа является широкое использование телекоммуникационной инфраструктуры, а также гипертекстовых и интерактивных информационных технологий, которые чрезвычайно перспективны в дистанционном мониторинге состояния окружающей среды. Актуальны также проблема интегрирования национальных информационных ресурсов по окружающей среде, создание региональных баз данных и расширение электронных коллекций по результатам космического экологического мониторинга.

Проблема получения адекватной информации о состоянии окружающей среды тесно связана с задачей обеспечения устойчивого развития общества, что особенно важно для экономики России в переходном периоде. В этой ситуации развитие технологий наблюдения из космоса, создание инфраструктур спутникового экологического мониторинга регионов России наряду с разработкой экологической системы контроля в реальном масштабе времени призваны сыграть ключевую роль в обеспечении безопасности окружающей среды и устойчивого развития экономики России.

2.1. Спутниковый экологический мониторинг

Во всем мире исследования Земли из космоса приобретают всеобъемлющий характер. Наиболее информативным методом для решения задач дистанционного исследования поверхности Земли из космоса является использование и тематический анализ изображений, полученных приборными комплексами различных частотных диапазонов, установленных на космических аппаратах. Целый ряд спутников, оснащенных приборами дистанционного зондирования (радиолокаторами, скаттерометрами, радиометрами и оптической техникой), выведены на орбиту специально для получения разносторонней геофизической информации, необходимой для оценки состояния окружающей среды и для природно-ресурсных исследований.

Для космического экологического мониторинга целесообразно ориентироваться прежде всего на полярно-орбитальные метеорологические спутники, как на отечественные аппараты (спутники типа «Метеор», «Океан» и «Ресурс»), так и на американские спутники серии NOAA и европейский спутники (ESA). Американские метеорологические спутники серии NOAA снабжены многозональной оптической и ИК аппаратурой, в частности радиометром высокого разрешения AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Космические аппараты NOAA запускаются на полярные орбиты высотой порядка 700 км над поверхностью Земли с наклоном 98,89 градусов. Радиометр высокого разрешения ведет съемки поверхности Земли в пяти спектральных диапазонах: 580–680 нм, 725–1100 нм, 3550–3930 нм, 10300–11300 нм и 11400–12400 нм. Космические съемки проводятся с пространственным разрешением 1100 м и обеспечивают полосу обзора шириной 2700 км.

Российские спутники серии «Ресурс-01» принадлежат Федеральной службе России по гидрометеорологии и мониторингу природной среды (Росгидромет). Океанографический спутник «Ресурс-01» обеспечивает получение многозональной космической информации высокого и среднего разрешения. Параметры орбиты спутника «Ресурс-01»: круговая солнечно-синхронная орбита высотой 678 км, период обращения 98 мин с наклоном 98,04 градуса. В состав бортового информационного комплекса входят два сканера видимого и ближнего инфракрасного диапазонов со следующими характеристиками:

- многоканальное сканирующее устройство высокого разрешения МСУ-Э с пространственным разрешением 35×45 м. Полоса обзора

составляет 45 км, съемка осуществляется в 3 спектральных каналах 500–600 нм, 600–700 нм и 800–900 нм;

- многоканальное сканирующее устройство среднего разрешения МСУ-СК с пространственным разрешением 150×250 м. Полоса обзора достигает 600 км. Съемка проводится в 5 спектральных каналах: 500–600 нм, 600–700 нм, 700–800 нм, 800–1100 нм и 10400–12600 нм;

- размеры видеоизображения составляют 1000 элементов на 1100 строк для МСУ-Э и 1800 элементов на 1500 строк для МСУ-СК.

Космическая гидрометеорологическая система «Метеор», также принадлежащая Росгидромету, обеспечивает глобальный экологический мониторинг территории России. Параметры орбиты спутника «Метеор»: приполярная круговая орбита высотой около 1200 км, наклонение — 82,5 градуса. Комплекс научной аппаратуры позволяет оперативно получать изображения облачности и подстилающей поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах, данные о температуре и влажности воздуха, температуре морской поверхности и облаков. Осуществляются также мониторинг озоносферы и геофизический мониторинг.

В состав бортового комплекса спутника входят сканирующий десятиканальный ИК радиометр с пространственным разрешением 35×35 км (спектральный диапазон — 9,65–18,7 мкм, полоса обзора — 400 км), а также ИК радиометр для глобального обзора и передачи данных на автономные пункты приема информации (АППИ) с пространственным разрешением 3×3 км (спектральный диапазон — 10,5–12,5 мкм, полоса обзора — 3100 км). В составе бортового комплекса имеется также сканирующая ТВ аппаратура с системой запоминания данных на борту для глобального обзора и сканирующая ТВ аппаратура для передачи данных на АППИ.

Российская космическая система «Океан» обеспечивает получение радиолокационных, микроволновых и оптических изображений земной поверхности в интересах морского судоходства, рыболовства и освоения шельфовых зон Мирового океана. Одной из основных задач спутника является освещение ледовой обстановки в Арктике и Антарктике, обеспечение проводки судов в сложных ледовых условиях. Параметры орбиты спутника: приполярная круговая орбита высотой 600–650 км, наклонение — 82–83°. Поток информации в условиях облачности и в любое время суток обеспечивается радиолокатором РЛС БО и системой сбора информации от автономных морских и ледовых станций «Кондор». В состав комплекса бортовой аппаратуры спутника «Океан-01» входят СВЧ-радиометры Р-600 и Р-255, сканирующий

СВЧ-радиометр «Дельта-2», трассовый поляризационный спектро-радиометр «Трассер», а также комплекс оптической сканирующей аппаратуры, включающий в себя многоканальное сканирующее устройство среднего разрешения МСУ-С (пространственное разрешение — 370 км, полоса обзора — 1100 км, спектральные диапазоны — 0,6–0,7 мкм, 0,8–1,1 мкм) и многоканальное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-М (пространственное разрешение — 2 км, полоса обзора — 1900 км, спектральные диапазоны — 0,5–0,6; 0,6–0,7; 0,7–0,8; 0,8–1,1 мкм).

Спутниковые данные дистанционного зондирования позволяют решать следующие задачи контроля состояния окружающей среды: определение метеорологических характеристик: вертикальные профили температуры, интегральные характеристики влажности, характер облачности и т.д.); контроль динамики атмосферных фронтов, ураганов, получение карт крупных стихийных бедствий; определение температуры подстилающей поверхности, оперативный контроль и классификация загрязнений почвы и водной поверхности; обнаружения крупных или постоянных выбросов промышленных предприятий; контроль техногенного влияния на состояние лесопарковых зон; обнаружение крупных пожаров и выделение пожароопасных зон в лесах; выявление тепловых аномалий и тепловых выбросов крупных производств и ТЭЦ в мегаполисах; регистрация дымных шлейфов от труб; мониторинг и прогноз сезонных паводков и разливов рек; обнаружение и оценка масштабов зон крупных наводнений; контроль динамики снежных покровов и загрязнений снежного покрова в зонах влияния промышленных предприятий.

2.2. Наземная инфраструктура мониторинга

Изображения со спутников передаются на Землю в реальном масштабе времени в диапазоне 1700 МГц в режиме HRPT (High Resolution Picture Transmission) и др. Возможность свободного приема спутниковой информации наземными станциями обеспечивается Всемирной метеорологической организацией согласно концепции «Открытого неба». Наземные станции в зоне видимости спутника принимают изображения земной поверхности с радиометрическим разрешением 10 бит, что обеспечивает передачу 1024 градаций яркости в каждом диапазоне. На наземных станциях приема спутниковой информации производятся прием, демодуляция, первичная обработка и подготовка спутниковых данных к вводу в персональный компьютер станции. В зоне приема в среднем находятся два спутника, например, се-

рии NOAA, обеспечивая регулярное обновление данных о состоянии окружающей среды.

На территории России в последнее десятилетие активно развивается сеть станций приема спутниковых данных, образующая наземную инфраструктуру регионального экологического мониторинга. В оперативном режиме непрерывных наблюдений работают наземные станции приема данных от спутников в Москве (Институт космических исследований РАН, ВНИИГОЧС МЧС), Красноярске (Институт леса СО РАН), Иркутске (Институт солнечно-земной физики СО РАН), Салехарде (Госкомитет по охране окружающей среды Ямало-Ненецкого автономного округа), Владивостоке (Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН).

Типовые станции приема сигналов от спутников состоят из антенной системы с диаметром параболического зеркала 1,8 м и шириной диаграммы направленности 6°, приемника (частота — 1700 МГц) и персонального компьютера для первичной обработки принимаемых данных. Программное обеспечение позволяет осуществить полный цикл работ от расчета траекторий спутников и от приема и организации хранения данных до тематической обработки спутниковых данных в пределах нескольких часов после момента приема.

Станции приема данных спутника «Ресурс» имели зеркало диаметром 160 см и приемник на частоту 8176–8223 МГц. Скорость передачи информации составляла 7,68 Мбит/с. Начальная обработка информации проводилась на одном компьютере, последующая обработка и архивация данных — на другом.

Спутниковая информация, принимаемая и обрабатываемая наземными станциями, служит основой для повседневного оперативного контроля за состоянием окружающей среды. С их помощью создается система геоэкологического мониторинга региона, в частности, можно осуществить контроль за сохранением границ водоохранных и санитарных зон при отводе земель и рубке леса в регионах, а также за целевым использованием земельных ресурсов.

2.3. Сетевая инфраструктура мониторинга

Современному уровню глобальных программ исследования Земли из космоса должны соответствовать передовые компьютерные инфраструктуры обработки, архивации и обмена спутниковыми данными, развитые телекоммуникационные и информационные системы и хорошо структурированные базы данных космической информации.

Институт космических исследований РАН, Институт радиотехники и электроники РАН и Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН разрабатывают комплексный проект создания интегрированной распределенной информационной системы данных дистанционного зондирования Земли с использованием ресурсов региональных центров приема, обработки и обмена спутниковыми данными, обеспечивая тем самым информационную поддержку программ дистанционного зондирования. Решение проблемы создания национальных информационных ресурсов по экологическим и природо-ресурсным программам на основе дистанционных методов исследования Земли из космоса поддержано научными проектами. В проектах объединение региональных центров геоэкологического мониторинга целиком основано на Интернет-технологиях и использует, в частности, Российскую научную космическую сеть Интернет RSSI (Russian Space Science Internet), которая была создана в Институте космических исследований РАН в апреле 1993 г. при поддержке NASA в рамках Соглашения между США и Российской Федерацией о сотрудничестве в изучении и использовании внешнего космоса для мирных целей. Сеть RSSI обеспечивает возможность оперативного обмена данными с NASA и ESA и выход на информационные ресурсы NASA.

Глобальная компьютерная сеть Интернет обеспечивает сетевой обмен данными дистанционного зондирования Земли и удаленный доступ внешних пользователей к экспериментальным данным и электронным каталогам зарубежных космических программ. Открытый доступ к пространственно распределенным данным долговременных природно-ресурсных и экологических исследований Земли из космоса реализуется на основе Web-технологий.

В настоящее время внешние пользователи через Интернет взаимодействуют с информационной системой наблюдения Земли из космоса EOSDIS, разработанной в США NASA. Поисковый сервер EOSDIS базируется на международном стандарте Протокола интероперабельности каталогов (Catalogue Interoperability Protocol — CIP) и позволяет вести поиск одновременно в нескольких каталогах с данными дистанционного зондирования. Вместе с тем EOSDIS включает серверы, обслуживание словаря данных и путеводитель по метаданным. Информационная система EOSDIS сводит воедино производителей и потребителей спутниковых данных и также обеспечивает вход в другие информационные системы дистанционного зондирования в Европе (Information on Earth Observation — INFEO) и Японии (CGER). Существенно, что любые новые информационные системы по наблюдению Земли связаны с системой EOSDIS.

2.4. Компьютерные методы обработки спутниковых данных

Целью обработки данных дистанционного зондирования (ДЗ) является получение снимков или изображений с требуемыми радиометрическими и геометрическими характеристиками. Рассмотрим основные этапы обработки данных.

Радиометрическая точность обеспечивается системами внутренней и внешней калибровки. Информация, необходимая для окончательной калибровки данных, должна содержаться в структуре передаваемого на землю сигнала и учитываться при последующей обработке. Наземная система обработки данных предназначена для извлечения полезной информации из мультиспектральных данных ДЗ и передачи ее потребителям. Система обработки является промежуточным звеном между датчиком ДЗ и пользователем. Поэтому ее характеристики во многом зависят как от характера данных, так и в значительной степени от требований потребителей информации ДЗ.

Таблица 2.1

Уровни обработки спутниковых данных

Уровень	Описание
0	первичные данные, дополненные орбитальной информацией
1	радиометрически откорректированное и географически привязанное изображение (дополнительно устраняются искажения, вносимые аппаратурой и вращением Земли)
2	преобразованное в заданную картографическую проекцию изображение с учетом координат опорных точек
3	геометрически преобразованное изображение с учетом цифровой модели местности (для суши)
4	мультиспектральная обработка, включающая в себя совместную обработку разновременных данных или данных, полученных с различных датчиков

Обработка данных ДЗ в соответствии с мировой практикой подразумевает несколько уровней обработки, представленных в табл. 2.1. В общем случае обработка данных дистанционного зондирования включает три этапа: предварительную обработку; первичную обработку; вторичную (тематическую) обработку. На первом этапе, после приема спутниковых данных, записи их на магнитный носитель и выполнение необходимых декодирующих и корректирующих операций, происходит преобразование данных (с учетом калибровок), переданных с космического аппарата, непосредственно в изображение или космический снимок (например, синтез радиолокационных изображе-

ний из радиоголограмм, переданных по радиолинии), а также преобразование их в форматы, удобные для последующих видов обработки.

На втором этапе проводят радиометрические и геометрические преобразования (коррекцию) для исправления радиометрических и геометрических искажений, вызванных нестабильностью работы космического аппарата (КА) и датчика, а также географическую привязку изображения с наложением на него сетки координат, изменение масштаба изображения и представление изображения в необходимой географической проекции (геокодирование). Первый и второй этапы обработки в настоящее время могут быть выполнены на борту КА.

Третий этап — тематическая обработка — включает как цифровой анализ с применением статистических методов обработки (кластерный анализ, методы выделения признаков и классификацию для количественных оценок и т. п.), так и визуальное дешифрирование и интерпретацию. Тематическую обработку целесообразно проводить в интерактивном или полностью автоматизированном режиме. Для этих целей разработаны различные виды программного обеспечения тематической обработки с использованием специализированной компьютерной техники, в основном зарубежного производства.

Радиометрические преобразования используются для перевода необработанных мультиспектральных данных в радиометрически корректное и совместимое множество измерений. Часто эти преобразования используются для коррекции определенных типов искажений в системе сбора данных, таких как некомпенсированная нестабильность электронных устройств. Иногда вводится поправка на изменения параметров среды во время зондирования (состояние атмосферы, изменение освещенности и т.п.). Радиометрические преобразования используются также для абсолютной калибровки данных, т.е. для преобразования интенсивности изображения, измеренной датчиком, в значение измеряемых физических параметров (например, перевод цвета изображения в значения содержания хлорофилла).

С помощью геометрических преобразований изменяют геометрию изображения либо корректируют геометрические искажения, вносимые аппаратурой ДЗ. Искажения возникают в результате ограниченности разрешения каждой системы ДЗ, а также вследствие дефектов или погрешностей в системе регистрации данных. Геометрические искажения могут быть устранены или существенно уменьшены с помощью соответствующей обработки, если имеются данные, характеризующие положение датчика в пространстве в момент съемки и геометрию подстилающей поверхности. «Совмещение» и «наложение данных» — это термины, которыми обозначаются процессы геометриче-

ского выравнивания одного множества данных относительно другого. Например, одно множество может быть данными ДЗ океана, другое — карты. Заметим, что существует большое разнообразие данных, которые можно совместить или наложить друг на друга. Например, распределение данных ДЗ океана в виде изображения или снимка можно наложить на данные о подводной топографии, о контактных подспутниковых измерениях, о метеорологических параметрах и др. Масштабирование, преобразование проекций, исправление систематических искажений — процедуры, необходимые для получения изображения в нужном масштабе или географической проекции и для устранения различных искажений, возникших из-за нестабильности платформы КА.

Представление данных — один из важных видов обработки и анализа данных. Формы представления данных в значительной степени зависят от характера приложений и от используемой процедуры обработки. Сжатие и архивация данных является наиболее важным элементом обработки, так как в процедуре ДЗ приходится обрабатывать огромные потоки данных и хранить обработанную информацию. Путем уменьшения формата или объема данных в коммуникационных системах можно понизить требования к передаче, хранению и обработке данных, что в конечном итоге приводит к снижению стоимости системы обработки в целом.

Под улучшением изображений в широком смысле понимают процедуры улучшения любой разновидности данных, представленных в виде изображения, а в узком — процедуры, улучшающие визуальное восприятие данных, представленных в виде изображения. Все процедуры улучшения изображений могут быть полезны безотносительно того, действительно ли данные ДЗ должны быть визуализированы. Например, фильтрация, позволяющая улучшить выделение контуров или границ, может быть частью более сложной процедуры. Другие операции предназначены для уменьшения различных видов аппаратных шумов и тем самым могут быть использованы для улучшения последующего классификационного анализа.

Статистические методы применяют для распознавания тех или иных объектов ДЗ и классификации данных с помощью численных методов. Эти методы эффективны для количественных оценок в процедуре дистанционного зондирования. Результаты, полученные после обработки и анализа данных ДЗ, представляются в определенном виде и формате (таблицы, массивы данных, графики, схемы, карты).

На сегодня в системах обработки данных ДЗ стали стандартом рабочие станции и персональные компьютеры с высокоскоростными

процессорами и накопителями большой емкости, что предъявляет соответствующие требования к процедурам обработки данных. Разработано множество пакетов прикладных программ различного уровня для обработки данных ДЗ и изображений — от распространяемых бесплатно до дорогих.

2.5. Электронная библиотека космического мониторинга

При создании электронного архива данных дистанционного зондирования важно уже на этапе проектирования архива обеспечить его адекватную структуризацию, необходимую для эффективного извлечения наборов данных из архива. Структуризация электронного архива производится исходя из представлений о составе типовых запросов архивных данных. Опыт эксплуатации архивов космической информации показывает, что пользователи, как правило, запрашивают уровень представления данных, название проекта, в рамках которого получены данные, и название прибора (сенсора), показания которого включены в архив. Поэтому при создании архива данных дистанционного зондирования необходимо разделить его на сегменты (разделы), соответствующие различным уровням представления (обработки) данных, а в каждом из таких разделов выделить подразделы, которые содержат наборы данных, относящиеся к конкретному проекту и научному прибору (например, сенсору).

Эффективное разрешение информационных ресурсов и открытый доступ к пространственно распределенным экспериментальным данным базируются на использовании информационного сервиса глобальных сетей Интернет, т.е. на основе Web-технологий. С этой целью разрабатываются системы обращения со структурами метаданных, обеспечивающие сбор и распределение экспериментальных данных и результатов тематической обработки, при этом архив объединяется с региональными центрами геоэкологического мониторинга глобальной сетью Интернет. Важным элементом является разработка структуры интерфейса, архивации и сетевого обмена данными дистанционного зондирования. Это требует развития поисковых систем и реализации удаленного интерактивного доступа внешних пользователей по сети Интернет к экспериментальным данным и электронным каталогам обработки, предоставление пользователям возможности для интерактивного доступа к ним в режиме on-line.

Современной тенденцией в развитии программ исследования Земли из космоса является создание в ряде стран электронных библиотек космической информации. Эти национальные информационные

системы используют потоки спутниковых данных для решения разнообразных задач дистанционного зондирования, определяемых как научным сообществом, так и конкретными отраслями производственной деятельности. Например, в США для информационной поддержки своей национальной системы наблюдения Земли из космоса (EOS) NASA создало EOSDIS — разветвленную инфраструктуру сбора, архивирования и распространения спутниковых данных потребителям. Система EOSDIS сосредоточила огромные массивы геопространственных данных, получаемых со спутников ДЗЗ. Это создает серьезные проблемы при организации хранения и доступа к спутниковым данным, поскольку стандартные пакеты программ баз данных не могут их эффективно перерабатывать. Например, каждый кадр прибора ТМ спутника «Landsat» в шести спектральных каналах (разрешение — 30 м) и одним тепловом (разрешение — 120 м) покрывает площадь 170×185 квадратных километров. В результате объем такого кадра спутника «Landsat» достигает 400 Мбайт. Ежедневные объемы необработанных спутниковых данных ДДЗ, поступающие в систему EOSDIS, оцениваются в 480–490 Гбайт. Объем обработанных данных ДЗЗ в системе EOSDIS достигает 1600 Гбайт в сутки и более.

В России одним из развитых архивов данных дистанционного зондирования является Центр обработки и хранения космической информации ИРЭ РАН (ЦОХКИ ИРЭ РАН), созданный в первую очередь для информационной поддержки космической программы «Природа». ЦОХКИ проектировался, создавался и функционирует в настоящее время в оперативном режиме как полностью интероперабельная система с электронным архивом ДДЗ США — системой NASA EOSDIS V0. Поэтому для ИРЭ не существует проблемы доступа со стороны пользователей NASA, а также проблем информационного обмена с системой INFEO (Information on Earth Observations), которая представляет собой научный архив ДЗЗ, созданный Европейской Комиссией в период действия четвертой Рамочной программы. Анализ запросов по каталогам ЦОХКИ идет в рамках общего опроса (бродкаста) по системе EOSDIS. Разработка программного обеспечения спутниковой природно-ресурсной информации направлена на обеспечение в автоматическом режиме решения следующих задач: оперативное наблюдение Земли; тематическая обработка ДДЗ и наполнение оболочки электронного архива с целью изучения природных ресурсов Земли; геоэкологический мониторинг окружающей среды; оценка состояния экосистем космическими методами, обеспечение доступа к гидрометеорологической информации со всей поверхности Земли.

В процедуре геоэкологического мониторинга территории России одной из существенных проблем, возникающих при наблюдении больших по площади территорий, является необходимость согласования работы нескольких распределенных центров приема и обработки спутниковых данных. Важной проблемой также является организация такой системы доступа к данным, которая была бы максимально независимой от конкретных регионов, где эти данные приняты и обработаны. Указанные задачи могут быть решены различными способами с помощью глобальных компьютерных сетей Интернет.

При существующем в России уровне развития информационных технологий в процедуре спутникового мониторинга все большее значение приобретает принцип распределенной обработки данных. Перспективным оказывается поэтапное создание информационных систем мониторинга, при котором эффективное функционирование информационной системы начинается при создании лишь нескольких их узлов и элементов. Так, первым этапом создания системы доступа к спутниковой информации, принимаемой и обрабатываемой на разных наземных станциях, является разработка базового сервера в узле сети, имеющего развитые телекоммуникации. Информация на центральном (базовом) сервере обновляется различными региональными центрами с использованием даже низкоскоростных коммутируемых каналов. В то же время удаленные пользователи получают доступ по сети Интернет к спутниковым данным, полученным региональными центрами мониторинга. В структуре геоэкологического космического мониторинга, роль базового сервера принадлежит и ИРЭ РАН.

Региональные центры геоэкологического мониторинга и электронный архив спутниковых данных обеспечивают для удаленного пользователя доступ к информационным ресурсам космического экологического мониторинга по каналам Интернет с пропускной способностью 512 кбит/с, хранение информации в течение 15 лет, а также свободный доступ к системе поиска и заказа данных из архива по выделенному каналу емкостью 256 кбит/с.

Рассмотренная выше информационная система спутникового мониторинга не является единственной. В ИКИ РАН действует также система оперативного доступа к спутниковым данным, взаимодействующая с Росгидрометом, Росавиакосмосом и другими ведомствам. В последнее время информационные ресурсы развитой в России инфраструктуры спутниковой системы геоэкологического мониторинга вызывают повышенный интерес зарубежных исследователей. Улучшение доступа к российским космическим данным на основе Web- и Интернет-технологий стимулирует развитие ряда международных программ,

объединяющих информационные ресурсы в области мониторинга окружающей среды и уменьшения ущерба от природных и техногенных катастроф. Отметим, что участие в таких программах чрезвычайно важно также для синхронизации и объединения на основе глобальной сети Интернет деятельности региональных центров приема спутниковых данных и восстановления потенциала российской спутниковой системы.

Обобщенно в разделе рассмотрены различные аспекты разработки космических методов контроля экосистем и спутниковой системы геоэкологического мониторинга территории России, проблемы модернизации космического экологического мониторинга, связанные с развитием и внедрением наземной инфраструктуры мониторинга и Интернет-технологий в программы экологических и природно-ресурсных исследований методами дистанционного зондирования Земли. На современном этапе в процедуре геоэкологического мониторинга центральное место занимают проблемы создания национальных информационных ресурсов по экологическим и природно-ресурсным программам на основе методов исследования Земли из космоса. Рассмотрен анализ влияния сетевой среды и передовых информационных технологий на структуру электронной коллекции данных дистанционного зондирования. Показано, что учет этих факторов приводит к существенным изменениям самой инфраструктуры архивации и обмена данными геоэкологического мониторинга для возможно большего круга внешних пользователей. Отмечено, что электронный архив геоэкологического мониторинга является по существу цифровой библиотекой космической информации, общедоступен и ориентирован на максимально широкое использование. Использование гипертекстовых и интерактивных технологий приводит к тому, что статус архивных материалов совпадает со статусом текущих данных. Сокращается интервал между архивированием и доступом пользователя к данным. Архив мониторинга превратился в электронную коллекцию, максимально приближенную к моменту контроля экологических условий региона.

Активное построение архива спутниковых данных на базе компьютерных информационных технологий создает предпосылки к превращению электронной коллекции в место перераспределения и упорядочивания данных. Интернет обеспечивает ускоренную циркуляцию информации, что создает предпосылки для интеграции данных геоэкологического мониторинга территории России в мировую систему информационных ресурсов исследования Земли из космоса.

Глава 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ИЗ КОСМОСА

Дистанционные методы измерений достаточно давно и широко используются при исследованиях разнообразных явлений и процессов в различных областях науки и техники. Косвенные оптические методы измерений применяются в астрофизике, оптике и спектроскопии, молекулярной физике и т. д. Так, в астрофизике до недавнего времени практически всю экспериментальную информацию о различных объектах вселенной получали на основе интерпретации измерений электромагнитного излучения в различных областях спектра. Дистанционные методы имеют достаточно долгую историю и в метеорологии (анализ сумеречных явлений, проекторное зондирование).

Исследования общей циркуляции атмосферы и океана, анализ и прогноз погоды различной заблаговременности, изучение современных тенденций изменения климата Земли и контроль факторов, его определяющих, проблемы охраны окружающей среды, а также многочисленные потребности экономики требуют периодического получения разнообразной информации о параметрах физического состояния системы атмосфера — подстилающая поверхность в глобальном масштабе. Существующая и планируемая сеть прямых измерений, несмотря на постоянное ее совершенствование и расширение, не способна обеспечить глобальность наблюдений при разумных затратах на ее организацию и обслуживание. В настоящее время на земном шаре функционирует 800 станций радиозондирования (из них 650 в северном и 150 в южном полушариях). При этом на одну станцию радиозондирования приходится от 144000 до 390000 км² территории суши или водной поверхности.

Именно поэтому после запуска первого советского искусственного спутника Земли в 1957 г. начались интенсивные разработки дистанционных методов измерений и соответствующей аппаратуры для их реализации. Первый метеорологический спутник Земли (МСЗ) был запущен в 1962 г. И хотя стало возможным исследовать только глобальное поле облачности, этот первый космический эксперимент наглядно продемонстрировал огромные потенциальные возможности нового типа метеорологических наблюдений. В последующие годы в России, США и ряде других стран были запущены и успешно функционировали десятки различных МСЗ как оперативного, так и исследовательского характера, позволившие получить очень много разнообразной количественной информации о параметрах физического состояния системы атмосфера—подстилающая поверхность.

О современной роли спутниковых систем наблюдений наглядно говорит следующий перечень, характеризующий объем различной метеоинформации, получаемой и используемой ежедневно в прогностических целях: 2500 вертикальных профилей давления, температуры, влажности и скорости ветра по данным радиозондирования; 12000–16000 вертикальных профилей давления и температуры с полярных МСЗ; 2500 измерений скорости ветра с геостационарных спутников; 50000 наблюдений наземных метеостанций; 5500 наблюдений на кораблях и автоматических буях, включая температуру поверхности воды; 60000 измерений температуры поверхности воды со спутников.

Рассматриваемые дистанционные методы относятся к обратным задачам теории переноса излучения. Эти задачи сводятся к решению некорректных в классическом смысле интегральных уравнений Фредгольма 1–го рода. Для решения этих уравнений необходимо использовать специальные регуляризующие алгоритмы, а также располагать данными о ядре интегрального уравнения (или определять его в рамках регрессионного подхода к решению обратных задач). Ядро задачи определяется физико-математической моделью переноса излучения и количественными характеристиками взаимодействия излучения с системой атмосфера–подстилающая поверхность. Таким образом, в отличие от прямых методов измерений, для которых предварительная градуировка чувствительного элемента позволяет относительно легко получать требуемую информацию о состоянии объекта исследования, косвенные дистанционные методы измерений фактически включают в себя не только аппаратуру для измерений тех или иных характеристик полей излучения, но и совокупность алгоритмов и исходной (априорной) информации, используемой в этих алгоритмах для получения искомых параметров. Поэтому точность косвенных методов измерений, а следовательно, возможности и качество решения различных научных и прикладных задач зависят от следующих факторов:

- характеристик спутниковой аппаратуры для измерений уходящего излучения (области спектра, числа, положения, ширины спектральных каналов измерений, времени измерений, угловой апертуры, абсолютной и относительных погрешностей измерений и т. д.);
- качества и объема априорной информации о закономерностях переноса излучения, о количественных характеристиках взаимодействия излучения со средой и о параметрах физического состояния атмосферы и подстилающей поверхности;
- используемого алгоритма обращения радиационных измерений.

В связи с этим значительное внимание уделено математическим аспектам дистанционных методов зондирования и проблеме информативности измерений, выполняемых с помощью спутниковых наблюдательных систем.

3.1. Общая характеристика методов дистанционного зондирования

Многообразие как по физической природе, так и по пространственным и временным масштабам явлений и процессов в атмосфере и на ее подстилающей поверхности определяется с помощью измерительных средств, используемых для получения метеорологической информации. Многие из них были заимствованы из смежных областей науки, ряд других специально разработаны для метеорологического применения. Хотя в науке и технике существуют строгие терминологические стандарты различных типов измерений, в метеорологической литературе нашла распространение следующая классификация различных методов измерений.

Прямые измерения — измерения, в которых используются эталоны интересующих нас характеристик (величин) состояния окружающей среды. Это, например, измерения длин объектов с помощью эталонов расстояний или массы — с помощью эталонов массы и т. д. Можно отметить, что прямых измерений, в таком понимании, в метеорологии и физике атмосферы осталось мало.

Косвенные измерения — измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Это определение соответствует терминологическому стандарту, и при его широком толковании все рассматриваемые нами дистанционные методы измерений относятся к косвенным измерениям, как и такие традиционные измерения (часто называемые прямыми), как измерения температуры, влажности, скорости ветра, осуществляемые, например, с помощью радиозондов.

Локальные измерения — измерения, при которых датчик (как прямых, так и косвенных измерений) находится в непосредственном контакте с исследуемой средой.

Дистанционные измерения — измерения параметров физического состояния среды, осуществляемые на различных расстояниях от нее с помощью регистрации характеристик различных полей (гравитационных, электромагнитных, акустических и т. д.).

В соответствии с приведенной классификацией рассматриваемые нами методы измерений, основанные на регистрации различных характеристик электромагнитных полей, являются и косвенными и дистанционными. В дальнейшем для их обозначения будут использоваться оба термина. При этом их нельзя путать с «дистанционными» методами, при которых, например, датчик и регистрирующее устройство, соединенные проводами (или радиолинией), разнесены в пространстве.

Можно предложить целый ряд схем классификации дистанционных методов измерений, основанных на использовании различных признаков. Рассмотрим основные из них.

1. Классификация по природе поля:

- а) гравитационные методы;
- б) электрические и магнитные методы;
- в) методы электромагнитного (ЭМ) излучения;
- г) ядерные методы;
- д) акустические методы.

2. Классификация по источнику поля:

- а) пассивные методы.
- б) активные методы.

В первом случае измеряются естественные поля, присутствующие в природе вне всякой связи с самими измерениями (гравитационные поля Земли и планет; солнечное, тепловое и т. д. излучения; естественная радиоактивность и т. д.). Во втором случае используются искусственные источники, например, ЭМ излучения — лазеры, прожекторы, радиолокаторы.

Имеется целый ряд классификаций косвенных электромагнитных методов.

3. По области спектра:

- а) ультрафиолетового диапазона спектра;
- б) видимого диапазона спектра;
- в) инфракрасные;
- г) микроволновые.

4. По основному процессу взаимодействия (или генерации) излучения:

- а) прозрачности (поглощения);
- б) рассеяния;
- в) теплового излучения;
- г) рефракции.

5. По геометрии или положению измерительного прибора:

- а) наземные;

- б) самолетные и аэростатные;
- в) космические.

Эти типы классификаций можно детализировать. Например, методы рассеяния (4б) иногда подразделяют на методы релеевского рассеяния, методы аэрозольного рассеяния, методы комбинационного рассеяния и т.д.

В последнее десятилетие особое внимание уделялось разработке дистанционных методов, использующих измерения целого ряда характеристик электромагнитного излучения в различных областях спектра. К основным особенностям этих методов можно отнести следующие:

1. *Дистанционность*. Измерения осуществляются на различных расстояниях от исследуемого объекта. В случае спутниковых косвенных методов эти расстояния могут достигать тысяч километров.

2. *Отсутствие внешнего влияния на объект исследования*. Все пассивные косвенные методы в принципе не могут оказывать влияние на состояние изучаемого объема атмосферы, так как эти методы используют измерения характеристик естественных ЭМ полей, существующих вне зависимости от того, производятся измерения или нет. В большинстве случаев это справедливо и для активных косвенных методов, хотя для лазерных методов может наблюдаться и другая картина при значительных мощностях генерируемого излучения.

Отсутствие влияния на исследуемый объект – чрезвычайно ценное свойство косвенных методов. Оно особенно важно при исследованиях верхних разреженных слоев атмосферы, где сам измерительный прибор может стать источником значительных искажений.

3. *Однородность измерений*. Это свойство дистанционных измерений относится прежде всего к спутниковым измерениям, которые осуществляются с помощью одного или нескольких однотипных приборов.

4. *Высокая информативность*. С помощью косвенных методов измерений определяют большое количество параметров атмосферы и подстилающей поверхности (табл. 3.1). Использование спутников позволяет проводить измерения в глобальном и региональном масштабах с высокими периодичностью (геостационарные спутники в настоящее время осуществляют измерения каждые 20–30 мин) и пространственным разрешением. Пространственное разрешение измерений может варьировать в зависимости от метода и требований к получению необходимой информации от метров (лазерное зондирование) до километров и сотен километров (пассивные методы).

Таблица 3.1

**Основные физические параметры атмосферы и подстилающей
поверхности, измеряемые косвенными методами**

Параметры	Методы измерений	Область спектра
Температура атмосферы	Тепловое излучение Прозрачность атмосферы Лазерное зондирование Рефракция	ИК, МКВ ИК ИК ВМД, МКВ
Температура океана и суши	Тепловое излучение	ИК, МКВ
Газовый состав	Тепловое излучение Прозрачность атмосферы Рассеянное излучение Лазерное зондирование Рефракция	ИК, МКВ от УФ до МКВ от УФ до БИК от УФ до МКВ МКВ
Характеристики аэрозоля	Тепловое излучение Прозрачность атмосферы Рассеянное излучение Лазерное зондирование	ИК от УФ до БИВ от УФ до БИК от УФ до ИК
Характеристики облаков	Тепловое излучение Радиолокация Рассеянное излучение Прозрачность атмосферы Лазерное зондирование	ИК, МКВ МКВ ВИД, ИК МКВ ВИД, БИК, ИК
Влажность почв	Радиолокация Тепловое излучение Отраженное солн. излучение	МКВ, ИК МКВ ВИД
Ледовитость	Тепловое излучение	МКВ
Загрязнение почв и суши	Тепловое излучение Лазерное зондирование	ИК, МКВ От УФ до ИК
Снегозапас	Гамма-спектрометрия Тепловое излучение	ГИ МКВ
Поле ветра	Тепловое излучение Рассеянное излучение Прозрачность атмосферы Лазерное зондирование Радиолокация Акустическое зондирование	ИК, МКВ ВИД ВИД, БИК ВИД–ИК МКВ –
Давление и плотность	Рефракция	ВИД, МКВ
Морские течения	Тепловое излучение Радиолокация	ИК, МКВ МКВ

Условные обозначения: ВИД — видимая, ИК — инфракрасная, МКВ — микроволновая, УФ — ультрафиолетовая, БИК — ближняя инфракрасная, ГИ — гамма-излучение (области спектра).

Следует отметить, что косвенные методы характеризуются относительно высокой стоимостью (вследствие сложности специализированной аппаратуры и схем обработки данных), особенно в случае космических наблюдений. Однако высокая информативность косвенных измерений полностью окупает этот недостаток.

Физико-математические основы косвенных дистанционных методов измерений метеорологических величин. Исторически исследования в области теории переноса излучения были начаты с так называемых *прямых задач теории переноса*. В этом случае известными предполагались параметры физического состояния атмосферы и подстилающей поверхности (метеорологические величины F) и характеристики взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМ) со средой R (коэффициенты поглощения, излучения, рассеяния и т. д.). Ставилась задача определения характеристик поля излучения: интенсивностей, потоков, притоков ЭМ излучения и их зависимостей от пространственных, угловых, спектральных переменных.

В дальнейшем все большее значение начали приобретать *обратные задачи* теории переноса излучения. Решающим обстоятельством при этом было стремление использовать измерения характеристик полей излучения для получения новой информации о физических параметрах состояния атмосферы и поверхности Земли. Можно сформулировать два типа обратных задач теории переноса излучения. *Первый тип обратных задач*, к которому относятся рассматриваемые нами дистанционные методы измерений, можно сформулировать следующим образом:

- заданы (измерены) те или иные характеристики поля излучения J ;
- заданы (известны на основе предыдущих исследований) параметры взаимодействия излучения со средой R ;
- требуется определить те или иные метеорологические величины F .

В *обратных задачах второго типа* также предполагается, что измерены те или иные характеристики поля излучения J , но заданы параметры физического состояния среды F . При этом определению подлежат характеристики взаимодействия излучения со средой R . Хотя этот тип обратных задач не так часто используется в метеорологической практике, он давно плодотворно применяется в различных разделах физики при лабораторных исследованиях различных количественных характеристик взаимодействия излучения с газовой и конденсированной средой.

Таблица 3.2

Зависимости различных процессов взаимодействия от F

Процесс, характеристика	Определяющие параметры
Поглощение:	
молекулярное	Количество и природа поглощающих молекул, давление, температура
аэрозольное	Количество, форма, строение, физико-химические свойства аэрозольных частиц
Рассеяние:	
молекулярное	Количество молекул и их природа
аэрозольное	Количество, форма, строение, физико-химические свойства аэрозольных частиц
неупругое	Количество, природа молекул, температура
Тепловое излучение	Температура, количество излучающих молекул, давление
Рефракция	Количество и природа молекул
Отражение подстилающей поверхности	Физико-химические свойства, форма и структура подстилающей поверхности
Тепловое излучение подстилающей поверхности	Температура, физико-химические свойства, форма и структура подстилающей поверхности

Физической основой возможности извлечения информации о разнообразных метеорологических величинах F из измерений характеристик излучения J является хорошо известный факт, что величины J в той или иной мере зависят от F . В табл. 3.2 даны характеристики такой зависимости для различных процессов взаимодействия.

Для математической формулировки обратных задач используется аппарат теории переноса излучения или физическое рассмотрение диффузии квантов в атмосфере (например, метод пяти компонент в теории рассеяния, уравнение лазерной локации). Основной величиной, используемой при этом, является монохроматическая интенсивность излучения J_ν (или вектор Стокса, когда важную роль играет поляризация излучения), через которую можно выразить другие измеряемые характеристики излучения, в частности поток излучения, регистрируемый приборами на МСЗ (ν — частота или связанные с ней характеристики, длина волны или волновое число).

Уравнение переноса излучения в линейной оптике можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dJ_\nu}{ds} = -\alpha_\nu J_\nu + \alpha_\nu \bar{J}_\nu, \quad (3.1)$$

где ρ — плотность ослабляющей субстанции; α_ν — коэффициент ос-

лабления на единицу массы; J_v — функция источника; ds — элемент пути вдоль трассы распространения излучения. Формальное решение уравнения переноса (его интегральная форма) для граничного условия $J_v = J_v(0)$ при $s = 0$ можно представить в следующей форме:

$$J_v(s) = J_v(0) \exp \left[- \int_0^s \alpha_v(s') \rho(s') ds' \right] + \int_0^s \alpha_v(s') \bar{J}_v(s') \rho(s') \exp \left[- \int_{s'}^s \alpha_v(s'') \rho(s'') ds'' \right] ds'. \quad (3.2)$$

Конкретный вид коэффициента ослабления и функции источника зависят от физики процессов взаимодействия излучения со средой. Из уравнений (3.1) и (3.2) можно получить соотношения, соответствующие различным дистанционным методам. Например, для тепловой области спектра, полагая $\alpha_v = k_v$, где k_v — коэффициент поглощения, и $\bar{J}_v(s) = B_v[T(s)]$, где $B_v[T(s)]$ — функция пропускания Планка, интенсивность уходящего излучения в надир для плоскопараллельной атмосферы записывается в виде

$$J_v = B_v[T(0)] \exp \left[- \int_0^\infty k_v(z) \rho(z) dz \right] + \int_0^\infty k_v(z) B[T(z)] \rho(z) \exp \left[- \int_0^\infty k_v(z') \rho(z') dz' \right] dz, \quad (3.3)$$

где Z — высота.

Измеряя угловые или спектральные зависимости характеристик теплового излучения на МСЗ, можно ставить задачи по определению температуры подстилающей поверхности $T(0)$, вертикального профиля температуры $T(z)$, вертикальных профилей содержания поглощающих веществ $\rho(z)$ и т.д. Аналогичным образом можно сформулировать обратные задачи для других областей спектра, других моделей атмосферы и геометрии измерений.

3.2. Основные понятия теории излучения

3.2.1. Электромагнитное излучение и его трансформации

Обычно источником электромагнитного излучения в дистанционном зондировании является Солнце или подстилающая поверхность (рис. 3.1). Излучение Солнца рассеивается и поглощается атмосферой Земли, а также отражается от земной поверхности и частично поглощается ею. Отраженное излучение несет информацию о свойствах участка подстилающей поверхности (объекта), на котором произошло отражение. Это излучение собирается приемной системой спутника, трансформируется в электрический сигнал и передается на Землю для дальнейшей обработки. Такова очень упрощенная схема пассивного дистанционного зондирования.

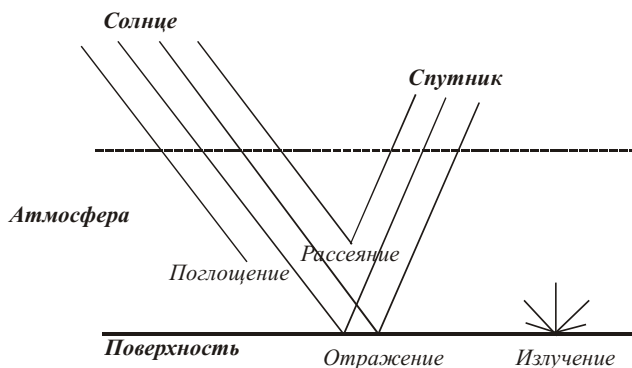


Рис. 3.1. Трансформации электромагнитного излучения в дистанционном зондировании

В действительности происходящие процессы неизмеримо сложнее. Во-первых, солнечное излучение рассеивается и поглощается атмосферой как на пути к земной поверхности, так и после взаимодействия с интересующим нас объектом, находящимся на поверхности Земли, на пути излучения от объекта до приемного устройства спутника. Во-вторых, рассеянное в атмосфере излучение (не взаимодействовавшее с интересующим нас объектом) также собирается приемной системой в случае, когда излучение рассеяно в направлении визирования спутника. Таким образом, мы имеем помехи двух видов — ослабление (поглощение и рассеяние) излучения, взаимодействовавшего с нашим объектом, в атмосфере и прием излучения, никак с объектом не взаимодействовавшего.

Описанные проблемы целиком относятся лишь к дистанционному зондированию в видимой области спектра. Вклад рассеяния в искажение излучения в инфракрасной области спектра незначителен, там основную роль играет поглощение. Кроме того, источником излучения в инфракрасной области спектра является земная поверхность и излучение искажается лишь на пути следования от поверхности до приемного устройства спутника. Поэтому, прежде чем обсуждать возможности конкретных приборов, следует рассмотреть особенности взаимодействия электромагнитного излучения с атмосферой и с подстилающей поверхностью в разных диапазонах спектра.

Электромагнитное излучение проявляется как свет, который мы видим, как тепло, которое мы ощущаем, и как радиоволны, которые принимают наши радиотелевизионные приемники. Электромагнитное излучение характеризуется двумя взаимосвязанными величинами —

длиной волны (λ) и частотой (ν). Связь между этими величинами определяется формулой

$$\lambda = c/\nu,$$

где c — скорость света в вакууме.

Если известна одна из этих величин, другая может быть легко рассчитана. Чем короче длина волны, тем больше частота и наоборот, чем меньше частота, тем больше длина волны. Длины волн в диапазоне, используемом для дистанционного зондирования, обычно измеряются в нанометрах (нм), в микрометрах (мкм) или в сантиметрах (см). Частота измеряется в герцах (Гц). Обычно, сравнительно короткие длины волн (меньше сантиметра) характеризуют длиной волны, а более длинные — частотой.

Электромагнитное излучение всех возможных длин волн принято называть электромагнитным спектром. В этом спектре выделяются следующие диапазоны (рис. 3.2): гамма-диапазон, рентгеновский, ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный, радиодиапазон. Некоторые из этих диапазонов в свою очередь подразделяются на поддиапазоны. Наш глаз может воспринимать очень малую часть электромагнитного излучения, которую принято называть видимым диапазоном электромагнитного спектра. Глаз может воспринимать различные длины волн в пределах видимого диапазона, а также интенсивность (яркость) излучения в этом диапазоне. Это позволяет получать около 90 % всей информации, обрабатываемой мозгом человека. Большая часть электромагнитного спектра человеческим глазом не воспринимается, но иногда излучение, не видимое глазом, может ощущаться другими органами чувств человека. Например, инфракрасное излучение воспринимается нашей кожей как тепло.

Приборы дистанционного зондирования (сенсоры) могут принимать излучение в существенно более широком диапазоне электромагнитного спектра (рис. 3.2) и, таким образом, предоставлять колоссальные объемы информации о состоянии окружающей среды. Основная проблема здесь состоит в создании таких алгоритмов обработки спутниковых данных, которые позволили бы извлечь из данных заложенную в них информацию. Двумя важнейшими источниками электромагнитного излучения, принимаемого пассивными приборами дистанционного зондирования, являются Земля и Солнце. Солнечное излучение генерируется термоядерными реакциями, происходящими на Солнце, причем 99% излученной энергии сосредоточено в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра.



Рис. 3.2. Спектральные диапазоны спутниковых сенсоров

Спектр излучения Солнца достаточно хорошо моделируется спектром излучения абсолютно черного тела при температуре около $5,780^\circ\text{K}$. Представление об этом спектре можно получить из рис. 3.3 (буквой *B* обозначен видимый диапазон электромагнитного спектра). Поверхность Земли излучает большую часть электромагнитной энергии в диапазоне длин волн от 3,0 до 1000 мкм и спектр этого излучения приблизительно совпадает со спектром абсолютно черного тела при температуре 255°K (рис. 3.3).

В действительности соотношение энергий, обусловленных Солнцем и Землей, в спектре излучения, принимаемом спутниковыми приборами, отлично от изображенного на рис. 3.3. Это связано с разными расстояниями от спутника до Земли и Солнца. Поэтому начиная с длин волн порядка 3–4 мкм излучение Земли приходится учитывать в принимаемом сигнале, а при больших длинах волн принимаемые сигналы пассивных спутниковых приборов в основном обуславливаются излучением поверхности Земли. Электромагнитное излучение с разными длинами волн по-разному взаимодействует с атмосферой и с подстилающей поверхностью. Приборы, установленные на спутниках, принимают электромагнитное излучение в четырех диапазонах спектра — ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и микроволновом. Границы этих диапазонов представлены в табл. 3.3.

Рассмотрим кратко особенности этих диапазонов. *Ультрафиолетовая* часть спектра включает наиболее короткие длины волн, используемые в дистанционном зондировании. Ультрафиолетовое излучение генерируется Солнцем, и оно было бы весьма опасно для живых существ, если бы большая часть его не поглощалась земной атмосферой — кислородом и озоном. В ультрафиолетовом диапазоне спектра

традиционно выделяют 3 поддиапазона (*A*, *B* и *C*): *A* — от 320 до 400 нм, *B* — от 295 до 320 нм и *C* — короче 295 нм.

Излучение черного тела,

Вт·см⁻³

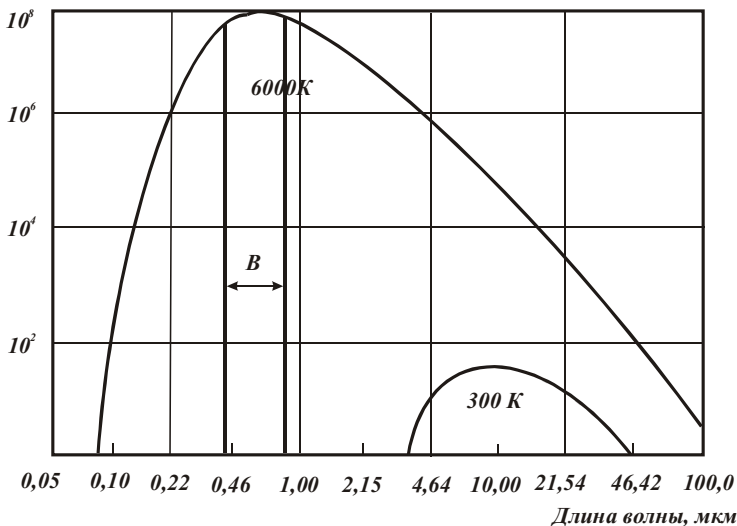


Рис. 3.3. Излучение абсолютно черного тела при $T = 6000^\circ\text{K}$ и 300°K

Большая часть ультрафиолетового излучения из поддиапазона *A* не поглощается ни кислородом, ни озоном атмосферы и достигает поверхности Земли. Ультрафиолетовое излучение из поддиапазона *B* поглощается озоном и то, какая его часть достигнет поверхности, зависит от содержания озона в атмосфере. И, наконец, ультрафиолетовое излучение из поддиапазона *C* поглощается и озоном, и кислородом атмосферы и поверхности Земли достигает очень малая часть излучения из этого поддиапазона.

Свет, который может воспринимать наш глаз, принадлежит к *видимой* части электромагнитного спектра. В этой же части спектра (от 0,4 до 0,7 $\mu\text{м}$) Солнце излучает максимальное количество энергии. Наиболее длинные волны из видимой части электромагнитного спектра воспринимаются как красный свет, а наиболее короткие — как фиолетовый. То, что мы видим окружающие нас предметы окрашенными в разные цвета, определяется различными коэффициентами поглощения и отражения для квантов различной длины волны. Особенности поглощения и рассеяния излучения в видимой части электромагнитного спектра будут рассмотрены в следующем разделе.

Таблица 3.3

Диапазоны спектра

Спектр	Диапазон
Ультрафиолетовый	0,1 нм – 0,4 мкм
Видимый	0,4 мкм – 0,7 мкм
Инфракрасный	0,7 мкм – 1000 мкм
Микроволновый	1000 мкм – 1000000 мкм (0,001 м – 1 м)

Следующий спектральный диапазон, представляющий интерес для дистанционного зондирования, называется *инфракрасным* (ИК) и простирается от 0,7 мкм до 1000 мкм. Инфракрасный диапазон подразделяется на два поддиапазона в зависимости от радиационных свойств излучения каждого поддиапазона. В первом поддиапазоне, который называется ближний ИК (0,7–3,0 мкм), инфракрасное излучение представляет собою отраженное от земной поверхности излучение, источником которого является Солнце. В дистанционном зондировании излучение этого диапазона используется так же, как излучение видимого диапазона, оно подвержено тем же искажениям в атмосфере. Во втором поддиапазоне, который называется дальним или тепловым ИК (3,0–1000 мкм), источником излучения является поверхность Земли и излучает электромагнитное излучение в виде тепла. Если излучение ближнего ИК диапазона при прохождении через атмосферу участвует как в процессе рассеяния, так и в процессе поглощения, то излучение дальнего ИК диапазона практически подвержено лишь поглощению в атмосфере.

Еще более длинноволновое излучение называется *микроволновым* и занимает диапазон от 0,1 см до 1 м. Излучение этого типа еще меньше рассеивается в атмосфере, и оно может даже проникать сквозь сравнительно мощную облачность, туман. Это позволяет исследовать поверхность Земли в любую погоду — днем и ночью. Так же, как для теплового ИК излучения, источником микроволнового излучения являются различные объекты на поверхности земли и моря, а также атмосфера.

3.2.2. Взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой

Излучение, регистрируемое приборами дистанционного зондирования, должно пройти через атмосферу Земли прежде, чем оно достигнет спутника. Все компоненты атмосферы: атомы, молекулы, частицы и т.п. — могут взаимодействовать с электромагнитным

излучением, когда оно распространяется в атмосфере. Главные эффекты такого взаимодействия — *рассеяние* и *поглощение*. Вероятность рассеяния или поглощения, с одной стороны, зависит от длины волны излучения, а с другой от сорта и размера атома, молекулы или иной вовлеченной в процесс взаимодействия частицы.

Рассеяние происходит, когда аэрозольные частицы или газовые молекулы, которые присутствуют в атмосфере, взаимодействуют с распространяющимся излучением и вызывают его отклонение от первоначального пути, но длина волны остается при этом неизменной. Степень рассеяния излучения зависит от нескольких факторов. Наиболее важными из них являются: соотношение между длиной волны излучения и размером частицы, количество рассеивающих объектов на пути излучения и длина пути излучения через атмосферу. Мы можем разделить все процессы рассеяния на два различных типа, свойства которых рассматриваются ниже.

Релеевское рассеяние происходит, когда материальные частицы малы в сравнении с длиной волны излучения. Этот тип рассеяния обычно проявляется для излучения со сравнительно большой длиной волны. Рассеяние происходит на мелких аэрозольных частицах или, чаще, на флуктуациях молекул кислорода и азота, составляющих атмосферу. Релеевское рассеяние — доминирующий механизм рассеяния в верхних слоях атмосферы. Когда излучение проходит через атмосферу, более короткие длины волн видимого диапазона спектра, которые воспринимается глазом как синие, рассеиваются сильнее, чем красные. Это обстоятельство обуславливает синий цвет дневного неба.

Рассеяние Ми встречается, когда материальные частицы имеют примерно тот же самый размер, как длина волны излучения. Частицы пыли и дыма, сконденсировавшийся водяной пар и другие аэрозоли участвуют в этом типе рассеяния излучения. Это рассеяние происходит обычно в нижних слоях атмосферы, где достаточно крупные аэрозольные частицы присутствуют в большем количестве, чем в верхних слоях атмосферы. Характерным проявлением рассеяния Ми является радуга, появление которой обусловлено рассеянием солнечного излучения на капельках воды.

Поглощение — другой основной механизм взаимодействия электромагнитного излучения с атмосферой. В отличие от рассеяния поглощение полностью обусловлено присутствием в атмосфере молекул, способных поглощать энергию в различных диапазонах спектра. В некоторых случаях поглощающие молекулы остаются практически неизменными после взаимодействия с излучением, но в других случа-

ях молекулы меняются, теряя, например, часть своих атомов. Озон, кислород, углекислый газ и водяной пар — четыре компонента атмосферы, которые ответственны за поглощение излучения.

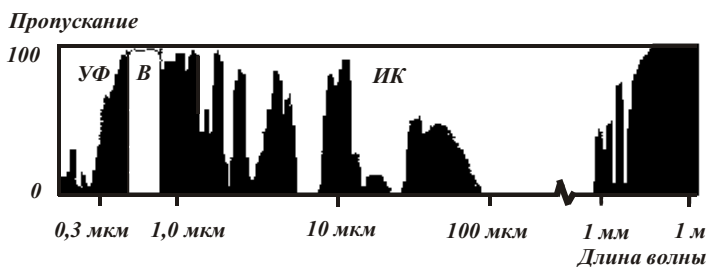


Рис. 3.4. Спектр пропускания атмосферы

На рис. 3.4 представлен спектр пропускания атмосферы в зависимости от длины волны. Когда пропускание равно нулю, это означает, что солнечное излучение с такой длиной волны не достигает поверхности Земли, полностью поглощаясь в атмосфере. Молекулы *кислорода* в верхних слоях атмосферы поглощают излучение в рентгеновской области спектра и коротковолновое (до 0,3 мкм) ультрафиолетовое излучение. Такое излучение является чрезвычайно вредным для жизни на планете, так как может воздействовать на клетки живых организмов, вызывая мутации и подобные нежелательные явления. Молекулы *кислорода* в этом процессе распадаются на отдельные атомы кислорода. Этот процесс происходит в самых высочайших слоях, которые при этом обогащаются активными атомами кислорода. В более низких слоях атмосферы, до которых жесткое коротковолновое излучение доходит уже сильно ослабленным, отдельные атомы кислорода могут объединяться с молекулами кислорода и формировать молекулы озона.

Озон поглощает излучение в средней части ультрафиолетовой области спектра, защищая нас от того вредного излучения, которое осталось не поглощенным молекулами кислорода в более высоких слоях атмосферы. После поглощения излучения молекула озона распадается на атом кислорода и молекулу кислорода, но атом кислорода обычно повторно объединяется с другой молекулой кислорода, создавая при этом новую молекулу озона. Относительно недавно посредством дистанционного зондирования были обнаружены резкие уменьшения концентрации озона (озоновые дыры). Поскольку озон поглощает тоже достаточно вредную для живых существ часть электромагнитного излучения, уменьшение концентрации озона привлекло внимание общественности. Был создан ряд специальных датчиков дистанционного зондирования для озоновых измерений и

организовано постоянное наблюдение за изменениями концентрации атмосферного озона.

Углекислый газ является одним из парниковых газов. Парниковые газы пропускают электромагнитное излучение в видимой области спектра, но интенсивно поглощают излучение в инфракрасной области, что, во-первых, приводит к некоторому повышению температуры атмосферы, а во-вторых, к возвращению части поглощенного излучения обратно к поверхности Земли. Увеличение концентрации углекислого газа рассматривается как возможная причина глобального потепления. *Водяной пар* — атмосферный газ, который сильно поглощает излучение в инфракрасной области электромагнитного спектра (между 1 и 22 мкм). Наиболее высокая концентрация водяного пара наблюдается в нижних слоях атмосферы, причем эта концентрация сильно меняется от места к месту и от одного времени года к другому. Например, воздушная масса над пустыней содержит небольшое количество водяного пара, в то время как в тропиках наблюдаются высокие его концентрации.

Перечисленные атмосферные газы поглощают электромагнитную энергию в определенных областях спектра, и это определяет, какие части электромагнитного спектра можно использовать для целей дистанционного зондирования. Например, атмосфера почти непрозрачна к электромагнитному излучению в большей части инфракрасной области спектра. Другие области, в которых поглощение не существенно, называются «окнами прозрачности». Большинство инструментов (сенсоров) дистанционного зондирования измеряют излучение в одном или нескольких окнах прозрачности. Они ориентированы в основном на исследование подстилающей поверхности. Некоторые приборы на метеорологических спутниках измеряют поглощение газов, например озона и они настраиваются на такие длины волн, где поглощение изучаемых газов максимально.

3.3. Теория излучения. Уравнение переноса

3.3.1. Основные законы излучения

Основные законы излучения подробно рассмотрены в курсе физической метеорологии. Поэтому рассмотрим основные понятия, значение которых необходимо при выводе и анализе уравнения переноса излучения. Важную роль в теории переноса излучения играет модель идеального излучателя (поглотителя) — абсолютно *черного тела*

(АЧТ). Если ввести *коэффициент поглощения* электромагнитного излучения

$$\alpha = \Phi_{\text{погл}} / \Phi_{\text{пад}},$$

где $\Phi_{\text{пад}}$ — поток (мощность) падающего на тело излучения, $\Phi_{\text{погл}}$ — та часть из этого потока, которая телом поглотилась, а также *коэффициент отражения*

$$\beta = \Phi_{\text{отр}} / \Phi_{\text{пад}},$$

где $\Phi_{\text{отр}}$ — поток отраженного телом излучения, то для АЧТ эти коэффициенты соответственно равны

$$\alpha_{\text{АЧТ}} = 1, \quad \beta_{\text{АЧТ}} = 0.$$

Способность тела испускать электромагнитное излучение определяется его *излучательной способностью* ε . Для любого тела, согласно *закону излучения Кирхгофа*, его излучательная способность ε равна его коэффициенту поглощения α при заданной температуре T и длине волны λ :

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T).$$

Излучение АЧТ превышает излучение любых других тел при данной длине волны и температуре. Его излучательная способность $\lambda_{\text{АЧТ}}$ (подобно коэффициенту поглощения) равна единице.

Реальные тела — не черные, их излучательная способность всегда меньше единицы. При одной и той же температуре потоки излучения, испускаемые реальными (Φ) и абсолютно черными ($\Phi_{\text{АЧТ}}$) телами, связаны соотношением $\Phi = \Phi_{\text{АЧТ}}$.

Спектральную плотность, или *спектральную яркость*, излучения АЧТ как функцию температуры и длины волны описывает закон Планка:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/k\lambda T} - 1}. \quad (3.4)$$

Здесь $B(\lambda, T)$ — мощность излучения, приходящаяся на единицу площади, единицу длины волны и единицу телесного угла, измеряется в $\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ — постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света в вакууме, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана.

Если вместо длины волны λ использовать частоту $\nu = c/\lambda$, то функция Планка запишется в виде

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (3.5)$$

При повышении температуры мощность излучения возрастает, а ее максимум сдвигается в сторону меньших длин волн.

Положение максимума мощности излучения можно определить из выражения (3.4) обычным образом, приравняв к нулю первую производную от $B(\lambda, T)$ по λ :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{4,97} \frac{hc}{kT} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot K}{T} = \frac{2898 \text{ мкм} \cdot K}{T},$$

что представляет закон смещения Вина.

Максимум излучения земной поверхности при $T = 233 \text{ К}$ приходится на $\lambda = 12,4 \text{ мкм}$, при $T = 273 \text{ К}$ — на $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ и при $T = 313 \text{ К}$ — на $\lambda = 9,26 \text{ мкм}$. Максимум излучения Солнца ($T = 6000 \text{ К}$) приходится на $\lambda = 0,483 \text{ мкм}$ (синий цвет).

Рассмотрим две важные аппроксимации функции Планка. На высоких частотах, когда $h\nu \gg kT$, можно пренебречь единицей в знаменателе (3.5) по сравнению с экспонентой и получить формулу Вина

$$B(\lambda, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-h\nu/kT},$$

согласно которой яркость убывает до нуля по показательному закону. В этой области частот зависимость яркости от температуры очень сильна: на фиксированной частоте значение функции $B(\nu, T)$ быстро возрастает с повышением температуры.

В СВЧ диапазоне энергия квантов электромагнитного излучения мала, $h\nu \ll kT$ и знаменатель в (3.5) может быть записан в виде

$$e^{h\nu/kT} - 1 \approx h\nu/kT.$$

В результате имеем формулу Рэлея—Джинса

$$B(\nu, T) = \frac{2\nu^2 kT}{c^2} = \frac{2kT}{\lambda}.$$

В области частот, где справедлива формула Рэлея—Джинса, спектральная яркость возрастает от нуля пропорционально квадрату частоты. При заданной частоте яркость $B(\nu, T)$ пропорциональна температуре. Это, пожалуй, самая важная особенность аппроксимационного выражения Рэлея—Джинса. Таким образом, от 20 до 21 К изменение яркости будет таким же, как и при нагревании от 300 до 301 К (если яркость измерять в пределах узкой полосы частот вокруг ν).

При одной и той же температуре T яркость любого реального тела на частоте ν , которая называется *спектральной яркостью* и в дальнейшем обозначается как $D(\nu, T)$, меньше яркости АЧТ. Такую же спектральную яркость будет иметь АЧТ, нагретое до так называемой *яркостной температуры* $T_{\text{я}}$.

По своему физическому смыслу яркостная температура излучения есть температура АЧТ, спектральная яркость которого равна

наблюдаемой. Для АЧТ значения $T_{\text{я}}$ и T совпадают, тогда как для всех реальных тел $T_{\text{я}} < T$.

Исходя из определения $T_{\text{я}}$, приравняв величину $D(\nu, T)$ к спектральной яркости АЧТ $B(\nu, T)$, в соответствии с (3.5) получим

$$D(\nu, T) = B(\nu, T_{\text{я}}) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT_{\text{я}}} - 1},$$

откуда после нескольких преобразований находим

$$T_{\text{я}}(\nu) = \frac{h\nu/k}{\ln[1 + 2h\nu^3/D(\nu, T)c^2]}. \quad (3.6)$$

Это соотношение может служить определением яркостной температуры. При использовании вместо (3.5) ее аппроксимации (формулы Вина или формулы Рэлея–Джинса) можно получить соответствующие аппроксимации и для яркостной температуры. В частности, для СВЧ диапазона из формулы Рэлея—Джинса следует

$$T_{\text{я}}(\nu) = \frac{D(\nu, T)c^2}{2k\nu^2}.$$

Значение $T_{\text{я}}(\nu)$, определенное по этому соотношению, обычно называют радиояркостной температурой.

В тех же единицах, что и спектральная яркость, измеряется *спектральная интенсивность* электромагнитного излучения $I(\nu, T)$. Однако между интенсивностью $I(\nu, T)$ и яркостью $B(\nu, T)$ есть различие: яркость определяется количеством энергии, *излучаемой с поверхности источника*, а интенсивность — количеством энергии, *проходящим* через некоторую площадку, расположенную на пути электромагнитных волн. Так же, как и спектральная яркость, спектральная интенсивность электромагнитного излучения $I(\nu, T)$ может быть однозначно описана с помощью яркостной температуры $T_{\text{я}}(\nu)$. Яркостная температура, соответствующая спектральной интенсивности излучения, по-прежнему определяется выражением (3.6) или его аппроксимациями, только значение $D(\nu, T)$ заменяется на $I(\nu, T)$.

3.3.2. Вывод уравнения переноса излучения

В общем случае при выводе уравнения переноса излучения в среде необходимо учитывать взаимодействие радиации со средой, проявляющееся в процессах поглощения, излучения и рассеяния. Точное количественное описание всех этих процессов для различных природных сред представляет собой довольно сложную задачу. Поэтому в

дальнейшем ограничимся выводом уравнения переноса излучения при ряде упрощающих предположений:

- поле излучения стационарно, а само излучение монохроматично;
- можно не учитывать поляризацию излучения и влияние рефракции.

Возьмем луч направления r и рассмотрим элемент среды в виде цилиндра единичного сечения, ось которого совпадает с направлением луча (рис. 3.5).

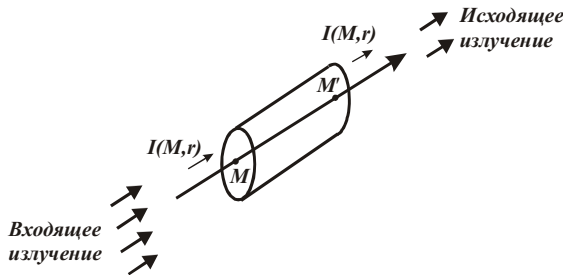


Рис. 3.5. Распространение излучения

Пусть луч пересекает перпендикулярные ему основания в точках M и M' , находящихся друг от друга на расстоянии ds . Интенсивность излучения в этих точках равна $I_\lambda(M, r)$ и $I_\lambda(M', r)$ соответственно.

В общем случае изменение интенсивности на пути ds может быть представлено как

$$I_\lambda(M', r) = I_\lambda(M, r) + \frac{\partial I_\lambda}{\partial s} ds. \quad (3.7)$$

Изменение интенсивности излучения на величину

$$I_\lambda(M', r) - I_\lambda(M, r) = \Delta I_\lambda \quad (3.8)$$

обусловлено следующими физическими процессами: истинным поглощением — энергия квантов переходит во внутреннюю энергию (химическую и энергию возбуждения атомов и молекул); истинным излучением — энергия возбужденных атомов и молекул и химическая энергия переходят в излучение; рассеянием — меняется направление распространения квантов при взаимодействии электромагнитной волны с флуктуациями плотности молекул, аэрозольными частицами, гидрометеорами.

Произведем количественное описание влияния указанных процессов на изменение интенсивности излучения при переходе от точки

M к точке M' . При этом будем предполагать, что изменение интенсивности пропорционально ее первоначальному значению, пройденному пути и плотности среды.

1. Уменьшение интенсивности излучения вследствие поглощения энергии может быть выражено как

$$I_{\lambda}^{(1)} = -k_{\lambda}(M)I_{\lambda}(M, r)\rho(M)ds,$$

где $\rho(M)$ — плотность среды в точке M , $k_{\lambda}(M)$ — *массовый коэффициент поглощения* среды в этой же точке.

2. Увеличение интенсивности излучения за счет излучения рассматриваемым элементом среды в направлении r

$$I_{\lambda}^{(2)} = \eta_{\lambda}(M)\rho(M)ds,$$

где $\eta_{\lambda}(M)$ — *массовый коэффициент излучения* среды в точке M на волне λ .

3. Уменьшение интенсивности излучения вследствие рассеяния электромагнитного излучения рассматриваемым элементом среды

$$I_{\lambda}^{(3)} = -\sigma_{\lambda}(M)I_{\lambda}(M, r)\rho(M)ds,$$

где $\sigma_{\lambda}(M)$ — *массовый коэффициент рассеяния*.

4. Увеличение интенсивности излучения $I_{\lambda}(M', r)$ благодаря процессу рассеяния обусловлено присоединением части рассеянного в направлении r излучения от лучей всевозможных направлений, проходящих через рассматриваемый элементарный цилиндр. Рассмотрим луч произвольного направления r' с интенсивностью $I_{\lambda}(M, r')$, проходящий через элемент среды. Изменение интенсивности, обусловленное рассеянием, составит $\sigma_{\lambda}(M)I_{\lambda}(M, r')\rho(M)ds$.

Поскольку рассеяние излучения произойдет во всех направлениях, в том числе и в направлении r , то из общей рассеянной энергии некоторое ее количество, равное

$$\frac{1}{4\pi}\sigma_{\lambda}(M)I_{\lambda}(M, r')f_{\lambda}(M, r', r)\rho(M)ds,$$

увеличит интенсивность излучения, распространяющегося в направлении r . Так как направление r' было выбрано произвольно, то общее увеличение интенсивности можно найти, интегрируя последнее выражение по всем возможным направлениям:

$$\Delta I_{\lambda}^{(4)} = \frac{\sigma_{\lambda}(M)}{4\pi} \int_{\Omega} I_{\lambda}(M, r')f_{\lambda}(M, r', r)\rho(M)dsd\Omega.$$

В двух последних выражениях функция f_{λ} есть *индикатриса рассеяния*. Связанная с ней величина $f_{\lambda}(M, r', r)/4\pi$ равна вероятности того, что квант излучения, распространяющийся в направлении r' , в

точке M будет рассеян средой в направлении r в единицу телесного угла.

Подставляя в левую часть уравнения (3.8) ее значение из (3.7), заменяя правую часть суммой слагаемых $\Delta I_{\lambda}^{(i)}$ ($i = 1, \dots, 4$) и деля левую и правую части полученного уравнения на $\rho(M)ds$, будем иметь (опуская в ряде мест M)

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial S} = \eta_{\lambda} - (k_{\lambda} + \sigma_{\lambda}) I_{\lambda} + \frac{\sigma_{\lambda}}{4\pi} \int_{\Omega} I_{\lambda}(M, r') f_{\lambda}(M, r', r) d\Omega, \quad (3.9)$$

где суммарное значение коэффициентов поглощения и рассеяния, т. е. величина $\beta_{\lambda} = k_{\lambda} + \sigma_{\lambda}$ есть массовый коэффициент ослабления.

Предполагая, что в точке M среды выполняются условия термодинамического равновесия (т. е. в среде выполняются условия так называемого локального термодинамического равновесия), воспользуемся следствием из сформулированного в общем виде закона Кирхгофа, согласно которому отношение коэффициентов излучения и поглощения равно функции Планка:

$$\eta_{\lambda}(M) / k_{\lambda}(M) = B_{\lambda}(M),$$

где $B(M)$ — значение функции Планка в точке M среды, т. е. $B[\lambda, T(M)]$. Выражая из последнего равенства значение $\eta_{\lambda}(M)$ и подставляя его в уравнение (3.9), находим

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial I_{\lambda}}{\partial S} = k_{\lambda} B_{\lambda} - (k_{\lambda} + \sigma_{\lambda}) I_{\lambda} + \frac{\sigma_{\lambda}}{4\pi} \int_{\Omega} I_{\lambda}(M, r') f_{\lambda}(M, r', r) d\Omega. \quad (3.10)$$

Полученное соотношение и есть *уравнение переноса* электромагнитного излучения. Дальнейшие преобразования уравнения переноса излучения связаны с введением дополнительных предположений о характере взаимодействия излучения со средой или о свойствах самой среды. Ключевое значение при этом приобретает вопрос о необходимости учета эффектов рассеяния.

3.3.3. Коэффициенты поглощения, рассеяния и ослабления

Главными оптическими параметрами, регулирующими процесс излучения в средах с рассеянием, являются объемные коэффициенты рассеяния $\sigma_{\lambda}[m, N(r)]$, поглощения $k_{\lambda}[m, N(r)]$ и ослабления $\beta_{\lambda}[m, N(r)] = \sigma_{\lambda}[m, N(r)] + k_{\lambda}[m, N(r)]$, а также индикатриса рассеяния $f_{\lambda}[m, N(r), \theta]$ (θ — угол рассеяния), зависящие от распределения частиц по размерам $N(r)$ и от комплексного коэффициента преломления частиц $m = n - i\chi$.

Объемные коэффициенты связаны с введенными ранее массовыми соотношениями:

$$\sigma_{\lambda}[m, N(r)] = \rho \sigma_{\lambda}, \quad k_{\lambda}[m, N(r)] = \rho k_{\lambda}, \quad \beta_{\lambda}[m, N(r)] = \rho \beta_{\lambda}.$$

Кроме массового и объемного коэффициентов взаимодействия излучения со средой определяются поперечные сечения, или факторы эффективности рассеяния (поглощения, ослабления) в расчете на одну частицу: $\sigma[\lambda, m, r]$, где r — радиус частицы.

В точной теории, развитой Ван де Хюлстом, К. С. Шифриным и др., используются безразмерные эффективные сечения рассеяния (поглощения, ослабления), которые выражаются через так называемые *ряды Ми*. Члены этих рядов содержат отношения функций Рикатти — Бесселя действительного или комплексного аргумента, включающего *нормализованный размер* $a_{\lambda} = 2\pi r/\lambda$, коэффициент преломления m и вычисляются на ПК. При заданном распределении частиц по размерам $N(r)$ вычисляются объемные коэффициенты рассеяния, поглощения и ослабления. При проведении таких вычислений для полидисперсных распределений, содержащих главным образом частицы, соизмеримые с длиной волны, объемные коэффициенты рассеяния, поглощения и ослабления сильно зависят от формы спектра и количества частиц, а также от их оптических констант.

Индикатриса рассеяния $f(\theta)$ характеризует степень рассеяния излучения под данным углом θ и представляет собой дифференциальное сечение рассеяния. Интегральное сечение рассеяния, или относительную интенсивность всего рассеянного излучения σ , можно получить, проинтегрировав $f(\theta)$ по всему телесному углу. При расчете интенсивности радиации, рассеянной некоторым объемом, нужно суммировать не ее амплитуды, а интенсивности. Причина этого заключается в том, что при атмосферных условиях длина свободного пробега молекул $l \gg \lambda$, фазы переизлученных волн случайны и интерференции не возникает. Это упрощает решение задачи так называемого многократного рассеяния — рассеяние уже прежде рассеянной радиации. Необходимость учета многократного рассеяния зависит при прочих равных условиях от важного параметра теории переноса излучения — вероятности выживания квантов, или альбедо единичного объема

$$\omega_{\lambda} = \frac{\sigma_{\lambda}}{\beta_{\lambda}} = \frac{\sigma_{\lambda}}{\sigma_{\lambda} + k_{\lambda}}, \quad (3.11)$$

где σ_{λ} , k_{λ} , β_{λ} — объемные коэффициенты рассеяния, поглощения и ослабления.

Глава 4. КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

4.1. Космические системы мониторинга Земли и атмосферы

Метеорологические спутники. При запуске первого спутника (4 октября 1957 г.) в России (СССР) были получены первые изображения атмосферы и поверхности Земли из космоса. 1 апреля 1960 г. запустили метеорологический спутник в США. Странами, начавшими метеорологические программы, были Россия (СССР) и США. В 1969 г. Россией (СССР) был запущен спутник *Метеор-1* серии *Космос*. В США с 1960-х гг. получали данные с метеорологического спутника *Tiros-1*.

В настоящее время активно используются данные американского спутника *NOAA* (National Oceanic and Atmospheric Administration), благодаря бесплатному распространению и высокому радиометрическому разрешению. Очередной спутник *NOAA-19* запущен в 2009 г., сейчас в активной эксплуатации 5 космических аппаратов NOAA, что позволяет осуществлять съемку с высокой периодичностью. В 2006 г. запущен европейский метеорологический спутник *MetOp-A*, в 2008 г. – китайский *Fengyun-3*. К группе метеорологических спутников можно отнести космические аппараты (КА) широкого назначения, запущенные в рамках американской экологической программы EOS (Earth Observing System) глобального мониторинга поверхности Земли, проводимой NASA. В конце 1999 г. выведен на орбиту первый спутник программы EOS *AM-1*, который известен под названием *Terra*, два других спутника этой серии – *Aqua* и *Aura* – запущены в 2002 и 2004 гг. К спутникам метеорологического назначения относятся геостационарные спутники, международная глобальная система которых формируется с 70-х гг. XX в. При высоте орбиты 35810 км период обращения ИСЗ равен периоду оборота Земли вокруг своей оси. Перемещаясь по орбите в направлении, совпадающим с направлением вращения Земли, геостационарный спутник все время находится над одним и тем же наземным пунктом. С одиночного геостационарного спутника видно около 42% поверхности Земли, а совокупность четырех–пяти геостационарных спутников обеспечивает непрерывное получение спутниковых снимков между 81° южной и 81° северной широты. Одними из первых были запущены два геостационарных спутника *GOES* (США), координаты подспутниковых точек которых 75 и 135° з.д. Поскольку геостационарные спутники находятся над экватором, широта подспутниковой точки равна 0°. Запуск очередного гео-

стационарного метеоспутника *GOES-13* состоялся в 2006 г. Европейский спутник *Meteosat* расположен над точкой с координатой 0° . Последний спутник этой серии *MSG* (*Meteosat* второго поколения) несет на своем борту 12-канальный сканер *SEVIRI*. Японский *GMS MTSAT* и индийский *Insat KALPANA* находятся над точками с координатами 140° в.д. и 74° в.д. соответственно.

20 января 2011 г. запущен очередной российский геостационарный спутник серии *Электро* с точкой стояния 76° в.д. Основные задачи *Электро-Л*: оперативные наблюдения состояния атмосферы и поверхности Земли, гелиогеофизические измерения, сбор данных с наземных платформ и обеспечение системы спасения КОСПАС/САРСАТ. Характеристики спутника (табл. 4.1): трехосная высокоточная стабилизация, масса КА – 1500 кг, масса полезной нагрузки — 370 кг, срок существования – 10 лет, точка стояния – 76° в.д., форматы передачи данных – HRIT/LRIT, периодичность получения изображений – 30/15 мин.

Таблица 4.1

Основные характеристики аппаратуры МСУ-ГС спутника *Электро-Л*

Параметры	Характеристики
Количество каналов (видимый, инфракр.)	10 (3, 7)
Спектральные диапазоны, мкм	0.5-0.65; 0.65-0.80; 0.8-0.9; 3.5-4.0; 5.7-7.0; 7.5-8.5; 8.2-9.2; 9.2-10.2; 10.2-11.2; 11.2-12.5
Размер кадра изображения, $^\circ \times ^\circ$	$20 \pm 0.5 \times 20 \pm 0.5$
Пространственное разрешение в надире, км	1.0 (видимый диапазон) 4.0 (инфракрасный диапазон)
Мощность, Вт	менее 150
Масса, кг	менее 88
Срок эксплуатации, лет	10

Общими особенностями метеорологических спутников являются охват съемкой большой территории (2800 км и более), низкое пространственное разрешение (1 км).

Природно-ресурсные спутники. Совершенствование съемочной аппаратуры на спутниках позволило повысить пространственное разрешение, что дало возможность изучать природные ресурсы (леса, сельскохозяйственные поля, геологические структуры и др.). Появились программы исследования природных ресурсов Земли, поэтому спутники, запускаемые в целях этих программ, называются природно-ресурсными. Первым стал спутник *LANDSAT* (США), выведенный на орбиту в 1972 г. Программа *LANDSAT* является самой продолжительной и результативной в космической съемке Земли. Накоплен значи-

тельный архив изображений, что позволяет сравнить получаемые изображения с архивными для выявления последствий глобального изменения климата и производственной деятельности. Информацию со спутников *LANDSAT* принимают более чем в 100 странах мира, седьмой спутник этой серии — *LANDSAT-7* — запущен в 1999 г. Он имеет сравнительно большое число спектральных диапазонов и тепловой канал. Работают российские спутники *Монитор-Э* (с 2005 г.) и очередной спутник серии *Ресурс – Ресурс-ДК 1* (с 2006 г.), а также индийские *IRS (CARTOSAT)*, японские *ALOS*. Самый большой в мире объем продаж снимков в оптическом диапазоне обеспечивают спутники *SPOT* (Франция), первый из которых запущен в 1986 г., последний на сегодняшний день — *SPOT-5* — в 2002 г. Общие характеристики природно-ресурсных спутников — более высокое разрешение — 30 м и меньшая обзорность — около 180 км по сравнению с метеорологическими.

Океанографические (радиолокационные) спутники. Облачность в каждый момент времени закрывает (приблизительно) больше половины площади земной поверхности и мешает зондированию в оптическом диапазоне спектра. Радиолокатор регистрирует собственное, отраженное земной поверхностью излучение. Даже тонкие облака не пропускают оптическое излучение, идущее от земной поверхности, поэтому результатов оптической съемки определенных объектов ожидают неделями. Использование для съемки земной поверхности радиоволн сантиметрового диапазона (выше 2 см) явилось актуальным, так как эти волны проходят сквозь облачный покров и способны проникать в почву. Радиолокаторы бывают некогерентные и с синтезированной апертурой (РСА), высокое пространственное разрешение вторых систем обусловило их широкое применение.

Одним из первых спутников с аппаратурой РСА стал *Seasat-A* (США), запущенный в 1978 г., ширина полосы захвата 100 км, разрешение 25 м. Космические системы с аппаратурой РСА следующие: *SIR-A* (США), *SIR-C*, *X-SAR* (США, Германия, Италия), *ERS-1,2*, *ENVISAT* (Европейское космическое агентство), *JERS* (Япония), *КА Алмаз* (Россия), *RADARSAT* (Канада) (табл. 4.2). С их помощью решались исследовательские задачи, проверялась аппаратура, методы обработки радиолокационных данных, технологии измерения характеристик природных объектов и явлений по радиолокационной информации. С 90-х гг. XX в., с запуском космического аппарата *RADARSAT* (Канада) в 1995 г., произошел переход к оперативным наблюдениям с использованием РСА. В настоящее время активно увеличивается группировка коммерческих радиолокационных систем.

Таблица 4.2

Современные радиолокационные спутники

КА	Страна	Год запуска	Разрешение, м
<i>TerraSar-x</i>	Германия	2007	1
<i>ENVISAT</i>	Европа (ESA)	2002	30
<i>ERS-2</i>	Европа (ESA)	1995	30
<i>Cosmo-Skymed-1,2,3</i>	Италия	2007 (08)	1
<i>Radarsat-1</i>	Канада	1995	8,5
<i>Radarsat -2</i>	Канада	2007	3
<i>YaoGan Weixing-1,3</i>	Китай	2006(07)	5
<i>ALOS</i>	Япония	2006	10

Примечание: Европа (ESA) – европейское космическое агентство.

По радиолокационной информации определяется толщина льда, его происхождение, состояние, радиолокационные снимки незаменимы в период навигации для безопасной проводки судов. С их помощью обнаруживается нефтяная пленка на поверхности воды из-за высокой чувствительности радиолокационного сигнала к шероховатости поверхности. Определяется скорость и направление приводного ветра, зона шторма и сильного волнения. Специальные технологии интерферометрической съемки позволяют определять незначительные подвижки грунта, данные используются для контроля состояния трубопроводов, сейсмоопасных зон. С использованием спутниковых радиолокационных изображений создают цифровые модели рельефа высокой точности. В июне 2010 г. запущен спутник *TagDEM-X* в дополнение к существующей системе *Terra SAR-X*. В комплексе *Terra SAR-X-TagDEM-X* земная поверхность облучается радиолокатором с одного спутника, а отраженный сигнал регистрируется другим. По результатам съемки земной поверхности создается глобальная цифровая модель рельефа с точностью по высоте 2 м. Космические системы, оснащенные радиолокаторами, являются дорогостоящими и крупногабаритными.

Спутники высокого разрешения (коммерческие). На коммерческой основе предоставляются разнообразные космические снимки, можно заказать снимки любой территории и практически любого пространственного разрешения. Коммерческий рынок данных дистанционного зондирования сформировался приблизительно в 2000-е гг. В последнее время важным событием стали запуски спутников высокого разрешения — *IKONOS*, *GeoEye*, *QuickBird*, *WorldView* (США) (рис. 4.1), *EROS* (Израиль).



Рис. 4.1. Спутники *QuickBird*, *WorldView-2*

В группу коммерческих можно включить индийский спутник *CARTOSAT-2* с пространственным разрешением 0,8 м, французский *SPOT-5* с пространственным разрешением до 2,5 м. Осуществили запуск коммерческих спутников Алжир, Великобритания, Китай, Корея, Испания и др. Информация с этих спутников обладает сверхвысоким (субметровым) разрешением до 41 см, но небольшого охвата ≈ 10 км.

Современное состояние оперативных космических систем метеорологического назначения. Метеорологическая космическая система (МКС) России входит составной частью в глобальную космическую подсистему наблюдений гидрометеорологического назначения (рис. 4.2). Развитие глобальной системы спутниковых наблюдений координирует ВМО, она состоит из двух частей:

- спутники на геостационарной орбите – США, Европейского сообщества, Японии, Индии, КНР (*GOES-E*, *GOES-W*, *METEOSAT*, *MSG*, *MTSAT*, *INSAT*, *FY*);

- спутники на приполярных солнечно-синхронных орбитах – США (*NOAA*), Европа (*MetOp*), Россия (*Meteop*) и др.

Основные съемочные системы ИСЗ серии *NOAA*: многоспектральный сканер видимого и ИК диапазонов спектра (радиометр AVHRR); аппаратура ATOVS атмосферного зондирования модуля HIRS, AMSU; бортовая радиотехническая система сбора данных с платформ типа ARGOS. Информация с ИСЗ серии *NOAA* поступает непрерывно в режиме HRPT и APT. Выходные продукты для информационного обеспечения задач оперативной метеорологии включают многоспектральные изображения облачности и подстилающей поверхности, данные температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА), данные о температуре поверхности океана (ТПО) и параметрах облачного покрова регионального и глобального покрытия. Пере-

дача цифровой и аналоговой спутниковой информации обеспечивается путем использования приемных станций, распространения через глобальную систему телесвязи (ВМО) и использования глобальной сети Интернет.

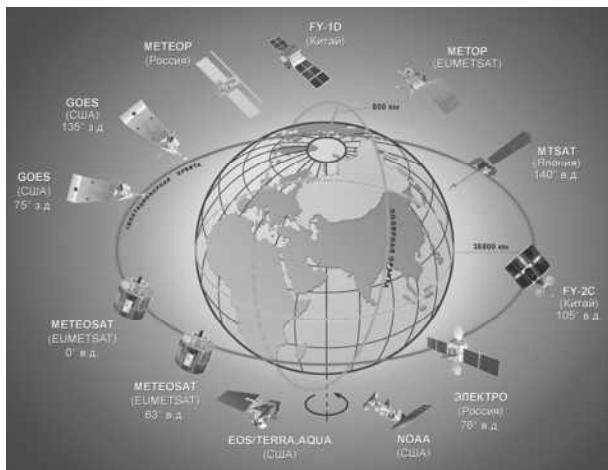


Рис. 4.2. Международная группировка метеорологических спутников

В КА MetOp № 1 (запущен в октябре 2006 г.), предназначенном для оперативной гидрометеорологии, используются следующие бортовые приборы: многоканальный радиометр AVHRR; ИК-зондировщик HIRS; MB-зондировщики AMSU-A, MHS; усовершенствованный ИК-зондировщик IASI высокого спектрального разрешения; усовершенствованный скаттерометр ASCAT; озонный зондировщик GOME-2; радиозатменный атмосферный зондировщик GRAS.

Основные информационные продукты, получаемые с метеорологических спутников:

- цифровые карты температуры верхней границы облаков и подстилающей поверхности, снежного и ледового покрова, оценки параметров облачности и осадков, данные мониторинга гидрометеорологических явлений (включая опасные), наблюдения антропогенных изменений природной среды и др.;
- оценки газового состава атмосферы и концентрации озона;
- оценки влагосодержания атмосферы, картирование снежного покрова, ледовой обстановки на морях и океанах, детектирование зон осадков;

- вертикальные профили температуры и влажности, концентрации озона в атмосфере;
- данные атмосферного зондирования по результатам радиозатменных наблюдений;
- данные о волнении на морях и океанах, оценки скорости приводного ветра.

Основные съемочные системы оперативных геостационарных ИСЗ типа *METEOSAT*, *GOES*:

- сканеры видимого и ИК диапазона спектра, позволяющие получать каждые 0,5 ч изображения диска Земли;
- атмосферный зондировщик VAS для получения данных ТВЗА регионального покрытия (на американских спутниках *GOES-E*, *GOES-W*);
- аппарата SEM для мониторинга околоземного космического пространства и получения гелиогеофизической информации;
- радиотехническая система для сбора и ретрансляции данных.

В настоящее время EUMETSAT (Европейское космическое агентство) эксплуатирует два геостационарных метеорологических спутника второго поколения *MSG* (*METEOSAT-8*, *METEOSAT-9*). По сравнению с космическими аппаратами (КА) первого поколения, спутники *MSG* имеют существенно большую информативность за счет установки сканера SEVIRI (12 каналов видимого и ИК диапазонов спектра). Данные с геостационарных КА передаются в международных форматах HRIT, LRIT, принимаются следующие виды данных: изображения всего видимого диска Земли в 12 спектральных каналах видимого и ИК диапазонов спектра для наблюдения динамики облачности, построения карт температуры облаков и подстилающей поверхности с пространственным разрешением около 3 км, оценок параметров облачности и аэрозоля, общего влагосодержания атмосферы и общего содержания озона, а также для детектирования зон осадков, получения данных для сверхкраткосрочного прогноза погоды и др.; данных о радиационном балансе системы Земля–атмосфера.

В прошлом Россией эксплуатировалась МКС в составе КА серии *Метеор* (*Метеор-2*, *Метеор-3*) на приполярных круговых орбитах высотой 1000 и 1250 км соответственно и наклоном 82,5°, КА *МЕТЕОР-3М №1* на солнечно-синхронной орбите (запущен в 2001 г.) и КА *ЭЛЕКТРО* на геостационарной орбите с точкой стояния 76° в.д. Кроме того, с 1986 по 1994 г. на солнечно-синхронные орбиты высотой 650 км запускались КА океанографического назначения серии *ОКЕАН-01* с радиолокатором бокового обзора и микроволновым

радиометром на борту. В настоящее время указанные КА выработали свой ресурс и выведены из эксплуатации. В табл. 4.3 приведен график запуска полярно-орбитальных КА до 2016 г.

Таблица 4.3

График запуска полярно-орбитальных КА до 2016 г.

КА (оператор)	Дата запуска	Форматы данных
<i>MetOp -2</i> (EUMETSAT)	2011	<i>AHRPT, LRPT</i>
<i>MetOp -3</i> (EUMETSAT)	2015	<i>AHRPT, LRPT</i>
<i>NPP</i> (NOAA)	2009	<i>HRD</i>
<i>NPOESS-1</i> (NOAA)	2011	<i>HRD, LRD</i>
<i>NPOESS-2</i> (NOAA)	2013	<i>HR, LRD</i>
<i>FY-3C</i> (KHP) (NRSCC)	2010	<i>AHRPT</i>
<i>FY-3C</i> (KHP) (NRSCC)	2012	<i>AHRPT</i>
<i>Метеор №1</i> (Росгидромет)	2009	<i>HRPT, LRPT</i>
<i>Метеор №2</i> (Росгидромет)	2012	<i>HRPT, LRPT</i>
<i>Электро-Л</i> (Росгидромет)	2011	<i>HRIT, LRIT</i>
<i>Канопус-В</i> (Росгидромет)	2012	-
<i>Ресурс-П</i> (Росгидромет)	2012	-
<i>Арктика-М</i> (Росгидромет)	2016	-

Действующие и перспективные российские спутниковые системы. Космическая система наблюдений Росгидромета основана на использовании данных отечественных и зарубежных космических аппаратов, в том числе зарубежных полярно-орбитальных спутников серий *NOAA*, *MetOp*, *EOS (Terra, Aqua)*, *FY-1* и геостационарных спутников серии *METEOSAT*, *GOES*, *MTSAT* и др.

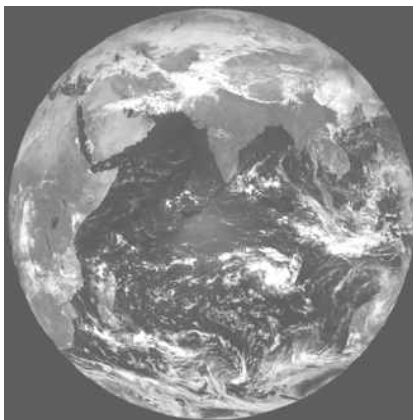


Рис. 4.3. Первый снимок со спутника *Электро-Л*, 20 января 2011 г.

Федеральная космическая программа России на 2006–2015 г. предусматривает создание к 2015 г. и дальнейшее постоянное поддержание на орбите российской группировки спутников наблюдения Земли, включающей: геостационарные метеорологические спутники серии *Электро* (*Электро-Л №1* запущен 20 января 2001 г., рис. 4.3); полярно-орбитальные спутники серии *Метеор*, два метеорологических, один океанографический (*Метеор-М №1* запущен 17 сентября 2009 г.; полярно-орбитальные природно-ресурсные спутники серии *Канопус-В*. В 2012 г. предполагается создать группировку из двух природно-ресурсных спутников серии *Ресурс-П*.

Российский космический аппарат (КА) метеорологического назначения *Метеор-М №1* запущен 17 сентября 2009 г. Это первый после долгого перерыва спутник, продолживший ряд (более 30) отечественных метеорологических спутников, функционировавших в 70–90 гг. прошлого столетия. *Метеор-М* относится к спутникам нового поколения, с характеристиками бортовой измерительной аппаратуры, соответствующими мировому уровню. С запуском КА *Метеор-М №1* (рис. 4.4) появилась возможность проводить наблюдения атмосферы и поверхности Земли за пределами зон радиовидимости приемных пунктов Росгидромета, осуществлять глобальный мониторинг окружающей среды. В рамках подготовки к запуску КА *Метеор-М №1* проведена модернизация технических средств приема спутниковых данных на НКПОР Росгидромета, включающая подготовку и введение в эксплуатацию в г. Долгопрудном и Хабаровске двух станций ПК-9 (диаметр зеркала 9 м) для приема информации КА *Метеор-М №1* по радиолинии сантиметрового диапазона.

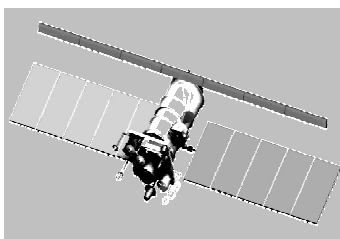


Рис. 4.4. Метеорологический спутник *Метеор-М №1*

Области применения данных КА *Метеор-М №1* по данным многоканального сканирующего устройства МСУ-МР: глобальный и региональный мониторинг облачного, снежного, ледяного и растительного покровов; контроль чрезвычайных ситуаций (пожары,

наводнения и др.), например, картирование ледовой обстановки. Данные комплекса многозональной съемки среднего разрешения (КМСС) могут быть использованы для проведения регионального мониторинга снежного, ледяного и растительного покровов, водной среды, картирования наводнений. По данным измерений модуля температурно-влажностного зондирования атмосферы (МТВЗА) можно определять интегральное влагосодержание атмосферы и модуль приводного ветра. Передача данных с МСУ-МР осуществляется на автономные пункты приема информации (АППИ) в международном формате LRPT, на спутнике применяется система сбора данных с наземных платформ (ССПД). К важным задачам, решаемым на основе данных КА *Метеор-М №1*, следует отнести мониторинг ледяного покрова полярных областей Земли и замерзающих морей России, а также пополнение климатических данных.

Таблица 4.4

Характеристики основной аппаратуры спутников *Метеор-М №1*

Прибор	Диапазон, мкм	Обзор, км	Разрешение, км	Применение
МСУ-МР (многоканальное сканирующее устройство малого разрешения)	0,5-12,5; 6 каналов	3000	1×1	Глобальное и региональное картирование облачности
КМСС (комплекс многоканальной спутниковой съемки)	0,4-0,9; 3+3 канала	450/900	0,05/0,1	Мониторинг земной поверхности
МТВЗА (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы)	10,6-183,3 ГГц; 26 каналов	2600	12-75	Профили температуры и влажности атмосферы
БРЛК (бортовой радиолокационный комплекс)	9500-9700 МГц	600	0,4×0,5	Ледовый мониторинг
ГТАК гелиогеофизический аппаратурный комплекс)	-	-	-	Гелиогеофизические параметры
БРК ССПД (бортовой радиокомплекс системы сбора и передачи данных)	-	-	-	Данные автоматических измерительных платформ

В настоящее время разрабатывается многофункциональная космическая система *Арктика*, предназначенная для мониторинга полярного региона. Создание системы необходимо для информацион-

ного обеспечении арктической зоны РФ и Северного морского пути. Основу КС *Арктика* будут составлять два космических аппарата на высокоэллиптических орбитах типа *Молния* (с наклоном 63° , период обращения 12 ч). Использование данных с *Арктики* существенно улучшит точность прогноза погоды по всему Северному полушарию. Предполагается также расширение и развитие НКПОР Росгидромета, в дополнение к существующим региональным центрам приема и обработки спутниковых данных Росгидромета планируется создать приемные центры в г. Баренцбурге, п. Тикси, г. Анадыре.

Создание космических систем нового поколения находится во взаимосвязи с развитием методов и технологий обработки спутниковых данных. Для решения оперативных задач спутникового мониторинга в ГУ НИЦ «Планета» создана технология построения карт облачности, опасных явлений, ледовой обстановки по спутниковым данным видимого, инфракрасного или микроволнового диапазонов. В автоматизированном режиме осуществляется предварительная обработка спутниковых изображений (географическая привязка, трансформирование космических изображений, составление обзорных монтажей). Данная информационная продукция передается для использования руководству Росгидромета, в Гидрометцентр РФ, организации Минтранса, РАН и оперативные службы. Изучаются долговременные изменения характеристик ледяного покрова на основе анализа рядов спутниковых данных Госфонда РФ. В частности, оценивались межгодовые изменения площади многолетнего льда в западном секторе Арктики. В 1983–1999 гг. такие оценочные исследования проводились на основе радиолокационных данных КА серии *Океан*, в 2002–2009 гг. эти ряды были дополнены данными микроволнового скаттерометра SeaWinds КА *QuikSCAT*. Изучение межгодовых изменений площади многолетнего льда проводилось в западном секторе Арктики, ограниченном 40 и 105 в.д. Установлено, что в исследуемом районе имеют место значительные межгодовые вариации площадей – от 180 до 540 тыс. км². За период наблюдения (с 1983 по 2009 гг.) в западном секторе Арктики отмечается существенное уменьшение площади многолетнего льда. Изменчивость характеристик ледяного покрова на замерзающих морях России оценивается на основе комплексной обработки спутниковых данных видимого, ИК, микроволнового диапазонов. Исследованы сезонные и межгодовые изменения площади припая и плавучего льда в Каспийском море в 2004–2009 гг., выявлены существенные межгодовые различия в продолжительности ледового периода.

4.2. Обзор систем дистанционного зондирования

Дистанционные приборы обеспечивают измерение характеристик удаленных объектов, поэтому они размещаются на устойчивых платформах, удаленных от изучаемого объекта или наблюдаемой поверхности. Платформы для дистанционных приборов могут располагаться на земле, самолете, космическом корабле или спутнике вне пределов атмосферы Земли. Спутники имеют несколько уникальных характеристик, которые делают их полезными для дистанционного зондирования Земли. В этом разделе рассмотрим различные спутниковые приборы.

Спутниковые *орбиты* (траектории, по которым двигаются спутники, когда они вращаются вокруг Земли) выбираются исходя из возможностей и назначения приборов, которые размещены на спутнике. Орбиты различаются по высоте над поверхностью Земли и по ориентации плоскости вращения спутника относительно Земли. Двумя наиболее распространенными типами орбит являются *геостационарные* (geostationary) орбиты и *полярные* (near-polar) орбиты.

Геостационарные орбиты — это круговые орбиты, которые ориентированы в плоскости экватора Земли на высоте 36000 км. Когда спутник пролетает на такой высоте, его орбитальный период точно соответствует периоду вращения Земли, поэтому он всегда располагается над одной и той же точкой земной поверхности. Это позволяет обеспечить регулярные наблюдения выбранной территории в любое время суток и года. Высокое временное разрешение и постоянные углы зрения являются преимуществом геостационарных изображений. Однако геостационарный спутник располагается слишком далеко от Земли, чтобы одновременно получать высокое пространственное разрешение и обеспечивать высокоточные количественные наблюдения. Кроме того, приборы, установленные на таких спутниках, не фиксируют полюсов и обеспечивают хорошие условия наблюдения только экваториальных областей, при условии одновременного размещения на орбите 5–6 спутников. Геостационарные орбиты имеют метеорологические спутники и спутники связи.

Для большинства спутников дистанционного зондирования в настоящее время используются полярные (околополярные) орбиты. Это означает, что спутник движется к северу на одной стороне Земли, пролетает вблизи полюса, а затем — к югу на второй половине орбиты. Многие из таких спутниковых орбит являются *солнечно-синхронизированными* (sun-synchronous) так, что спутники пролетают

над выбранным местом в одно и то же время. Это обеспечивает приблизительно одинаковые условия освещенности в одно и то же время года в течение последующих лет. Половина орбиты, на которой спутник летит в северном направлении, называется *восходящей* (ascending) орбитой, а другая половина — *нисходящей* (descending). Полярные орбиты существенно ниже, чем геостационарные (500-800 км). Приборы, размещаемые на полярноорбитальных носителях, обеспечивают лучшее пространственное разрешение и позволяют получать высококачественные данные дистанционного зондирования. Все спутники, на которых установлены описанные ниже приборы, летают по полярным орбитам.

Прибор MSS (спутник Landsat). Первый спутник Landsat (США) был запущен 23 июля 1972 г. Высота орбиты спутников Landsat 1, 2, 3 составляла 920 км, спутников Landsat 4, 5 — 705 км. Одним из основных приборов спутников серии Landsat является прибор MSS (Multi-Spectral Scanner). Основные технические характеристики этого прибора, размещенного на первых спутниках серии, приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Основные технические характеристики прибора MSS

Спектральные диапазоны	Размерность
I	0,5 – 0,6 мкм
II	0,6 – 0,7 мкм
III	0,7 – 0,8 мкм
IV	0,8 – 1,1 мкм
Ширина полосы обзора в надире	185 км
Разрешение на местности в надире	80×80 м

Прибор MSS один из первых приборов, с использованием которого началось систематическое изучение поверхности Земли из космоса. В начале 70-х гг. существовали только две космические державы — США и СССР. Советскому Союзу удалось запустить первый искусственный спутник (1957 г.) и осуществить первый в истории человечества полет космического корабля с человеком на борту (1961 г.). США в 60-е гг. начали несколько программ автоматического дистанционного зондирования с передачей получаемых данных на Землю. Из таких программ стоит упомянуть спутник TIROS, который был запущен в 1960 г. для метеорологических наблюдений, и спутник Landsat, запу-

щенный в 1972 г. с целью наблюдения поверхности Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с достаточно высоким пространственным разрешением. Первый спутник серии Landsat назывался ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), и с этого спутника начался непрерывный ряд наблюдений поверхности Земли. В конце 1999 г. на орбите находились спутник Landsat-5, запущенный в 1984 г., и спутник Landsat-7, запущенный 15 апреля 1999 г. Упрощенная схема прибора MSS представлена на рис. 4.6.

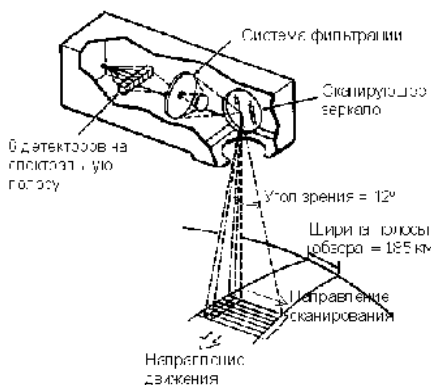


Рис. 4.6. Упрощенная схема прибора MSS

Прибор MSS на спутнике Landsat 1, 2, 3 являлся классическим сканером и работал следующим образом. Излучение, отраженное от поверхности Земли, собиралось телескопической системой (не показанной на рисунке) и направлялось на сканирующее зеркало. Это зеркало поворачивалось вокруг некоторой оси с периодом 3,3 миллисекунды, обеспечивая сканирование местности в направлении, перпендикулярном движению спутника с углом зрения, равным приблизительно 12° . Такой угол зрения при высоте спутника, равной 920 км, обеспечивал ширину полосы обзора, равную 185 км. Отраженное от сканирующего зеркала излучение попадало на систему фильтров. Эта система обеспечивала разделение излучения на спектральные диапазоны. После этого излучение регистрировалось с помощью системы детекторов. В приборе MSS было предусмотрено по 6 детекторов для каждого спектрального диапазона. Это позволяло одновременно принимать рассеянное излучение от 6 полос шириной около 80 м каждая, обеспечивая тем самым пространственное разрешение на местности 80×80 м. Система детектирования преобразовывала принимаемое излучение в цифровой сигнал в диапазоне от 0–255. Этот диапазон опре-

деляет яркостное (радиометрическое) разрешение прибора. Зарегистрированные сигналы с помощью системы телеметрии передавались на Землю, где из них формировались изображения для каждой из спектральных полос. Каждое из таких изображений состояло приблизительно из 7581600 элементов (пикселей). Пример обработки данных MSS приведен на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Композитное изображение Аральского моря. 10 августа – 22 сентября 1987 г., Landsat MSS

Прибор HRV (спутник SPOT). Первый спутник SPOT (Франция) запущен в 1986 г., высота орбиты этого спутника — 831 км. На борту спутника был помещен прибор HRV (High Resolution Visible). Основные характеристики этого прибора приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Основные технические характеристики прибора HRV

Спектральные диапазоны	Размерность
I	0,50 – 0,59 мкм
II	0,6 – 0,68 мкм
III	0,79 – 0,89 мкм
Ширина полосы обзора в надири	117 км
Разрешение на местности в надири	20×20 м (10×10 в панхроматической моде)

Если прибор MSS, описанный в предыдущем разделе, являлся типичным сканером, то в приборе HRV реализована иная схема, представленная на рис. 4.8.

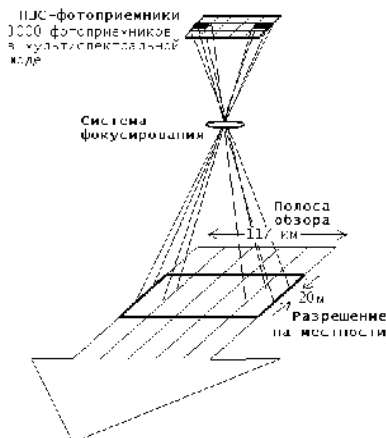


Рис. 4.8. Принципиальная схема прибора HRV

У сканеров есть несколько недостатков, что привело к тому, что эта схема практически перестала использоваться для приборов высокого пространственного разрешения. Во-первых, сканеры неизбежно имеют движущиеся части, что снижает надежность прибора. Во-вторых, при использовании небольшого количества детекторов возникают проблемы с обеспечением высокого пространственного разрешения. Поэтому в современных приборах высокого пространственного разрешения применяется очень большое количество фотоприемников (ПЗС-линеек). В приборе HRV используется три такие ПЗС-линейки длиной около 15 см по 1000 элементов в каждой для трех спектральных диапазонов. Система фокусирования устроена таким образом, что небольшая площадка 20×20 м на поверхности Земли, отображается на индивидуальный элемент ПЗС-линейки, как показано на рис. 4.8. Таким образом, пространственное разрешение прибора HRV составляет 20×20 м в каждом из трех спектральных диапазонов. В панхроматической моде (0,51–0,70 мкм), в которой интегрируются сигналы от отдельных спектральных каналов, удается достичь даже большего разрешения — 10×10 м.

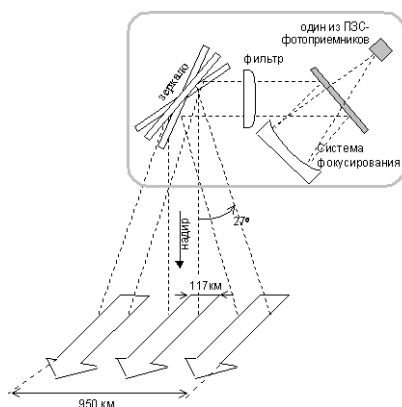


Рис. 4.9. Система формирования изображения прибора HRV

Спутник пролетает над одной и той же местностью каждые 26 дней, а полоса обзора прибора HRV составляет 117 км. В действительности наблюдение подстилающей поверхности может осуществляться в полосе 950 км. Это достигается с помощью поворотного зеркала, как показано на рис. 4.9. Зеркало может поворачиваться на угол 27° , что обеспечивает выбор любой полосы шириной 117 км в пределах полосы обзора прибора, равной 950 км. После зеркала излучение поступает в систему фильтров, обеспечивающую разделение принимаемого сигнала на три спектральных диапазона: 1-й (зеленый) — от 0,50 до 0,59 мкм, 2-й (красный) — от 0,6 до 0,68 и 3-й (в ближней инфракрасной области спектра) — от 0,79 до 0,89 мкм. Затем с помощью системы фокусирования излучение собирается на один из 3000 ПЗС-приемников. Примеры изображений полученных с помощью прибора HRV приведены на рис. 4.10–4.13 (на рис. 4.13 изображение получено при синтезе изображений рис. (4.10–4.12) с помощью модуля ГИС IDRISI).

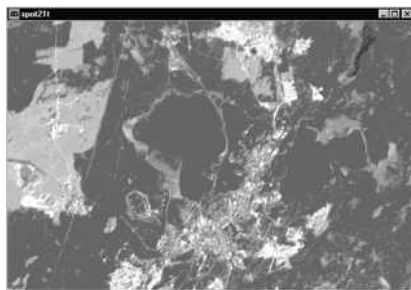


Рис. 4.10. Прибор HRV, диапазон 1, 26.08.96 г.

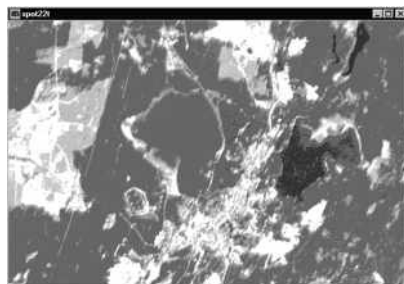


Рис. 4.11. Прибор HRV, диапазон 2, 26.08.96 г.

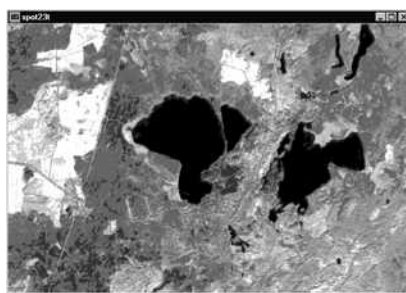


Рис. 4.12. Прибор HRV, диапазон 3, 26.08.96 г.

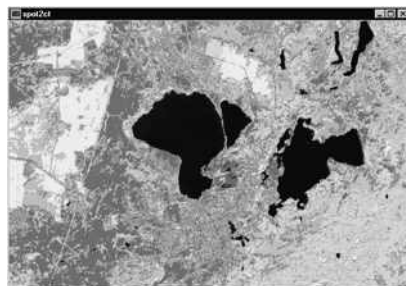


Рис. 4.13. Прибор HRV, синтезированное изображение, 26.08.96 г.

Прибор МСУ-Э (спутник Ресурс-01). Приблизительно по той же схеме, что и прибор HRV, устроен сканер высокого разрешения МСУ-Э российского природоресурсного спутника Ресурс-01. Первый спутник этой серии (спутник Космос-1939) был запущен в середине 80-х гг. В конце 90-х гг. основная информация поступала со спутника Ресурс-

01 №3, запущенного 4 ноября 1994 г. на высоту 678 км. Основные технические характеристики прибора МСУ-Э приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Основные технические характеристики МСУ-Э

Спектральные диапазоны МСУ-Э	Размерность
I	0,50–0,59 мкм
II	0,61–0,69 мкм
III	0,81–0,90 мкм
Ширина полосы обзора в надире	45 км
Разрешение на местности в надире	34×45 м

Пример обработанных данных, полученных с помощью прибора МСУ-Э, представлен на рис. 4.14.

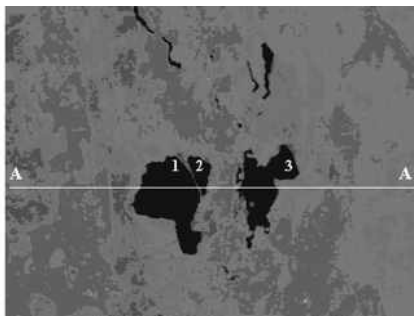


Рис. 4.14. Фрагмент снимка со спутника Космос-1939 (канал 3) по профилю АА. Район пос. Токсово, Ленинградская обл.:
1 — оз. Кавголовское, 2 — оз. Курголовское, 3 — оз. Хеппо-Ярви

Прибор GOME (спутник ERS-2). Спутник ERS-2 (European Remote Sensing-2) запущен в апреле 1995 г., высота — 795 км. Прибор GOME (Global Ozone Monitoring Experiment), размещенный на этом спутнике, предназначен для исследования озона и некоторых других газов в стратосфере Земли.

В середине 80-х гг. над Антарктидой были зарегистрированы резкие уменьшения концентрации озона. Слой озона (O_3) расположен на высоте между 15 и 35 км над поверхностью Земли и играет важную роль по поглощению вредного ультрафиолетового излучения. Явление уменьшения концентрации озона получило название «озоновые дыры» и стало предметом постоянного внимания, как ученых, так и общест-

венности. Были предприняты шаги в направлении снижения объемов производства галогенуглеродов, которые достаточно широко использовались в промышленности и которые, попадая в стратосферу, могли стать катализаторами распада озона. Прибор GOME имеет следующие характеристики (табл. 4.5).

Таблица 4.5.

Основные технические характеристики спектрометра GOME

Параметры	Размерность
Спектральный диапазон	0,24 – 0,79 мкм (240–790 нм)
Спектральное разрешение	0,2 – 0,4 нм
Спектральные зоны	
I	0,24 – 0,29 мкм
II	0,29 – 0,40 мкм
III	0,40 – 0,60 мкм
IV	0,59 – 0,79 мкм
Ширина полосы обзора:	960 км
Разрешение на местности в надире	320×40 км
Измеряемые газы	O ₃ , NO ₂ , H ₂ O, SO ₂ , ClO, BrO и др.

Прибор GOME является спектрометром, который предназначен для спектральных измерений в диапазоне от 240 до 793 нм, т.е. в ультрафиолетовом и видимом диапазонах электромагнитного спектра со спектральным разрешением 0,2–0,4 нм. Такое высокое разрешение обеспечивается тем, что спектрометр GOME является двойным монохроматором. На первом этапе излучение разлагается в спектр с помощью кварцевой линзы на четыре спектральных диапазона: 240–295, 290–405, 400–605 и 590–790 нм. Дальнейшее разложение излучения в спектр осуществляется с помощью дифракционных решеток. Пространственное разрешение спектрометра GOME — 320×40 км. Пример обработанных данных, полученных с помощью прибора GOME, представлен на рис. 4.15.

Прибор AVHRR (спутники NOAA). Спутники NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) используются с начала 70-х гг. на высоте приблизительно 800 км (первым спутником этой серии был спутник TIROS-M, запущенный 23 января 1970 г.). На спутниках серии NOAA установлены приборы AVHRR (Advanced Very

High Resolution Radiometer), обеспечивающие непрерывные ряды наблюдений в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Основные технические характеристики прибора AVHRR приведены в табл. 4.6.

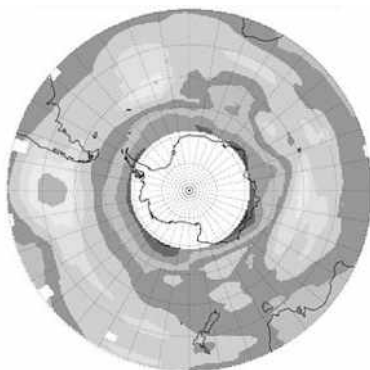


Рис. 4.15. Содержание озона в стратосфере южного полушария

Прибор AVHRR является типичным сканером, таким же, как описанный выше прибор MSS. Отличительная особенность прибора AVHRR — возможность принимать сигнал в окне прозрачности атмосферы 10–12 *мкм*. Это позволяет оценивать температуру поверхности моря (sea surface temperature). Одновременно прибор позволяет принимать сигнал в видимой и в ближней инфракрасной областях спектра при составлении полного изображения поверхности Земли за одни сутки. Это, при достаточно длинном ряде наблюдений, делает его незаменимым при оценке текущих изменений растительности планеты (vegetation indices).

Таблица 4.6
Основные технические характеристики сенсора AVHRR

Спектральные каналы	NOAA-6, 8, 10	NOAA-7, 9, 11, 12, 14
I	0,58 – 0,68 <i>мкм</i>	0,58 – 0,68 <i>мкм</i>
II	0,725 – 1,00 <i>мкм</i>	0,725 – 1,00 <i>мкм</i>
III	3,55 – 3,93 <i>мкм</i>	3,55 – 3,93 <i>мкм</i>
IV	10,50 – 11,50 <i>мкм</i>	10,3 – 11,3 <i>мкм</i>
V		11,5 – 12,5 <i>мкм</i>
Ширина полосы обзора	2800 <i>км</i>	2800 <i>км</i>

Разрешение на местности	1,1×1,1 км	1,1×1,1 км
-------------------------	------------	------------

Прибор AVHRR имеет не очень хорошее пространственное разрешение — порядка 1 км, но достаточно широкую полосу обзора — 2800 км. Примеры изображений, полученных при обработке данных прибора AVHRR, представлены на рис. 4.16, 4.17.

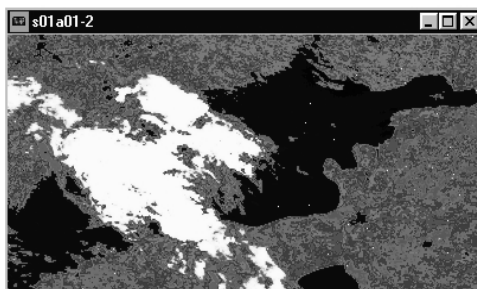


Рис. 4.16. Альbedo подстилающей поверхности по данным второго канала AVHRR. Большое облако над Финским заливом

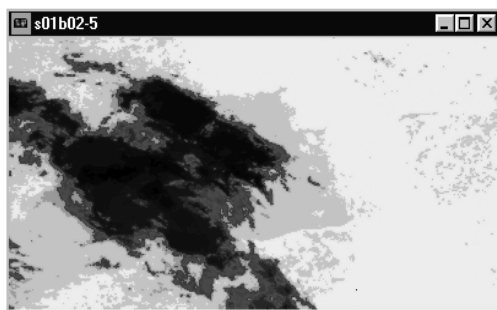


Рис. 4.17. Яркостная температура по данным пятого канала AVHRR. Большое облако над Финским заливом

Микроволновые радиометры SMMR и SSM/I. Микроволновые радиометры — это пассивные приборы, принимающие излучение Земли в окне прозрачности атмосферы приблизительно от 1 до 200 ГГц.

Прибор SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) был запущен в 1978 г. на спутнике Nimbus-7 (США) и работал по август 1987. Прибор принимал излучение на 5 частотах — 6,63; 10,69;

18,0; 21,0 до 37,0 ГГц (на каждой частоте принималась и горизонтальная, и вертикальная поляризации).

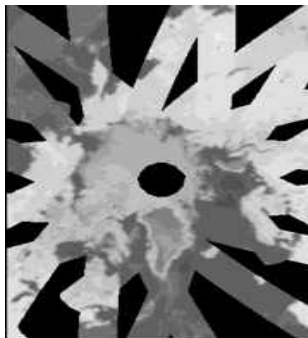


Рис. 4.18. Данные SMMR за один день

Прибор SSM/I (Special Sensor Microwave/ Imager) размещается на спутниках F8, F10, F11, F12, F13 и F14 серии DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), принимает излучение на 4 частотах — 19,35; 37,0; 85,5 ГГц (горизонтальная и вертикальная поляризации) и 22,235 ГГц (только вертикальная поляризация).

Высота полета спутников — около 850 км, полоса захвата — 1400 км. Пространственное разрешение — 25×25 км. Сигнал имеет 128 градаций. Данные микроволновых радиометров SMMR и SSM/I распространяются Национальным центром по снегу и льду США (National Snow and Ice Data Center, NSIDC) и используются главным образом для изучения динамики изменения ледового и снежного покрова на планете. Результаты обработки данных прибора SMMR показаны на рис. 4.18 и 4.19.

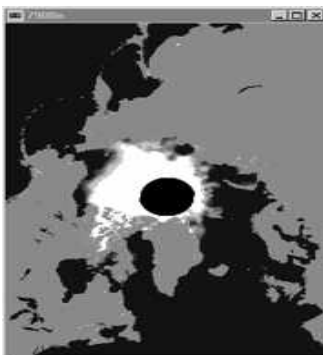


Рис. 4.19. Средняя концентрация льда в Северном Ледовитом океане

Прибор SAR (спутники ERS-1/2). Приборы SAR (Synthetic Aperture Radar) размещаются на спутниках ERS (European Remote Sensing Satellite), которые летают на высоте около 780 км. Спутник ERS-1 был запущен в июле 1991 г., спутник ERS-2 — в апреле 1995 г. В отличие от пассивных приборов дистанционного зондирования, обсуждавшихся в предыдущих разделах данной главы, SAR является радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой и обеспечивает активное дистанционное зондирование поверхности Земли. Основные характеристики прибора ERS-SAR представлены в табл. 4.7 и на рис. 4.20.

Таблица 4.7.

Основные технические характеристики ERS-SAR

Параметры	Размерность
Частота	5,3 ГГц (длина волны — 5,66 см)
Размер антенны	10 × 10 м
Угол зрения	23°
Поляризация	Вертикальная
Разрешение на местности	30 × 30 м
Ширина полосы обзора	100 км

Рассмотрим, как работает радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой. Схема работы радиолокатора (в английском языке используется слово RADAR, которое является сокращением от Radio Detection and Ranging) представлена на рис. 4.21. Антенна радара поочередно передает и принимает короткие импульсы электромагнитного излучения — 1500 импульсов в секунду длительностью около 10–15 микросекунд.

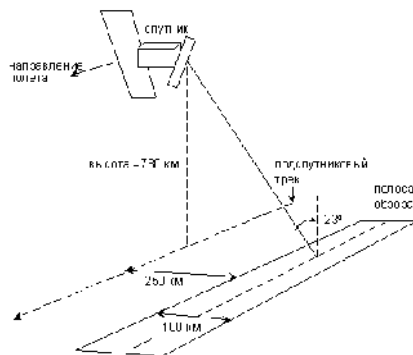


Рис. 4.20. Основные технические характеристики ERS-SAR

Для импульса характерна узкая полоса частот (меньшая, чем полоса частот приемной системы радара) в сантиметровом диапазоне, где влияние атмосферы, в том числе и облачности, минимально. Импульс отражается от подстилающей поверхности в соответствии с индикатрисой рассеяния, характерной для каждого типа поверхности. При этом меняется не только амплитуда импульса, но и диапазон его частот и поляризация. Наибольшую амплитуду имеет излучение, рассеянное в «зеркальном» направлении, когда углы падения и отражения равны. Но характеристики рассеяния в этом направлении очень близки для всех типов подстилающей поверхности и не позволяют уверенно отличать один тип поверхности от другого. Поэтому локаторы типа SAR принимают излучение, рассеянное под углами, отличными от зеркальных, которое несет существенно больше информации об особенностях поверхности. Такие локаторы называются локаторами бокового обзора.

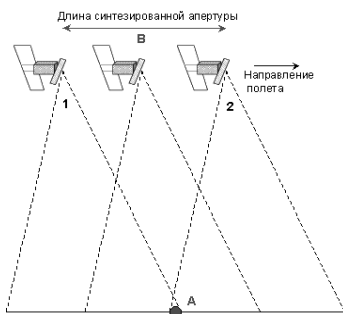


Рис. 4.21. Работа радиолокатора с синтезированной апертурой

Относительно высокое для прибора, работающего в сантиметровом диапазоне, пространственное разрешение локатора обеспечивается за счет синтезированной апертуры (рис. 4.21). Импульсы локатора распространяются в некотором конусе, и прибор принимает рассеянные сигналы со всей поверхности в основании конуса. Например, сигнал, рассеянный от точки *A* начинает регистрироваться, когда спутник находится в положении 1, а заканчивается в положении 2. В это время сигналы от точки *A* синтезируются в специальной программе, в результате накопления получают сигналы необходимой амплитуды от небольших участков подстилающей поверхности. Локаторы с синтезированной апертурой используются для решения многих задач, например, для изучения океанических течений, фронтов, внутренних волн, наблюдения пятен нефти на поверхности океана, изучения ледовой обстановки.

Глава 5. НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС ПРИЕМА, ОБРАБОТКИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ РОСГИДРОМЕТА

Первоочередной целью функционирования наземного комплекса приема, обработки и распространения спутниковой информации (НКПОР) является обеспечение государственных органов управления, организаций федеральных министерств и ведомств (Росгидромета, МЧС) всей доступной информацией, полученной с помощью российских и зарубежных оперативных спутниковых систем, необходимой для решения государственных задач (гидрометеорологическое обеспечение, мониторинг чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, мониторинг состояния окружающей среды). Основные функции НКПОР: планирование работы бортовых измерительных комплексов, прием, обработка, архивация и распространение спутниковых данных.

В состав наземного комплекса приема, обработки, архивации и распространения спутниковой информации входят НКПОР Росгидромета (образующий основу государственного НКПОР России), а также малые станции приема спутниковых данных (ведомственные, территориальные и коммерческие). Наиболее развитой структурой НКПОР в настоящее время является НКПОР Росгидромета, в создании и развитии которого принимали участие Росгидромет и Росавиакосмос. Наземный комплекс Росгидромета осуществляет прием, обработку и распространение данных, получаемых со всех российских космических аппаратов (КА) типа «Ресурс-01», «Океан-01», «Океан-О», «Метеор», «Электро» и ряда зарубежных КА типа NOAA, Meteosat, GMS. Имеется техническая возможность приема данных французского КА SPOT.

Обобщенная схема НКПОР Росгидромета представлена на рис. 5.1. Основу НКПОР Росгидромета составляет система трех крупных центров приема — научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии (НИЦ) «Планета» (с пунктами приема в г. Москве, г. Обнинске и г. Долгопрудном), Западно-Сибирский (ЗС) региональный центр приема и обработки данных (РЦПОД) (г. Новосибирск) и Дальневосточный (ДВ) РЦПОД (г. Хабаровск), обеспечивающих получение спутниковой информации по всей территории России. В состав НКПОР Росгидромета входит также сеть автономных пунктов приема информации — АППИ, которые в режиме непосредственной передачи с КА «Метеор», NOAA, «Океан», «Ресурс» могут принимать данные пониженного разрешения в диапазоне 137 МГц. Такие АППИ установлены на всех крупных аэродромах, в областных бюро погоды и в под-

разделениях Минобороны, что позволяет оперативно получать данные ДЗЗ и использовать в синоптической оценке метеобстановки.

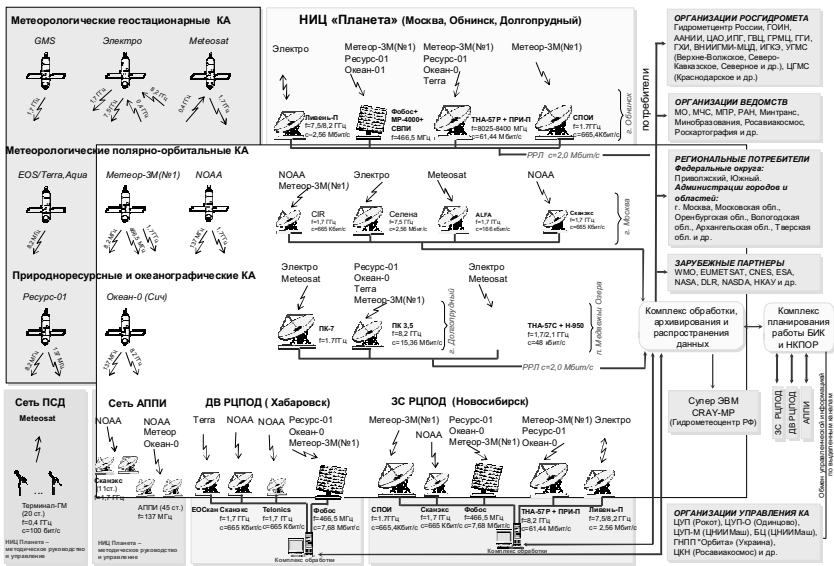


Рис. 5.1. Обобщенная схема НКПОР Росгидромета

Важным обстоятельством, определяющим возможность функционирования и развития центров и пунктов приема сети НКПОР, является проблема помеховой обстановки в районах расположения станций приема. Радиотехнические комплексы систем сотовой связи, аэродромных служб и другие создают существенные проблемы для работы ряда пунктов приема спутниковой информации (прежде всего для малых станций). Крупные центры приема Росгидромета регулярно выполняют работы по защите радиочастот, что позволяет вести уверенный прием спутниковых данных.

Возможности центров приема Росгидромета по приему данных оперативных спутниковых систем ДЗ существенно отличаются и определяются степенью технической оснащенности. Наилучшей технической оснащенностью обладают подразделения НИЦ «Планета». В целом комплексы технических средств НИЦ «Планета» позволяют осуществлять прием данных практически со всех российских и ряда зарубежных оперативных КА ДЗЗ.

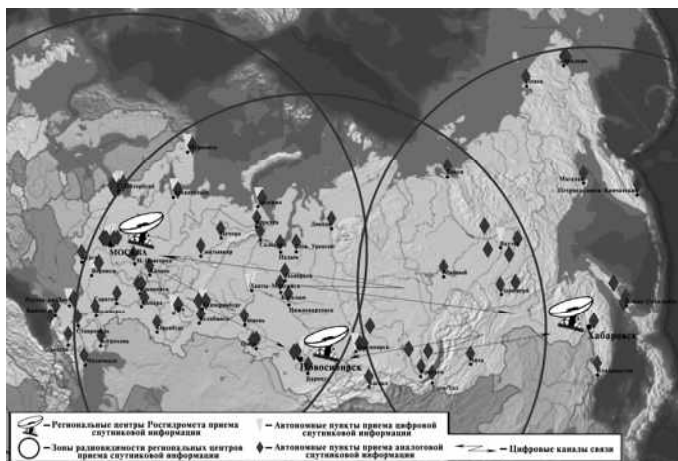


Рис. 5.2. Космическая подсистема наблюдения Росгидромета

НИЦ «Планета» является организацией выполняющей основные функции НКПОР — планирование, прием, обработку, архивацию и доведение до потребителей информации российских и ряда зарубежных оперативных спутниковых систем:

- планирование работы бортовых измерительных комплексов спутниковых систем «Метеор», «Океан»;

- прием, обработка и архивация данных российских оперативных спутниковых систем, а также зарубежных КА серии NOAA, METEOSAT, SPOT;

- сбор, обработка и архивация данных принятых в ЗС РЦПОД (г. Новосибирск) и ДВ РЦПОД (г. Хабаровск);

- научно-методическое руководство ЗС и ДВ РЦПОД, а также сетью АППИ;

- доведение спутниковой информации до потребителей (организаций Росгидромета, МЧС).

В части планирования работы бортовых измерительных комплексов НИЦ «Планета» взаимодействует (и имеет разветвленную сеть каналов связи) со всеми организациями, участвующими в управлении космическими системами ДЗЗ (рис. 5.2).

На спутниковом сервере НИЦ «Планета» в среде INTERNET действует совместный с ЗС РЦПОД (г. Новосибирск) оперативный каталог спутниковой информации, позволяющий осуществлять поиск необходимой информации с возможностью просмотра сжатых изображений.

Доведение информации до потребителей осуществляется по различным каналам связи (выделенные линии, оптоволоконные каналы) с использованием технологий INTERNET по автоматизированной системе передачи данных «Погода». На рис. 5.3–5.8 представлены примеры некоторых видов оперативной спутниковой информационной продукции.

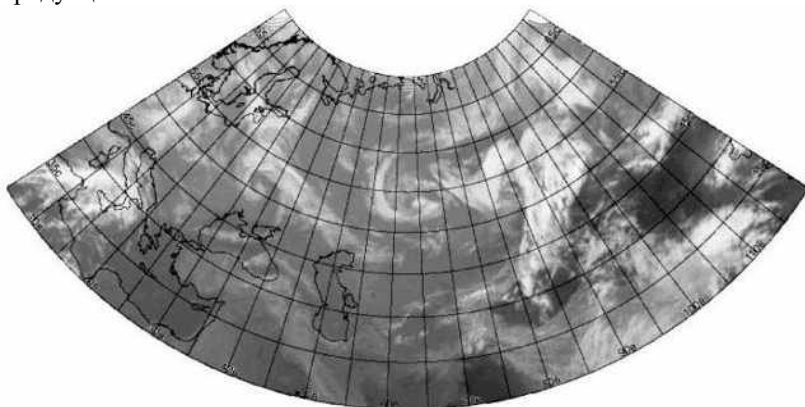


Рис. 5.3. Космический снимок с геостационарного спутника МЕТЕОСАТ (северная зона видимости). ИК диапазон — 10,5–12,5 мкм.
9.05.2000, 3 ч 00 мин

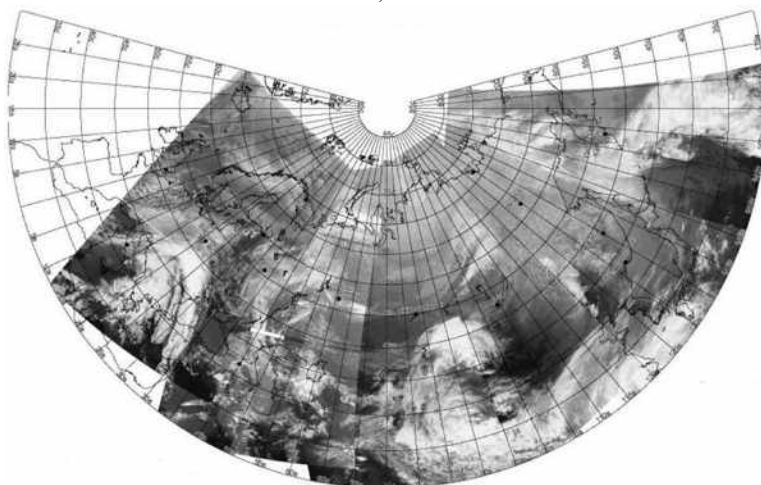


Рис. 5.4. Монтаж космических изображений Евразии с ИСЗ NOAA-14 (AVHRR-2, 10,3–11,3 мкм). Полярная стереографическая проекция, референц эллипсоид Красовского

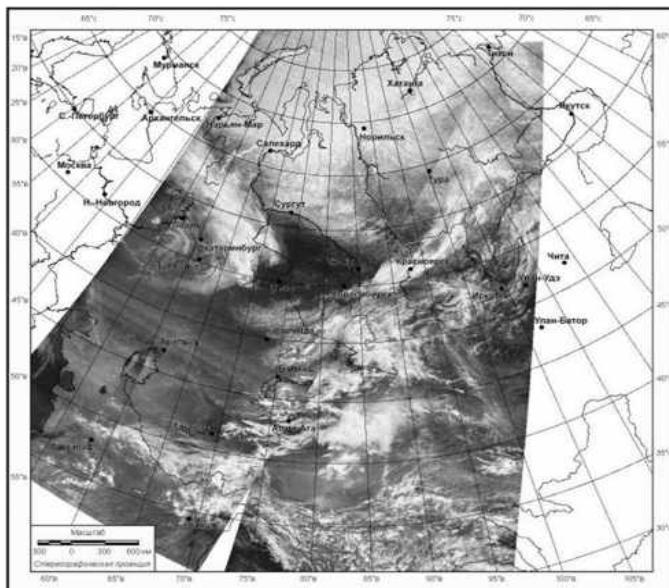


Рис. 5.5. Монтаж изображений с ИСЗ Ресурс-01 №4 (МР-900, 0,5–0,8 мкм).
Сибирский регион

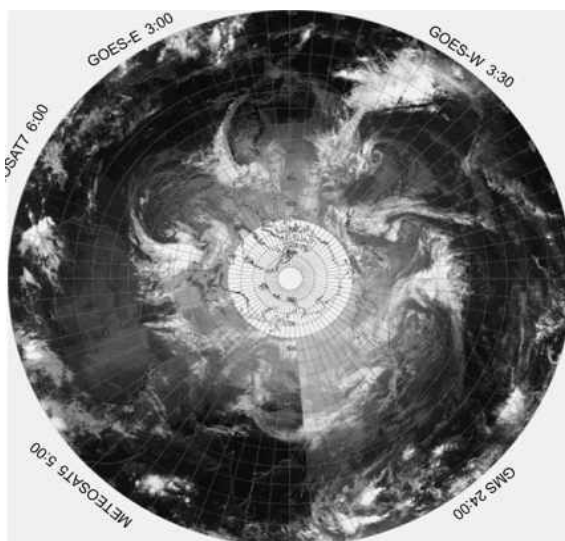


Рис. 5.6. Глобальная карта облачности. ИК диапазон — 10,5–12,5 мкм (полярная стереографическая проекция)

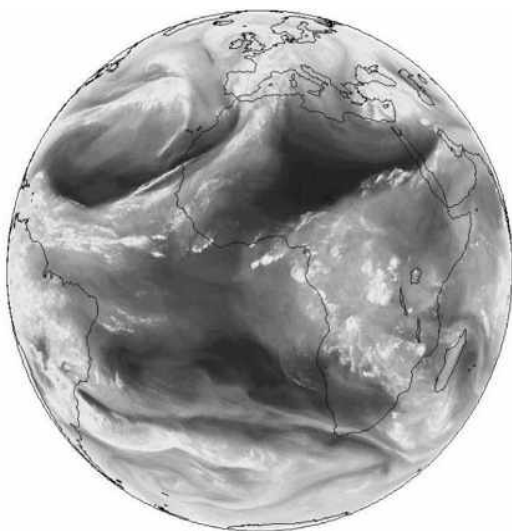


Рис. 5.7. Геостационарный спутник METEOSAT-7. Изображение земли в спектральном канале поглощения водяного пара (5,7–7,1 мкм)

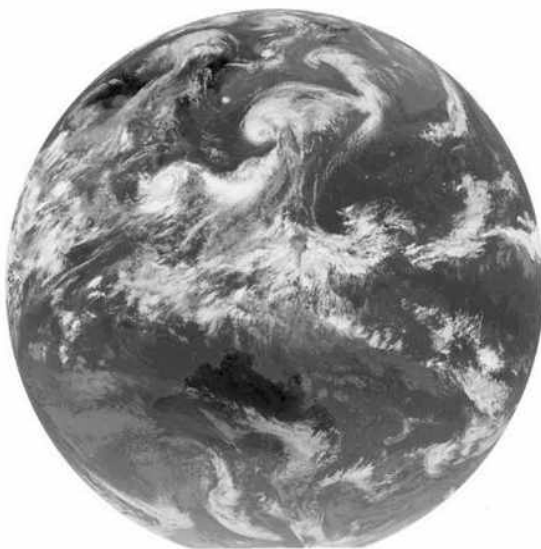


Рис. 5.8. Геостационарный спутник GSM. ИК диапазон — 10,5–12,5 мкм

Особенности приема и обработки спутниковой информации аппаратно-программным комплексом. Аппаратно-программный комплекс (АПК) «Лиана». Станция «Лиана» предназначена для приема изображений Земли, передаваемых с полярно-орбитальных спутников серии NOAA в формате АРТ (Automatic Picture Transmission), в диапазоне 137 МГц. С некоторыми ограничениями возможен прием и с других ИСЗ, имеющих подобные форматы сброса (например, Метеор-3, Ресурс-01).

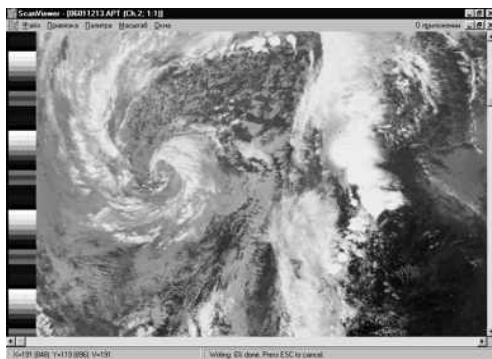


Рис. 5.9. Визуализация изображения в ScanViewer

Основную часть принимаемой информации составляют данные двух спектральных каналов (ближнего ИК и теплового ИК) сканирующего радиометра AVHRR. Изображения имеют пространственное разрешение 3,3 км в полосе обзора около 3000 км и обычно используются в метеорологических целях. Станция получает изображение окружающей ее территории 8–12 раз в сутки. Объем информации, получаемой за один сеанс связи, т.е. пока спутник проходит через зону видимости станции, может составлять 3–3,5 МБ. В состав станции входят антенна, маломощный ВЧ усилитель (МШУ), кабель снижения, демодулятор сигнала, интерфейс связи с компьютером, персональный компьютер и программное обеспечение.

Антенна станции «Лиана» — спиральная, ненаправленная, не требует управления. Она сравнительно легка и компактна и может быть установлена на крыше практически любого здания. Размер антенны в рабочем состоянии — 150 × 100 × 100 см, вес — не более 12 кг. Максимальная длина кабеля — до 50 м (на это расстояние антенна может быть отнесена от ПК). МШУ устанавливается на основании антенны. Шумовая температура — 250 К, коэффициент усиления — не менее 36 дБ, полоса пропускания — 136–138 МГц.

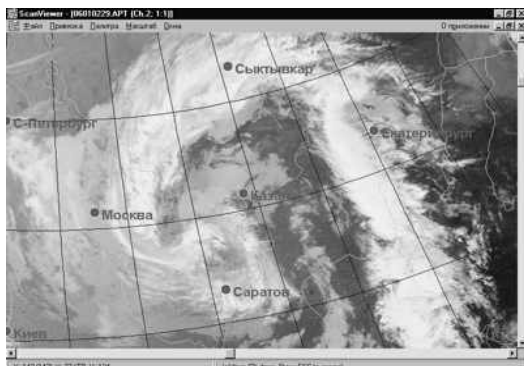


Рис. 5.10. Географическая привязка изображений

Программное обеспечение станции состоит из двух приложений Windows: SL Receiver и ScanViewer. Основные функции приложения управления станцией SL Receiver: расчет расписаний приема (т.е. прохождения спутников через зону видимости станции) по орбитальным элементам спутников в стандартных форматах TLE и TBUS; автоматическая активизация станции по расписанию; запись принимаемых данных на диск ПЭВМ; визуализация принимаемых изображений в реальном времени.

Основные функции приложения просмотра и предварительной обработки данных ScanViewer: визуализация изображений (рис. 5.9) — произвольного прямоугольного фрагмента в произвольном масштабе, в сером или псевдоцветном представлении; географическая привязка изображений с наложением карты и возможностью коррекции привязки по опорным точкам (рис. 5.10); фрагментация изображений; экспорт изображений в обменные графические форматы и вывод на печать. Станция «Лиана» используется в региональных, областных и авиационных гидрометеорологических центрах. Сегодня в оперативной эксплуатации находится более 90 станций «Лиана».

АПК «СканЭкс». Станция СканЭкс предназначена для приема и записи информации, передаваемой с полярно-орбитальных спутников серии NOAA в формате HRPT (High Resolution Picture Transmission) в диапазоне 1,7 ГГц.

Основную часть принимаемого потока составляют данные сканирующего радиометра AVHRR, который формирует изображения подстилающей поверхности в 5 спектральных диапазонах (от видимого до теплового инфракрасного), в полосе обзора шириной 3000 км, с пространственным разрешением в середине полосы 1,1 км. Станция

получает изображение окружающей ее территории 8–12 раз в сутки. Объем информации, получаемой за один сеанс связи, т.е. пока спутник проходит через зону видимости станции, может составлять до 80 МБ.

В состав станции входят: антенная система, лабораторный настольный блок, интерфейс связи с компьютером, персональный компьютер, программное обеспечение. Антенная система станции — зеркальная параболическая на антенно-поворотном устройстве (АПУ). Диаметр штатной антенны — 1,2 м, общий вес антенной системы — не более 50 кг. На антенне установлен облучатель с малошумящим усилителем (МШУ) и преобразователем частоты. Прием информации осуществляется бесплатно по концепции «открытое небо» Всемирной метеорологической организации.

Полярно-орбитальные искусственные спутники Земли серии NOAA (США) выводятся на солнечно-синхронные орбиты, т.е. каждые сутки спутник проходит над любой территорией примерно в одно и то же местное время. Высота орбиты порядка — 830 или 870 км. Орбиты проходят вблизи полюсов Земли, и с учетом широкой полосы обзора (3000 км) это гарантирует съемку любого участка поверхности не менее 6 раз в сутки с каждого спутника. В настоящее время функционируют NOAA-12, 14, 15, 16, 18.

АПК «СканЭкс» принимает информацию ИСЗ в цифровом формате HRPT в диапазоне 1670–1710 МГц с разрешением 1,1 км. Для сравнения: станция «Лиана» принимает информацию ИСЗ в аналоговом формате АРТ в диапазоне 137 МГц с разрешением порядка 3 км. Съемка вдоль подспутниковой трассы и передача информации ведется непрерывно. Для приема не требуется лицензирования, если информация не используется в коммерческих целях. Комплекс «СканЭкс» работает на базе обычного IBM совместимого персонального компьютера и полностью управляется программно. Участие оператора требуется только для коррекции таймера ПЭВМ, контроля свободного пространства диска, замены орбитальных данных и расчета расписания.

В состав персональной станции приема входит аппаратное и программное обеспечение. Аппаратная часть состоит из антенной системы и блока преобразования информации. Программное обеспечение включает следующие приложения:

- приема: обеспечивает управление комплексом при приеме и тестировании, расчет расписания прохождения спутников в заданном интервале времени, автоматический прием данных по расписанию, расчет траектории спутника для управления антенной, индикацию состояния антенны и потока данных в процессе приема, формирование файла принимаемых данных и запись его на жесткий диск, формиро-

вание растрового изображения одного из спектральных каналов и отображения его на дисплее в темпе приема;

- просмотра (рис. 5.11): обеспечивает просмотр изображений в произвольном черно-белом, псевдоцветном или синтезиропанном цветном представлении, целочисленное масштабирование на стадиях загрузки отображения, плавное масштабирование при отображении, коррекцию яркости и контрастности, географическую привязку по орбитальным элементам, расчет гистограмм и поэлементную фотометрию, радиояркостную калибровку изображений, коррекцию привязки по реперным точкам в изображении, расчет абсолютных значений температуры поверхности воды и вегетационного индекса, автоматическое детектирование очагов пожаров по температурным признакам;

- архивации: обеспечивает эффективную работу с большим количеством снимков и позволяет организовать запрос по дате и территории съемки;

- геометрической нормализации: обеспечивает трансформацию изображений в ряд географических проекций и экспорт их в различные форматы.

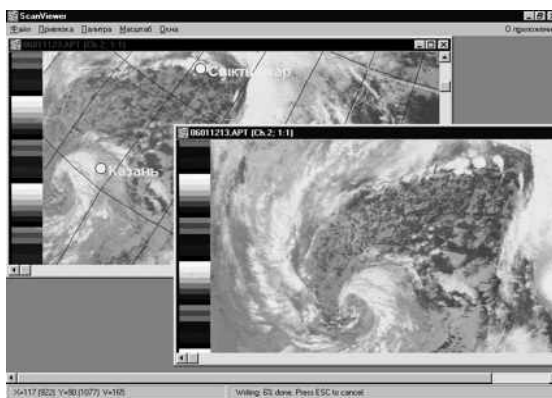


Рис. 5.11. Просмотр изображения в АПК

Глава 6. ЭКОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ КАК ИНСТРУМЕНТ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

На стыке многих областей знания, таких как науки об окружающей среде, информатика и др., возникла новая сфера деятельности — экоинформатика, ориентированная на применение информационных технологий для изучения окружающей среды и обеспечения устойчивого развития. Новый термин был образован из двух слов — экология и информатика. Термин экология был предложен Э. Геккелем в 1866 г. для обозначения части биологии, которая изучает экосистемы — сообщества живых организмов и их эволюцию в зависимости от состояния окружающей среды. В настоящее время этот термин истолковывается шире и используется для обозначения разделов науки, ориентированных на изучение и сохранение среды, окружающей человека. Термин «информатика» сформировался относительно недавно, как эквивалент понятия «computer science», и обозначает систему знаний об электронных вычислительных машинах и их использовании для решения различных задач. Информатика, как область человеческой деятельности, сформировалась во второй половине двадцатого века. В 80-е гг. XX в., фактически в течение одного десятилетия, во всех развитых странах мира были созданы национальные экоинформационные системы, которые включали национальные системы мониторинга атмосферы, водных ресурсов, почв и других компонентов природной среды, а также системы сбора и анализа географически привязанной информации об антропогенной нагрузке и состоянии здоровья населения. В девяностых годах, за счет появления новых информационных технологий и развития сети Internet, эти системы оказались объединенными в единую экоинформационную систему, на серверах которой хранятся огромные объемы информации о состоянии окружающей среды планеты Земля, полученные с помощью систем экологического мониторинга.

В экоинформационной системе можно выделить три уровня ориентированных на решение различных задач экологического мониторинга и отличающихся по методам работы с экологической информацией (рис. 6.1). Верхний уровень составляют программные модули для поддержки принятия решений, средний — программное обеспечение, позволяющее провести системный анализ информации о состоянии окружающей среды, нижний — модули обработки первичной экологической информации.

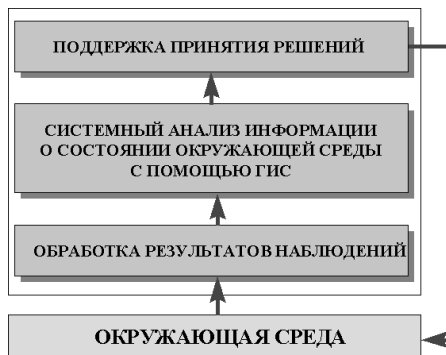


Рис. 6.1. Формирование информации для поддержки принятия решений в экоинформационных системах

На нижнем уровне экоинформационной системы для хранения данных о состоянии окружающей среды используются различные системы управления базами данных (СУБД), а для обработки результатов наблюдений используются программные продукты —электронные таблицы, пакеты прикладных программ типа MathCAD, Surfer и многие другие. Такое разнообразие систем программного обеспечения обусловлено громадным количеством разноплановых задач обработки результатов наблюдений за состоянием окружающей среды, полученных с помощью локальных и дистанционных методов экологического мониторинга. На среднем уровне экологической информационной системы для анализа информации о состоянии окружающей среды используются географические информационные системы (ГИС). Подобные системы, обеспечивая ввод, хранение, обновление, обработку, анализ и визуализацию всех видов географически привязанной информации, позволяют систематизировать выдачу информации для управления природными ресурсами, реализуя опыт, накопленный в этой области.

В будущем системы поддержки принятия решений в области экологической безопасности неизбежно будут основываться на математическом моделировании процессов, происходящих в природе. Это неудивительно, так как схема «модель (гипотеза) — эксперимент — установленный факт» составляет основу процесса познания практически в любой из многочисленных областей современной науки. В рамках математических моделей станет возможно сопоставление между собой сведений из разных источников, анализ результатов мониторинга, и прогнозирование последствий того или иного хозяйственного

решения. Вычислительная мощность современных компьютеров мала, а методы математического моделирования окружающей среды не достаточно отработаны, чтобы их результаты могли бы широко использоваться для поддержки принятия решений в области природоохранной деятельности. Поэтому в настоящее время накопление знаний, необходимых для поддержки принятия решений, основывается на упрощенных методах оценки воздействия на окружающую среду, таких как методология оценки воздействия на окружающую среду, индикаторы устойчивого развития и др.

Далее рассмотрим компьютерные технологии, используемые на различных уровнях экоинформационной системы для обработки данных мониторинга и формирования знаний о состоянии окружающей среды.

6.1. Базы данных и системы управления базами данных

Для манипулирования информацией (вводом, поиском) используются специальные пакеты программ, называемые системами управления базами данных (СУБД). Этот вид программного обеспечения в последние годы быстро совершенствуется. С одной стороны, СУБД шире используются для манипулирования новыми типами информации (мультимедиа, географические информационные системы), с другой — созданы новые технологии (архитектура «клиент-сервер», распределенные базы данных, гипертекст), которые позволяют обеспечить доступ к информации пользователей в рамках сети Internet, открывая новые возможности для изучения окружающей среды.

Рассмотрим технологии, позволяющие манипулировать экологической информацией. Информация — это сведения о состоянии окружающей среде и о процессах, в ней происходящих. Информация, фиксированная в определенной форме, пригодной для последующей обработки, хранения и передачи, называется данными. Организованный определенным образом массив данных, хранимый в вычислительной системе, называется базой данных. Термин «данные» был введен в информатике для того, чтобы подчеркнуть необходимость преобразования информации в форму, пригодную для ввода в компьютер. В последние годы благодаря развитию технологий мультимедиа с помощью компьютеров стало возможным обрабатывать практически любые типы информации об окружающей среде — зарисовки, звуки, видео и термин «информация» стал использоваться как синоним термина «данные». Комплекс баз данных и специальных методов и средств (программных, организационных), позволяющих работать с информа-

цией о состоянии окружающей среды широкому кругу пользователей, называется экологической информационной системой.

В 80-е гг. было разработано большое количество СУБД специально для ПК. В нашей стране наибольшее распространение получили такие СУБД, как FoxBASE, dBASE III plus, R:Base, Paradox, а в конце восьмидесятых годов приобрел популярность пакет Clipper. В 1991 г. начался новый этап в развитии СУБД для ПК, хотя основополагающие идеи этого этапа разрабатывались значительно раньше. Можно выделить три основные особенности нового этапа: распределенные базы данных, графический пользовательский интерфейс и архитектура «клиент-сервер». В 1993 г. первые СУБД этого нового поколения — Microsoft Access, dBase IV получили широкое распространение среди пользователей персональных компьютеров.

В настоящее время фактическим стандартом систем управления базами данных для персональных компьютеров является СУБД Microsoft Access. Пакет Microsoft Access for Windows является мощным средством управления базами данных, которое поддерживает реляционную модель данных и позволяет создавать сложные приложения на особом диалекте Visual BASIC (VBA). Microsoft Access можно применять для поиска и обработки всевозможных данных, а также для подготовки отчетных документов. Пользовательский интерфейс достаточно прост и предоставляет пользователю удобные возможности для манипулирования базами данных.

В связи с бурным развитием сети Internet, которая является гигантской распределенной базой данных, возрос интерес к таким СУБД, как Oracle. В настоящее время эта система управления базами данных установлена на многих серверах Сети.

Реляционные базы данных. В подавляющем большинстве СУБД для персональных компьютеров информация организовывается в виде двухмерных таблиц и их называют реляционными базами данных.

Широкое распространение получил иерархический подход к организации баз данных. Иерархические базы данных организовываются в виде деревьев, что предполагает неравноправие между данными — одни данные оказываются жестко подчинены другим. Такая организация данных напоминает некоторые схемы построения баз знаний в экспертных системах и обеспечивает высокоэффективный поиск информации. Однако иерархический подход к организации баз данных имеет и очевидные недостатки. Например, необходимо жестко определять связи между данными, что существенно усложняет организацию системы информации. Чтобы преодолеть подобные недостатки была предложена сетевая модель данных, в которой кроме вертикальных

связей между данными предусматривались и горизонтальные. Примером реализации такой модели может служить система директори, позволяющая организовать информацию на жестком диске персонального компьютера. Но и эта модель требует достаточно больших усилий при организации информации.

Реляционные базы данных появились из стремления преодолеть эти недостатки и обеспечить простые и гибкие способы организации данных. Реляционную базу данных можно определить как совокупность связанных таблиц. В такой базе информация организуется в виде двумерных таблиц, со столбцами — полями и строками — записями, в которых хранятся как сами данные, так и информация о связях между ними. Каждое поле содержит наименьший элемент данных, который можно хранить в таблице. Это может быть число, слово, какой-то текст или даже изображение, музыка, видеоклип. Запись (строка таблицы) представляет собой совокупность полей и содержит одну копию каждого определенного в базе данных поля, даже в том случае, если поле не содержит никакой информации. Множество записей образуют таблицу. Множество связанных между собой таблиц образуют реляционную базу данных.

Файлы .DBF стандарта dBASE представляют собой отображение двумерной таблицы со столбцами — полями и строками — записями. При поиске информации в этих файлах часто приходится использовать сведения о положении данных в файле (номер строки таблицы, номер записи файла .DBF) и в этом отношении стандарт dBASE не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к реляционным базам данных. Пока базы данных на персональных компьютерах были относительно невелики и их можно было разместить в одном файле .DBF, это обстоятельство не играло существенной роли, а привычная простота таблицы привлекала к этому способу организации информации многочисленных пользователей. Но при увеличении размеров баз данных хранить их в одной таблице становится невозможным и возникает необходимость выполнения других требований реляционной модели. В связи с этим для реляционной модели данных важное значение имеет понятие нормализации. Нормализация не является жестко фиксированным понятием или установленной раз и навсегда процедурой. Нормализация скорее набор правил, которыми стоит руководствоваться при проектировании реляционных баз данных. Одно из таких правил гласит — в таблице не должно быть повторяющихся полей и дублирования информации.

Как организовать информацию в реляционной базе данных, можно проиллюстрировать на примере базы BOOKS.MDB, созданной

с помощью СУБД Microsoft Access 7.0. База BOOKS.MDB предназначена для хранения информации о книгах. Схема организации информации в этой базе показана на рис. 6.2.

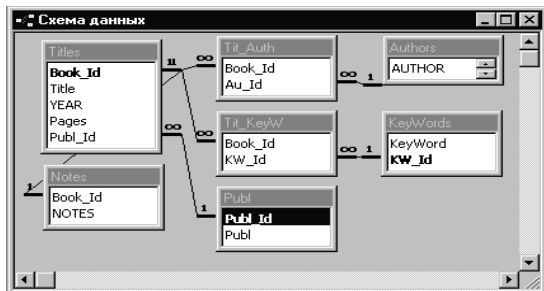


Рис. 6.2. Схема данных базы BOOKS.MDB

База данных BOOKS.MDB состоит из 7 таблиц. Отношения между таблицами бывают трех типов: «один к одному», «один ко многим» и «многие ко многим».

Пример отношения между таблицами Titles и Notes типа «один к одному» показан на рис. 6.3.

Book_Id	Title	PUBL	YEAR
1	Применение мате	М.: Физматгиз	1960
2	Статистические в	М.: Наука	1973
3	Анализ процессов с	М.: Мир	1973

Book_Id	NOTES
1	Основные алгоритмы регрессионного анализа
3	1. Хорошо проработанные примеры для тестирования

Рис. 6.3. Пример отношения между таблицами типа «один к одному»

В таблице Notes в полях типа MEMO хранятся примечания к некоторым, но далеко не ко всем книгам. Поэтому, чтобы не перегружать пустыми записями основную таблицу Titles, примечания вынесены в таблицу Notes. Связь между этими таблицами осуществляется по полям Book_Id. В любой таблице, как правило, хотя бы одно поле является ключевым. Благодаря ключевым полям любой запрос к базе данных может быть оформлен в виде операций с таблицами и их полями (атрибутами), но не с их строками. Кроме того, ключевые поля используются для поддержки целостности реляционной базы данных. Таблица может иметь только один уникальный идентификатор, называемый первичным ключом (primary key), и несколько вторичных (внешних) ключей (foreign key), ссылающихся на первичные ключи

других таблиц. При этом внешние ключевые поля таблицы должны иметь одно из значений, определенное для первичных ключей. Так, значения внешнего ключа Book_Id таблицы Notes равны соответствующим значениям первичного ключа Book_Id таблицы Titles. Благодаря этому устанавливается однозначное соответствие между полями таблиц, например: примечание в таблице Titles при Book_Id = 1 относится к книге, для которой значение первичного ключа Book_Id таблицы Titles равно также 1. Отношения типа «один ко многим» используются, когда одной записи первой таблицы необходимо поставить в соответствие несколько записей второй таблицы. Для описания такой ситуации приходится использовать связи, обеспечивающие отношения типа «многие ко многим» между записями таблиц. В этом случае связи между таблицами базы описываются во вспомогательных таблицах (junction table) Tit_Auth и Tit_KeyW, которые связаны отношениями типа «один ко многим» с другими таблицами. Следует отметить, что определять отношения между таблицами «вручную» – занятие трудоемкое. Этот процесс автоматизируется с помощью макросов Microsoft Access или программы на Visual BASIC. Пример формы, которая позволяет одновременно менять все таблицы базы BOOKS.MDB, показан на рис. 6.4. Программа, поддерживающая эту форму, написана на языке программирования Visual BASIC 5.0. Поля «Номер», «Название книги:» и «Год:» заполняются из таблицы Titles. Поле «Издательство» заполняется из таблицы Publ, связанной с таблицей Titles отношениями типа «один ко многим». Поле «Примечания» заполняется из таблицы Notes, связанной с таблицей Titles отношениями типа «один к одному». Список авторов и ключевых слов формируется на основе информации, хранящейся в таблицах Authors и KeyWords соответственно. Предусмотрен также ввод новых фамилий или ключевых слов.

Рис. 6.4. Форма для ввода информации в базу BOOKS.MDB

При сохранении информации, введенной в форму рис. 6.4, в таблицу Tit_Auth добавляется столько записей, сколько авторов у книги. При этом в поле Book_Id каждой новой записи копируется значение первичного ключа таблицы Titles, а в поле Au_Id – значения первичных ключей таблицы Authors. Название полей во вспомогательной таблице могут и не совпадать с названиями первичных ключей, но тип данных и размер этих полей должны совпадать обязательно. Таким образом, автоматически устанавливаются связи, показанные ломаными линиями на рис. 6.2. Обеспечение целостности данных достигается при установлении двух переключателей в меню СУБД Access – «Каскадное обновление связанных полей» и «Каскадное удаление связанных полей». Например, при установлении второго переключателя стирание записи о книге в таблице Titles приведет к стиранию записей в таблицах Tit_Auth и Tit_KeyW, для которых значение в поле Book_Id совпадает со значением ключевого поля удаленной записи. После этого становится возможным удалить записи с фамилиями авторов книги и ключевыми словами, если на них нет ссылок из других записей таблицы Titles. Реляционная модель данных превратилась в основное средство организации информации в базах данных не только на персональных компьютерах, но и на больших ЭВМ. В рамках этой модели был разработан язык структурированных запросов SQL, который стал основным средством для получения информации из реляционных баз данных.

Структурированные запросы и поиск информации. Язык структурированных запросов SQL (Structured Query Language) был разработан корпорацией IBM в семидесятих годах, но всеобщее распространение получил позднее, когда после появления компьютерных сетей потребовались стандартные языки для обмена информацией. Благодаря своей независимости от специфики компьютера, а также поддержке лидерами в области технологии реляционных баз данных SQL стал стандартным языком. Синтаксис SQL похож на синтаксис английского языка и позволяет конструировать достаточно сложные запросы. SQL является непроцедурным языком, в нем отсутствуют многие стандартные для процедурных языков конструкции – функции, циклы, условные операторы. SQL состоит из инструкций, которые передаются СУБД, обеспечивая выполнение определенных действий. Эти инструкции в общем виде называются предложениями, но чаще используется термин «команда SQL». Интерпретаторы команд SQL встраиваются во многие процедурные языки программирования, такие как Visual BASIC, C/C++. В этом случае команда обычно формируется в виде строковой переменной. Например, на языке Visual BASIC для

базы BOOKS.MDB можно сформировать следующую команду SQL, обеспечивающую формирование списка авторов книги в форме на рис. 6.4: sQry = «SELECT Authors.Author From Authors» & «INNER JOIN Tit_Auth ON Authors.Au_Id = Tit_Auth.Au_Id» & «WHERE (Tit_Auth.Book_Id = « + txtNum.Text +»)», что означает запрос «Выбрать из таблицы Authors все поля Author, содержащие фамилии авторов, для записей, в которых значение поля Au_Id совпадает со значением поля Au_Id из таблицы Tit_Auth, при этом значение поля Book_Id таблицы Tit_Auth должно равняться значению ключевого поля таблицы Titles». Значение ключевого поля таблицы Titles отображается в окошке «Номер» формы на рис. 6.4.

Во многих пакетах команды SQL формируются автоматически из специальных меню или форм. В этих случаях команды SQL используются в скрытом от пользователя виде. Примером такого использования является язык запросов по образцу QBE, который, например, достаточно широко применялся в СУБД Paradox. Другим примером могут служить электронные таблицы Excel. В этих таблицах с помощью приложения MS-Query можно формировать различные запросы по образцу к базам данных форматов Access, dBASE, Paradox, FoxPro и других, доступ к которым осуществляется через интерфейс ODBS (Open Data Base Connectivity).

Архитектура «клиент-сервер». Распространение компьютерных сетей породило еще одну, кроме необходимости разработки стандартизованного языка запросов, проблему. Эта проблема возникает, когда несколько пользователей с разных компьютеров начинают изменять одну и ту же базу данных. До тех пор пока база данных открыта «только для чтения», особых трудностей не возникает, но, как только нескольким пользователям позволяет модифицировать базу, возникают трудно разрешимые конфликты. Эти проблемы разрешаются в рамках модели базы данных типа «клиент-сервер». При реализации этой модели система управления базами данных разделяется на две части — «клиент» и «сервер». Программа «клиент» размещается на пользовательской машине и позволяет формировать запросы (как правило, на языке SQL), которые по сети передаются на специализированную машину (часто называемую «сервером»), где работает программа «сервер». Программа «сервер» обрабатывает запрос, формирует из базы данных требуемую выборку записей и отправляет ее программе «клиенту». Если пользователь предполагает изменять информацию в запрошенной выборке, доступ любого другого пользователя для модификации выбранных записей блокируется («монопольный захват»). Если пользователь запрашивает информацию «только для

чтения», то доступ к выбранным записям не ограничивается («коллективный захват»). Основной механизм, который позволяет избежать конфликтов между пользователями, заключается в разбиении процесса обработки информации на элементарные события — группы команд SQL, которые могут выполняться (или не выполняться) только все вместе. Такие группы команд называются транзакциями. Транзакция начинается всякий раз, когда на вход «сервера» начинают поступать команды SQL, если никакая другая транзакция не является активной. Транзакция заканчивается либо командой внести изменения в базу данных, либо отказом от внесения изменений (откат). Если в процессе выполнения команд возникает какая-либо ошибка, автоматически выполняется откат и база данных остается в исходном состоянии.

Распределенные базы данных. Успехи модели баз данных типа «клиент-сервер» привели к очевидной идее, что не только обработку информации можно распределить между несколькими компьютерами, но и саму информацию хранить в разных местах. Поэтому в начале 90-х гг. все большую привлекательность для пользователей персональных компьютеров стали приобретать распределенные базы данных и соответственно СУБД, разработанные для больших ЭВМ. Современные информационные системы очень редко реализуются на одном персональном компьютере, и поэтому возникают проблемы использования данных, хранящихся на разных ЭВМ, с обеспечением при этом высокой надежности работы и защиты данных. Многолетний опыт решения таких проблем, накопленный при разработке СУБД для больших машин, широко используется при создании сетей из персональных компьютеров. Под распределенной базой данных понимается логически единая база данных, которая размещается на нескольких ЭВМ. Гигантской распределенной базой данных является сеть Internet. Для пользователя любого из компьютеров, объединенных в сеть, в узлах которой распределена такая база данных, она выглядит как единое целое и одинаково доступна. При этом возникает много проблем с обеспечением целостности и непротиворечивости хранимых данных и, одновременно, приемлемого быстродействия прикладных программ, работающих с распределенной базой данных. Лишь в очень немногих системах управления базами данных (Sybase, Ingres, Informix) эти проблемы решены в достаточном объеме, и самой известной из них является СУБД Oracle. В программное обеспечение этой СУБД входит одна из наиболее полных реализаций языка структурированных запросов SQL, а также генераторы меню, отчетов и других экранных форм. Кроме того, программное обеспечение позволяет на основании информации, хранящейся в СУБД, строить более 50 типов графиков и

диаграмм. Oracle содержит очень надежную систему защиты данных, их целостности и непротиворечивости.

Мультимедиа. Термином «мультимедиа» (multimedia) обозначаются интерактивные компьютерные системы, обеспечивающие работу с разнообразными типами данных — неподвижными и движущимися изображениями, а также с текстом, речью и высококачественным звуком. В соответствующих базах данных хранится не только текстовая информация, но и оцифрованные видеоклипы, звуки и музыка, факсимильные изображения и многое другое. Современные системы управления мультимедийными базами данных поддерживают технологию «клиент–сервер», описанную в предыдущем разделе, а сами базы данных оказываются распределенными по узлам всемирной компьютерной сети. Технология мультимедиа чаще используется в настоящее время в образовании — для создания обучающих программ, тренажеров, энциклопедий и справочников. В одном файле можно разместить тексты, изображения, звуки и видеоклипы, связанные в единую интерактивную систему, последовательность событий в которой определяется пользователем.

6.2. Internet и гипертекстовые технологии

Компьютеры остаются одним из важнейших инструментов технического прогресса, широко используемых для автоматизации производственных процессов и в научной работе. В настоящее большое значение время приобрела сеть Internet. С одной стороны, это гигантская, распределенная по всей планете база данных, на узлах которой постепенно сосредотачиваются все накопленные знания, с другой стороны, это средство общения.

Развитие сети Internet. В восьмидесятые годы в развитых странах были созданы десятки информационных систем. Каждая такая система представляла собой локальную или распределенную сеть, объединяющую компьютеры правительственных, научных учреждений. В конце восьмидесятых годов такие локальные сети начали быстро объединяться. Internet — это некоммерческое объединение многих сетей. В ней нет единого центра управления, и она никому не принадлежит. Исторически сеть Internet выросла из американской сети ARPANET (Advanced Research Projects Agency NETwork), созданной по инициативе Управления перспективных исследований Министерства обороны США (Defense Advanced Research Projects Agency) в 1969 г. для обмена информацией между исследовательскими центрами военной промышленности. Одним из главных требований к этой сети

было требование надежности — сеть должна была продолжать функционировать даже в том случае, когда часть центров будет уничтожена. Для выполнения этого требования была придумана схема, которая и по сей день лежит в основе Internet — в сети отсутствует единый центр управления, вместо этого компьютеры постоянно обмениваются между собой информацией о текущем состоянии сети, что позволяет им выбрать путь для передачи данных между двумя компьютерами даже в том случае, когда большая часть других компьютеров в сети перестала функционировать.

В период с 1989 по 1993 г. сеть Internet расширялась со скоростью 20% в месяц и насчитывала до 2 млн подключенных компьютеров. К концу XX в. сеть Internet превратилась во всемирную объединяющую сотни сетей и многие миллионы компьютеров. Такое объединение произошло следующим образом. Небольшие группы компьютеров соединяются в локальные или распределенные сети. Локальной сетью называется компьютерная сеть, объединяющая компьютеры, расположенные в одном здании или в соседних зданиях, при этом информация передается непосредственно от компьютера к компьютеру. В локальных сетях используются различные сетевые платы (обычно Ethernet), обеспечивающие высокие скорости передачи информации. Непосредственное соединение компьютеров можно использовать только на небольших расстояниях. Если же компьютеры находятся в разных частях города или в разных городах, то отдельные компьютеры должны соединяться между собой с помощью модемов (модуляторов сигнала) и посредством множества разнообразных линий связи. Модем преобразует информацию, которая хранится в компьютере, в сигналы, которые могут быть переданы по телекоммуникационным линиям связи. И наоборот, принятые по линиям связи сигналы с помощью модема преобразуются в изображения на экране дисплея. Такие сети называют распределенными (региональными). Компьютеры локальной и распределенной сетей обычно связаны с узловым компьютером, который иногда называют хостом (host). Узловой компьютер с помощью специального коммутирующего устройства, называемого маршрутизатором (router), связывает компьютеры локальной или распределенной сети со всемирной сетью Internet.

Характеристики линий связи определяют работу сети в значительной большей степени, чем параметры модемов и любых других устройств, подключенных к сети. Телефонные линии не обеспечивают нужной скорости передачи информации. Поэтому с 90-х гг. осуществляется замена телефонных каналов, связывавших локальные сети между собой, на оптоволоконные и спутниковые каналы связи. Это по-

зволило существенно повысить скорость обмена информацией между конечными пользователями.

В каждой сети действуют определенные сетевые соглашения (протоколы обмена), обеспечивающие передачу информации от одного компьютера к другому. При подключении к Internet информация от разнотипных компьютеров, работающих под управлением различных операционных систем, для передачи преобразуется в соответствии с едиными протоколами обмена (TCP/IP). Протокол TCP (Transmission Control Protocol) определяет разбиение информации на отдельные нумерованные порции, а протокол IP (Internet Protocol) обеспечивает передачу их по назначению. При этом на компьютерах-серверах для доступа к информации может использоваться различное программное обеспечение, позволяющее пользователям Internet не только обмениваться файлами, но и обеспечивающее интерактивный доступ к базам данных сервера, а также поиск в базах данных, распределенных на других машинах сети. Наиболее известными в настоящее время протоколами для доступа к информации в сети Internet являются протоколы FTP, telnet, Gopher и WWW.

Протокол FTP (File Transfer Protocol) позволяет получать и передавать файлы. Этот протокол предполагает точное знание местонахождения файла на серверах сети Internet или, хотя бы, знание адреса сервера. При выполнении этого условия на свой компьютер можно скопировать нужный файл с сервера, находящегося в произвольном месте планеты, так же как, осуществляется копирование файла с диска на диск. Протокол telnet (протокол эмуляции терминала удаленного доступа) позволяет работать на компьютере, расположенном в другом городе или другой стране, если бы это был ваш собственный компьютер. Протокол Gopher предназначен для поиска информации и основывается на вложенной системе меню.

Огромные объемы информации, накопленные в мультимедиа-системах и циркулирующие в сети Internet, потребовали создания новой системы поиска данных, которая получила название гипертекста или, применительно к сети Internet, WWW (World Wide Web — «всемирная паутина»). Эта система основывается на специальном протоколе HTTP (Hyper Text Transfer Protocol), обеспечивающем передачу гипертекста.

Организация доступа к информации — гипертекстовые технологии. Термином «гипертекст» первоначально обозначалась технология работы с текстовыми данными, позволяющая устанавливать ассоциативные связи между отдельными фрагментами текста и благодаря этому допускающая не только последовательную работу с текстом, как

при обычном чтении, но и произвольный доступ в соответствии с установленной структурой связей. При этом текст оказывается одновременно организованным и от начала к концу, и по тематике, и по индексам, и по библиографическим указателям так, как задаст пользователь системы. Таким образом, гипертекстовые технологии обеспечивают структурирование информации и произвольный доступ к выделенным фрагментам с помощью установления гиперсвязей.

Типичным примером применения гипертекстовых технологий может служить справочная система (Help) таких пакетов, как Microsoft Word. В нем предусмотрены разнообразные подсказки, причем некоторую их часть система предоставляет автоматически. Мастер подсказок используется для генерации сообщений в тех случаях, когда система самостоятельно предприняла какие-то действия или когда считает, что пользователь что-то делает не самым эффективным образом. Из окна, в котором отображается сообщение, можно вызвать разъясняющую информацию.

С развитием технологий мультимедиа появились также системы, обеспечивающие возможность установления гиперсвязей для изображений. Они позволяют рассматривать фрагменты изображений, хранящиеся как отдельные изображения, полученные с большей детализацией, а также устанавливая связи фрагментов изображений с другими изображениями, поясняющим текстом, звуком и др. Такие системы иногда называют «гипермедиа», но чаще используют прежний термин – «гипертекст». Дальнейшее развитие технология гипертекста нашла в системе WWW (World Wide Web), на ее основе разработаны наиболее известные программы для поиска и просмотра информации в сети Internet, которые обычно называют браузерами (browser).

Стандартная технология поиска информации, реализованная, например, в протоколе Gopher, основывается на «деревьях». Примером реализации этой технологии могут служить также индексные файлы систем управления базами данных — «бинарные деревья». В тех случаях, когда поиск осуществляется автоматически на основе строгого алгоритма выбора дальнейшего пути поиска, технология, основанная на «деревьях», обеспечивает наилучшие результаты. Но в тех случаях, когда выбор осуществляет человек, не совсем ясно представляющий что он ищет, такой способ поиска будет приводить в тупик, т.е. к информации неполной. В таких случаях поиск приходится начинать сначала. Основная идея, реализованная в технологии WWW, состоит в том, чтобы каждый объект поиска имел ссылки на ассоциативно связанные с ним объекты. Причем в сети Internet такие ссылки может определять любой пользователь сети.

Языки программирования Internet. Язык разметки гипертекста HTML (Hypertext Markup Language) предназначен для создания мультимедийных документов, насыщенных изображениями, звуком, анимацией и гипертекстовыми ссылками на другие документы, которые могут размещаться как на одном компьютере, так и на многих, подключенных к сети Internet. HTML-документ состоит из текста и тегов, которые определяют внешний вид документа, объявляют о начале и конце гиперссылок и областей выполняемого кода.

Язык HTML непрерывно развивается, и в нем появляются все новые технологии, такие как, например, CGI (Common Gateway Interface) — интерфейс, обеспечивающий вызов внешних программ сервера. CGI-программы размещаются и исполняются на Web-сервере. В 1995 г. начала распространяться технология «исполняемого контекста», получившая название Java. Java представляет собой объектно-ориентированный интерпретируемый язык программирования, с синтаксисом, похожим на синтаксис языка C++, но более надежный. На языке Java пишется выполняемый код (активный объект — applet), который может быть частью HTML-документа после тега <applet> и загружаться с удаленного сервера. В состав программ браузеров включены интерпретаторы языка Java, которые и обеспечивают выполнение кода, полученного с сервера. Таким образом, программа, хранящаяся на удаленном сервере, может выполняться на пользовательском компьютере. Язык Java включает средства реализации графических, сетевых и многопоточных возможностей. Для обеспечения контроля за работой браузера используется язык JavaScript, который можно считать дополнением языка HTML. JavaScript — это объектно-ориентированный язык программирования, разработанный специалистами корпорации Netscape для описания сценариев при разработке Web-приложений. Он позволяет преобразовать статичные Web-страниц в динамичные, полностью интерактивные документы.

6.3. Обработка данных экологического мониторинга

Технология мультимедиа и возможности сетей широко используется в экоинформационных системах. Накапливаются огромные объемы информации — спутниковые данные, результаты локальных измерений, карты, космические снимки, видео. В сочетании с новыми технологиями обработки данных это позволит быстро получать исчерпывающие сведения о процессах, происходящих в биосфере. Для персональных ПК разработано большое количество универсальных пакетов прикладных программ, ориентированных на обеспечение процесса

измерения — электронные таблицы, пакеты для статистического анализа данных. Однако, как показывает опыт, максимальный эффект дают программы, созданные для конкретных приложений, например пакеты, разработанные для таких приборов, как хроматомасспектрометры, лазерные спектрометры, в которых персональный компьютер управляет всем процессом измерения. При разработке программного обеспечения для конкретных приложений удастся максимально учесть специфику данного вида измерений и в то же время сделать очень простой пользовательский интерфейс.

6.3.1. Электронные таблицы

В конце XX в. большую популярность приобрел пакет Excel. Электронные таблицы Excel позволяют решать многие задачи обработки данных, сформированных в таблицы. В Excel предусмотрен автоматический ввод данных из SQL-серверов и различных СУБД. Обработка данных дает возможность манипулирования комплексными числами и матрицами, вычисления параметров регрессионных зависимостей, преобразований Фурье и других статистических характеристик. Предусмотрены разнообразные методы для графического вывода результатов, в том числе, начиная с Excel 7.0, отображение получаемых результатов на числовые карты в формате ГИС MapInfo. Сложные задачи могут решаться в пределах нескольких связанных таблиц, называемых в Excel рабочей книгой. В пакете предусмотрены различные средства для сохранения логической целостности информации — автоматическая замена номеров листов и ячеек при внесении изменений в книгу, автоматическое копирование формул со сдвигом номеров ячеек в пределах столбцов со сходными вычислениями и многое другое. Продемонстрируем возможности пакета Excel для обработки данных экологического мониторинга.

Обработка данных анализа проб воды. На рис. 6.5 представлен фрагмент одного из листов рабочей книги, ориентированной на обработку данных анализа проб воды на разных стадиях ее очистки. В одной из нижних линеек перечислена часть листов и показано, что активным является лист, название которого начинается символами «Таб2». Весь рабочий лист разбит на ячейки, координаты которых определяются заголовками — названием столбца (латинские буквы А, В, С) и номером строки (цифры 1, 2, 3). Любую ячейку в пределах листа можно сделать активной, для этого надо указать на нее курсором и щелкнуть левой кнопкой мышки. В отображенный на рис. 6.5 момент в таблице активна ячейка F12. Размеры ячеек можно легко менять, ус-

тановив курсор на границы заголовка (например, на границу, разделяющую ячейки заголовка А и В), нажав левую кнопку мышки и переместив границу на новое место.

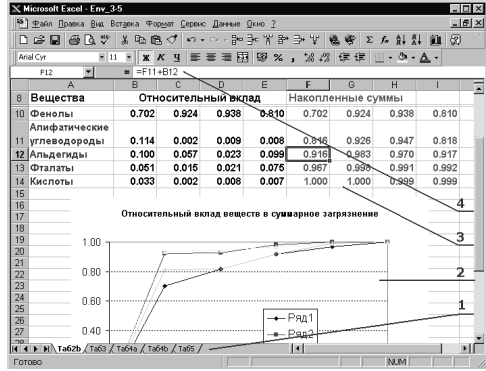


Рис. 6.5. Общий вид экрана при работе с электронными таблицами Excel

Рабочий лист на рис. 6.5 состоит из двух частей — диаграммы (2) и таблицы (3). В верхнем окне размещается таблица, в пределах которой проводятся вычисления. В одной из верхних линеек (4) приведена формула, по которой рассчитывается результат, отображенный в активной ячейке $F12 = F11 - B12$. Это означает, что число в ячейке F12 определяется результатом вычитания числа в ячейке B12 из числа в ячейке F11. В нижнем окне рабочего листа размещается диаграмма, более полно показанная на рис. 6.6.

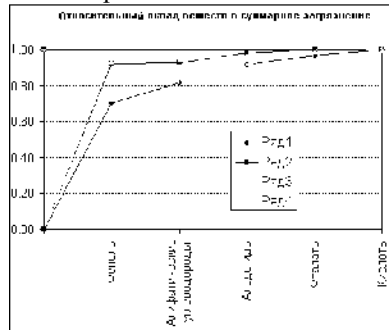


Рис. 6.6. Результаты обработки анализа проб воды на разных стадиях ее очистки: 1 — исходная вода; 2 — фильтрат, обработанный аммиаком и хлором; 3 — исходная вода, прошедшая озонирование; 4 — фильтрат озонированной воды после реагентной обработки и вторичного хлорирования

Диаграмма формируется по результатам, полученным в столбцах A, F, G, H и I таблицы при выборе пункта меню Вставка — Диаграмма, и далее в окне «Мастер диаграмм» надо установить тип диаграммы «График». Свойства элементов диаграммы могут быть легко изменены. Для этого надо щелкнуть правой кнопкой по выбранному элементу и вызвать в выпадающем меню специальную форму.

Линейный регрессионный анализ. Линейный регрессионный анализ обычно включает четыре стандартных этапа:

- оценка по заданной выборке $\{x_i \ y_i\}$, $i = 1...k$ коэффициентов b_1 и b_0 линейных моделей $Y = b_0 + b_1X$ или $Y = b_1X$;
- оценка остаточной дисперсии, характеризующей качество аппроксимации исходных данных;
- оценка значимости коэффициентов b_1 и b_0 ;
- проверка адекватности модели экспериментальным данным.

В Excel линейный регрессионный анализ осуществляется с помощью функции ЛИНЕЙН. Эта функция вызывается стандартным способом (Вставка — Функция). Пример формы, заполненной для запуска функции ЛИНЕЙН, приведен на рис. 6.7.

Рис. 6.7. Входные данные для функции ЛИНЕЙН

Массивы X и Y, использованные для расчетов, представлены на рис. 6.7. В форме ЛИНЕЙН заполняются четыре поля:

- в поле Изв_знач_y вводится ссылка на массив значений Y — ячейки B4: B13, которые видны слева от формы;
- в поле Изв_знач_x вводится ссылка на массив значений X — ячейки A4: A13, которые видны в первом столбце таблицы Excel;
- в поле Константа вводится логическое значение ИСТИНА или ЛОЖЬ. При значении ИСТИНА анализ проводится для модели $Y = b + mX$ (или в более привычном написании: $Y = b_0 + b_1X$), а при значении ЛОЖЬ — для модели $Y = mX$;

– в поле Стат вводится логическое значение ИСТИНА, если надо выводить результаты статистического анализа, и значение ЛОЖЬ (или ничего не вводится), если эти результаты не нужны.

Результаты расчетов с помощью функции ЛИНЕЙН представлены на рис. 6.8. Для того чтобы вывести в результате расчетов массив значений, перед вызовом функции ЛИНЕЙН необходимо выделить ячейки, в которые необходимо записать результаты (выделены цветом). После заполнения формы (рис. 6.8) необходимо одновременно нажать клавиши CTRL + SHIFT + ENTER. При этом формула (верхнее правое поле) для вызова функции ЛИНЕЙН окаймляется фигурными скобками {}, а в отведенное место таблицы выводятся результаты.

Д4 (=ЛИНЕЙН(B4:B13;A4:A13;1;1))

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3		X	Y	Результаты:		
4	10	12.05		0.1875	10.26	
5	10	11.48		0.0274	0.9072	
6	20	12.59		0.8544	1.2233	
7	20	15.82		46.961	8	
8	30	17.35		70.275	11.972	
9	30	16.42				
10	40	16.24				
11	40	17.04				
12	50	20.56				
13	50	19.28				
14	Пример 4.3.1 из книги Д. Хэммелъ-Блау (1973)					

Рис. 6.8. Результаты расчетов с помощью функции ЛИНЕЙН

Расшифровка результатов расчета функции ЛИНЕЙН представлена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты расчета функции ЛИНЕЙН

0.1875 - B1	10.26 - B0
0.0274 - Sb1	0.9072 - Sb0
0.8544 - r2	1.2233 - Sv
46.961 - F	8 - fv
70.275 - SSreg	11.972 - SSresid

Значения b1 и b0 присвоены переменным a и b (Вставка — Имя — Присвоить). Переменные a и b использованы для получения расчетных значений Yрас. Формула для расчета 1-го значения представлена на рис. 6.9 ($C3 = a + b \cdot A3$). Вызов переменных: (Вставка — Имя — Вставить). Остальные Yрас значения получены копированием 1-го.

График полученной зависимости представлен на рис. 6.9.

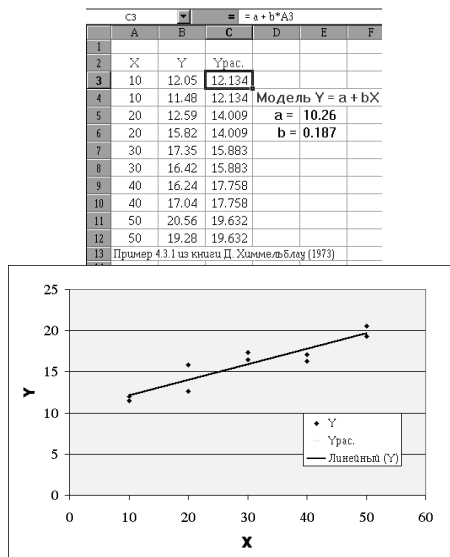


Рис. 6.9. Расчетные значения Y и график полученной зависимости

Более подробную информацию по использованию электронных таблиц Excel в геоэкологических исследованиях можно найти в специализированных пособиях.

6.3.2. Пакеты для инженерных и научных расчетов

Идея трансляции математической формулы в машинный язык, например, лежит в основе языка программирования FORTRAN. В разное время было разработано много пакетов прикладных программ, в которых реализовывалась метафора формулы. Традиционно такие пакеты были ориентированы на инженерные и научные расчеты, эффективные в исследованиях окружающей среды. Особенности подобных пакетов рассмотрим на примере пакета Mathcad фирмы MathSoft, Inc. (USA). Пакет Mathcad предназначен для работы с формулами, числами, текстами и графиками, причем формулы могут быть записаны в привычном символьном виде. Простейший пример вычислений с помощью Matcad приведен на рис. 6.10.

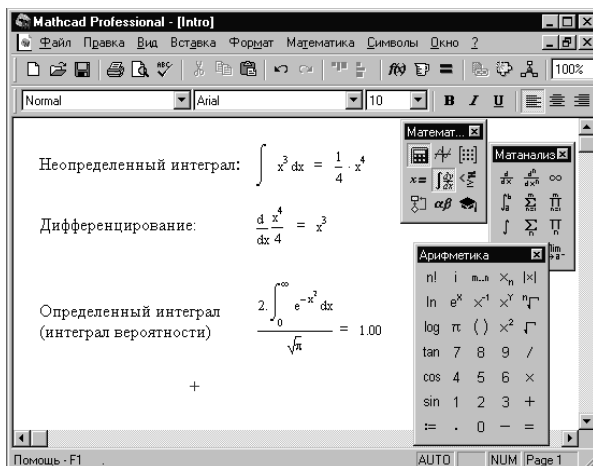


Рис. 6.10. Общий вид экрана при работе с пакетом Mathcad

Представлены результаты вычисления неопределенного интеграла в символьном виде, затем полученное выражение продифференцировано и, наконец, рассчитано значение определенного интеграла, тоже записанного в символьном виде. Mathcad допускает возможность комбинирования на экране дисплея математических выкладок, текста и графики. Так, при взятии неопределенного интеграла исходная формула была набрана с помощью панелей инструментов, которые видны в правой части экрана на рис. 6.10, значение интеграла в символьной форме было получено в результате работы программы, а поясняющий текст был набран, как в обычном текстовом редакторе.

Возможности символьных вычислений пакета Mathcad, кроме интегрирования и дифференцирования, включают решение алгебраических уравнений и алгебраические преобразования, а также матричные преобразования – обращение и транспонирование матриц и вычисление их определителей. При проведении символьных вычислений исходное выражение и результат представляются в символьной форме. При численных вычислениях только исходное выражение представляется в численном виде, а результат отображается в виде набора чисел или с помощью графиков. В пакете Mathcad реализовано большое количество численных алгоритмов:

- решение систем уравнений и неравенств,
- вычисление сумм, рядов, произведений и функций,
- решение обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных,

- вычисление производных и интегралов,
- вычисление тригонометрических, гиперболических, экспоненциальных и бесселевых функций,
- вычисление статистических функций, включая линейную регрессию и функций вероятностных распределений,
- быстрые преобразования Фурье, одномерные и двумерные,
- аппроксимация кривых кубическими сплайнами.

В пакете предусмотрена возможность проведения вычислений с комплексными числами, переменными и функциями, а также с векторами и матрицами, включая операции матричного умножения, обращения матриц, транспонирования, вычисления определителя матрицы, скалярное и векторное умножение. Результаты вычислений могут быть представлены в виде разнообразных графиков:

- функции в декартовых и полярных координатах, с линейными и логарифмическими осями,
- линии уровня,
- трехмерные функции (поверхности уровня) и др.

Предусмотрены разнообразные средства для обмена информацией с другими пакетами. Ниже приведены примеры обработки данных с помощью пакета Mathcad 2000.

Функции нормального распределения. Стандартная нормальная функция распределения (интеграл вероятности) $\text{spnorm}(x)$ в пакете Mathcad эквивалентна функции $\text{pnorm}(x, 0, 1)$ с аргументами: $m = 0$ — среднее арифметическое значение, $s = 1$ — среднеквадратическое отклонение. Обратная функция существует для $\text{pnorm}(x, m, s)$ — это $\text{qnorm}(p, m, s)$, где аргумент p — вероятность. Обратной функции для $\text{spnorm}(x)$ не предусмотрено. Кроме функции для расчета интеграла вероятности $\text{spnorm}(x)$ в пакете Mathcad существует функция для расчета интеграла ошибок — $\text{erf}(x)$. Расчет с помощью функций Mathcad может быть реализован следующим образом:

$$\text{spnorm}(1.000) = 0.841345$$

$$\text{pnorm}(1.000, 0, 1.0) = 0.841345.$$

Для нормального отклонения 1.000 интеграл вероятности

$$0.841345 = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{1.000} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = 0.841345$$

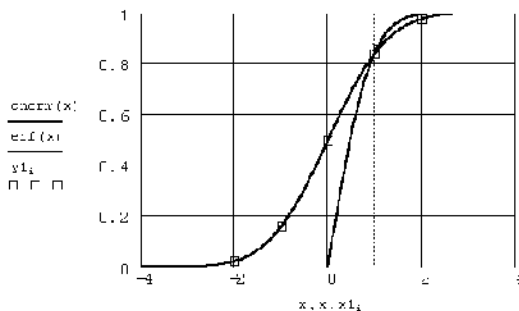
Обратная величина: для $P = 0.841345$ нормальное отклонение $\text{qnorm}(0.841345, 0.0, 1.0) = 1.0$

Интеграл ошибок: $\text{erf}(1.000) = 0.842701$

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{1.000} e^{-x^2} dx = 0.842701$$

Графики интегралов вероятностей и ошибок:

```
x = -4, -3, 0, 1, 2
i = 0 .. 4      x1_i = i - 2      y1_i = cnorm(x1_i)
k = 0.59227      cnorm(x) = 0.839457      erf(x) = 0.839457
```



Здесь выведено 3 зависимости:

- график интеграла вероятности $\text{cnorm}(x)$ — красная линия;
- график интеграла ошибок $\text{erf}(x)$ — синяя линия;
- значения интеграла вероятности в точках -2, -1, 0, 1, 2 — точки, обозначенные зелеными квадратами.

Условные знаки для этих зависимостей можно сменить, если вызвать форму **Formatting Carrently Selected X-Y Plot** (правой кнопкой по графику, а потом **Формат — След.** или в меню: **Формат — График — X-Y Зависимость — След.**). Там же можно подключить легенду.

График строится следующим образом: **Вставка — График — X-Y Зависимость**. Для того чтобы построить 3 графика (в данном случае 2 линии и точки), надо задать переменные по осям абсцисс и ординат. В данном случае по каждой из осей используются 3 переменные. Для того чтобы ввести вторую переменную, после первой переменной необходимо поставить запятую ($\text{cnorm}(x)$,) и т.д. Здесь надо быть внимательным — курсор должен относиться ко всей переменной, а, например, не к нижнему индексу. Если все сделано правильно, по оси ординат появляющееся окошко ввода должно перескочить на следующую строчку. Можно отображать не только линии (lines), но и точки (points), отрезки, показывающие ошибки (error), и др. Для этого в форме **Formatting Carrently Selected X-Y Plot** надо сменить тип графика. Например, для 2-й зависимости тип lines заменен на points и выбран

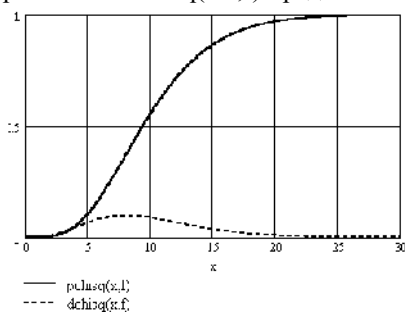
символ Вох. Для того чтобы увидеть график, надо закончить ввод — щелкнуть мышкой вне области графика. До этого график не виден.

Метка k, показанная на графике вертикальной пунктирной линией и обозначающая точку, в которой значения интегралов вероятности и ошибок равны с точностью до 6-го знака, подключается в столбце Оси X-Y формы Formatting Carrently Selected X-Y Plot. После этого у соответствующей оси появятся два окошка, в которые можно ввести имена меток (естественно соответствующие переменные должны быть определены заранее).

Распределение хи-квадрат. Квантили распределения хи-квадрат рассчитываются с помощью функции $qchisq(P, f)$ где P — доверительная вероятность, а f — число степеней свободы. Доверительная вероятность рассчитывается с помощью функции $pchisq(chi, f)$. Плотность доверительной вероятности определяется выражением $dchisq(chi, f)$. Расчет с помощью функций Mathcad может быть реализован следующим образом:

$$\begin{aligned}
 &P := 0.1 \quad f := 10 \\
 &chi := qchisq(P, f) \quad chi = 4.3652 \\
 &dP1 := dchisq(chi, f) \quad dP1 = 0.064 \quad \frac{1}{2^{\frac{f}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{f}{2}\right)} \cdot chi^{\frac{f}{2}-1} \cdot e^{-\frac{chi}{2}} = 0.0541 \\
 &P1 := pchisq(chi, f) \quad P1 = 0.1 \quad \frac{1}{2^{\frac{f}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{f}{2}\right)} \cdot \int_0^{chi} x^{\frac{f}{2}-1} \cdot e^{-\frac{x}{2}} dx = 0.1 \\
 &x := 0, 0.1 \dots 4 \cdot f
 \end{aligned}$$

Графики доверительной вероятности $pchisq(chi, f)$ и плотности доверительной вероятности $dchisq(chi, f)$ представлены ниже.



Распределение Стьюдента. Квантили распределения Стьюдента рассчитываются с помощью функции $t = qt(P, f)$, где P — доверительная вероятность, а f — число степеней свободы. Существует обратная функция для расчета доверительной вероятности $P = pt(t, f)$, а также функция для расчета плотности доверительной вероятности $dP =$

= dt(t, f). Для значений доверительной вероятности ($P = 0.95$) и числа степеней свободы ($f = 10$) имеем:

$$t := qt(P, f) \quad t = 1.812,$$

$$P1 := pt(t, f) \quad P1 = 0.9,$$

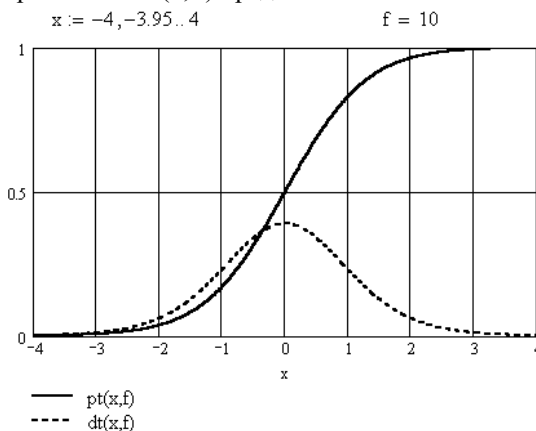
$$dP1 := dt(t, f) \quad dP1 = 0.082.$$

Те же значения для доверительной вероятности $P1$ и для плотности доверительной вероятности $dP1$ можно получить, используя выражения

$$P1 = 0.5 + \frac{\Gamma\left(\frac{f+1}{2}\right)}{\sqrt{f} \cdot \pi \cdot \Gamma\left(\frac{f}{2}\right)} \int_0^t \left(1 + \frac{x^2}{f}\right)^{-\frac{f+1}{2}} dx \quad P1 = 0.95$$

$$dP1 := \frac{\Gamma\left(\frac{f+1}{2}\right)}{\sqrt{f} \cdot \pi \cdot \Gamma\left(\frac{f}{2}\right)} \cdot \left(1 + \frac{t^2}{f}\right)^{-\frac{f+1}{2}} \quad dP1 = 0.082$$

Графики доверительной вероятности $pt(x, f)$ и плотности доверительной вероятности $dt(x, f)$ представлены ниже.



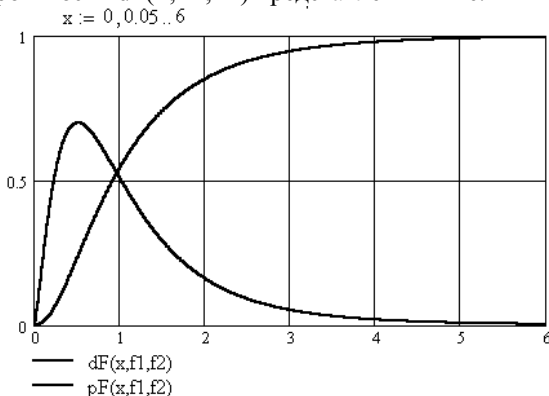
Распределение Фишера. Квантили распределения Фишера рассчитываются с помощью функции $qF(P, f1, f2)$ где P — доверительная вероятность, а $f1, f2$ — степени свободы. Доверительная вероятность рассчитывается с помощью функции $rF(F, f1, f2)$. Плотность доверительной вероятности определяется функцией $dF(F, f1, f2)$, которая определяется отношением плотностей доверительной вероятности двух распределений хи-квадрат.

Для значений доверительной вероятности ($P = 0.99$) и числа степеней свободы ($f_1 = 5, f_2 = 12$) имеем: $F := qF(P, f_1, f_2) \quad F = 5.0643$.

$$dF(F, f_1, f_2) = 0.0073 \quad \frac{\Gamma\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) \cdot f_1^{\frac{f_1}{2}} \cdot f_2^{\frac{f_2}{2}}}{\Gamma\left(\frac{f_1}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{f_2}{2}\right)} \cdot \left[\frac{F^{\frac{f_1}{2}-1}}{(f_1 \cdot F + f_2)^{\frac{f_1+f_2}{2}}} \right] = 0.0073$$

$$pF(F, f_1, f_2) = 0.9900 \quad \int_0^F \frac{\Gamma\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) \cdot f_1^{\frac{f_1}{2}} \cdot f_2^{\frac{f_2}{2}}}{\Gamma\left(\frac{f_1}{2}\right) \cdot \Gamma\left(\frac{f_2}{2}\right)} \cdot \left[\frac{x^{\frac{f_1}{2}-1}}{(f_1 \cdot x + f_2)^{\frac{f_1+f_2}{2}}} \right] dx = 0.9900$$

Графики доверительной вероятности $pF(F, f_1, f_2)$ и плотности доверительной вероятности $dF(F, f_1, f_2)$ представлены ниже.



Распределение Кокрена. Для числа степеней свободы $f_1 = 9$, доверительной вероятности $P = 0.95$ и числа сравниваемых дисперсий $n = 4$, использованных для тестирования, получим

$$\begin{aligned}
 P &:= 0.95 & f_1 &:= 9 & n &:= 4.0 \\
 a &:= 1 - P & P_1 &:= 1 - \frac{a}{n} & f_2 &:= f_1 \cdot (n - 1) & n_1 &:= n - 1 \\
 G_1 &:= \frac{qF(P_1, f_1, f_2)}{n_1 + qF(P_1, f_1, f_2)} & G_1 &= 0.5018
 \end{aligned}$$

Это совпадает с табличным значением квантиля распределения Кокрена с точностью до четырех значащих цифр.

Линейный регрессионный анализ без повторных наблюдений. Для тестирования функций линейного регрессионного анализа использовался тот же массив данных, что и ранее. Этот массив данных записан в два неструктурированных файла data1X.dat и data1Y.dat (табл.6.2).

Таблица 6.2

Массив данных

data1 X.dat	data1 Y.dat
10.0	12.05
10.0	11.48
20.0	12.59
20.0	15.82
30.0	17.35
30.0	16.42
40.0	16.24
40.0	17.04
50.0	20.56
50.0	19.28

Эти данные читаются в два массива, и на этой основе рассчитывают коэффициенты b_0 , b_1 , значение остаточной дисперсии $S2Y0$ и расчетные значения y_{ci} :

```

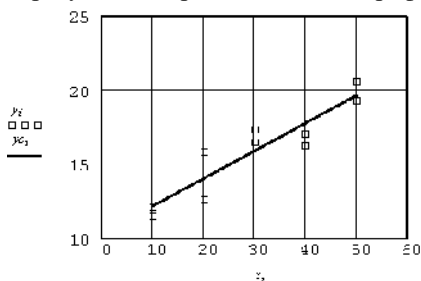
i = 0..9
xi := READ("data1X.dat")
yi := READ("data1Y.dat")

b1 := slope(x, y)          b1 = 0.1874
b0 := intercept(x, y)     b0 = 10.2595  <- коэффициенты
S2Y0 := stdev(x, y)2      S2Y0 = 1.4965

yci := b0 + b1 xi      <- расчетные значения

```

Полученные результаты представлены на графике.



В заключение следует сказать об ограничениях пакета Mathcad. Основным ограничением при сложных научно-технических расчетах является отсутствие собственного языка программирования. Пакет Mathcad ориентирован на сравнительно простые задачи, в более сложных случаях следует использовать такие пакеты, как MATLAB.

6.3.3. Пакеты программ для статистического анализа данных мониторинга

Методы статистического анализа реализованы в пакетах прикладных программ, различающихся как по объему и качеству методов, так и по назначению. Их можно разделить на три группы — пакеты базовой статистики, пакеты углубленного статистического анализа и экспертные статистические системы.

Пакеты базовой статистики ориентированы на пользователей, не являющихся специалистами в области статистического анализа. Такие пакеты включают в основном классические методы анализа — расчет простых оценок (например, среднего арифметического), критерии, основанные на статистике Стьюдента (t-тесты), однофакторный дисперсионный анализ и др. В документации приводится подробное описание используемых методов, а пользовательский интерфейс основан на системе меню с максимально возможными подсказками и пояснениями.

Пакеты углубленного статистического анализа ориентированы на специалистов по математической статистике. Такие пакеты (STATISTICA, Systat, SAS, Statgraphics и др.) содержат мощное математическое обеспечение, включающее методы разведочного анализа, факторный и регрессионный анализ, анализ временных рядов и многое другое. Как правило, такие пакеты имеют собственный язык, позволяющий вызывать имеющиеся в пакете статистические процедуры и даже программировать новые. Кроме того, пакеты углубленного статистического анализа имеют очень широкие возможности по визуализации результатов анализа в виде графиков, гистограмм.

Рассмотрим свойства пакета углубленного статистического анализа на примере пакета STATISTICA фирмы StatSoft Inc. (США). Этот пакет достаточно широко распространен в России.

На рис. 6.11 представлен пример обработки данных, которые использовались для тестирования функций и оценки параметров простой линейной регрессии. В левом верхнем окне видны исходные данные. В правом верхнем окне на графике отображены эти данные и зависимость $y = 10.259 + 0.187 \cdot x$. В нижнем окне показаны результаты обработки с помощью модуля множественной регрессии пакета STATISTICA, которые во многом совпадают с аналогичными результатами, полученными в пакете Excel.

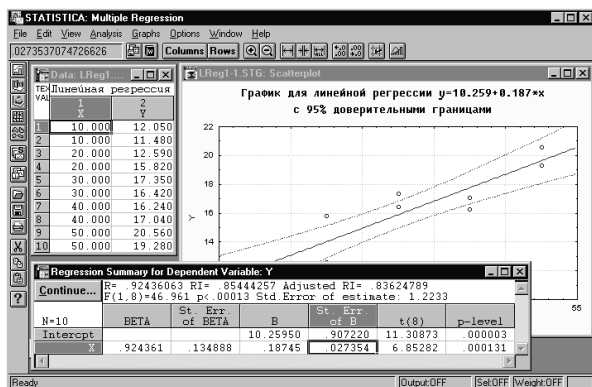


Рис. 6.11. Общий вид экрана при работе с пакетом STATISTICA

STATISTICA представляет собой интегрированную систему статистического анализа и обработки данных. Система состоит из следующих основных компонент:

- подсистемы для работы с данными, которая включает в себя электронные таблицы для ввода и задания исходных данных, а также специальных таблиц для вывода численных результатов анализа и модуля управления данными. Для статистической обработки чрезвычайно больших массивов данных имеется специальный инструмент Менеджер мегафайлов, который может быть использован и для предварительной обработки данных перед вводом их непосредственно в электронную таблицу STATISTICA;
- мощной графической системы для визуализации данных и результатов статистического анализа;
- набора статистических модулей, в которых собраны группы логически связанных между собой статистических процедур. В любом конкретном модуле можно выполнить определенный способ статистической обработки, не обращаясь к процедурам из других модулей;
- подсистемы подготовки отчетов. При помощи текстового редактора, встроенного в систему, можно готовить полноценные отчеты. В STATISTICA также имеется возможность автоматического создания отчетов;
- встроенных языков SCL и STATISTICA BASIC, которые позволяют автоматизировать рутинные процессы обработки данных в системе.

Пакет STATISTICA включает следующие основные модули:

– модуль основных статистик и таблиц, включающий процедуры для описательных статистик, группировки, разведочного анализа, оценки корреляции и т.п.,

– модули «Множественная регрессия», «Дисперсионный анализ», «Дискриминантный анализ», «Непараметрическая статистика», «Факторный анализ», «Многомерное шкалирование», «Анализ надежности», «Кластерный анализ», «Логлинейный анализ», «Нелинейное оценивание» и др.

Формальное применение статистических методов без тщательного анализа их пригодности для обработки конкретного типа данных приводит к неверным результатам. Это обусловлено сложностью задач обработки данных при исследовании природной среды.

Первое поколение статистических экспертных систем было ориентировано на подготовленного пользователя. Многие из методов, отработанных при создании таких систем, широко используются в разрабатываемых в последнее время проблемно-ориентированных пакетах (специализированных пакетов для статистического анализа). Особенность таких пакетов в том, что они используют терминологию и критерии, принятые в какой-либо конкретной области знания. Такие пакеты помогают пользователю уточнить цель исследования, выбрать наиболее подходящий метод обработки, подобрать математическую модель.

6.4. Статистические экспертные системы для обработки данных экологического мониторинга

Особенности экспертных систем для обработки данных. Экспертной системой принято называть систему искусственного интеллекта, которая создана для решения задач в конкретной проблемной области. Структура экспертной системы определяется следующими модулями:

– временные базы данных, предназначенные для хранения исходных и промежуточных данных текущей задачи;

– базы знаний, предназначенные для хранения долгосрочных сведений (фактов) и правил манипулирования данными;

– базы программ, реализующие последовательность правил для решения конкретной задачи на основе информации, хранящейся в базах знаний и базах данных;

– компонент приобретения знаний, автоматизирующий процесс наполнения базы знаний;

– объяснительный компонент, формирующий пояснения о том, как система решала поставленную задачу.

Экспертные системы для обработки данных принято называть статистическими экспертными системами. Такие системы за счет дружеского пользовательского интерфейса должны иметь возможность помочь начинающему пользователю не только ввести результаты наблюдений, но и уточнить задачу обработки и, при необходимости, спланировать эксперимент, позволяющий решить поставленную задачу. В базе знаний экспертной системы должно храниться достаточно большое и постоянно пополняемое количество сведений и правил для того, чтобы обеспечить возможность решения разнообразных задач обработки данных. Пояснения о том, как система решала поставленную задачу, должны быть понятны специалисту в предметной области и содержать достаточно информации для анализа достоверности результатов обработки специалистом по математической статистике.

Разработка экспертных систем, предназначенных для обработки данных, связана с огромными трудностями. «Интеллектуализация» компьютерной обработки первичной информации об окружающей среде основывается, с одной стороны, на идеях и методах конкретной области знания, для которой создается система обработки данных. С другой стороны, в компьютерной системе обработки используются разнообразные методы прикладной математики — математической статистики, теории решения обратных задач и др. Поэтому при создании экспертных систем обработки данных, с одной стороны, приходится учитывать методические и метрологические особенности методик выполнения измерения, а с другой — априорные предположения и ограничения математических алгоритмов обработки, что предполагает участие профессионалов — специалистов в предметной области, математиков, программистов и специалистов по разработке экспертных систем. Поэтому при наличии огромного количества систем общего назначения — пакетов для статистической обработки данных, электронных таблиц существует небольшое количество экспертных систем, способных автоматически провести весь цикл анализа данных.

Методические и метрологические особенности обработки данных контроля природной среды. Любая наблюдаемая (и ненаблюдаемая) величина в природе зависит от множества других величин. Это очевидное утверждение может быть записано в виде уравнения

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

в которое в качестве «величин» $Y, X_1, X_2, \dots, X_n$ можно подставить любое число, зарегистрированное путем измерения или наблюдения некоторого параметра (признака, свойства, состояния и др.) изучаемого

объекта природной среды. В простейшем случае «величина» может принимать только два значения — 0 и 1. Например, дождь идет — 1, дождь прекратился — 0.

Основной особенностью данных об окружающей среде, определяющей требования к алгоритмам их обработки, является чрезвычайное разнообразие этих данных по источникам информации (наблюдение явлений, происходящих в природе; локальные и дистанционные измерения; официальная статистика). Эти данные имеют разную степень достоверности и характеризуют окружающую среду с различных сторон. Наиболее значимая часть сведений об окружающей среде получается с помощью измерений, которые составляют предмет изучения таких дисциплин, как «экологический мониторинг», «метеорология», «приборостроение». Здесь невозможно рассказать обо всех проблемах измерений при контроле окружающей среды. Назовем только те из них, которые важны для понимания особенностей обработки данных экологического мониторинга.

Методы экологического мониторинга подразделяются на локальные и дистанционные. Для локальных (контактных) методов характерно то, что пробоотбор и измерения проводятся в точке контроля. Для дистанционных методов точка контроля может быть удалена на сотни километров от средства измерения.

Наиболее распространенными при контроле природной среды являются локальные методы мониторинга. В самом общем случае, при контроле загрязнения химическими веществами, такие методы включают: планирование эксперимента, пробоотбор, пробоподготовку, измерения состава пробы (физико-химические, медико-биологические и т.п.), обработку результатов измерений и, наконец, включение полученных результатов в эcoinформационные системы. Планирование эксперимента предполагает определение пространственной и временной частоты измерений, требуемого количества проб. Пробоотбор и пробоподготовка имеют целью формирование представительной пробы, по которой можно судить о степени содержания загрязняющих веществ в окружающей среде. Измерения состава и свойств пробы и последующая обработка результатов должны позволять расшифровывать состав пробы, определять содержание в пробе различных химических веществ и оценивать погрешность. При включении обработанных данных в эcoinформационные системы необходимо преобразовать полученные результаты в форматы соответствующей географической информационной системы, учитывая при этом уже имеющиеся данные, а также цели, с которыми проводился мониторинг окружающей среды.

Дистанционные методы зондирования включают измерения, выполненные с некоторого расстояния, например из космоса, с использованием различных летательных аппаратов, а также наземные измерения, проводимые с помощью локаторов различного типа и пассивных приборов. Как правило, дистанционные методы зондирования значительно превосходят локальные по полноте пространственной информации, но сложнее в обработке результатов. Трудность обработки результатов дистанционных методов обусловлена, главным образом, двумя причинами: во-первых, сложностью перехода от измеряемых физических величин (типа альбеда подстилающей поверхности) к параметрам, характеризующим загрязнение окружающей среды, и, во-вторых, неоднозначностью влияния свойств атмосферы на результаты дистанционных измерений.

Зарегистрированное с помощью локальных или дистанционных измерений значение X_{ji} i -го параметра изучаемого объекта природной среды X_i можно представить в виде суммы $X_{ji} = X_{mi} + X_{si} + X_{ei}$, где X_{mi} — истинное значение величины (математическое ожидание), X_{si} — погрешность из-за изменения величины во времени, X_{ei} — погрешность измерения. При обработке данных контроля природной среды необходимо определить значение наблюдаемой величины и оценить составляющие погрешности результата измерения. Погрешности результата измерений могут быть обусловлены самим процессом измерения, а также изменением физической величины во времени. Кроме того, если результат измерения относят не к той точке, в которой проводились измерения, появляется еще одна пространственная составляющая погрешности. Эту погрешность можно считать пренебрежимо малой, если определение географических координат для результатов локальных измерений осуществляется с помощью глобальных систем определения координат GPS (Global Position Systems).

Оценка погрешности результатов измерения относится к задачам метрологического обеспечения. Для стандартизованных средств измерения она решается с помощью поверочных схем, передающих размер единицы физической величины от эталона к рабочему средству измерения. В этом случае погрешность результата измерения определяется результатами проверки. Сложнее определить составляющие погрешности результата измерения, особенно в тех случаях, когда используются нестандартизованные средства измерений или методики выполнения измерения. В этом случае оценка составляющих погрешности предполагает проведение целого комплекса исследований, методически основанного на идеях теоретической метрологии. Основная сложность состоит в том, что на каждом этапе этих исследований де-

лаются многочисленные допущения, например, о том, что химические реакции идут до конца и нет побочных химических реакций. Невыполнение этих допущений может сильно влиять на величину составляющих погрешности и на свойства обрабатываемых данных, которые в результате могут иметь законы распределения, отличные от нормального, сериальные корреляции и многие другие особенности, которые существенно затрудняют проведение статистической обработки данных. Задачи обработки данных экологического мониторинга достаточно многочисленны и сложны.

Математические особенности обработки данных контроля природной среды. Обработка данных контроля природной среды проводится с помощью методов прикладной статистики — дисперсионного анализа, регрессионного анализа и др. Неоднократно отмечалось, что формальное применение методов математической статистики без анализа пригодности для обработки конкретного типа данных приводит к неверным результатам. Важное значение для исследования природной среды имеет регрессионный анализ, изучающий зависимости между случайными величинами. Регрессионный анализ ведет свою историю с работ Гаусса и Лагранжа по обоснованию метода наименьших квадратов. В начале XX в. регрессионный анализ быстро развивался (работы К. Пирсона), основным его недостатком считались вычислительные сложности при реализации. С появлением ЭВМ они перестали быть препятствием, однако постепенно выяснилось, что в большинстве случаев регрессионная задача принадлежит к классу задач, которые математики называют некорректно поставленными. Поэтому, как область чистой математики, регрессионный анализ перестал рассматриваться и теперь относят к прикладной статистике (анализу данных). Прикладная статистика нацелена на решение того же вопроса, что и математическая статистика — какие выводы можно сделать, обрабатывая ограниченную выборку. Но в этой теории за счет отказа от математической строгости удалось снять некоторые логические противоречия и уменьшить значение дополнительных априорных предположений. Так появились корреляционный и кластерный анализы, алгоритмы непараметрической статистики, робастные методы. Важнейшим понятием в теории анализа данных является понятие «модель».

Понятие «модель» стало центральным и для новой технологии научных исследований, которая называется вычислительным экспериментом и основывается на изучении математических моделей с помощью вычислительных средств. Обычно выделяют три основных типа вычислительного эксперимента: поисковый, оптимизационный и диаг-

ностический. Поисковый вычислительный эксперимент используется при исследовании процессов переноса и основывается на решении прямых задач математической физики. Математическая модель в этом случае обычно представляется системой дифференциальных уравнений с частными производными. Для оптимизационного вычислительного эксперимента характерно решение задачи оптимизации, т.е. определение параметров модели, при которых достигается минимум или максимум некоторого функционала, например минимум ущерба окружающей среде. При этом используются самые разнообразные математические модели — от простых алгебраических уравнений до сложных систем интегродифференциальных уравнений. Диагностический вычислительный эксперимент используется при обработке данных и основывается на решении обратной задачи математической физики.

Любая задача определения параметров окружающей среды по величине сигнала какого-либо прибора относится к классу обратных задач и является некорректной из-за погрешностей обрабатываемой измерительной информации. В этом случае точное решение обратной задачи найти невозможно и задача обработки данных сводится к получению устойчивого к малым изменениям исходных данных приближенного решения. Отнесение алгоритмов обработки измерительной информации к обратным задачам позволяет оценивать свойства таких алгоритмов, абстрагируясь от составляющих погрешности экспериментальных данных. Это открывает возможность для разработки процедур и критериев выбора наиболее эффективного алгоритма обработки конкретного типа данных из некоторого множества рассматриваемых алгоритмов. В то же время, поскольку для некорректных обратных задач не может существовать заведомо устойчивого решения, вопрос об устойчивости к малым изменениям исходных данных приближенного решения становится центральным для оценки любого алгоритма обработки.

Прогресс вычислительной техники и информационных технологий порождает иллюзию, что, используя все более изощренные математические методы, можно из одних и тех же данных извлекать дополнительную или более достоверную информацию. Подобные ожидания не всегда оправдываются. Методы прикладной статистики, используемые для обработки данных, основываются на различных априорных предположениях. Выполняются или нет априорные предположения, используемые в конкретном методе обработки, зависит от структуры исходных данных. Алгоритм обработки, эффективный для одного типа данных, может приводить к невероятным результатам для данных другого типа. Специалисты по аналитической химии не всегда

могут выбрать из большого количества потенциально пригодных методов обработки данных алгоритм, подходящий для конкретного типа данных. С другой стороны, специалисты по обработке данных из-за разнообразия типов данных не могут предложить универсальный алгоритм обработки, одинаково пригодный для любого случая. Современные ПК позволяют в приемлемые сроки обработать одни и те же данные разными способами. Проблема в том, что далеко не для всех случаев сформулированы критерии, которые позволяют выбрать алгоритм, наиболее эффективный для обработки конкретного типа данных. Специалисты по обработке данных в таких случаях часто полагаются на интуицию, и многие этапы обработки остаются плохо формализованными.

Решением вопроса является разработка баз знаний экспертных систем, в которых после анализа свойств введенных данных автоматически выбирается наиболее эффективный алгоритм их обработки. Такие базы знаний требуют формализации всех этапов обработки, начиная с предварительного (разведочного) анализа данных и до заключительных критериев, позволяющих оценить оптимальность проведенной обработки. При этом требуется обоснование процедур, позволяющих выделить точностные характеристики алгоритма обработки данных из погрешностей средств измерений и из неопределенностей, обусловленных нестабильностью пробы. Кроме того, для разработки программного обеспечения необходимо сформулировать принципы выбора алгоритмов, т.е. правила, позволяющие отдать предпочтение одному алгоритму перед другими. После этого, изучая свойства данных и устойчивость выбранных алгоритмов к изменению этих свойств с помощью обоснованного комплекса процедур и правил, можно сформировать критерии для передачи управления между программными модулями экспертной системы, что является необходимым условием для ее создания.

Глава 7. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Результаты экологического мониторинга всегда имеют географическую привязку, поэтому оптимальным способом организации анализа сведений о состоянии окружающей среды будет тот, который основывается на географической информационной системе (ГИС). Географические информационные системы предназначены для создания карт и анализа событий, происходящих на планете. Определение ГИС принадлежит Институту системных исследований окружающей среды (Environment System Research Institute — ESRI) — разработчику ГИС ARC/INFO. Существуют и другие определения ГИС, используемые в научной литературе и отражающие другие взгляды на обсуждаемую проблему. Иногда в термин «ГИС» вкладывается значительно более широкий смысл, чем это вытекает из определения ESRI. В это понятие могут включаться и способы принятия решения на основе анализа пространственной информации. Географическая информационная система — это типичная система управления базами данных, многочисленные примеры которых рассмотрены ранее. В случае ГИС разработка новых подходов началась давно — в середине 60-х гг. была предпринята первая попытка создать компьютерную систему для управления географическими данными. В начале 70-х гг. появились первые коммерческие ГИС на ЭВМ, а потом и на персональных компьютерах. Мощные полнофункциональные географические информационные системы, такие как ARC/INFO, MapInfo, IDRISI, служат основным инструментом при создании национальных и региональных экологических информационных систем.

7.1. Структура геоинформационных систем

Термин «географическая информационная система» обозначает организованный набор аппаратуры, программного обеспечения, географических данных и персонала, предназначенный для эффективного ввода, хранения, обновления, обработки, анализа и визуализации всех видов географически привязанной информации. Специалисты, проектирующие и поддерживающие систему, во многом определяют ее свойства и эффективность последующего использования. Аппаратные средства включают компьютеры (платформы), на которых работает ГИС. Такие ГИС, как ARC/INFO, функционируют на достаточно большом количестве платформ — на мощных серверах, обслуживающих клиентские машины в локальных сетях и в сети Internet, на рабо-

чих станциях и отдельных ПК. Кроме того, географические информационные системы используют разнообразное периферийное оборудование — дигитайзеры (для оцифровки карт), лазерные принтеры, плоттеры (для печати карт). Программное обеспечение позволяет вводить, сохранять, анализировать и отображать географическую информацию. Ключевыми компонентами программного обеспечения являются:

- средства для ввода и манипулирования географическими данными;
- система управления базой данных;
- программные средства, обеспечивающие поддержку запросов, географический анализ и визуализацию информации;
- графический интерфейс пользователя, облегчающий использование программных средств.

Данные — важный компонент ГИС. Географические информационные системы работают с данными двух основных типов:

- пространственные (синонимы: картографические, векторные) данные, описывающие положение и форму географических объектов, и их пространственные связи с другими объектами;
- описательные (синонимы: атрибутивные, табличные) данные о географических объектах, состоящие из наборов чисел, текстов.

Описательная информация организуется в базу данных. Таблицы связываются между собой по ключевым полям, для них могут быть определены индексы, отношения. Кроме этого, в ГИС описательная информация связывается с пространственными данными. Отличие ГИС от стандартных систем управления базами данных (dBASE, Access и др.) состоит в том, что ГИС позволяют работать с пространственными данными. Пространственные данные в ГИС представляются в двух основных формах — векторной и растровой. Векторная модель данных основывается на представлении карты в виде точек, линий и замкнутых фигур. Растровая модель данных основывается на представлении карты с помощью регулярной сетки одинаковых по форме и площади элементов. Различия между этими моделями данных поясняются рис. 7.1.

Растровая модель — это набор одинаковых по величине, но разного цвета окрашенных квадратов. В векторной модели данных озеро изображается окрашенным многоугольником, который в ARC/INFO называется полигоном (polygon), а река — ломаной линией, которая называется дугой (arc). Начало и конец этой ломаной линии называются узлами (node).

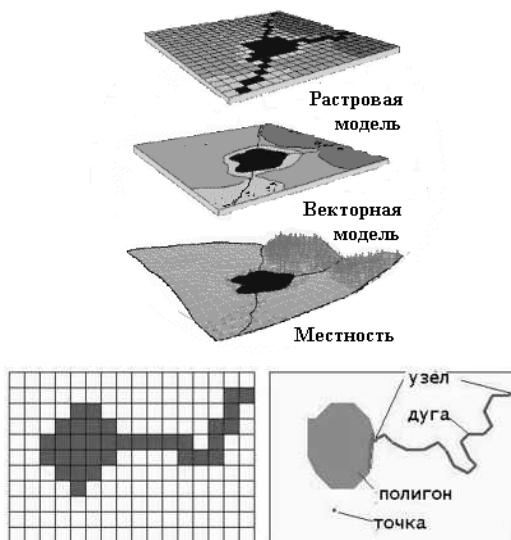


Рис. 7.1. Растровая и векторная модели пространственных данных

Другой пример растрового и векторного способов отображения пространственных данных представлен на рис. 7.2 и 7.3. На них показано, как изменяются фрагменты изображения при его увеличении. На рис. 7.2 изображение получено прибором AVHRR спутника NOAA и визуализировано с помощью растровой ГИС IDRISI. Его форма несколько искажена, что объясняется особенностями орбиты спутника NOAA. На рис. 7.3 представлена карта в проекции Меркатора, сформированная из покрытий PONET и DNNET карты DCW с помощью ГИС ARC/INFO.

При увеличении изображения в первом случае увеличивается размер прямоугольных ячеек — элементов изображения (пикселей), из которых состоит растровое изображение. При этом ни форма, ни цвет прямоугольников (величина сигналов) не изменяются. На нижнем фрагменте рис. 7.2 хорошо видны прямоугольники, из которых составлено изображение о. Котлин. Изменение цвета пикселей на границах острова объясняется тем, что эти сигналы определяются отражением и от поверхности острова, и от поверхности Финского залива.



Рис. 7.2. Растровый способ представления пространственных данных

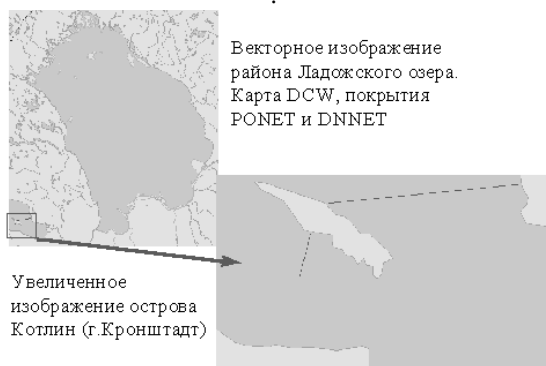


Рис. 7.3. Векторный способ представления пространственных данных

При увеличении изображения на рис. 7.3 полигон, соответствующий о. Котлин, преобразуется в подобный полигон большей площади. Для большего полигона увеличивается длина отрезков замкнутой ломаной линии, определяющей его границу, при этом ширина этой линии не изменяется.

7.2. Цифровые карты

Из всей совокупности географических объектов можно выделить родственные объекты, например реки, которые впадают в другие реки или озера; железные дороги, которые образуют железнодорож-

ную сеть и могут начаться от другой железной дороги, но не начинаются от шоссейной дороги. Такие родственные объекты можно объединить в покрытия (coverage), представляющие собой цифровой аналог слоя карты, а иногда и отдельной карты. При этом картографическая информация фрагментируется, что очень удобно, так как позволяет в дальнейшем работать лишь с теми слоями карты, которые действительно необходимы пользователю при решении поставленной задачи.



Рис. 7.4. Объединение отдельных слоев в цифровую карту

На рис. 7.4 показан процесс объединения в простую цифровую карту двух слоев цифровой карты DCW: PONET — границы государств, морей, океанов; DNNET — гидрографические объекты (реки, каналы, озера, острова).

Двумерные покрытия, как уже отмечалось в предыдущем разделе, состоят из элементарных географических объектов трех типов — точек, линий и площадных объектов (полигонов). Точки определяют объект карты, который слишком мал, чтобы показать его на карте линией или контуром, или объект, вообще не имеющий площади, например высшую точку горного массива. Ломаные линии, называемые в ARC/INFO дугами, определяют объекты слишком узкие, чтобы можно изобразить его площадь, или объекты, вообще не имеющие ширины, например изолинии. Площадной объект представляет собой фигуру, ограниченную замкнутой ломаной линией и определяющую однородную территорию — озеро, страну. Следует отметить относительность понятий «малость», «узость» в определениях типов географических объектов. Например, на карте одного масштаба река может выглядеть как линейный объект, а на карте другого масштаба как площадной. Строго говоря, для цифровой карты понятие масштаба не совсем корректно — любой фрагмент карты может быть увеличен или уменьшен до желаемого размера. Однако масштаб бумажной карты, на основе которой формировалась цифровая карта, имеет очень большое значение, поскольку определяет степень детализации отображения геогра-

фических объектов и их атрибутов. Например, цифровая карта DCW сформирована на основе карт масштаба 1:1000000. Именно это обстоятельство определяет, какой объект на этой карте будет изображаться полигоном, а какой ломаной линией. На рис. 7.5, представляющем фрагмент карты DCW, р. Нева имеет ширину и изображается в виде полигона, а реки, впадающие в нее и в Финский залив, изображаются ломаными линиями.

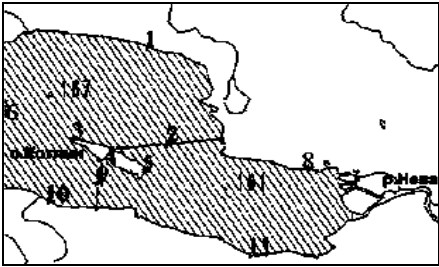


Рис. 7.5. Организация пространственной информации на числовой карте

В цифровых картах пространственная информация об объектах хранится в виде координат (X, Y). Точка описывается одной парой координат. Отрезок прямой линии представляется двумя парами координат (X, Y), соответствующими началу и концу отрезка. Ломаные линии описываются упорядоченной последовательностью координат (X, Y). Если ломаная линия начинается и заканчивается в одной и той же точке, она ограничивает замкнутую фигуру — полигон. Соответственно, первая и последняя пары координат ломаной линии (или первой и последней из ломаных линий, когда полигон ограничивается несколькими дугами) должны совпадать. Карта состоит из множества объектов. Чтобы различать их, каждому присваивается номер (идентификатор). Соответственно, координаты каждого объекта хранятся вместе с идентификатором. Например, северный (идентификатор 2) и южный (идентификатор 9) участки дамбы на рис. 7.5 описываются линиями со следующими географическими координатами (долготой и широтой):

```
2
29.73174 60.02094
29.96598 60.03535
END
.....
9
29.70355 60.00590
29.69974 59.93268
END
```

Картографическая информация об объектах включает не только их координаты, но и отношения типа «Нева впадает в Балтийское море». На цифровых картах такие отношения описываются с помощью топологии, определяющей пространственные связи. В ГИС ARC/INFO приняты три основные топологические условия: дуги соединяются между собой в узлах; дуги, ограничивающие фигуру, определяют полигон; дуги имеют направление, а также левую и правую сторону.

Рассмотрим применение этих концепций на примере рис. 7.5. Полигон с номером (идентификатором) 167, изображающий часть Финского залива, ограничивается дугами с идентификаторами 1, 2, 3, 9, 10, 6. Дуга представляет собой ломаную линию, причем внутренние точки, в которых сопрягаются концы смежных отрезков и которые определяют форму дуги, называются вершинами (vertex, vertices), а концы ломаной линии называются узлами (node, nodes). Условие связности дуг (1) предполагает, что дуги соединяются только в узлах. Предположим, что к существующему набору дуг нужно добавить новую, описывающую вновь появившийся объект. При использовании в качестве узла (начала или конца) новой дуги внутренней точки (вершины) существующей дуги вершина становится узлом и соответственно существовавшая дуга распадется на две новых. Например, в исходной версии цифровой карты DCW о. Котлин ограничивался одной дугой, которая начиналась и заканчивалась в одной и той же точке (псевдоузле). При добавлении информации о положении дамбы (дуги 2 и 9) узлы, которыми дамба заканчивалась со стороны о. Котлина, совмещены с вершинами дуги, ограничивающей остров. В результате эта дуга распалась на три дуги с идентификаторами 3, 4 и 5. На рис. 7.5 узлы трех получившихся дуг, ограничивающих остров, показаны жирными точками.

В том случае, когда узел одной дуги не совмещается с узлом другой дуги (или дуг), констатируются ошибки топологии. Такие ошибки бывают двух типов — псевдоузел и висячий узел. Псевдоузел констатируется в случае, если в узле соединяется меньше трех дуг, т.е. встречается замкнутая линия (остров) или одна дуга является продолжением другой. Висячий узел возникает, если дуга в этом месте не соединяется ни с какой другой дугой и не замыкается на себя. Следует отметить, что псевдоузлы и висячие узлы считаются топологическими ошибками, но во многих случаях их существование вполне допустимо. Например, висячие узлы встречаются при обозначении истока рек. Всем дугам приписано направление, соответственно, узлы бывают двух типов — начальные (from-node) и конечные (to-node). При этом один полигон находится справа от дуги, а другой — слева (условие 3).

Соответствующая информация хранится в таблицах, облегчая проведение географического анализа.

Таблица 7.1

Атрибутивная таблица

PONET	FNODE	TNODE	LPOLY	RPOLY
1	2	1	167	148
2	3	2	167	161
3	3	4	166	167
6	7	1	0	167
9	4	9	161	167
10	9	7	148	167

Так, о дугах, ограничивающих полигон 167 на рис. 7.5, в табл. AAT.DBF (Arc Attribute Table), в которой описаны показанные на рисунке объекты, хранится следующая информация. В верхней строке таблицы приведены названия полей: Ponet_ — идентификатор дуги — ключевое поле; Fnode_ — номер начального узла дуги; Tnode_ — номер конечного узла дуги; Lpoly_ и Rpoly_ — номера левого и правого полигонов, которые соответствуют значениям поля Ponet_id таблицы PAT.DBF. В колонке Ponet_ табл. 7.1 значения идентификаторов расположены в порядке возрастания, хотя реально последовательность дуг, ограничивающих полигон 167, другая: 1, 2, 3, 9, 10, 6. Дуга 6 ограничивает фрагмент карты, поэтому левый для нее полигон обозначен нулем (0). Номер 166 соответствует полигону, отображающему о. Котлин. Номер 148 приписан побережью Финского залива. Номера узлов, приведенных в колонках Fnode_ и Tnode_, на рис. 7.5 не показаны. Таким образом, в атрибутивных таблицах хранится информация о каждой дуге и о каждом полигоне, что обеспечивает связывание атрибутивной и пространственной информации. Пример соотнесения пространственной и атрибутивной информации показан на рис. 7.6 и 7.7.

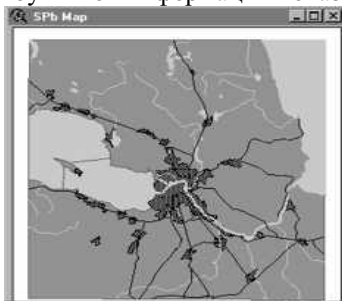
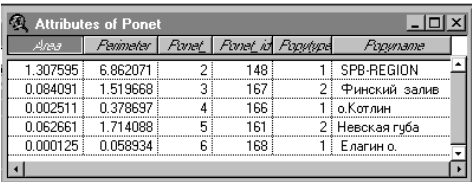


Рис. 7.6. Фрагмент карты района г. Санкт-Петербурга

На рис. 7.6 приведен фрагмент карты района Санкт-Петербурга в проекции Меркатора. На этом фрагменте совмещены четыре покрытия: Ponet: океаны, моря, страны; Dpnet: озера, реки; Rppol: районы жилой застройки; Rrline: железные дороги. Фрагмент таблицы PAT.DBF, содержащей описание полигонов, для покрытия Ponet приведен в окне Attributes of Ponet на рис. 7.7.



Area	Perimeter	Ponet	Ponet_id	Roroute	Roroute_name
1.307595	6.862071	2	148	1	SPB-REGION
0.084091	1.519668	3	167	2	Финский залив
0.002511	0.378637	4	166	1	о.Котлин
0.062661	1.714088	5	161	2	Невская губа
0.000125	0.058934	6	168	1	Елагин о.

Рис. 7.7. Фрагмент таблицы PAT.DBF с описанием покрытия Ponet

На рис. 7.7 показаны значения шести полей. Информация, хранящаяся в полях Area и Perimeter, позволяет рассчитывать площадь и периметр полигонов в установленных единицах — метрах, дюймах и др. Поле Ponet_ , так же как в таблице AAT.DBF (табл. 7.1), содержит уникальный внутренний идентификатор, позволяющий связывать ячейки таблицы PAT.DBF с пространственной информацией, приведенной на рис. 7.5 и 7.6 и с атрибутивной информацией, хранящейся в других таблицах. Например, значения пользовательского идентификатора, хранящегося в поле Ponet_id, можно автоматически вывести в качестве меток полигонов, как это сделано на рис. 7.5. Эти значения можно также связать с информацией о положении полигонов относительно дуг, хранящейся в таблице AAT.DBF (табл. 7.1). В поле Roroute хранится информация о типе полигона. Значение 1 в этом поле означает сушу, а значение 2 — море. Именно эти значения использовались для того, чтобы на рис. 7.6 сушу и море раскрасить в различные цвета, а на рис. 7.5 выделить море косой штриховкой. В поле Roroute_name хранятся названия полигонов.

7.3. Принципы географического анализа экологической информации

Географический анализ экологической информации позволяет изучать процессы, происходящие в окружающей среде, путем проведения различных логических операций над векторными и атрибутивными данными (пространственного и табличного анализа). Для ото-

бражения результатов пространственного анализа обычно используются карты, а для отображения результатов табличного анализа — отчеты. Пример отображения результатов простого пространственного анализа приведен на рис. 7.8. На этом примере обсуждаются некоторые особенности проведения географического анализа и открывающиеся при этом возможности.

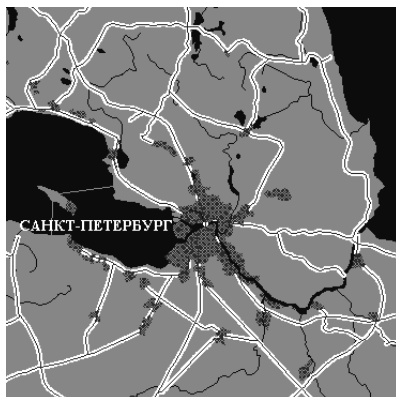


Рис. 7.8. Зона загрязнения вокруг шоссе-ных дорог вне населенных пунктов

Цель проведения географического анализа, результаты которого представлены на рис. 7.8, состояла в определении зон возможного загрязнения почв свинцом по критерию, использованному в «Экологической карте Ленинградской области», — преимущественное нахождение свинца вдоль автодорог с интенсивным движением в двухсотметровой полосе. Дополнительное условие анализа состояло в исключении из рассмотрения районов жилой застройки — городов и поселков городского типа, где загрязнение почв свинцом наблюдается повсеместно. Решение задачи проходило в несколько этапов. Во-первых, подготовлена карта района Санкт-Петербурга (рис. 7.8) в проекции Меркатора, на которой совмещены четыре покрытия карты DCW: Ponet: океаны, моря, страны; Dnnnet: озера, реки; Rppoly: районы жилой застройки; Rdline: автомобильные дороги.

Далее средствами ARC/INFO было сформировано покрытие RdlineM1, включающее области, лежащие вблизи автомобильных дорог (в пределах 200 м). Затем из этого покрытия вырезаны области, соответствующие жилой застройке. При этом сформировано покрытие RdlineM2. На рис. 7.8 часть полигонов этого покрытия, соответствующих внутренним областям буферных зон, показаны белой заливкой.

Эти полигоны представляют решение поставленной задачи по определению зон возможного загрязнения почв свинцом.

Первое, что следует отметить в связи с этой задачей, — это легкость, с которой она решается средствами ARC/INFO. Быстро решаются и другие задачи пространственного анализа:

- формирование областей, лежащих вне полигонов вырезающего покрытия;
- создание новых покрытий при помощи «вырезания и склеивания»;
- расщепление покрытий на несколько меньших покрытий;
- наложение полигонов и сохранение всех областей обоих покрытий;
- наложение точек, линий или полигонов на полигоны и сохранение всех объектов входных покрытий;
- наложение точек, линий или полигонов, но сохранение только части объектов входного покрытия, попадающей внутрь полигонов формирующего покрытия.

В перечисленных выше операциях составляются таблицы, описывающие полигоны, дуги, границы покрытия и реперные точки. Эти таблицы изначально пригодны для проведения анализа, и для них можно формировать разнообразные запросы, аналогичные запросу на выбор полигонов покрытия RdlineM2 на рис. 7.8, для которых выполняется условие атрибут Inside = 100 в таблице PAT.DBF, что соответствует внутренним областям буферных зон. При проведении табличного анализа, используя логические операции and, or и формируя другие, более сложные структурированные запросы, можно выбрать информацию из нескольких полей одной или разных таблиц.

Возможность проведения географического анализа — это главное, что отличает географическую информационную систему. Географический анализ позволяет сопоставить между собой разнообразную пространственно привязанную информацию и представить результаты анализа в форме, удобной для восприятия. Рутинные операции географического анализа легко автоматизируются. Для этого в каждую полнофункциональную ГИС встраивается внутренний язык программирования: SML — в ГИС ARC/INFO; MapBasic — в ГИС MapInfo и др. Все это делает ГИС незаменимым инструментом для проведения анализа информации о состоянии окружающей среды. Особенности работы с некоторыми ГИС рассматриваются в следующем разделе.

Географические информационные системы предоставляют собой мощные средства для анализа экологической информации. Однако сами по себе они не порождают новых знаний о состоянии окружаю-

щей среды – они только инструмент для естествоиспытателя. В то же время, особенно в последние годы, быстро развиваются информационные технологии, ориентированные на формирование знаний о состоянии окружающей среды. Модули, основанные на таких технологиях, развиваются и в рамках наиболее мощных географических информационных систем, но значительно чаще они формируются в экспертные системы, ориентированные на прогнозирование состояния окружающей среды, на оценку риска хозяйственной деятельности и на поддержку принятия решений, обеспечивающих устойчивое развитие.

7.4. Особенности работы в ГИС

7.4.1. ГИС ARC/INFO

Широкое распространение получила ГИС ARC/INFO, разработанная исследовательским центром Environment System Research Institute (ESRI, США). Программные средства ARC/INFO работают на компьютерах различного типа под управлением операционной системы UNIX и др. Рассмотрим особенности работы с этой системой на примере ARC/INFO версии 3.4. Структура ARC/INFO 3.4 включает несколько интегрированных модулей, предназначенных для работы как с векторной географической информацией (точки, ломаные линии, замкнутые контуры), так и с атрибутивной (текстовой) информацией, логически связанной с географической.

Модуль STARTER KIT является базовым модулем для решения прикладных задач ГИС и содержит в себе средства для связи персонального компьютера, периферийного оборудования, рабочих станций, а также отдельных программных модулей системы. Модуль включает в себя систему цифрования ADS (Arc Digitizing System), предназначенную для топологически корректной оцифровки и редактирования карт. Предусмотрено автоматическое исправление некоторой части ошибок в топологии покрытий и составление таблиц, обеспечивающих связь между векторной и атрибутивной информацией (команды BUILD и CLEAN). Система TABLES модуля STARTER KIT предназначена для создания и работы с базами данных. ARC/INFO поддерживает полную реляционную базу данных и язык программирования для обработки табличной информации, включая ввод данных; поиск данных, соответствующих некоторым логическим условиям (запросы); обработку данных в процессе выполнения логических и арифметических операций над строками и колонками таблиц; составление итоговых отчетов. Табличные данные, сопряженные с пространственными

данными (с характеристиками географических объектов), хранятся в формате dBASE (файлы .DBF). Это позволяет использовать для работы с таблицами любую подходящую dBASE совместимую систему. ARC/INFO контролирует и обновляет таблицы сопряженных характеристик, поддерживая тем самым соответствие между каждым объектом картографического покрытия и табличными данными.

Модуль ARCEDIT предназначен для интерактивного ввода и редактирования пространственных и табличных данных и вывода этих данных на экран дисплея и на другие графические устройства. С помощью курсора на экране дисплея можно передвигать, копировать, добавлять точечные, линейные и площадные объекты или менять их очертания. Каждая отдельная вершина или узел ломаной линии может быть передвинут, удален или добавлен, меняя при этом очертания дуги на карте. Можно изменять очертания надписей на карте, масштабируя шрифты и направляя надписи под любым углом к объекту или вдоль линейного объекта. Можно создавать новые шрифты и условные знаки. ARCEDIT обладает эффективными средствами создания картографических покрытий, проверки и корректировки ошибок, соединяя все удобства системы ADS по цифрованию покрытий с более широким набором средств графического редактирования. Модуль ARCPLOT существует для графического отображения информационных запросов, обеспечивающий полный набор средств вывода картографической информации от простых экранных изображений до высококачественных географических карт. Он обеспечивает средства интерактивного составления и предварительного просмотра карт на экране дисплея, их печати на принтере или плоттере, а также отображения результатов запросов из баз данных в картографической форме. Рисунки 7.9 и 7.10 подготовлены с помощью ARCPLOT и небольших программ, написанных на языке SML (Simple Macro Language).

Модуль OVERLAY обеспечивает комплексный анализ системы карт (наложение карт, районирование) и формирование новых покрытий для отображения результатов анализа в наглядном виде (например, при выделении участков территории, на которых выполняются заданные условия). При наложении картографических покрытий в результате пересечения границ полигонов образуется новый набор объектов покрытия. Характеристики новых объектов определяются характеристиками исходных покрытий и типом использованной пространственной операции — буферизация, объединение, вырезание и т.п. При этом создаются новые пространственные и атрибутивные взаимосвязи данных. Модуль DATA CONVERSION обеспечивает преобразование форматов данных для связи с другими СУБД (dBASE, Oracle) и други-

ми ГИС. Векторные форматы данных, в которые «осуществляются» Export/Import информации, включают в себя Initial Graphics Exchange Specification (IGES), AutoCAD Drawing Exchange Format (DXF) и др. Точечные, линейные и полигональные покрытия могут быть преобразованы в текстовые файлы, содержащие координаты отдельных точек или вершин дуг. Кроме этого, такие покрытия могут быть преобразованы в форматы, воспринимаемые модулем GRID. Этот модуль, совместно с другими модулями, позволяет решать многие важные для исследований окружающей среды задачи: построение трехмерных цифровых моделей, например, для рельефа; моделирование различных процессов, имеющих географическую привязку, например процессов переноса загрязнений; решение оптимизационных задач и многое другое.

Пользовательский интерфейс ГИС ARC/INFO основывается на командах, вводимых с клавиатуры или с помощью программ. Это обеспечивает большую гибкость при решении разнообразных задач формирования числовых карт и проведения географического анализа, но предполагает высокую квалификацию пользователя. Чтобы упростить пользовательский интерфейс и приблизить его к привычным стандартам графического пользовательского интерфейса, разработана система ArcView. Общий вид экрана при работе с системой ArcView показан на рис. 7.9. — это фрагмент карты в проекции Меркатора района Санкт-Петербурга и таблица PAT.DBF с описанием покрытия Ponet. ArcView удобен при изготовлении карт, географическом анализе информации и при решении других задач. Это достигается с помощью простого набора программных средств для интерактивной визуализации и анализа географических объектов, управляемых из стандартной системы меню и окон.

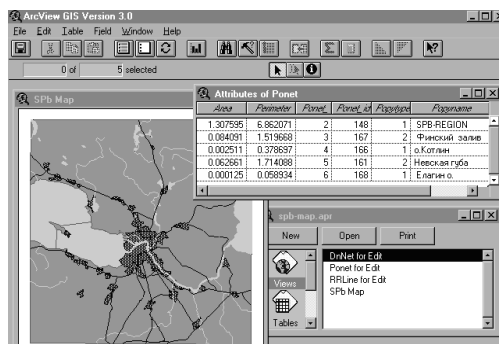


Рис. 7.9. Общий вид экрана при работе с системой ArcView

Программные средства визуализации выводят на экран карты и таблицы, выделяют отдельные области, увеличивают выделенные объекты и открывают многоуровневые окна. Программные средства запроса выводят информацию о точках, линиях и полигонах на карту. Они могут быть также использованы для формирования сложных логических запросов к реляционным табличным данным. Программные средства измерения динамически рассчитывают площади и определяют расстояния между географическими объектами. Программные средства символизации создают легенды карт, классифицируют объекты и выбирают способы графического оформления карт с помощью библиотек цветов, штриховок, символов и шрифтов. ГИС ARC/INFO — пример большой, полнофункциональной системы.

7.4.2. ГИС MapInfo

Наиболее известным примером векторной системы является ГИС MapInfo, общий вид экрана при работе с программой показан на рис. 7.10. На нем изображен фрагмент карты района Санкт-Петербурга, отображенный в двух разных окнах.

Способ организации данных в ГИС MapInfo несколько отличается от того, который принят в ГИС ARC/INFO. В частности, в ней не поддерживаются основные топологические условия ARC/INFO.

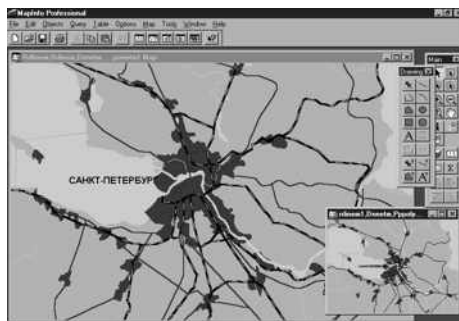


Рис. 7.10. Общий вид экрана при работе с ГИС MapInfo

В ГИС MapInfo картографическая информация в пределах слоя-таблицы (Table) организуется в виде отдельных графических примитивов — объектов (Objects). Могут использоваться следующие графические объекты: точка (point), линия (line), ломаная линия (polyline), область (region), дуга — часть эллипса (arc), текст (text), прямоугольник

(rectangle), скругленный прямоугольник (rounded rectangle), эллипс (ellipse).

ГИС MapInfo — динамично развивающаяся система, приобретающая все большую популярность. За последние годы, при переходе от версии к версии, в ней появились многие дополнительные возможности по редактированию карт, подготовке бумажных копий. Предусмотренные в системе возможности по созданию тематических карт позволяют формировать запросы к базам данных и получать отображение результатов на карте. Это очень мощный механизм для анализа состояния окружающей среды по данным экологического мониторинга. Предусмотрена также возможность в полуавтоматическом режиме составлять отчеты, состоящие из набора карт и легенд к ним, таблиц из баз данных. Появляются и другие пакеты, работающие с форматами MapInfo, например Vertical Mapper, который работает с трехмерными данными. Отображение информации в форматах MapInfo предусмотрено в электронных таблицах Microsoft Excel.

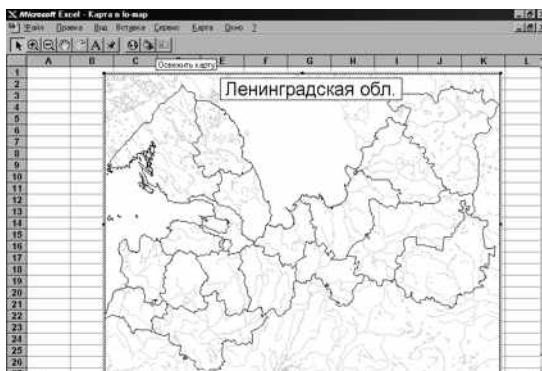


Рис. 7.11. Общий вид экрана при работе с картографической информацией в электронных таблицах Excel

Пример вывода картографической информации в Microsoft Excel представлен на рис. 7.11, на нем изображена речная сеть Ленинградской области.

7.4.3. ГИС IDRISI

Примером средней растровой системы может служить ГИС IDRISI, разработанная в Университете Кларка (США). Общий вид экрана при работе с ГИС IDRISI вер. 4.0 показан на рис. 7.12. На нем

представлен фрагмент снимка района Санкт-Петербурга, полученного прибором AVHRR спутника NOAA. Цифрой 1 обозначена р. Нева, изображение которой было выведено на растровую подложку на основе информации, хранящейся в специальном векторном файле. Этот файл сначала был экспортирован из системы ARC/INFO в формате ASCII, а затем пересчитан по формулам, учитывающим параметры орбиты спутника NOAA.

В отличие от векторных систем в растровых системах географическое положение объектов и описание их свойств (атрибуты) содержатся в одном файле. Исследуемая местность отображается набором ячеек, каждой из которых в цифровом представлении соответствует число, описывающее определенное свойство данного участка местности. Числа в растровых картах могут представлять информацию, полученную из наблюдений над объектом: это может быть идентификатор объекта, а также качественное или количественное атрибутивное его описание. Кроме того, данные, содержащиеся в растровом файле, могут описывать явления, не видимые при непосредственном наблюдении, но выявленные в результате анализа данных наблюдений.

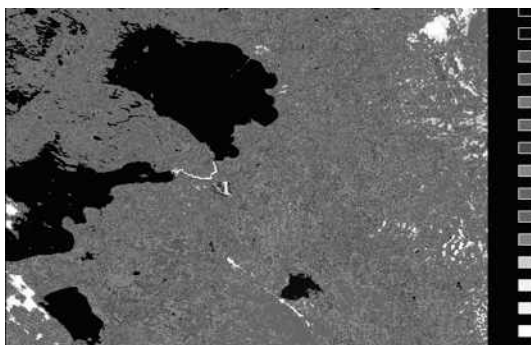


Рис. 7.12. Общий вид экрана при работе с ГИС IDRISI

При визуализации растрового изображения на экране дисплея картина также складывается из ячеек-пикселей. Растровые системы неэкономны в плане использования дискового пространства при размещении данных на жестком диске компьютера или на других носителях. Растровое изображение содержит описание всех ячеек, его составляющих, независимо от того, все ли объекты, попавшие в это изображение, интересуют исследователя. Достоинство такого представления пространственно распределенных данных состоит в том, что местность описывается однородно, привычным сплошным изображением. По-

следнее обстоятельство определяет огромный потенциал растровых систем при анализе и математическом моделировании непрерывно меняющихся параметров протяженных поверхностных объектов.

ГИС IDRISI представляет собою растровую ГИС, которая позволяет проводить хранение, анализ и визуализацию растровых карт и обработку спутниковых изображений. В ней предусмотрена также возможность работы с векторной информацией. ГИС IDRISI не является единой программой, но состоит из набора разнообразных модулей, образующих несколько блоков или систем.

Пространственная и атрибутивная база данных. Центральным блоком любой ГИС является база данных. Это набор карт и связанной с ними информации в цифровой форме. Пространственная база данных содержит географическую информацию о протяженных объектах (их форму, географические координаты), а атрибутивная база данных хранит описание различных характеристик (качественных или количественных) объектов, составляющих первую базу. Как правило, пространственная и атрибутивная информация хранятся вместе образуя интегрированную базу данных, однако IDRISI предоставляет возможность хранить атрибутивную информацию отдельно в файлах специального формата.

Система оцифровки. IDRISI, как растровая ГИС, предоставляет возможность для работы с векторным представлением географической информации. В системе IDRISI оцифровка и редактирование цифровых векторных карт производятся специальной программой (независимый пакет для оцифровки, поддерживающий формат IDRISI). Внутри самой ГИС IDRISI есть средства, позволяющие проводить векторизацию изображений, выведенных на экран. Система визуализации обеспечивает функцию просмотра, печати выбранного растрового изображения или векторного файла. Предусмотрены широкие возможности выбора параметров вывода как на экран, так и на принтер. Возможен просмотр гистограммы изображения и предложен ряд функций для улучшения изображения.

Система управления базой данных. IDRISI имеет интегрированную базу данных, но для управления пространственной и атрибутивной информацией предусмотрены разные модули. Для пространственной информации предусмотрены функции репозиционирования, изменения масштаба, склейки и вырезания изображений, конвертации растровых изображений в векторные. Для атрибутивной информации, когда она содержится в растровом файле, есть функции, позволяющие изменить данные классификации, а для изменения атрибутивной информации, содержащейся в файле формата dBASE, поддерживаемого

системой, предусмотрено использование встроенного IDRISI редактора. В рассматриваемой ГИС основной акцент смещен на пространственный анализ данных.

Блок географического анализа данных используется для работы с привязанными к местности данными географической информационной системы. ГИС невозможна без блока, реализующего географический анализ данных. Этот блок позволяет проводить наложение изображений, представляющих собою различные тематические слои, анализировать ряды изображений, осуществлять математические операции. Есть возможность делать запросы, причем относительно как пространственной (например, показать значения растрового изображения вдоль некоторой линии), так и атрибутивной информации.

Блок анализа спутниковых изображений. ГИС IDRISI обеспечивает широкие возможности обработки спутниковых данных. Прошедшие через этапы коррекции и интерпретации спутниковые данные являются основным источником растровых отображений земной поверхности, с которыми и работает данная ГИС. Система содержит функции, помогающие при работе со спутниковыми данными на всех этапах — от чтения специфических форматов (отсечение заголовков, разделение спектральной информации) до интерпретации изображений.

Система статистического анализа данных. Этот блок содержит программы, реализующие статистические процедуры, а также функции, разработанные для работы непосредственно с пространственно распределенной информацией. В ГИС IDRISI возможен обмен информацией с другими системами и усвоение данных из различных источников. Существуют специальные модули для импортирования изображений спутников SPOT и LANDSAT.

7.5. Геоинформационное обеспечение дистанционного мониторинга атмосферы

Атмосфера отличается от других природных образований многокомпонентным составом и высокой пространственно-временной изменчивостью состояния. Оказывая существенное воздействие на другие природные образования (геологические, гидрологические, биологические и др.), атмосфера подвергается воздействию многих факторов как природного, так и антропогенного происхождения. Обеспечение регионального мониторинга атмосферы (РМА) техническими средствами и методиками измерений решает только одну сторону проблемы. Другой стороной этой проблемы является геоинформационное обеспечение РМА, под которым понимается не только сбор, хранение и обра-

ботка результатов оперативных наблюдений, но и накопление необходимых знаний о состоянии атмосферы и атмосферных процессах, а также организация системного анализа, моделирования и обобщения всего информационного материала в доступной для пользователя форме. Дадим краткое описание основных геоинформационных задач и особенностей их решения при региональном мониторинге атмосферы, а также описание методологии и практики построения геоинформационных систем (ГИС) для решения этих задач. Основное внимание уделим тем задачам, которые связаны с климатозоологическим мониторингом, представляющим собой актуальное и ключевое направление атмосферных исследований.

7.5.1. Геоинформационные задачи регионального мониторинга атмосферы

Приведем характеристику методов исследования сложных систем, которые лежат в основе геоинформационного обеспечения РМА. Известны три общих направления в научных исследованиях: экспериментальные, теоретические исследования и математическое моделирование.

Экспериментальные исследования проводятся с реальными объектами в форме натурного эксперимента. Результатом натурного эксперимента являются экспериментальные данные о поведении и свойствах объекта исследования. Атмосфера как природный объект позволяет проводить такие эксперименты, но ее экспериментальные исследования с применением совокупности оптических, акустических, радиофизических и других методов оказываются длительными и трудоемкими.

Теоретические исследования. Теория имеет дело не с реальным объектом исследования, а с его идеализированным представлением, допускающим применение адекватного математического аппарата для формализованного описания объекта. В методологии науки обычно выделяют следующие компоненты теории:

- исходная эмпирическая основа — совокупность фактов, полученных в ходе натурных экспериментов;
- исходная теоретическая основа — совокупность постулатов, аксиом и общих законов теории, которые и описывают идеализированный объект исследований;
- совокупность установленных в процессе исследования закономерностей, составляющих основной массив теоретического знания.

Теория фиксирует две базовые формы знаний: факты (эмпирическое знание) и концепции (гипотезы, законы и модели). В результате абстрактного осмысления фактов у исследователей возникает ряд гипотез, объясняющих поведение и свойства объекта. При последующей экспериментальной проверке одна из конкурирующих гипотез может принять форму научного закона. Однако из-за сложностей атмосферных процессов как объектов исследования этот традиционный путь формирования теоретического знания «от гипотез – к закону» в рассматриваемом случае оказывается неприменимым. Поэтому в условиях недостаточной разработанности теории оптических, акустических, радиофизических и других методов исследования атмосферы функцию законов могут выполнять математические модели, использование которых составляет основу третьего направления научных исследований — математического моделирования.

Математическое моделирование. Учитывая, что экспериментальные исследования атмосферы являются дорогостоящими и долговременными, исследователи и разработчики систем мониторинга атмосферы в условиях ограниченного времени испытывают дефицит экспериментальной информации. Этот дефицит может быть частично устранен за счет использования в научном исследовании априорной информации, основанной как на результатах теоретических исследований, так и на опыте и интуиции экспертов — специалистов в рассматриваемой области научных исследований. Такая информация, получившая название экспертной, может быть получена с помощью методов экспертных оценок или путем совместной работы инженера по знаниям и эксперта. К экспертной также относится и информация, извлекаемая из научных и научно-технических документов с помощью экспертов. Таким образом, в процесс междисциплинарных исследований атмосферы вовлекаются как теоретические, так и экспериментальные методы, а модель используется как средство интеграции и хранения экспериментальных, теоретических и экспертных знаний об объекте исследования. Следовательно, модель для задач регионального мониторинга атмосферы должна иметь структуру, позволяющую учитывать как количественную, так и качественную информацию об объекте. Построение общих моделей — это не только математическая, но и информационная проблема, поэтому ее решение представляет одну из важных геоинформационных задач. Такая общая модель оказывается не только средством хранения знаний об объекте, но и инструментом проведения научных исследований, что и превращает математическое моделирование в самостоятельное направление научных исследований.

Общая схема исследований в региональном мониторинге атмосферы. Схема процесса комплексных исследований сложных процессов в земной атмосфере, иллюстрирующая сформулированный подход, приведена на рис. 7.13, где показаны все доступные источники информации, как априорной, так и полученной в ходе исследований: документальные источники (научно-технические документы, монографии, учебники, научные журналы и др.); эксперты-специалисты в узких областях атмосферных исследований; натурный эксперимент; компьютерный эксперимент. Рассмотренная экспертная информация связана с первыми двумя источниками информации. С третьим и четвертым источниками связаны соответственно экспериментальные данные и информация, полученная путем математического моделирования.

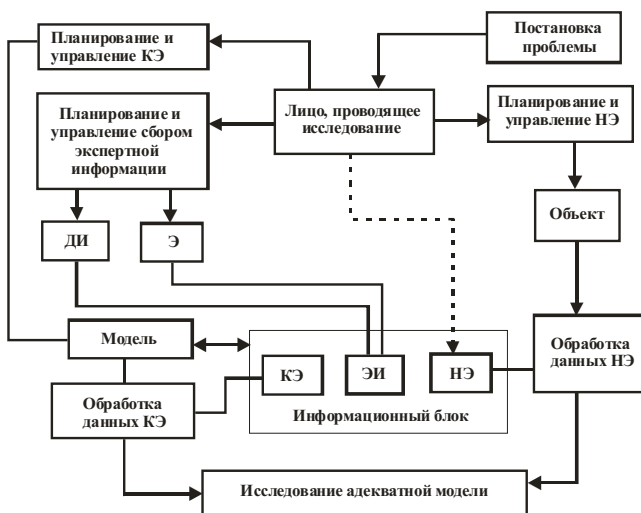


Рис. 7.13. Схема исследований сложных объектов. НЭ – натурный эксперимент; КЭ – компьютерный эксперимент; ДИ – документальные источники; Э – эксперты; ЭИ – экспертная информация

Краткая характеристика информации. Региональный мониторинг атмосферы использует существующую систему наблюдений с помощью наземных, бортовых и космических технических средств. Совмещение информационного поля уже имеющихся длинных рядов наблюдений параметров атмосферы с информационным потоком от вновь организованных наблюдений для новых параметров атмосферы является основной проблемой для геоинформационного обеспечения

РМА. Другая проблема адаптации существующих геоинформационных технологий к решению задач РМА связана с существенной пространственно-временной изменчивостью параметров атмосферы на разных высотах и с разным весом для атмосферных процессов и явлений. Принципиальная особенность геоинформационного обеспечения состоит в том, что для решения основной задачи РМА (выявление климато-экологических измерений с учетом антропогенных воздействий) первостепенное значение имеют параллельные ряды наблюдений в зонах с различной антропогенной нагрузкой. Следовательно, необходима адаптация геоинформационной технологии к условиям неоднородных потоков информации, которые могут быть унифицированы на основе моделирования атмосферных процессов и структур. При этом унификация региональных потоков информации не должна противоречить международным стандартам и обеспечивать их совместимость при анализе глобальных изменений.

Системы климатозэкологического мониторинга относятся к тому классу систем с природными компонентами, которые имеют высокую степень многомерности. С ними невозможно проведение активных экспериментов, что создает дефицит количественных экспериментальных данных и вызывает информационную неопределенность в описании систем рассматриваемого класса. Основными причинами такой неопределенности являются следующие факторы:

- стохастичность и непредсказуемость поведения природных объектов;
- неопределенность целей функционирования природных компонентов;
- неточность и нечеткость качественного описания объекта;
- недостаточность (или полное отсутствие) опытных данных о некоторых параметрах исследуемого объекта.

В связи с отмеченными особенностями климатозэкологической информации при решении задач количественного описания объекта наблюдения на основе ограниченных данных натурных экспериментов необходимо решать задачи извлечения и использования информации из качественного описания объектов, характеризующегося неточностью и неопределенностью. При этом важную роль играет качественная информация, извлекаемая путем теоретических исследований объектов. При описании объектов мониторинга наблюдается разнотипность данных. Поэтому приходится использовать все известные группы шкал: количественные, порядковые и номинальные (качественные).

Общая характеристика геоинформационных задач. Изучение атмосферы, как отмечено выше, требует проведения междисципли-

нарных исследований. Существенным свойством сложных объектов такого класса является контринтуитивность их поведения, которая означает, что реакция наблюдаемых объектов на внешние воздействия протекает другим образом, чем это интуитивно ожидалось. Сложная система не укладывается в рамки компетентности одного специалиста, как бы хорошо он ни знал ту или иную часть системы. Поэтому нельзя полагаться на предположения отдельных экспертов. Необходимо привлекать различных специалистов по атмосферным процессам для получения экспертной информации и создавать средства ее накопления и хранения в базах знаний ГИС. Важной геоинформационной задачей РМА является построение моделей, позволяющих учитывать наряду с теоретической, экспериментальной информацией и экспертные знания. Другая важная геоинформационная задача РМА связана с необходимостью сжатия экспериментальной инструментальной информации, которая характеризуется большой степенью избыточности из-за существенной пространственной неоднородности и временной нестационарности атмосферных процессов.

Известно, что наибольшей информативностью для РМА обладают спутниковые измерения и другие данные дистанционного зондирования (ДДЗ) по сравнению с данными традиционных наземных наблюдений. Однако из-за искажающего влияния атмосферы требуется коррекция данных, без этого не могут быть с достаточной точностью восстановлены количественные связи между регистрируемым излучением и характеристиками состояния зондируемого объекта. Разработка методических средств и ГИС-технологий атмосферной коррекции ДДЗ также представляет важную геоинформационную задачу РМА. Основу этих исследований и разработок составляет климатологическая модель атмосферы, разработанная в Институте оптики атмосферы СО РАН. Она представляет собой комплекс региональных моделей, каждая из которых описывает состояние атмосферного канала в отдельных квазиоднородных зонах, которые выявлены в результате классификации многомерных атмосферных объектов.

Интерес представляют задачи оценки и картирования риска возникновения смога в промышленных центрах и загрязнения почв атмосферными осадками, возникновения зон экотоксикологической опасности на территории региона из-за атмосферных загрязнений. Эти и другие задачи не могут быть решены в настоящее время без использования дистанционного мониторинга атмосферы и средств геоинформационных технологий. Их особенности требуют разработки нового подхода к созданию геоинформационной системы, предназначенной для интеграции разнородной климато-экологической информации,

которая накапливается и хранится в ГИС в виде моделей, баз данных и баз знаний. Создание и использование таких систем в решении конкретных региональных задач показывает, что они являются перспективным инструментом для решения проблем экологического мониторинга.

7.5.2. Вопросы организации ГИС

Структура ГИС. Получившие широкое распространение в мировой практике ГИС представляют собой вид компьютерных информационных систем, в которых обеспечивается пространственная (географическая) «привязка» данных. Традиционно геоинформационные системы (ГИС) включают в свой основной состав базы данных (БД) и средства автоматизации ввода, обработки и отображения картографической информации. При создании таких систем для решения задач регионального мониторинга атмосферы требуется учитывать ряд существенных особенностей.

Первой из особенностей является необходимость формирования в составе геоинформационной системы развитого комплекса математических моделей, используемых для анализа, диагноза и прогноза климато-экологического состояния региона, а также для моделирования различных физических, химических и биологических процессов в атмосфере. Вторая особенность связана с тем, что наряду с данными, полученными путем дистанционных измерений за изменениями характеристик атмосферы и параметров экологического состояния окружающей среды, все большее значение для задач анализа и прогноза климато-экологического состояния приобретает особый вид информации — экспертная информация, основанная на опыте и интуиции специалистов и накапливаемая в базах знаний (БЗ) геоинформационных систем. На рис. 7.14. приведена обобщенная схема банка данных и программного обеспечения ГИС.

При разработке структуры ГИС важным является этап анализа предметной области и проблемной среды ГИС. Под предметной областью (ПО) понимается совокупность объектов, предметов и явлений реального мира, информация о которых накапливается и хранится в базах данных и базах знаний ГИС. Под проблемной средой (ПС) понимается совокупность задач, на решение которых ориентирована данная ГИС. Результатом концептуального анализа проблемной среды и предметной области будут соответственно дерево задач (с выделением подзадач) и иерархическая структура баз данных.

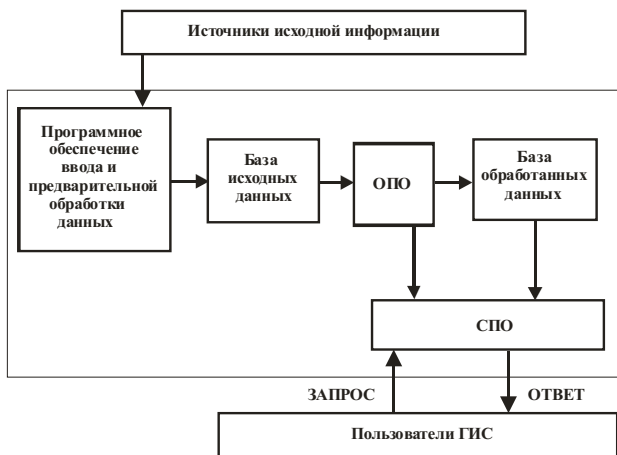


Рис. 7.14. Общая структура ГИС. ОПО – общее программное обеспечение; СПО – специальное программное обеспечение; ГИС – геоинформационная система

На основе анализа описания ПО определяются основные составные части и совокупность связей, существенных с точки зрения решения задач пользователей. Рабочие файлы задач (подзадач), включающие перечни показателей, необходимых для решения каждой задачи (подзадачи), согласно методологии формируются из файлов $F_{ij}, i = 1, \dots, t; j = 1, \dots, m$. Каждый уровень принятия решений в соответствии с деревом задач имеет и свой уровень картографирования, что предполагает формирование картографической базы данных ГИС как иерархической системы. При этом геоинформационные задачи регионального и областного уровней требуют картографирования в масштабах 1:500000 — 1:1000000, картографирование в масштабах 1:100000 — 1:200000 наиболее приемлемо при принятии решений районного уровня; для реализации конкретных проектных решений требуется картографирование в масштабах 1:25000 — 1:50000 или более крупных.

Сжатие информации и построение сжатых баз данных в ГИС.

Под сжатием информации понимается такое преобразование исходного множества данных в выходное множество, при котором избыточность информации значительно уменьшается по сравнению с исходной при заданном показателе качества восстановления. Показатель качества восстановления информации определяется требованием задачи,

решаемой с использованием экспериментальной информации. Например, одним из показателей качества может быть доверительная вероятность, показывающая ширину интервала, в котором могут быть восстановлены истинные значения измеренных характеристик по значениям сжатых данных.

Рассмотрим подход к обработке экспериментальных данных, основанный на методах автоматической классификации и позволяющий сократить объемы хранимой в базах данных ГИС информации, повысить эффективность и оперативность решения задач РМА за счет использования информации, хранимой в сжатом виде. Для оценки эффективности алгоритма сжатия используется коэффициент сжатия информации, который определяется как сокращение объема памяти, требуемой для хранения экспериментальных данных после обработки их предложенными процедурами сжатия. Коэффициент сжатия зависит от выбранного показателя качества восстановления информации, чем выше требования к качеству восстановления, тем меньшее значение коэффициента сжатия удастся достичь при обработке исходных данных. Желаемая точность восстановления информации задается пользователем и определяется из требований конкретных прикладных задач.

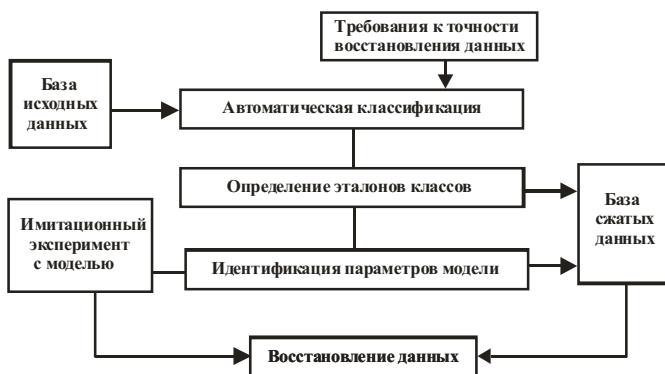


Рис. 7.15. Общая схема процедуры сжатия информации и построения баз сжатых данных ГИС

В основу процедуры сжатия информации (рис. 7.15) положен дивизимный метод автоматической классификации. Здесь исходным является множество, состоящее из одного класса, а конечным — множество классов, отвечающих заданным требованиям пользователя. В качестве исходного класса будем рассматривать множество описаний объекта (объектов) исследования, представленное в исходном файле

данных в виде совокупности записей. Ставится задача разбить этот класс на неизвестное заранее число подклассов (кластеров) так, чтобы достигалось заданное качество разбиения, задаваемое пороговым значением некоторой критериальной функции, позволяющей предпочесть одно разбиение другому.

Сжатие информации осуществляется путем замены описания характеристик всех элементов одного класса описанием характеристик одного элемента, называемого эталоном класса. Чем больше классов будет получено в результате работы алгоритма, тем меньшая степень сжатия информации будет достигнута. При высоких требованиях к качеству восстановления может произойти разбиение исходного файла на классы записей, включающие идентичные элементы, тогда сжатие информации производится только за счет устранения дублирования записей. Увеличение коэффициента сжатия происходит при снижении требований к качеству восстановления информации из сжатых данных, при этом в классы объединяются однородные элементы. Предлагаются два алгоритма сжатия информации, один предназначен для сжатия экспериментальной информации, получаемой при исследовании объектов, для которых имеются разработанные математические модели. Второй — используется при обработке экспериментальных данных, полученных при исследовании объектов, для которых отсутствуют математические модели. Первый из алгоритмов позволяет получать более высокие коэффициенты сжатия при равных требованиях к качеству восстановления. В основе работы первого алгоритма лежит использование математической модели исследуемой системы, при этом критерием качества классификации является степень близости элементов исходного множества в многомерном пространстве параметров адекватной математической модели. Объекты, значения которых могут быть отнесены к одной и той же генеральной совокупности (с заданным уровнем значимости показателя качества восстановления), объединяются в один класс, представитель которого (эталон класса) используется для параметрической идентификации модели. При таком подходе исходные данные будут разбиты на классы, каждый из которых можно описать значениями характеристик эталонного элемента и параметрами адекватной модели.

Характеристики элемента-представителя класса будут в сжатой форме представлять все объекты одного класса, а значения параметров модели дадут возможность восстановить информацию из сжатых данных, «проимитировав» ситуацию с помощью модели. Предлагается три варианта представления записей в базе сжатых данных (БСД):

- формирование БСД из описаний элементов-представителей классов и параметров адекватной математической модели. Такое представление информации позволит восстановить пропуски путем компьютерного моделирования при задании соответствующих (данному классу) параметров модели;

- формирование БСД только из описаний характеристик представителей классов. Экономия памяти достигается за счет потери возможности восстановить отсутствующие в базе сжатых данных характеристики объекта;

- формирование БСД только из параметров модели. При этом достигаются самые высокие значения коэффициентов сжатия, но для восстановления необходима компьютерная имитация данных с помощью модели.

Вопросы интеллектуализации ГИС. Комплексный междисциплинарный характер задач в области климато-экологического мониторинга региона требует применения нового класса геоинформационных систем, использующих базы знаний. Согласно методологии концептуального моделирования, на основе анализа описания предметной области (ПО) определяются перечни основных составных частей ПО и совокупность связей, существенных с точки зрения решения задач пользователей. Этот подход развивается в настоящем разделе применительно к построению ГИС, использующих базы знаний. Как показал анализ, семантические возможности традиционных языков представления знаний (ЯПЗ) оказываются недостаточными при формировании баз знаний ГИС. Это потребовало разработки ЯПЗ, в котором совмещались бы семантические возможности различных языков представления знаний. В частности, рассматривается возможность создания комбинированного ЯПЗ для отображения концептуальной модели предметной области в базе знаний ГИС. Комбинированный язык представления знаний реляционно-тезаурусного типа включает в себя две основные компоненты: систему тезаурусов и аппарат реляционной алгебры (алгебры отношений). Лексикой этого комбинированного ЯПЗ служат тезаурусы, являющиеся средством описания множеств лингвистических переменных. Реляционная алгебра используется для описания множеств третьего вида логических отношений — ассоциативных отношений и манипулирования этими отношениями при решении задач конечных пользователей. С точки зрения концептуального моделирования предметной области ГИС наиболее перспективными реляционными моделями являются полностью реляционные системы.

Отметим особенности концептуального анализа проблемной среды при построении базы знаний ГИС, целью которого является по-

строение дерева задач. Декомпозиция задач проводится до уровня, на котором выделяются элементарные подзадачи. Элементарной будем называть подзадачу, которой соответствует компьютерная программа, реализующая законченную элементарную процедуру обработки ограниченной совокупности простых файлов (двумерных таблиц данных). Решение каждой подзадачи требует использования определенного набора показателей, извлекаемых из разных файлов, содержащих информацию о свойствах составных частей предметной области. Перечень этих показателей и будет определять ассоциативные отношения, устанавливаемые между составными частями ПО.

Таким образом, результаты концептуального анализа ПС в виде множества ассоциативных отношений позволяют завершить синтез концептуальной модели предметной области (КМПО), которая представляется семантической сетью. Сформированная таким образом концептуальная модель ПС является основой для планирования вычислительных процессов при решении задач ГИС. При практической реализации базы знаний ГИС с помощью реляционно-тезаурусного ЯПЗ описание концептуальной модели предметной области осуществляется путем формирования компьютерных тезаурусов в виде файлов в реляционной системе управления базами данных (СУБД). Описание концептуальной модели ПС осуществляется в базе знаний с помощью компьютерных тезаурусов, отображающих наименования задач, связи между подзадачами, требуемые для их решения показатели (атрибуты задач), файлы данных и программы. Такой подход может быть использован, например, при разработке базы знаний ГИС предназначенной для расчета экологического ущерба в связи с загрязнением атмосферного воздуха промышленными предприятиями и применен в ГИС регионального мониторинга атмосферы.

Комплексный анализ разнородной геоинформации. Применяемые в пространственном анализе данных мониторинга статистические методы (регрессионный, факторный и др.) из-за существенной нестационарности и пространственной неоднородности этих данных оказываются недостаточно эффективными в решении задач мониторинга атмосферы. Одним из перспективных подходов к проведению комплексного пространственного анализа данных является подход, основанный на геозонировании территории. Этот подход может использоваться при решении задач мониторинга окружающей среды, когда возникает необходимость разделения территории на однородные участки (зоны). Под однородностью здесь и далее понимается «близость» значений характеристик выделенных зон. В простейшем виде с зонированием имеют дело при формировании тематических карт (поч-

венная, карта растительности, загрязнения и др.), в которых границы зон определяются по значениям единственной характеристики. Число различных тематических карт только одной территории может достигать до нескольких десятков и сотен. Наиболее часто применяются методы ландшафтного зонирования, которые требуют кропотливого длительного труда большого коллектива специалистов. Разработка методов компьютерного геоzonирования представляется перспективной. В предлагаемом подходе предусматривается зонирование территории по комплексам разнородных характеристик, получаемых как из тематических карт территории, так и путем дополнительных натурных экспериментов или моделированием.

Подход к решению задачи компьютерного геоzonирования. Геоzonирование — это формирование на компьютерной карте территории участков с однородными характеристиками. Предлагаемый подход к геоzonированию основан на статистических методах автоматической классификации. В качестве объектов классификации выступают достаточно малые по размерам участки территории (геокванты). При разработке правил разбиения территории на геокванты (при определении их размеров и форм) можно использовать априорные знания об исследуемой территории. Например, наличие и размеры естественных географических, геофизических, климатических и других видов неоднородностей, информация об участках территории с «близкими» по значениям характеристиками и др. Однако, если априорной информации для выделения геоквантов недостаточно, удобно разделять территорию на равные по размерам участки прямоугольной формы. Для каждого из полученных таким образом геоквантов (ГК) собирается вся доступная информация об их свойствах, в результате чего формируется массив данных, используемый в дальнейшей обработке с использованием методов автоматической классификации.

Для решения задачи геоzonирования в изложенной постановке традиционные алгоритмы автоматической классификации неприменимы по следующим причинам. В традиционных алгоритмах автоматической классификации (АК) необходимо иметь информацию о пороговых величинах разброса значений характеристик объектов классификации, число будущих классов или другую информацию для формулирования правила в алгоритме АК. Для решения задачи геоzonирования в постановке, когда заранее не известны ни число классов, ни пороги разброса значений характеристик, требуется разработать модифицированный алгоритм АК, в котором предусматривалось бы предварительное определение числа классов в зависимости от свойств классифицируемых геоквантов, сформулированные правила АК и последующее

проведение классификации геокваптов. В основу разработки модифицированного алгоритма АК положена идея выявления «естественного» числа классов (ЕЧК), которое может быть определено для каждой совокупности реальных объектов. Объясним понятие ЕЧК. Известно, что пространственная структура природных комплексов, изучаемых в географических, геологических, биологических и других естественных науках, обнаруживает характерные пространственные масштабы группирований этих объектов: крупномасштабные, мезомасштабные и мелкомасштабные структуры. При обработке информационных массивов, связанных с количественным описанием таких комплексов, классификация объектов будет приводить к выявлению достаточно устойчивых пространственных группирований объектов, слабо зависящих от изменения характеристик информационного массива. Такие устойчивые пространственные группировки и будут основой для определения естественного числа классов, которое может быть положено в основу правила в модифицированном алгоритме автоматической классификации.

Модифицированный алгоритм автоматической классификации для геозонирования. Задача разбиения множества объектов на произвольное или заранее фиксированное число непересекающихся и достаточно удаленных друг от друга однородных подмножеств (классов) исследовалась многими авторами. В результате появилось большое количество алгоритмов, которые можно разделить на четыре группы: эвристические, вариационные, статистические и лингвистические алгоритмы АК. Применительно к задаче геозонирования, в которой исходная информации имеет статистический характер, наиболее приемлемы статистические алгоритмы АК. По этой причине в основу разработанного алгоритма классификации для геозонирования был положен дивизимный статистический метод АК, в соответствии с которым исходное множество объектов первоначально рассматривается как один класс. Затем происходит последовательное дробление этого множества на несколько подмножеств, представляющих собой более однородные группы объектов по сравнению с исходным множеством в зависимости от требований, предъявляемых к каждому подмножеству.

Как было отмечено выше, для задач геозонирования необходима разработка модифицированного алгоритма АК, в котором была бы реализована не только процедура автоматической классификации объектов, но и процедура автоматического выбора оптимального числа классов. Модифицированный алгоритм классификации (МАК) основан на использовании идеи ЕЧК. Прежде чем объяснить понятие ЕЧК, рассмотрим работу МАК. Этот алгоритм построен по иерархическому

дивизимному методу, в соответствии с которым первоначально все множество классифицируемых объектов условно принимается за один класс. От выбранного критерия качества разбиения и от принятого решающего правила, положенного в основу классификации, зависит определяемое автоматически число классов. В МАК исходное множество классифицируемых объектов представлено в виде таблицы типа «объект-свойство» (ТОС), получаемой из исходного файла данных путем выбора признаков, по которым непосредственно будет проводиться классификация. Признаки, включенные в ТОС, нередко являются неоднородными, поскольку описывают разные свойства объектов, различающиеся интервалами принимаемых значений и единицами измерений. Поэтому перед классификацией данные ТОС подвергаются предварительному нормированию.

Классифицируемые объекты, представленные в ТОС, интерпретируются в виде точек в n -мерном признаковом пространстве. В соответствии с дивизимным подходом к АК это множество точек объявляется одним классом, внутриклассовая дисперсия значений признаков всех элементов которого равна D_{max} . Естественно предположить, что геометрическая близость двух или нескольких точек в этом n -мерном пространстве означает и близость состояний соответствующих объектов, их однородность. Тогда проблема классификации состоит в разбиении анализируемой совокупности точек-объектов на классы таким образом, чтобы объекты, принадлежащие одному классу, находились на сравнительно небольших расстояниях друг от друга, при этом дисперсия, определенная для каждой группы объектов, объединенных одним классом, уменьшится. Сформулируем требования к каждому из полученных на k -м шаге итерации вариантов разбиения: дисперсия каждой группы точек-объектов не должна превышать порогового значения дисперсии $D_{0k} = D_{max} - kd$, где d — шаг изменения дисперсии, определяемый в МАК по формуле

$$d = \frac{D_{max}}{W/c}.$$

W — количество классифицируемых объектов, представленных в ТОС; c — коэффициент, зависящий от числа объектов, подбирается опытным путем.

На каждом шаге итерации проводится расчет расстояний между всеми элементами ТОС и формируется матрица сходства размерности $W \times W$. По этой матрице определяются два максимально удаленных элемента ТОС, которые будут являться «псевдопредставителями» двух наиболее разнородных классов. Затем каждый из $(W-2)$ оставшихся объектов ТОС относят к одному из псевдоклассов. На k -м шаге итера-

ции после завершения процедуры распределения объектов по двум псевдоклассам производится расчет внутриклассовых дисперсий значений признаков объектов D_k . Полученные значения дисперсии D_k сравниваются со значением пороговой для этого шага дисперсией D_{0k} (изменяемой программно от величины $D_{\max}$ до минимального значения дисперсии $D_{\min}$). Если точность разбиения псевдокласса не удовлетворяет условию $D_k < D_{0k}$, то производится дальнейшее разбиение полученного псевдокласса на более мелкие классы, пока все полученные псевдоклассы не будут удовлетворять заданной точности разбиения. В результате на k -м шаге итерации будет проведено разбиение исходного массива данных на некоторое число (N) классов. На $(k + 1)$ -м шаге итерации дисперсия вновь уменьшается на величину d и выполняется аналогичная процедура с элементами каждого из N классов. Естественно, количество вновь полученных классов либо увеличится, либо останется равным N . В результате будет сформирован ряд вариантов разбиения ТОС, различающихся количеством полученных классов и величиной внутриклассовой дисперсии значений характеристик объектов в каждом классе. Один из этих вариантов, наиболее соответствующий реальному разделению совокупности объектов на естественные группировки, принимается в качестве окончательного результата классификации. Это выполняется на следующем этапе МАК, называемом «выбор естественного числа классов».

Для того чтобы объяснить понятие «естественного» числа классов (ЕЧК), представим зависимость числа классов N от внутриклассовой дисперсии D . Естественно предполагать, что при стохастически однородном распределении объектов в пространстве рассматриваемых признаков уменьшение величины внутриклассовой дисперсии на каждом шаге итерации должно сопровождаться последовательным пошаговым увеличением числа классов. Однако если в исследуемом объеме пространства происходит случайное группирование объектов в более или менее компактные пространственные образования, естественно ожидать, что не на каждом шаге уменьшение величины внутриклассовой дисперсии будет сопровождаться увеличением числа классов. По нашему мнению, именно это последнее обстоятельство и может служить объяснением появляющихся на графиках зависимости $N(D)$ характерных «полочек». Ступенчатый вид графиков $N(D)$, полученных при обработке экспериментальных данных из различных предметных областей, показывает общность характера зависимости $N(D)$ для комплексов различной природы. Качественный анализ пространственной структуры разнообразных природных комплексов показывает возможность выделения у них «характерных» про-

странственных образований с небольшим числом (два, три) «характерных» пространственных масштабов («крупный», «мелкий», «средний»). Поэтому при автоматической классификации данных о состоянии таких природных комплексов зависимость $N(D)$ будет иметь ступенчатый вид с очень небольшим числом характерных «полочек», которые и будут отображать процесс дробления «крупных» структур на более «мелкие». При этом «полочка», соответствующая определенному числу классов, указывает на число выделенных «мелких» структур. Такое число классов будем называть естественным и обозначать ЕЧК. Идея выявления ЕЧК в процедуре классификации положена в основу правила в разработанном алгоритме МАК: начало наиболее длинной из имеющихся на графике полочек принимается за порог, при котором автоматически определяется естественное число классов, и на это число классов проводится окончательное разбиение исходного массива.

Описание процедуры геоzonирования территории. Процедура геоzonирования территории выполняется в три этапа. Схема последовательности выполнения операции в процедуре приведена на рис. 7.16. На первом этапе проводится формирование файлов исходных данных, в которых накапливается информация о значениях характеристик выделенных геоквантов. На втором этапе выполняется автоматическая классификация элементарных участков территории (геоквантов), т.е. разбиение множества участков-геоквантов на классы по сформированному ранее набору значений их характеристик.

Оценивается степень устойчивости классификации по отношению к точности измерения характеристик. На заключительном этапе проводится группирование геоквантов, попавших в одинаковые классы по степени их пространственной близости (связности), в однородные зоны; формулируются решающие правила и описания представителей каждой зоны. Каждый из упомянутых этапов включает в себя ряд более простых операций. На рис. 7.16 приведена последовательность операций по выполнению процедуры. Рассмотрим каждый этап процедуры.

1. Сбор, анализ данных о геоквантах, разработка логической структуры базы данных, заполнение файлов характеристик ГК. В результате анализа табличных и картографических данных исследуемой территории выделяются объекты классификации — геокванты, в качестве которых могут выступать как реально существующие территориальные объекты (например, поля загрязнений атмосферы), так и элементы территории, условно выделенные по определенным правилам на компьютерной карте территории. Для всех выделенных ГК формируется список параметров, по которым может быть проведено ком-

плексное зонирование территории, проводится сбор и накопление данных в соответствии с разработанной ранее логической структурой базы данных. Результатом этого этапа является формирование файлов данных о характеристиках полученного множества ГК.

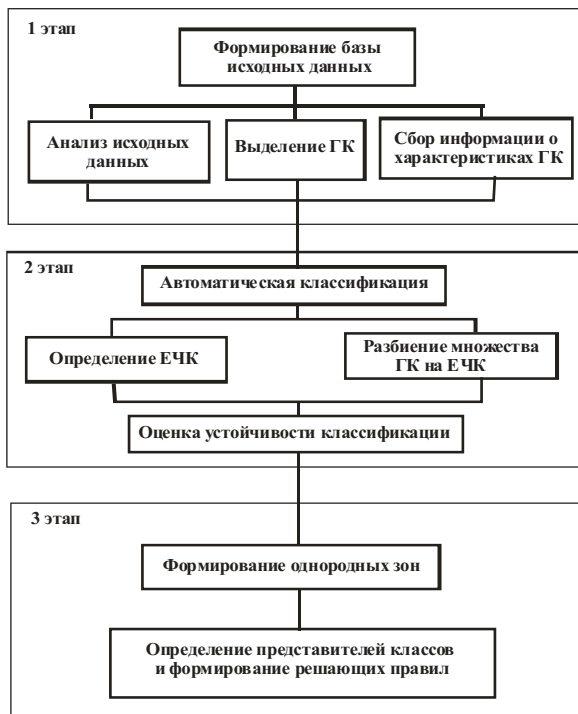


Рис. 7.16. Этапы процедуры геоzonирования: ГК – геокванты территории; ЕЧК – естественное число классов

Рассмотрим каждый этап процедуры.

1. Сбор, анализ данных о геоквантах, разработка логической структуры базы данных, заполнение файлов характеристик ГК. В результате анализа табличных и картографических данных исследуемой территории выделяются объекты классификации — геокванты, в качестве которых могут выступать как реально существующие территориальные объекты (например, поля загрязнений атмосферы), так и элементы территории, условно выделенные по определенным правилам на компьютерной карте территории. Для всех выделенных ГК формируется список параметров, по которым может быть проведено ком-

плексное зонирование территории, проводится сбор и накопление данных в соответствии с разработанной ранее логической структурой базы данных. Результатом этого этапа является формирование файлов данных о характеристиках полученного множества ГК.

2. Автоматическая классификация ГК. Целью этого этапа является отнесение каждого из ГК к одному из классов, под которым понимается «сгущение» точек-образов ГК в многомерном признаковом пространстве. Тогда проблема классификации состоит в разбиении анализируемой совокупности ГК на классы таким образом, чтобы объекты, принадлежащие одному классу, находились на сравнительно небольших расстояниях (в многомерном признаковом пространстве) друг от друга.

3. Выделение однородных зон на компьютерных картах территории. На этом этапе выполняется группирование геоквантов в зоны по степени их геометрической близости и принадлежности одному классу. Оконтуриваются и отображаются однородные зоны на компьютерных картах территории. Определяются типичные «представители» каждой зоны.

При выполнении условия $D_k / D_{mk} \leq 0,3$ описанный алгоритм дает устойчивые результаты геоzonирования и погрешность измерения характеристик не вносит заметных искажений в результат анализа данных.

7.5.3. Применение региональных ГИС

В настоящее время в стране широко развернуты работы по созданию и использованию ГИС для решения региональных проблем. Опыт применения ГИС для управления территориями широко обсуждается на научных конференциях и форумах (например, международная конференция «Интеркарто 2: ГИС для изучения и картографирования окружающей среды», 2-й технологически-презентационный авиатур ГИС96 и др.). Опыт разработки и применения региональных ГИС и геоинформационных технологий оперативно обобщается в Информационных материалах ГИС-ассоциации (Информационный бюллетень). Накопленный опыт разработки и использования ГИС для решения проблем окружающей среды показывает реальную возможность создания ГИС для регионального мониторинга атмосферы.

Общее состояние разработок и применения региональных ГИС. В настоящее время работы в области геоинформационного обеспечения регионального мониторинга окружающей среды и природных ресурсов проводятся по трем основным направлениям:

- создание баз картографо-кадастровых данных для обеспечения информационно-справочного режима;
- обработка аэрокосмических изображений с целью получения картографической и экологической информации для ГИС;
- разработка и использование геоинформационных приложений для анализа и прогноза состояния среды и природных ресурсов.

Большинство из опубликованных материалов относится к первому направлению, которое характеризуется применением развитых ГИС-технологий, основанных на использовании программного обеспечения широко распространенных в мире векторных ГИС (ArcInfo, ArcView, ArcCad, GeoDraw/GeoGraph, MapInfo, WinGIS и др.). Региональные ГИС разрабатываются как многоцелевые системы, в которых предусматривается накопление и использование некоторых климато-экологических характеристик. В качестве примера можно привести ГИС «Алтай» и «Байкал». Региональные ГИС ориентированы на использование карт различного масштаба. Так, ГИС «Байкал» оперирует картами масштабов: 1:1000000 (общая информация по региону), 1:200000 (информация по населенным пунктам, кадастровые данные и др.), 1:50000 и более детальные масштабы (информация по конкретным источникам загрязнения среды). Работы по второму направлению в ГИС-технологическом плане не получили широкого применения, что можно объяснить несколькими причинами. Одной из наиболее важных причин является недостаточная развитость растровых ГИС, требующих большой памяти для обработки изображений. Этот недостаток будет преодолен с появлением высокопроизводительных компьютерных средств. Из программных средств обработки ДДЗ наиболее известна система ERDAS, совместимая с ArcInfo. При картографировании ДДЗ наибольший эффект достигается при использовании их в комплексе с точечными (инструментальными) источниками информации, что представляется важным для реализации геоинформационных задач РМА. Третье из указанных направлений в настоящее время также находится на этапе разработки ГИС-технологий. Имеющиеся программные средства векторных ГИС, как правило, не содержат детально разработанных приложений, а существующие средства статистического анализа ограничены в возможностях и в большинстве практических задач оказываются неэффективными при проведении комплексного анализа разнородной информации, характерной для мониторинга окружающей среды. Поэтому разработчики таких приложений вынуждены создавать собственные средства аналитико-прогнозных оценок, реализующие, как правило, традиционные статистические методы. Именно ограниченность этих методов в примене-

нии к анализу данных мониторинга окружающей среды и побуждает к использованию методов автоматической классификации при разработке средств комплексного анализа состояния среды.

Региональное прогнозирование состояния атмосферы. В России разрабатываются и обсуждаются региональные программы устойчивого развития, однако реализация этих программ сдерживается недостаточностью наших знаний об опасности для человека и окружающей его природной среды новых химических соединений, поступающих во все возрастающем количестве и объемах в окружающую среду в результате производственной деятельности человека. Чтобы разрабатываемые программы устойчивого развития не превратились в набор лозунгов, необходимо предусмотреть механизмы их реализации, в разработке которых важная роль отводится региональным и глобальным прогнозам экологического состояния окружающей среды. На основе этих прогнозов могут формироваться обоснованные нормативы уровней загрязнения окружающей среды, ограничения на объемы выпуска промышленной продукции в регионах либо на объемы добычи и переработки сырьевых природных ресурсов. Без этих прогнозов невозможен выбор экологически приемлемых для территории производственных технологий.

Прогноз экологического состояния окружающей среды — это крайне сложная проблема, требующая комплексного подхода и использования междисциплинарных знаний. В настоящее время процедуры экологического прогнозирования недостаточно формализованы и задачи такого прогноза решаются на экспертном уровне, так как отсутствует надежный модельный аппарат прогнозирования. Поэтому понятен большой интерес, который вызывает разработка компьютерных подходов к проблемам регионального экологического прогнозирования. Экологическое состояние окружающей среды региона характеризуется большой совокупностью качественных и количественных показателей, описывающих состояние здоровья населения, природных ресурсов. Один из важных аспектов прогноза экологического состояния территории основан на использовании данных об уровнях загрязнения окружающей среды.

Необходим подход к прогнозированию состояния окружающей среды, основанный на выявлении зон экотоксикологической опасности на территории региона и прогнозе динамики развития этих зон в соответствии со сценарием экономического развития региона. Решение этой задачи осложняется двумя обстоятельствами. Первое из них связано с отсутствием надежного и общепринятого критерия качества окружающей среды, который учитывал бы комплексное воздействие

совокупности загрязняющих веществ, выбрасываемых предприятиями региона в атмосферный воздух. Второе обстоятельство связано с тем, что в настоящее время не для всех загрязняющих веществ, обнаруживаемых в компонентах окружающей среды, известны нормативы допустимых уровней загрязнения или степень их опасности. При этом количество загрязнителей среды с неизвестными нормативами значительно превышает число веществ, включенных в перечни химических соединений с известными нормативами. Так как процедуры определения предельно допустимых уровней загрязнения среды, основанные в настоящее время на традиционных методах токсикологии, требуют больших финансовых и временных затрат, для указанных задач прогноза стало необходимым использовать компьютерные экспресс-оценки опасности новых химических веществ на основе моделирования их структур.

Обобщенный критерий качества среды. Выбор стратегии ведения хозяйственной деятельности на территории с учетом требований устойчивого развития возможен на основе анализа прогнозов состояния окружающей среды (ОС), соответствующих тому или иному сценарию хозяйствования в регионе. Наиболее важным аспектом экономического развития является производственная деятельность в регионе как основной источник загрязнения ОС. Поэтому для анализа сценариев экономического развития территории при формировании прогнозов состояния ОС необходимо иметь возможность анализировать перспективные планы экономического развития каждого предприятия (промышленного или сельскохозяйственного) на территории рассматриваемого региона с целью определения перечня выбрасываемых в ОС загрязняющих веществ и возможных объемов их выбросов.

Подход к решению задачи регионального прогнозирования, основанный на выявлении зон экотоксикологической опасности (ЗЭО) на территории региона, сводится к прогнозу динамики изменения границ этих зон в зависимости от сценария экономического развития региона. Под ЗЭО понимается участок территории, в пределах которого обобщенный показатель загрязнения компонент окружающей среды Q превышает некоторое предельно допустимое значение $Q_{\text{пд}}$, при котором уровень загрязнения ОС не создает опасности для здоровья человека и последующих поколений. В общем случае величина $Q_{\text{пд}}$ должна определяться на основе результатов комплексных исследований воздействия загрязнений окружающей среды на здоровье нынешнего и последующих поколений с учетом совокупного загрязнения всех компонентов ОС (атмосферного воздуха, воды, почвы). Оценка величины $Q_{\text{пд}}$ для задач выявления тенденций динамики изменения зон экотоксико-

логической опасности на территории может быть выполнена экспертным путем на основе опыта природоохранной деятельности по учету одновременного совместного действия групп загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

Процедура и этапы компьютерного прогноза. Обобщенная схема прогнозирования изменения состояния окружающей среды путем определения границ ЗЭО для последовательных шагов прогноза показана на рис. 6.5. Рассмотрим более подробно содержание этапов схемы. В процессе выполнения этапа «анализ сценариев развития региона» формируются списки предприятий региона, вносящих основной вклад в загрязнение окружающей среды, проводится инвентаризация источников выбросов на этих предприятиях. На основе анализа технологических процессов и материалов статотчетности предприятий по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу определяются для каждого предприятия перечни загрязняющих химических соединений и объемы выбросов каждого из загрязнителей. В указанных перечнях выявляются те загрязняющие среду примеси, которые не контролируются природоохранными службами вследствие отсутствия для них нормативных показателей и степень опасности которых может быть определена компьютерными средствами экспресс-оценки. По мере создания и развития локальных и региональных систем мониторинга загрязнения атмосферы появляется реальная возможность корректировать указанные перечни загрязнителей и пополнять их дополнительными списками химических веществ, которые выявляются в выбросах предприятий, но отсутствуют в материалах статотчетности.

На основе анализа сценариев развития региона на этапе «прогноз объемов производства и уровней загрязнения» определяются для всех включенных в рассмотрение предприятий объемы продукции для каждого шага прогноза. Применительно к решаемой задаче результаты анализа сценариев экономического развития региона могут быть представлены в виде таблицы, отражающей планируемое увеличение (или уменьшение) объемов производства существующих в регионе предприятий. Если в результате анализа сценария развития выявляется необходимость создания в протический период новых предприятий, то в таблицу такие предприятия включаются на соответствующем шаге прогноза. Эта информация об объемах производства является основой для расчета объемов загрязняющих веществ, выбрасываемых предприятиями, на соответствующем шаге прогноза. В качестве протической модели могут применяться традиционно широко используемые в практике экономического планирования модели нормативного прогноза, позволяющие косвенным путем по небольшому объему статистическо-

го материала, данных производственно-статистической отчетности и планируемому сценарию развития производств произвести расчеты перспективных значений основных показателей загрязнения ОС.



Рис. 7.17. Обобщенная схема прогноза экотоксикологического состояния территории. ОПЗС – обобщенный показатель загрязнения среды; ХС – химическое соединение

Методические вопросы, связанные с моделированием процессов рассеяния и распространения примесей в воздухе от точечных источников, положенные в основу программ моделирования, в настоящее время достаточно разработаны и излагаются в соответствующей литературе. При расчете рассеяния в воздухе территория региона разделяется на достаточно малые элементарные участки (квадратной или прямоугольной формы). Для каждого участка и каждого отдельного загрязнителя проводится суммирование масс загрязняющего вещества, рассеянного разными источниками выбросов в атмосферу. Заметим, что в данном изложении не учтены другие важные аспекты поведения загрязняющих веществ в атмосфере, в том числе трансформация химических соединений, в результате которой образуются вторичные загрязнители, токсикологические характеристики которых могут существенно отличаться от характеристик первичных загрязнителей.

На этапе «расчет ОПЗС» (рис. 7.17) производится комплексная оценка уровня загрязнения среды с учетом множества загрязняющих

примесей в атмосферном воздухе. При этом показатель Q определяется в каждом элементарном участке территории суммированием относительных концентраций загрязняющих воздух веществ с использованием результатов, полученных на этапе моделирования. В случаях, если в перечнях загрязнителей компонент среды имеются новые вещества с неизвестными нормативами, необходимо воспользоваться экспресс-оценками их опасности. На последнем этапе схемы (рис. 6.5) производится определение границ зон опасности на каждом шаге прогноза. При этом используются полученные на предыдущем этапе прогностические оценки ОПЗС для всех элементарных участков территории. Эффективность использования результатов регионального прогноза в значительной степени зависит от возможностей их картографического отображения с использованием геоинформационных технологий.

7.5.4. Перспективы развития ГИС-центров

Задачи регионального мониторинга атмосферы требуют организации сбора и хранения больших объемов климатозэкологических данных, полученных с помощью разнообразных приборов, размещаемых в пространственно-разнесенных точках наблюдения, как в наземных, так и бортовых (на самолетах, спутниках и др.) условиях. Для передачи и накопления этих данных в ГИС используются различные коммуникационные каналы, по которым они поступают и банк мониторинговых данных (БМД) ГИС. Для обработки данных в системе регионального мониторинга атмосферы требуется их географическая «привязка», что осуществляется с использованием банка картографических данных (БКД). Разнородность мониторинговых данных и многоцелевой характер их использования с применением геоинформационных технологий определяют необходимость создания региональных ГИС-центров мониторинга атмосферы.

Обобщенная схема организации ГИС-центра РМА представлена на рис. 7.18. Поставщиками мониторинговой информации для ГИС-центра являются дистанционные средства наблюдения за изменениями параметров состояния атмосферы (концентрации атмосферного аэрозоля, парниковых газов, озона, уровней загрязнения атмосферы и др.). Поставщиками информации для систем РМА являются также региональные органы государственного управления территорией (органы госстатистики, природоохранных служб) и созданные в системе Роскартографии региональные центры геоинформации, выполняющие работы по созданию цифровых карт различных масштабов на террито-

рию России и ее отдельных регионов. На центры геоинформации возложены работы по созданию банка цифровых карт России.

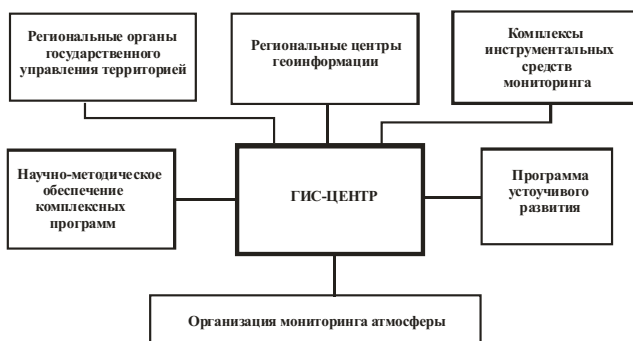


Рис. 7.18. Схема организации ГИС-центра регионального мониторинга атмосферы

Исходя из направленности работ ГИС-центра РМА на организацию мониторинга атмосферы в регионе в интересах его устойчивого развития (рис. 7.18), для разработки программных средств геоинформационного обеспечения задач РМА необходимо решить ряд научно-методических задач, учитывающих специфику региона и особенности его климатоэкологического состояния. Например:

- комплексный пространственный анализ данных мониторинга атмосферы;
- коррекция атмосферных искажений данных дистанционного зондирования;
- идентификация антропогенных факторов воздействия на окружающую среду;
- анализ экологического состояния территории в условиях загрязнения атмосферы.

Анализ современного состояния картографического, технического, программного обеспечения ГИС-технологий показывает практическую значимость создания регионального ГИС-центра мониторинга атмосферы. Действительно, в настоящее время имеются необходимые компьютерные средства, сетевое оборудование, широкий выбор программного обеспечения геоинформационных технологий. Наиболее приемлемым для цифровой топоосновы ГИС с учетом регионального уровня задач РМА является масштаб 1:1 000 000. Такого масштаба цифровые карты территории России, Европейской территории и Урала в настоящее время Роскартография предоставляет пользовате-

лям ГИС. На очереди завершение работ по созданию карт масштаба 1:200 000. Цифровые карты миллионного масштаба распространяются в формате F1M, что требует их конвертирования в форматы, воспринимаемые программным обеспечением ГИС. При организации работы региональных ГИС-центров необходимо ориентироваться именно на эти карты российского производства, так как другие цифровые и электронные карты территории России, распространяемые рядом организаций в более удобных форматах и по значительно меньшим ценам (например, американские карты ADC World Map и DCW), отличаются большими погрешностями.

Анализ задач регионального ГИС-центра РМА показывает, что кроме группы технического обеспечения в составе ГИС-центра должны быть образованы группы банка картографических данных, мониторинговых данных и группа прикладных задач мониторинга атмосферы. В составе групп должны быть картографы и специалисты по обработке данных дистанционного зондирования, в частности, спутниковых изображений. В составе центра может быть сформирована группа специалистов, занятая разработкой ряда научно-методических задач, учитывающих специфику региона и особенности его климато-экологического состояния. Стремительный рост технических возможностей компьютерной базы, периферийных устройств геоинформационных технологий (дигитайзеров, сканеров, плоттеров и др.), расширение функциональных возможностей программного обеспечения ГИС и сетевых технологий значительно расширяет и перспективы развития региональных ГИС-центров атмосферного мониторинга. Большие возможности для развития систем РМА существуют в объединении региональных ГИС-центров в единую государственную (мировую) сеть атмосферного мониторинга, что диктуется необходимостью решения глобальных экологических проблем человечества (парниковый эффект, кислотные дожди, озоновые дыры и др.). Опыт использования Internet для передачи и обработки геопространственных данных дает широкие возможности использования международной сети для скоростного интерактивного решения различных профессиональных задач.

Глава 8. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЭКОЛОГИИ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

8.1. Мониторинг загрязнения окружающей среды

Обнаружение загрязнения окружающей среды. Распознавание чаще всего базируется на том факте, что конкретный район с наибольшей вероятностью может подвергнуться загрязнению только определенным веществом (субстанцией). По космическим изображениям можно практически непрерывно проследивать контуры однородных крупномасштабных областей загрязнения. Идентификация в значительной степени облегчается возможностью оценки пространственных размеров таких областей.

Загрязнение почвы сточными водами. Его можно обнаружить на космических изображениях высокого разрешения, получаемых, например, с помощью радиометра MSS спутника Landsat, который для отображения полного кадра $185 \times 185 \text{ км}^2$ использует 28000 линий с 3200 элементами изображения на каждой линии. Например, на снимке сделанном в диапазоне длин волн 0,6–0,7 мкм, долина Арава на границе между Израилем и Иорданией, простирающаяся от Мертвого моря на севере до залива Акоба (Соломонов залив) на юге, выглядит очень светлой по сравнению с темными массами гор Элом в Иордании или темной областью залива. На расстоянии 25 км к северу от береговой линии залива на светлом фоне долины обнаруживается очень темное продолговатое пятно размером 2 км с севера на юг и 3 км с востока на запад. Оно соответствует зоне сброса сточных вод медного рудника. Весь район сброса покрыт спекшимися многогранными пластинами толщиной 2–10 см с сине-зеленым налетом оксидов меди на поверхности.

Загрязнение воздуха дымными шлейфами, газовыми веществами или атмосферными аэрозолями можно оценить по спутниковой информации. Достаточно узкие лентообразные (а иногда и с заметной клиновидностью) атмосферные рассеивающие системы, которые на спутниковых снимках выглядят более светлыми в любом участке диапазона длин волн 0,5–1,1 мкм, можно дешифровать как характерные облака, инверсионные следы за самолетами или морскими судами, шлейфы пыли или дыма.

Концентрация газообразных веществ (SO_2 , NH_3 , N_2O и CH_4) поддается контролю со спутников в случае значительного загрязнения (когда велико произведение концентрации загрязняющего вещества на высоту). В случае N_2O и H_2S (характерная концентрация у земной по-

верхности составляет всего лишь $0,002 \text{ млн}^{-1}$) контроль за областями загрязнения практически неосуществим. Полоса поглощения CH_4 обнаруживается на длине волны $7,7 \text{ мкм}$.

Разработан метод обнаружения и измерения концентрации газовых компонентов, основанный на корреляционной спектроскопии и заключающийся в сравнении измеренного спектрального сигнала с известными спектральными линиями поглощения загрязняющего вещества. Корреляционную спектроскопию можно приспособить к спектрам поглощения со многими выраженными пиками (локальными максимумами) и впадинами (локальными минимумами), например, для полосы поглощения SO_2 на волне 300 нм или для полосы поглощения NO_2 на длинах волн $400\text{--}440 \text{ нм}$. На измеренные спектральные яркости накладывается специальная маска так, чтобы можно было снять только два показания. Одно показание представляет собой сумму энергетических яркостей на длинах волн, соответствующих пикам поглощения, а другое — сумму энергетических яркостей на длинах волн, соответствующих впадинам. Разница между этими отсчетами, деленная на их сумму, зависит от произведения концентрации загрязняющего вещества на вертикальную протяженность области загрязнения и почти не зависит от солнечного излучения во время измерений (высоты Солнца, облачного покрова). Проверка метода с помощью аэрологического зонда, перемещающегося на высоте 35 км над большей частью озонового слоя, показала возможность проведения контроля со спутников.

8.1.1. Мониторинг воздействия на окружающую среду нефтяных и газовых разработок

Добыча нефти и газа в Западной Сибири привела к серьезным экологическим проблемам, связанным главным образом с нарушением норм строительства и эксплуатацией коммуникационных сетей и буровых установок. Работа по проекту «Геоинформационная система на основе спутниковых данных для мониторинга воздействия на окружающую среду нефтяных и газовых разработок в Западной Сибири (район Сургута)» была выполнена НИЦ «Планета» совместно Росавиакосмосом, администрацией Сургутского района и Национальным центром космических исследований Франции (фирмы BRGM, Istar). Исследуемым районом являлась нефтеносная территория, расположенная к северо-востоку от г. Сургута. Целями проекта являлись:

- создание базы данных карт местности, спутниковых изображений и результатов их обработки для определения текущего состояния окружающей среды;
- разработка методологии, позволяющей осуществлять идентификацию и классификацию по спутниковым изображениям различных типов объектов земной поверхности как функцию их способности задерживать или распространять углеводородные загрязнители;
- сравнение возможностей применения для мониторинга состояния окружающей среды оперативной космической информации с российских и зарубежных спутников.

В качестве исходной информации использовались космические изображения высокого разрешения с различных КС: панхроматическое и многозональное изображения со спутника SPOT, два многозональных изображения со спутника «Ресурс», а также радиолокационные изображения, полученные со спутников ERS-1 и «Алмаз» (рис. 8.1).

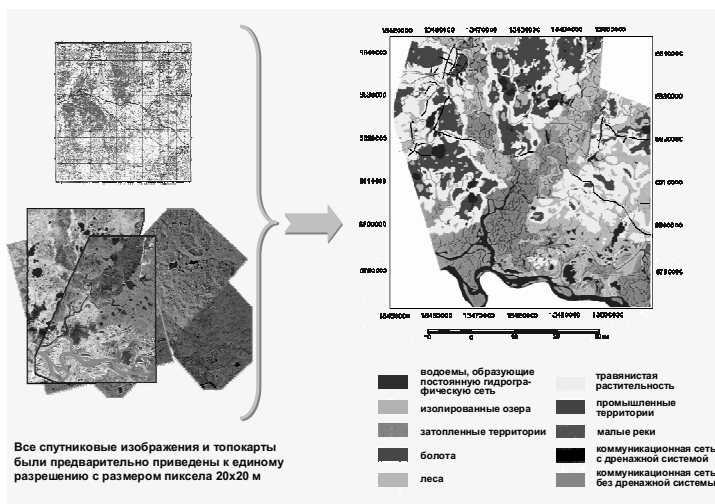


Рис. 8.1. Тематическая карта восточной части Сургутского района.
ИСЗ «Ресурс-01», МСУ-Э

В результате реализации проекта создана и передана для использования администрации Сургутского района территориальная информационная система для определения текущего состояния окружающей среды, содержащая базу данных географически привязанных спутниковых изображений («Ресурс», «Алмаз», SPOT, ERS), результаты их автоматизированной и визуальной интерпретации, карты мест-

ности. Получен ряд новых картографических документов: тематическая карта восточной части Сургутского района (рис. 8.1), карта зон риска поверхностных загрязнений (рис. 8.2), карта изменения ландшафта и инфраструктуры и др. Отработана методология идентификации и классификации по спутниковым изображениям различных объектов земной поверхности с точки зрения их способности задерживать или распространять нефтяные загрязнения.

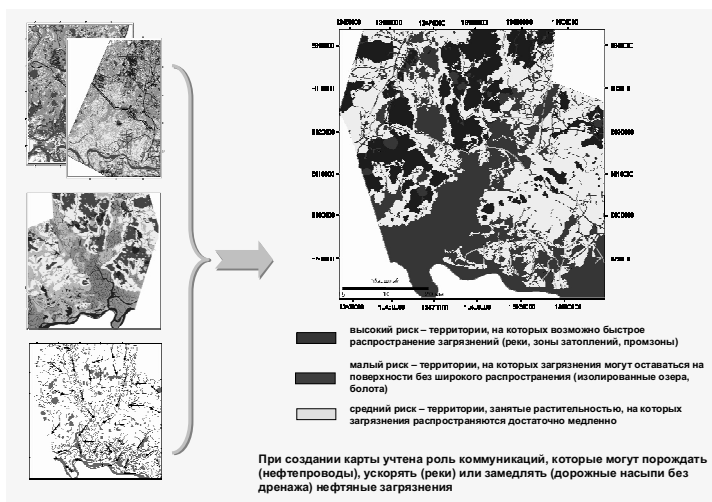


Рис. 8.2. Карта зон риска распространения загрязнений, полученная с использованием спутниковых данных. ИСЗ «Ресурс-01», МСУ-Э; SPOT, XS

8.1.2. Изменение антропогенной нагрузки в окрестностях города по данным спутникового зондирования

Обработка данных дистанционного зондирования в описываемом проекте заключалась в совместном анализе данных трех спектральных каналов приборов MSU-E (спутник Космос-1939) и HRV (спутник SPOT) с целью классификации природных объектов и изучения их свойств. В окрестностях Санкт-Петербурга был выбран полигон рис. 8.3.

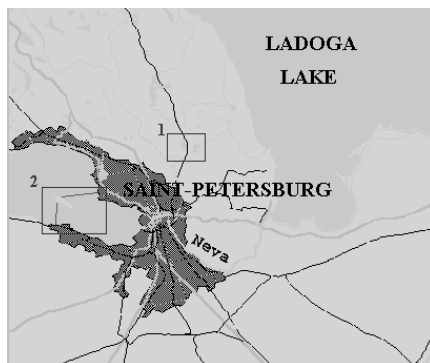


Рис. 8.3. Расположение полигона на карте окрестностей г. Санкт-Петербурга

На территории полигона, расположенного в районе поселка Токсово, находится два крупных озера — Кавголово-ское и Хеппо-Ярви, а также около десятка более мелких. В юго-западной части полигона протекает р. Охта, правый приток р. Невы, кроме того, на исследуемом пространстве много мелких рек и ирригационных каналов. Растительность определяется лесами различных типов — хвойными и смешанными, частично заболоченными. На территории полигона достаточно много полей, расположенных вблизи многочисленных поселков, и больших открытых участков леса, лугов и болот. Карта окрестностей поселка Токсово представлена на рис. 8.4.



Рис. 8.4. Карта окрестностей пос. Токсово

На первом этапе файлы исходных данных прибора HRV спутника SPOT и сканерное изображение карты были приведены к единой географической проекции (Reformat>RESAMPLE). После этого из трансформированных изображений были вырезаны фрагменты (Reformat>WINDOW), определяемые границами выбранного полигона. Соответствующий фрагмент карты, приведенный к проекции Меркатора, показан на рис. 8.5:



Рис. 8.5. Карта полигона

Для отображения файлов .IMG, представляющих фрагменты изображений, полученных для каждого из спектрального канала прибора HRV, были подготовлены файлы палитры (spot1t.SMP, spot2t.SMP, spot3t.SMP) (рис 8.6–8.9).

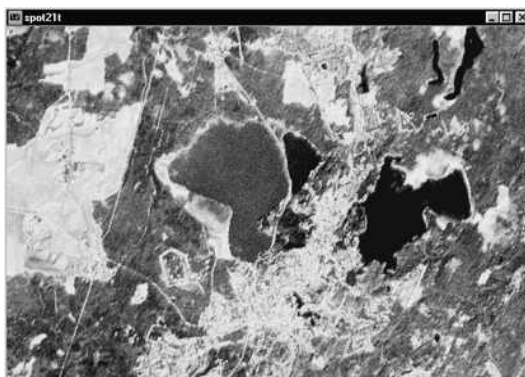


Рис. 8.6. Изображение полигона, полученное на 1-м канале прибора HRV спутника SPOT

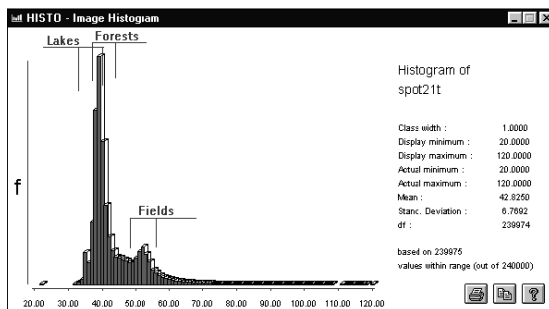


Рис. 8.7. Гистограмма изображения, полученного на 1-м канале прибора HRV

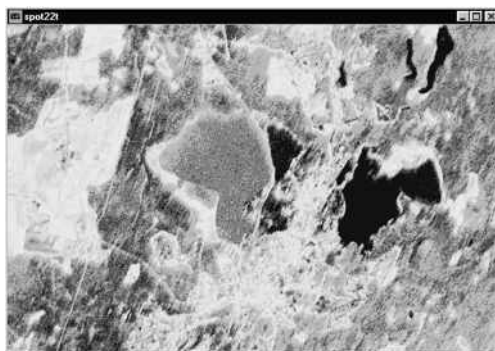


Рис. 8.8. Изображение полигона, полученное на 2-м канале прибора HRV спутника SPOT

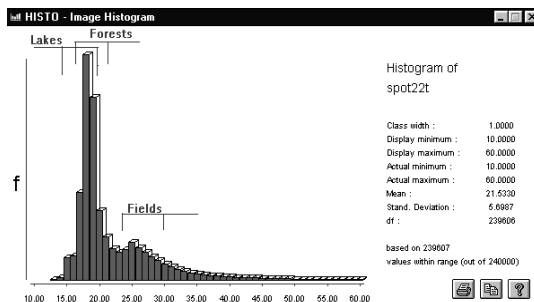


Рис. 8.9. Гистограмма изображения, полученного на 2-м канале прибора HRV

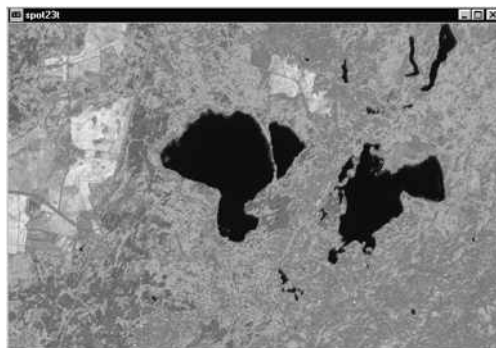


Рис. 8.10. Изображение полигона, полученное на 3-м канале прибора HRV спутника SPOT

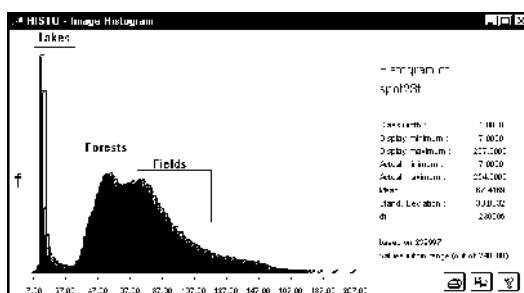


Рис. 8.11. Гистограмма изображения 3-го канала прибора HRV

Таким образом, основываясь на информации первого и второго каналов, не удастся провести однозначную классификацию природных объектов. Информация, полученная в третьем спектральном диапазоне прибора HRV, позволяет уверенно классифицировать озера с помощью модуля RECLASS. При классификации растительности получаются несколько худшие результаты (рис. 8.10 и 8.11).

Полученные результаты классификации природных объектов по информации, полученной в 3-м спектральном канале, не следует распространять на другие наборы данных. К такому результату приводит «сочетание» различных обстоятельств — времени зондирования, состояния растительности. Поэтому 3-й спектральный канал оказывается более информативным, чем первые два. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить гистограммы изображений, полученных на 3-м спектральном канале (рис. 8.11) и методом главных компонент (рис. 8.12).

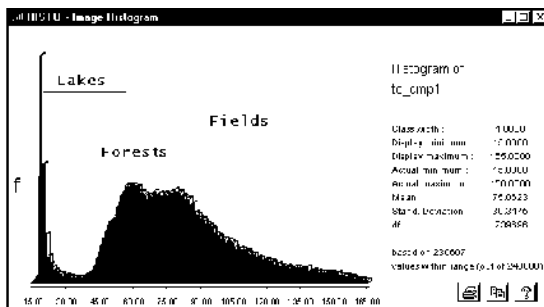


Рис. 8.12. Гистограмма изображения, полученного методом главных компонент

Метод главных компонент (Principal Components Analysis) — это способ свертывания информации, когда одно изображение заменяет 3 или 4 без существенной потери информации. В табл. 8.1 приведены коэффициенты корреляции между исходными файлами отдельных спектральных каналов (spot21t.img – 1-го, spot22t.img – 2-го и spot23t.img – 3-го) и файлами главных компонент (C1 – 1-й, C2 – 2-й и C3 – 3-й).

Таблица 8.1

Коэффициенты корреляции между исходными файлами и файлами главных компонент

ФАЙЛЫ	C1	C2	C3
spot21t	0.678413	0.725250	-0.118604
spot22t	0.549894	0.824819	0.132400
spot23t	0.998980	-0.044851	0.001179

Из таблицы видно, что первую главную компоненту определяет в основном информация 3-го канала ($r = 0.998980$). Высокая информативность 3-го канала определяет результаты классификации с обучением (рис. 8.13) и без обучения (рис. 8.14) — своими очертаниями эти рисунки напоминают рис. 8.10, представляющий изображение, полученное на 3-м канале прибора HRV.

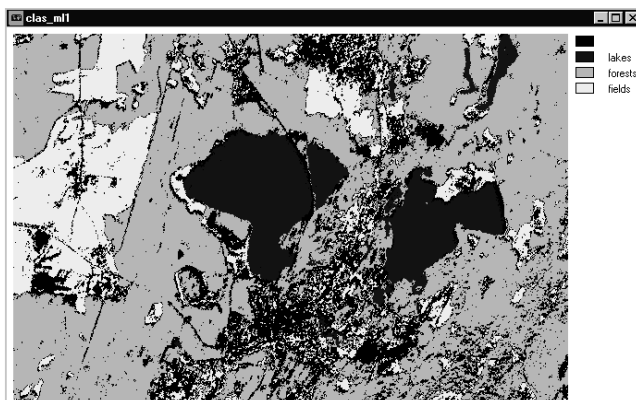


Рис. 8.13. Результат классификации с обучением

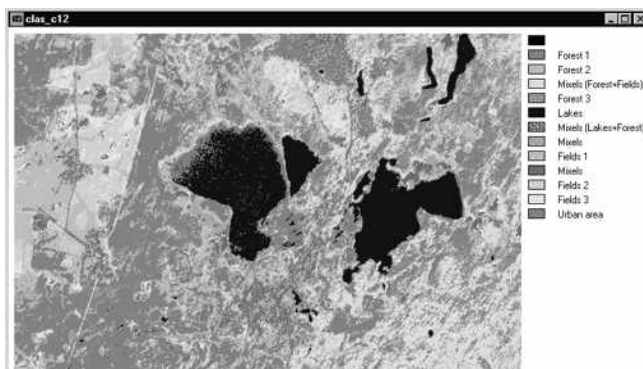


Рис. 8.14. Результат классификации без обучения

Один из вопросов, который изучался для полигона, расположенного в районе пос. Токсово, заключался в оценке изменения антропогенной нагрузки на этот район на основании сопоставления: карты; изображения, полученного с помощью прибора МСУ-Э; изображения, полученного с помощью прибора HRV г. Карта и спутниковые изображения трансформированы с помощью модуля RESAMPLE в проекцию Меркатора с одними и теми же параметрами, при этом соответствующие пиксели любого из обрабатываемых изображений имели одни и те же географические координаты, что позволяло переносить результаты векторизации с одного изображения на другое. На рис. 8.15. представлен результат классификации данных прибора HRV без обу-

чения модулем ISOCLUST при 22 кластерах. Рисунок 8.16 повторяет предыдущий, но здесь на растровую подложку выведено четыре векторных файла: ochta.ves — р. Охта, оцифрованная с карты и представленная в левом нижнем углу рис. 8.16 синей ломаной линией; groad.ves — железная дорога, оцифрованная с карты и показанная на рис. 8.16 красно-белой ломаной линией, идущей приблизительно посередине рисунка с юга на север; ua_old.ves — границы старой застройки, оцифрованные с карты и представленные на рис. 8.16 тонкими красными ломаными линиями; ua_new.ves — границы новой застройки, оцифрованные непосредственно с результата классификации данных прибора HRV на рис. 8.15 и представленные на рис. 8.16 жирными красными ломаными линиями.

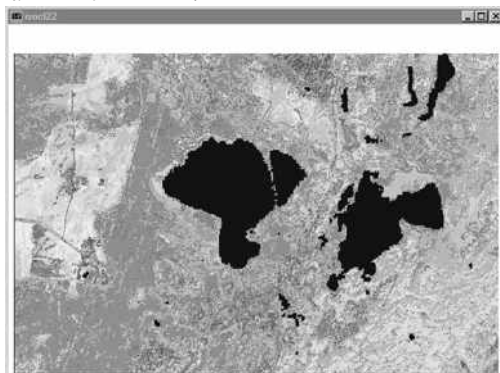


Рис. 8.15. Результат классификации данных прибора HRV без обучения модулем ISOCLUST при 22 кластерах

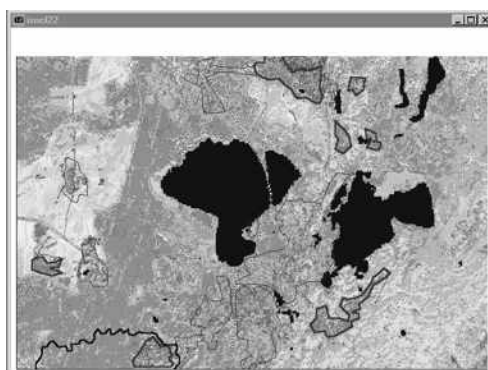


Рис. 8.16. Результат классификации данных прибора HRV модулем ISOCLUST и выведения на растровую подложку векторных файлов

Границы новой застройки по данным прибора HRV оцифровывались приблизительно по тем же кластерам, которые при сопоставлении результатов классификации с картой, должны быть отнесены к районам жилой застройки.

Эти же границы показаны на рис. 8.17, представляющем результаты классификации данных прибора МСУ-Э без обучения модулем ISOCLUST при 21 кластере.

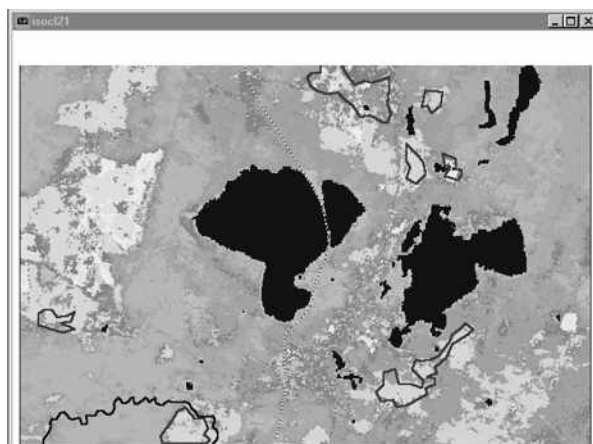


Рис. 8.17. Результат классификации данных прибора МСУ-Э без обучения модулем ISOCLUST при 21 кластере и выведения на растровую подложку векторных файлов

Как видно из рис. 8.17, в данном случае кластеры, попадающие в границы новой застройки, показанные жирными красными ломаными линиями, в основном не совпадают с кластерами, которые можно отождествить со старой застройкой. Из этого можно сделать вывод о том, что новая застройка появилась между 1989 и 1996 гг. — датами соответствующих спутниковых снимков.

Таким образом, на основании сравнения карты и космических снимков можно сделать вывод о том, что в начале 90-х гг. резко возросла антропогенная нагрузка на окрестности пос. Токсово, что выразилось в появлении новых, достаточно больших, участков жилой застройки на этой территории.

8.1.3. Информационные технологии и методы дистанционного зондирования для построения космического экологического мониторинга мегаполисов

Разработка единой интегрированной программы, отражающей конвергенцию информационных, коммуникационных технологий (ИКТ) и Web-технологий в широкомасштабные исследования по формированию информационного общества, ориентированы также и на развитие комплексной системы экологического мониторинга. Мониторинг окружающей среды — одна из актуальных научных задач, так как направлена на решение таких глобальных проблем, как антропогенное изменение климата и состояние окружающей среды. Важнейшим источником информации для мониторинга природных сред являются спутниковые данные, эффективное использование которых возможно только при условии применения современных информационных технологий, обеспечивающих их автоматический прием, обработку и архивацию. Система экологического мониторинга предусматривает оперативный доступ к спутниковой информации удаленных пользователей и использование экологической информации для устойчивого развития социальных структур без деградации среды обитания. Особенно важно обеспечить развитие этого ключевого направления для современного мегаполиса. Так, в одной из международных программ «Глобальный вызов Бангемана» (Global Bangemann Challenge, GBC), поддержанной Комиссией европейских сообществ, Центром по формированию информационного общества и направленной на развитие информационных и коммуникационных технологий в городах, значительное место занимают проблемы применения ИКТ в задачах охраны окружающей среды.

Проблемы и примеры решения задач спутникового геоэкологического мониторинга мегаполиса Москвы в рамках проблемы конвергенции передовых информационных технологий и организации информационной среды города рассматривались в данном проекте.

Аэрокосмический экологический мониторинг. Методы дистанционного зондирования, Интернет-технологии приобретают в настоящее время важное значение для обеспечения оперативного доступа к спутниковым данным и электронным ресурсам космических методов контроля экосистем. Развитие глобальной компьютерной сети Интернет и взрывной рост информационных технологий не только оптимизировали информационный обмена в мировом научном сообществе, электронный доступ ученых к информационным ресурсам и научным базам данных ведущих национальных центров, интенсивной интегра-

ции научно-исследовательской и информационной деятельности. Одной из новых возможностей является интеграция современных информационных технологий в системах *космического экологического мониторинга*. Основное внимание сосредоточено на проблеме использования спутниковой информации и Интернет-технологий для наблюдения за состоянием окружающей среды в больших городах.

Использование телекоммуникационной инфраструктуры, гипертекстовых и интерактивных технологий чрезвычайно перспективно в спутниковом мониторинге состояния окружающей среды. Решение этих задач делает возможными интеграцию технологий дистанционного зондирования в системах геоэкологического мониторинга мегаполисов и геоэкологической безопасности г. Москвы и реализацию нового подхода к управлению качеством жизни в городе — подхода, основанного на прозрачности, предоставлении городскому сообществу доступа через сеть к оперативной информации о состоянии окружающей среды в г. Москве.

В контексте формирования в Москве концепции информационного общества и использования новейших ИКТ для интеграции источников информации определим круг задач, анализ которых позволяет ответить на вопрос о возможности применения методов исследования Земли из космоса, основанных на развитии ИКТ и Интернет-технологиях, не только в традиционно решаемых задачах метеорологии и океанографии, но и при решении природоохранных проблем в интересах крупных городов. Если говорить в общем виде о формировании концепции интеграции Москвы в информационное общество, то в направлении, основанном на использовании и интеграции спутниковой информации в городском геоэкологическом мониторинге, в настоящее время можно выделить следующие актуальные для Москвы задачи:

- информирование широких слоев населения об экологии мегаполиса, обеспечение пользователей, всего городского сообщества оперативными информационными ресурсами космического экологического мониторинга;
- интеграция электронных ресурсов о состоянии окружающей среды в единое информационное пространство мегаполиса;
- обеспечение единого информационного пространства системы геоэкологической безопасности города на основе дистанционного зондирования, ГИС и Интернет-технологий;
- введение и хранение цифровых карт местности, атрибутивных баз данных, представление экологической информации на различных

административных уровнях пользователя для оперативного решения задач управления геоэкологической безопасностью г. Москвы.

Тепловое дистанционное зондирование г. Москвы. Космический экологический мониторинг перспективен для выявления изменений в состоянии окружающей среды урбанизированных территорий. Спутниковый мониторинг геофизических полей в видимом и инфракрасном диапазонах спектра позволяет контролировать состояние атмосферы над городом, обнаруживать техногенные выбросы промышленных предприятий и устанавливать зоны негативного влияния мегаполиса на прилегающие лесопарковые зоны. В Институте космических исследований РАН по поручению правительства г. Москвы на основе спутниковой информации проводился мониторинг тепловых выбросов ТЭЦ и крупных производств. Для спутникового экологического мониторинга больших городов наиболее эффективны метеорологические спутники, как отечественные (спутники типа «Ресурс-01»), так и американские спутники серии NOAA с многоканальными радиометрами типа AVHRR. Высокая периодичность мониторинга (несколько раз в сутки), достаточно хорошо разработанное метеорологическое и методическое обеспечение обработки информации позволили развить концепцию и разработать спутниковую подсистему городского экомониторинга г. Москвы, которая в состоянии обнаруживать тепловые аномалии и тепловые выбросы промышленных отходов (ТЭЦ, крупные производства, пруды-охладители), регистрировать дымные шлейфы от труб, возникающие в результате крупных лесных и торфяных пожаров в окрестности города.

На борту спутников серии NOAA и «Ресурс-01» выполняется калибровка для последующего преобразования измеряемой спутником суммарной тепловой энергии от Земли и атмосферы в яркостные температуры по определенному алгоритму.

Обнаружение тепловых аномалий и контроль тепловых выбросов промышленных объектов. Обнаружение тепловых аномалий включает в себя:

- собственно классификацию участков изображения по радиационной температуре в условиях помех и выявление аномальных на данном снимке источников излучений;
- выявление тепловых аномалий на основе анализа временных рядов с учетом помеховой обстановки.

Рассмотрим, как проводятся классификация участков изображения по радиационной температуре и выявление аномальных источников излучений. В зависимости от помеховой обстановки, времени суток и природно-климатических условий используются различные

стандартные алгоритмы выявления тепловых аномалий, а также алгоритмы, которые успешно апробированы при обнаружении пожаров.

При отсутствии облачности наиболее удобна регистрация тепловых аномалий на основе алгоритма обнаружения по порогам температур. Участок многоканального изображения считается аномальным, если выполняются следующие условия, представленные в табл. 8.2, где T_{3p} , T_{34p} , T_{4p} — температурные пороги, I_2 , I_1 — интенсивность излучения в 1-м и 2-м каналах.

Таблица 8.2

Критерии обнаружения тепловой аномалии

Для дневных темпера- тур	Для ночных темпера- тур
$T_3 > T_{3p};$ $T_4 > T_{4p};$ $T_3 - T_4 > T_{3,4p};$ $(I_2 - I_1)/(I_2 + I_1) > 0.1;$	$T_3 > T_{3p};$ $T_4 > T_{4p};$ $T_3 - T_4 > T_{3,4p};$

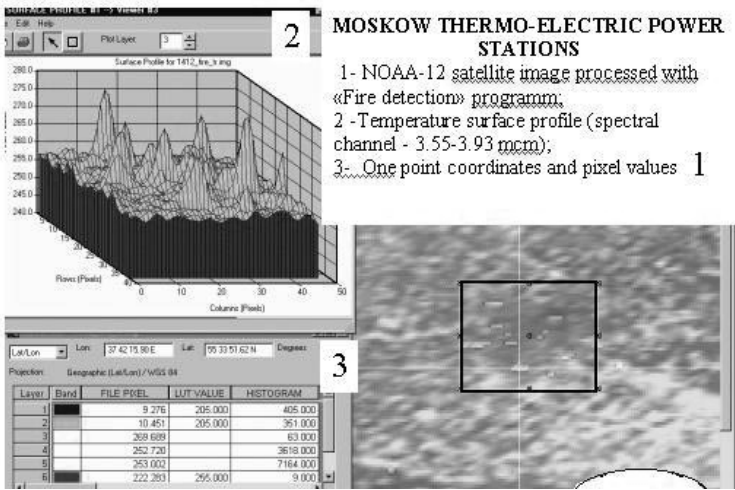


Рис. 8.18. Локализация московских тепловых электростанций спутник NOAA-12; температурный профиль поверхности; координаты точек и величины пикселей

Алгоритм обработки тепловых аномалий реализован в дополнительном программном модуле «Fire detection» к пакету прикладных программ ERDAS Imagine. Температурные пороги задаются оператором

ром в следующих интервалах: $T_{3p} — 310–322$ К; $T_{34p} — 7–15$ К; $T_{4p} — 275–285$ К. Для летнего времени задаются следующие температурные пороги: $T_3 = 312$ К; $T_{34} = 15$ К; $T_4 = 276$ К. Пример выделения источников излучения от тепловых электростанций на территории г. Москвы приведен на рис. 8.18.

В условиях разорванной облачности и при больших значениях зенитного угла Солнца «блики» в 3-м канале от облаков, водных поверхностей и открытых участков местности резко увеличивают вероятность ложных помех. В этом случае хорошие результаты получают при использовании смешанного алгоритма используемого в программной среде «ERDAS IMAGINE». Методика выявления тепловых аномалий в условиях помех представлена на диаграмме (рис. 8.19).

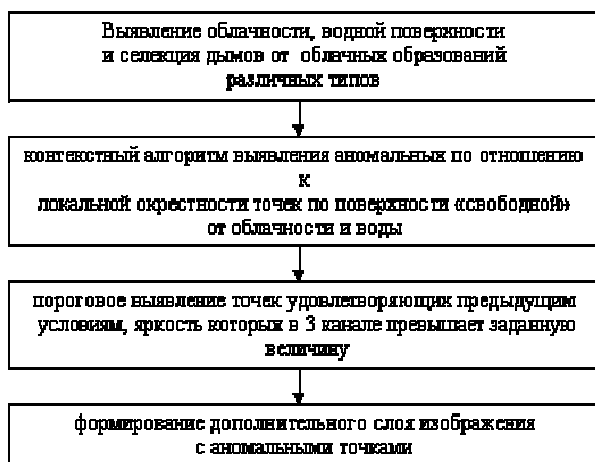


Рис. 8.19. Методика выявления тепловых аномалий в условиях помех

Пример выявления тепловой аномалии под дымом техногенного происхождения (пожар на нефтяной скважине) приведен на рис. 8.20.

При низкой контрастности значений яркости тепловых каналов обработка производится с использованием ГИС-технологий программного продукта «ERDAS IMAGINE». Градации яркости определяются посредством обработки теплового канала методом кластерного анализа (ISODATA).



Рис. 8.20. Тепловая аномалия под дымом техногенного происхождения

Выявление тепловых аномалий на основе анализа временных рядов с учетом помеховой обстановки. На абсолютные значения собственного излучения подстилающей поверхности, включая техногенные объекты, влияют следующие факторы:

- время суток, угол Солнца, взаимное положение спутника, участка наблюдения и Солнца;
- метеорологическая обстановка (облака, осадки, ветер);
- характер застройки и инфраструктуры.

Учет вышеперечисленных факторов возможен на основе статистических наблюдений для разделения параметров, входящих в случайную и систематическую погрешности. Такая работа должна проводиться с использованием данных наземных измерений.

Спутниковый мониторинг тепловых выбросов промышленных объектов. При известных размерах источника тепловых излучений, например труб ТЭЦ, прудов-охладителей, корпусов сталелитейных производств и тому подобных объектов, возможно получение абсолютных значений температур. Так как контроль территорий с помощью спутников серии NOAA производится несколько раз в сутки, то такой мониторинг позволит не только выявлять тепловые загрязнения, но и осуществлять оперативный контроль состояния технических объектов.

Выделение дымовых шлейфов, локализация источников задымления и оценки границ размывания шлейфов в пределах городской территории. Задача выделения дымовых шлейфов во многом сходна с задачей выделения и анализа тепловых аномалий. Однако в настоящее время не существует признаков, по которым можно по данным оптических и тепловых измерений со спутников (ближний ИК и обычный ИК спектральные каналы) локализовать нетепловые источники загрязнений. Для решения этой задачи требуется применять более сложные методы анализа. Например, использовать более широкий набор спектральных каналов, специальные методы обработки и выделения границ неоднородных областей шлейфов и распознавания их на фоне естественных образований, в частности отделения шлейфов от облаков.

В настоящее время практически может быть решена более узкая задача — выявление тепловых шлейфов и зон задымления от локализованных источников, т.е. от таких источников, которые могут быть обнаружены по данным спектрального канала 3,5–3,9 мкм. Такой канал имеется и на отечественных спутниках серии «Ресурс-01» (5-й канал МСУ-СК), и на спутниках NOAA. Перспективным методом решения подобной задачи является использование многоканальных (оптических и тепловых) спектральных каналов, в том числе и совмещенных данных дистанционного зондирования со спутников разных серий. Анализ серии снимков со спутников «Ресурс-01» показал, что в результате такого совмещения источники тепловых аномалий полностью совпадают с источниками дымовых шлейфов.

Возникающие вблизи городов пожары могут сильно влиять на экологическую обстановку в городе за счет насыщения воздуха углекислым газом и продуктами горения, в отдельных случаях вызывать острый дефицит кислорода. Примерами являются торфяные пожары вблизи г. Москвы и пожары на нефтяной скважине. Протяженность дымовых шлейфов достигает 100–200 км (рис. 8.21).

Программное обеспечение, разработанное для нужд МЧС России, позволяет выявлять очаги пожаров (для торфяных пожаров до возникновения дымовых шлейфов), осуществлять географическую привязку и использовать возможности современных геоинформационных систем для принятия решений.

При возникновении крупных техногенных пожаров в черте города наблюдения со спутника NOAA позволяют визуализировать район загрязнения опасными химическими веществами.

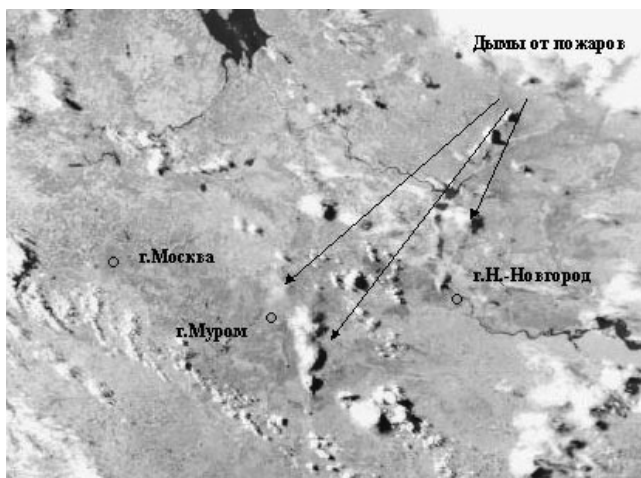


Рис. 8.21. Пожары в Центральной части России на спутниковом снимке

Перспективы применения спутникового экомониторинга в больших городах. Проведенные исследования показали, что аэрокосмические методы изучения природной среды находят широкое применение в спутниковом экомониторинге мегаполисов. Метод тепловой космической съемки мегаполисов основан на бесконтактном определении температуры объекта земной поверхности или среды по плотности потока излучения в инфракрасном диапазоне длин волн. Регистрируемое излучение (радиационная температура) является функцией термодинамической температуры и спектрального коэффициента излучения, характеризующего оптические свойства излучающей поверхности.

В заключение перечислим основные перспективные направления дальнейшего использования данных спутникового геоэкологического мониторинга больших городов:

1. Разработка методов теплового дистанционного зондирования мегаполисов и выявление изменений в состоянии окружающей среды урбанизированных территорий.
2. Оперативное обнаружение тепловых аномалий и техногенных выбросов, например контроль тепловых выбросов ТЭЦ и промышленных объектов. Классификация участков космических снимков по радиационной температуре и выявление аномальных источников излучений. Выделение дымовых шлейфов на основе специальных алгорит-

мов и определение границ неоднородных областей шлейфов. Задача выявления тепловых дымовых шлейфов и зон задымления от локализованных источников.

3. Прогнозирование переноса загрязнений в городской атмосфере, основанное на анализе структуры турбулентных полей и ветра. Известно, что распространение загрязнений в городской атмосфере определяется структурой турбулентных полей и ветра. В то время как средний ветер вызывает адвекцию (снос) примесей, турбулентность приводит к диффузионному распылению облака загрязнений. Характеристики крупномасштабной турбулентности определяют размеры зон, охваченных загрязнениями воздуха. Показано, что в условиях плотной городской застройки возникают благоприятные возможности для возбуждения крупных вихревых структур.

4. На основе комплексного экологического мониторинга региона возможно эффективное оценивание влияния мощной техногенной системы на экологию города.

5. Построение температурных карт городов и тематических методик обработки спутниковых данных.

6. Выявление температурных аномалий и суммарных загрязнений природной среды объектами промышленного и городского хозяйства с использованием тематической дешифровки и компьютерной обработки данных ДЗЗ и ГИС-технологий.

7. Формирование единой упорядоченной информационной среды региона. Создание информационного банка знаний по космическому геоэкологическому мониторингу мегаполиса. Комплексная обработка экологической информации о мегаполисе — от сбора данных до ее хранения, обновления и представления городскому сообществу.

8. Построение динамических моделей техногенного воздействия по данным тепловой космической съемки.

8.1.4. Оценка ареалов загрязнения снежного покрова по космическим сканерным изображениям

Выявления площадей с различной степенью загрязнения почвенного и снежного покрова тяжелыми металлами по материалам, полученным с различных систем дистанционного зондирования, является одной из актуальных задач в связи с усилением антропогенных нагрузок на природную среду, что требует получения оперативной информации для больших территорий. Снежный покров, обладая свойством интегрального накопления загрязняющих веществ (ЗВ), которые адсорбируются на поверхности кристаллов в процессе их выпадения,

используется в качестве планшета-индикатора загрязнения подстилающей поверхности. Аккумулируемые в снежном покрове ингредиенты сохраняются до снеготаяния и таким образом несут в себе значительную геохимическую информацию.

В районах действия техногенных источников загрязненный снежный покров позволяет оценить химический состав атмосферных выпадений, их интенсивность, выявить ареалы рассеяния и вместе с данными космической съемки получать информацию о степени загрязнения снежного покрова вблизи промышленных центров. Накопление ЗВ в снежном покрове зависит от климатических условий на данный период, свойств подстилающей поверхности, почв, горных пород, рельефа, растительности, локальных техногенных источников. Накопленные в снежной толще ЗВ в период таяния увеличивают концентрации в весеннем стоке. При таянии они попадают в дождевую канализацию, водоемы и могут быть причиной загрязнения питьевых вод. Известно, что концентрация ЗВ в атмосфере, поступающих от источников, резко убывает с увеличением расстояния от источника. Аналогичная картина содержания и изменения наблюдается в снежном покрове.

Применение дистанционных методов измерения параметров загрязнения местности особенно примечательно, поскольку ранее в отношении снежного покрова эти методы применялись лишь для определения пространственно-временных характеристик ореала загрязнения. В связи с этим актуализируется проблема сбора и анализа оперативной информации о состоянии снежного покрова на большой территории. Возникла необходимость в разработке дистанционных методов оценки уровней загрязнения снега по цифровым спутниковым изображениям и в построении карт загрязнений.

Определение функциональной зависимости. Практическое использование результатов дистанционного зондирования определяется возможностью установления связей параметров, характеризующих состояние природной среды с полем уходящего излучения. Важным свойством снежного покрова, обеспечивающим его дешифрирование на спутниковых изображениях, являются его высокие альбедо и спектральные коэффициенты яркости (СКЯ). Данные характеристики, как показали исследования, зависят от многих факторов, в том числе и от степени загрязнения. Альбедо чистого сухого снега может достигать 90–100%, а загрязнение снижает этот показатель до 20–50%, и таким образом оно может быть идентифицировано по дистанционным измерениям. На космических снимках, полученных в видимом и ближнем ИК диапазонах (0.6–1.1 мкм), загрязненным участкам снежного покро-

ва соответствуют более темные участки снимка и, соответственно, меньшие значения коэффициентов интенсивности снега. Этот признак выбран в качестве основного для дешифрирования загрязнения снежного покрова.

Для определения функциональной зависимости между многозональными дистанционными измерениями отражательных характеристик снежного покрова и параметрами, характеризующими степень загрязнения снега, используются данные, полученные при моделировании, и цифровые данные сканеров МСУ-Э и МСУ-СК. Снимки, полученные с помощью МСУ-СК, обеспечивают съемку всей территории за один пролет и позволяют глобально оценить и выявить источники и площади загрязнений, а снимки с МСУ-Э служат для более детального изучения отдельных участков загрязнений.

В процессе моделирования в рассматриваемом проекте загрязненность поверхности снега имитировалась путем искусственного запыления заданными дозами веществ, собственная яркость которых близка к встречающимся в зоне воздействия промышленности (уголь, зола). Спектрофотометрирование проводилось на девяти фиксированных значениях длины волны в диапазоне 560–946 нм. Далее с помощью процедуры простой регрессии пакета STATGRAPHICS (Statistical Graphics System) составлялась модель отношения СКЯ снежного покрова и массы загрязнителей путем минимизации суммы квадратов остаточных величин для подбираемой линии. В результате аппроксимации модельных данных различными функциями получили зависимость вида

$$L = (A - B) \exp\{-C_m\} + B,$$

где A — СКЯ чистого снега, B — СКЯ загрязнителя, C — коэффициент, характеризующий физические параметры загрязнителя.

Для количественной оценки загрязнений снежного покрова по спутниковым изображениям необходимо использование наземных данных с тестовых участков. Поэтому синхронно со съемкой из космоса проводилось взятие образцов снега с тестовых участков наземными экспедициями. Территория съемки и места отбора проб предварительно планировались по архивным космическим снимкам. Для определения концентрации твердого осадка загрязнений и содержания в снеге тяжелых металлов проводился химический анализ проб. Для определения связей между массой осадка m и массой тяжелых металлов M_z рассчитывалась корреляционная матрица, элементы которой (коэффициенты парной корреляции) определялись по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{cp})(M_z - M_{zcp})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - m_{cp})^2 \sum_{i=1}^n (M_z - M_{zcp})^2}}.$$

Очень сильной оказалась корреляционная связь между массой осадка и содержанием металлов, характерных для промышленных выбросов (ТЭЦ, промпредприятия): для В, Ва, Со, Мп, Тi, V они соответственно составляют 0,86, 0,79, 0,93, 0,91, 0,87, 0,82 и низкие — для металлов, нехарактерных для антропогенного загрязнения. Также оказалось, что данные подчиняются логнормальному распределению, среднее значение которого стремится (погрешность не превышает 10 %) к фоновому значению загрязнения местности.

Изображения МСУ-Э, МСУ-СК совмещались с картоосновой, что позволило определить места отбора проб наземными экспедициями на снимке и значения интенсивности, соответствующие этой точке. Из-за невозможности точного, до нескольких десятков метров, определения на снимке места отбора пробы проводилось усреднение значения интенсивности космических изображений по окну 5×5 пикселей. Параллельно по карте места отбора разделялись на ландшафты (лес, снежный покров, населенный пункт). В результате получили следующий набор данных: масса содержания осадка загрязнения; значения интенсивности снимка в данной точке отбора.

За основу решения задачи нахождения связи измеряемых спутником характеристик излучения с параметрами, характеризующими загрязнение снежного покрова, взяты регрессионные методы, позволяющие получить эту связь простыми, но достаточно надежными способами. Задача этого этапа заключается в нахождении адекватной регрессионной зависимости и оценке уравнений связи функций — откликов (содержание твердого осадка или металлов) с факторами — параметрами (значениями интенсивности изображения разных каналов сканера). Прежде всего определялось наличие достаточно сильных и значимых связей между содержанием твердого осадка загрязнения и значением интенсивности снимка. Для построения регрессионных моделей использовались данные экспедиций (209 точек). Используя зависимость, полученную на модельном загрязнении (1), найдены коэффициенты А, В, С. Нахождение коэффициентов проводилось с помощью процедуры нелинейной регрессии из пакета STATGRAPHIC, который обеспечивает оценку параметров по методу наименьших квадратов.

Определение областей пригодности полученной модели было основано на совместном анализе результатов сплайн-аппроксимации,

регрессионного и дисперсионного методов. Скользящим окном размером 5×5 пикселей в области спутникового изображения рассчитывалась квадратичная ошибка восстановления m с помощью двух способов: кубического сплайна по наземным данным и регрессионного уравнения по орбитальным данным. Для наглядности вывода и удобства анализа полученное пространственное распределение представлялось в формате исходного изображения. Их визуальное сравнение показало, что в областях открытого снега, т.е. незанятого застройками и хвойным лесом, значения m , полученные разными методами, совпадают с погрешностью не более 10%, что свидетельствует о хорошей расчетной точности построенной модели.

Эта же функциональная зависимость справедлива не только для твердого осадка, но и для ряда тяжелых металлов, имеющих высокий коэффициент парной корреляции с ним и характерных для антропогенного загрязнения (В, Ва, Со, Мп, Тi, V) и наилучшим образом описывает их распределение. Результаты оценки коэффициентов модели по изображению и корреляционные отношения между значением интенсивности снимка и содержанием металла приведены в табл. 8.3. Для металлов, нехарактерных для антропогенного загрязнения, и, соответственно, имеющих низкие коэффициенты корреляции с массой осадка, такой связи нет. Пространственное распределение Со в снежном покрове показано на рис. 8.22. Такие цифровые карты построены для 18 химических элементов. В данном проекте представлены также картосхемы распространения Pb и Mz (масса твердого осадка), размерность цветовой шкалы соответствует превышению фонового значения (рис. 8.23).

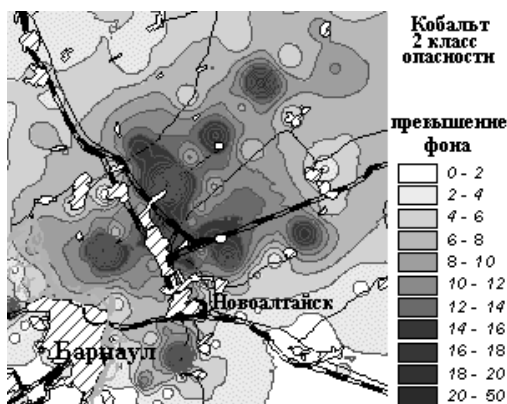


Рис. 8.22. Распределение кобальта в снежном покрове

Анализ данных химического анализа проб снега показал, что содержание некоторых тяжелых металлов в снежном покрове превышает предельно допустимые концентрации в несколько раз.

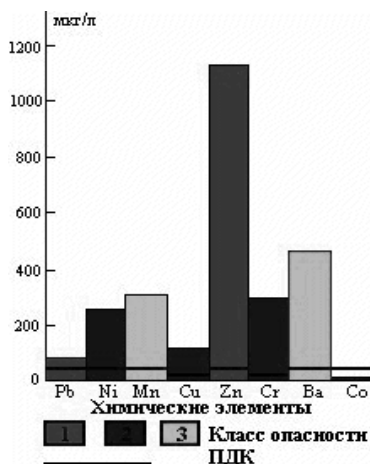


Рис. 8.23. Содержание тяжелых металлов в снежном покрове

На рис. 8.24 трехмерном виде представлено распределение массы твердого осадка в снежном покрове.

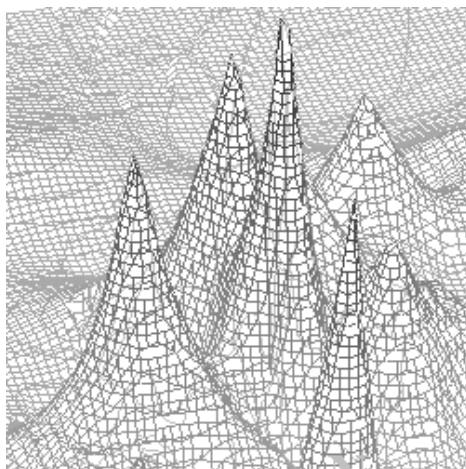


Рис. 8.24. Распределение массы твердого осадка в снежном покрове

Таблица 8.3

Результаты регрессионного анализа для снежного покрова

Элемент	Коэффициенты						Корре- ляция
	A	отклонение	ошибка	C	отклонение	ошибка	
Mz	146.7	7.13	0.049	18.7	0.7	0.037	0.88
B	144.3	7.1	0.049	0.467	0.018	0.039	0.87
Ba	132.6	4.7	0.035	0.188	0.00057	0.031	0.92
Co	151.8	7.72	0.051	0.637	0.0245	0.038	0.88
Mn	149.4	8.0	0.054	0.019	0.0008	0.042	0.86
Ti	139.9	6.1	0.045	0.0039	0.00015	0.38	0.88
V	157.3	9.1	0.058	0.189	0.008	0.042	0.86

Классификация спутниковых изображений. Для определения статистически связанных областей в пространстве интенсивности применяются методы автоматической классификации, непосредственно опирающиеся на задачи выделения в многомерном пространстве компактных групп точек и основанные на описании классов «ядрами». В основе программы автоматической классификации FOREL (разработка лаборатории обработки изображений Алтайского госуниверситета) лежит следующий алгоритм: задается начальное разбиение $Q_1, \dots, Q_k$; пусть после m -ой итерации имеем $Q_1, \dots, Q_k$; вычисляется набор средних $Q_{cp}[i]$; объект Q относится к классу $Q[i]$, если расстояние между $Q_{cp}[i]$ и Q не превышает D_0 ; если объект не относится ни к одному из классов, и число допустимых классов $\max Q$ превышает количество существующих классов, то определяется новый класс с «ядром» Q ; если за текущую итерацию набор средних и количество элементов в классе не изменяется, то завершаем работу алгоритма.

Реализация программы состоит из следующих этапов: определение оператором начальных параметров классификатора по уже имеющейся методике классификации и требуемых характеристик выходной карты (количество классов, дисперсия яркостных значений в одном классе), автоматическая классификация с заданным параметром классификатора, предварительная оценка правильности классификации исходя из требований, заложенных в первом пункте, коррекция параметров и, если необходимо, повторная автоматическая классификация; полученная карта и набор классов, соответствующих ей, на основании имеющихся наземных данных или иного картографического материала анализируются на предмет исключения классов, не представляющих интереса (леса, водные поверхности, участки занятые строениями и др.), на основе сформированного набора классов производится окончательная классификация исходного снимка и определя-

ется принадлежность классов различным природным объектам; если необходимо, проводится более тонкая классификация с целью разделения классов на подклассы.

Полученные значения ядер классов могут использоваться для обучения при дальнейшей обработке других аналогичных снимков и могут представлять банк данных яркостных характеристик снежного покрова. Помимо значений ядер классов в банк данных входят данные, полученные наземными экспедициями о химическом составе, влажности и спектральных характеристиках.

С использованием описанной программы производится выявление и определение пространственного распределения зон загрязненного снежного покрова с различными отражательными способностями в оптическом и ИК диапазоне на основе данных, полученных бортовыми космическими сканерами МСУ-Э (3-канальное изображение) и МСУ-СК (1- и 4-канальное изображение). На выходе классификатора получено 200 классов МСУ-Э, 10 и 58 классов МСУ-СК, включающих в себя среднее значение интенсивности, дисперсию и количество точек в классе. Ядра выходных классов для снимков приведены на рис. 8.25 и 8.26.

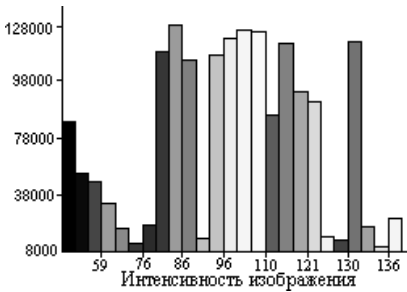


Рис. 8.25. МСУ-Э: ядра выходных классов

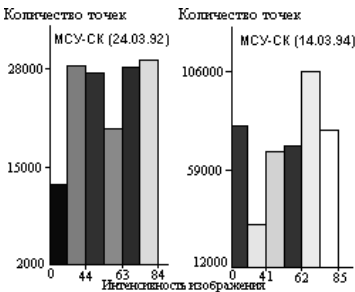


Рис. 8.26. МСУ-СК: ядра выходных классов

Из полученных классов визуально по карте отобраны классы, приходящиеся на снежный покров. Пространственное расположение выходных классов однозначно указывает на их связь с загрязненностью территории атмосферными выпадениями. Отдельные классы представляют дымовые шлейфы в атмосфере, «отпечатки» шлейфов на свежевыпавшем снеге, средне- и сильнозагрязненные городские кварталы, а также открытую от снега почву и различные степени загрязнения снежного покрова, соснового леса. На синтезированном изображении МСУ-Э от 1.04.92 г. хорошо выделяется различная степень загрязнения города, а также зоны открытой воды на р. Обь, образовавшиеся вследствие сброса отработанных вод с промышленных предприятий города (рис. 8.27). Вытянутая на северо-восток эллипсоидная форма загрязненного снега соответствует розе ветров в зимний период и превышает площадь города в 4 раза. Вклад г. Новоалтайска заметен в восточной части пятна вытянутого снега.

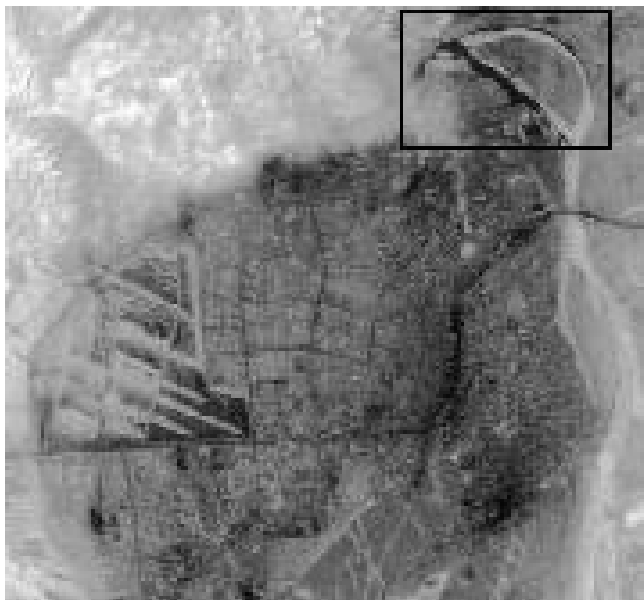


Рис. 8.27. Синтезированное изображение (МСУ-Э)

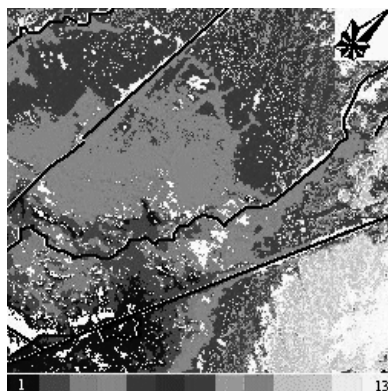


Рис. 8.28. Загрязнение снежного покрова (по изображениям МСУ-Э)

На рис. 8.28 представлено загрязнение снежного покрова, полученное по изображениям МСУ-Э, МСУ-СК. Цветовые классы, указанные на клине, соответствуют номерам выходных классов на рис. 8.26 и построены в порядке уменьшения степени загрязнения. Класс леса при обработке снимков МСУ-СК совпадает с классом сильно загрязненного снега. При анализе изображений, полученных с МСУ-Э и МСУ-СК, наблюдается уменьшение загрязнения снежного покрова вокруг г. Барнаула по сравнению с предыдущими годами. Дымовые шлейфы в атмосфере и их «отпечатки» на фоне свежеснежного покрова представлены на синтезированных изображениях МСУ-Э, МСУ-Э и сканерных снимках со спутника SPOT (рис. 8.29, 8.30). Анализ данных материалов дистанционного зондирования показал, что на осенних снимках (октябрь-ноябрь) хорошо видна динамика установления снежного покрова. Источников промышленного загрязнения обнаружить не удается. В зимний период загрязнения проявляются только во время долгого отсутствия снегопадов. На свежеснежном покрове выделяются точечные источники загрязнений в виде отдельных городов и поселков (в пределах городской черты).

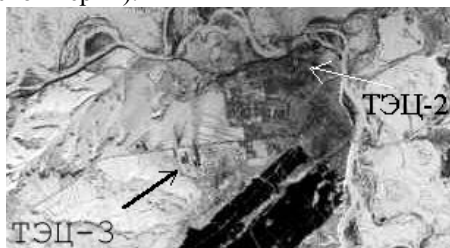


Рис. 8.29. Сканерный снимок со спутника SPOT(1)

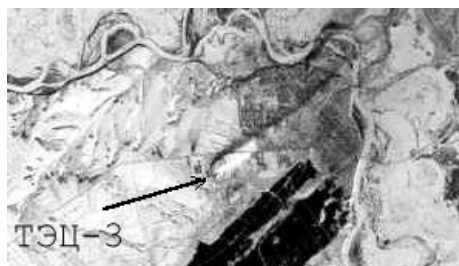


Рис. 8.30. Сканерный снимок со спутника SPOT(2)

По мере прекращения снегопадов и наступления снеготаяния в марте начинают проявляться обширные зоны загрязнения вокруг промцентров. Так, на территории Западной Сибири и Казахстана в конце марта проявляются: Павлодар – Ермак с радиусом загрязнений 120 км, Экибастуз — 150 км, Славгород — 30 км, Горняк – Жезкент – Змеиногорск — полоса с запада на восток длиной 100 км и шириной 30 км, Восточный Казахстан: полоса с северо-запада на юго-восток — 250×60 км. (Первомайский – Глубокое – Усть-Каменогорск – Лениногорск – Серебрянск). На территории Республики Алтай выделяется загрязнение долины Горно-Алтайск – Майма с площадью 100 кв. км и долины у с. Шебалино. Другие населенные пункты сливаются с окружающим их хвойным лесом (Онгудай, Акташ). В других случаях площадь загрязнений не превышает границ поселков.

На поздневесенних снимках (до 10 апреля) сильно загрязненные участки протаяли до открытой почвы (видна структура и нарезка сельскохозяйственных полей), а чистые покрыты снегом. На хребтах Рудного Алтая в Восточном Казахстане — Убинском, Ульбинском снег продолжает лежать, но это обусловлено высотной поясностью. На позднеосенних изображениях (октябрь–ноябрь), когда подстилающая поверхность степных районов имеет яркость темнее снежного покрова в предгорьях и на хребтах, при слабой атмосферной дымке выделяется перенос воздушных потоков из Западного Китая.

Оперативная съемка территории юга Западной Сибири проводилась со спутника «КОСМОС-1939» сканером МСУ-СК. Для качественной оценки загрязнения использовалось разбиение гистограммы интенсивности 2-го канала на отдельные градации. Интервалы подбирались в интерактивном режиме с учетом опыта дешифрирования аналогичных снимков. На рис. 8.31 вытянутость поля загрязнения объясняется преобладанием ветров в этом направлении в течение нескольких дней перед моментом съемки.

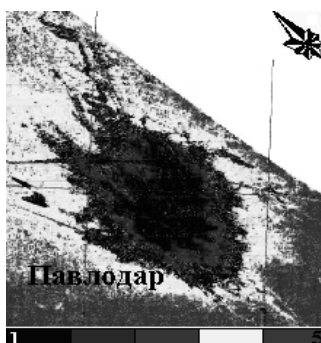


Рис. 8.31. Загрязнение снежного покрова в районе г. Павлодара

Область загрязнения достигает 80 км. Выделяются отдельные дымовые шлейфы от промпредприятий и ГРЭС. При западном и юго-западном ветрах эти шлейфы достигают Алтайского края. Для оценки загрязнений снежного покрова вокруг г. Бийска использовались данные сканера МСУ-СК. При анализе космических снимков выделяется аномальная по отношению к розе ветров зона загрязнений снежного покрова в западной и северо-западной части окрестностей г. Бийска. Ширина загрязнения к западу от Бийска по направлению север-юг в районе с. Сорокино составляет около 30 км, а к востоку от города (по розе ветров) в районе с. Большеенисейское — около 10 км. Возможным источником загрязнения снежного покрова в северо-западном направлении является промзона в западной части г. Бийска.

Рассмотрим дымовые шлейфы от г. Горняка в Локтевском районе Алтайского края и г. Жезкент в Семипалатинской области Казахстана. Источниками служат котельные на горно-обогачительных комбинатах и мелкие городские котельные. На снежном покрове видны следы от дымовых шлейфов, соответствующие направлениям ветра в период от последнего крупного снегопада до момента съемки. На снимках г. Рубцовска выделяются дымовые шлейфы в северной части города. Загрязнение снега достигает только оз. Горького. На рис. 8.32 представлено изображение загрязнения снежного покрова вокруг Горняка и Жезкента по снимку в масштабе 1:140000.



Рис. 8.32. Загрязнения снежного покрова вокруг г. Горняк

Пересчет в проекцию карты не проводился. Палитра из шести цветов означает степень загрязнения на качественном уровне. Шестой градации соответствует слабая степень загрязнения (значения интенсивностей 3-го канала МСУ-Э от 177 до 186), которое имеет резкую границу с запада. На север — протяжение до 50 км. Это обнаружено на снимках за все даты. Возможными источниками загрязнения являются дымовые шлейфы, а также открытые от снега почвы. На рис. 8.33 представлены дымовые шлейфы от Горняка и Жезкента, выделенные по снимку за 5.03.92 г.

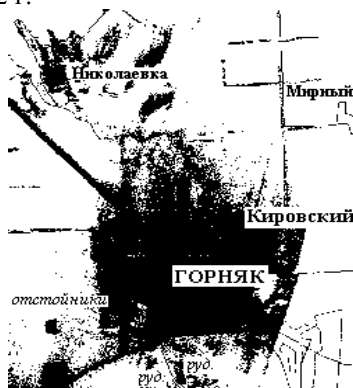


Рис. 8.33. Дымовые шлейфы от г. Горняк и г. Жезкент

Пересчет в проекцию карты проводился по формуле неполного квадрата. Изображение разбивалось на два кадра размером 512×512 элементов каждый с перекрытием в 30 строк. На каждом фрагменте

указывалось 6 опорных точек, при этом 2 точки находились в области перекрытия кадров.

В рассматриваемом исследовании проведен анализ обусловленности связей спектрально-яркостных свойств снежного покрова влиянием на него загрязняющих веществ, получена зависимость степени загрязнения снежного покрова и интенсивности спутникового изображения. Выявлены количественные зависимости содержания твердого осадка и тяжелых металлов в снежном покрове от значения интенсивности изображения. Построены цифровые карты пространственного распределения загрязнения снежного покрова в окрестностях г. Барнаула тяжелыми металлами. Примененный метод обработки космических изображений загрязненного снежного покрова с помощью алгоритмов классификации и регрессионного анализа позволяет пространственно экстраполировать уровень загрязнения на обширной территории, что существенно ускоряет и упрощает оценку экологической обстановки.

8.2. Космический мониторинг водных ресурсов

Индикация состояния водосборов и водохранилищ. Качество оценки интенсивности весеннего половодья определяется полнотой и объективностью информации о динамике снежного покрова на водосборе и запасах воды в снеге. Поэтому задача сводится к получению необходимых сведений о распределении снежного покрова по площади и во времени с заданной частотой и точностью. По космическим изображениям, получаемым в видимом участке спектра излучения, при благоприятных условиях (отсутствие облачности, достаточная освещенность и др.) можно изучить: особенности распределения снежного покрова на водосборах, степень их покрытия снегом и средние значения высоты снеговой линии в дни наземных гидрологических съемок; сроки образования и схода снежного покрова на различных высотах за каждый год; продолжительность залегания снежного покрова на различных высотах, длительность периодов образования и схода снежного покрова, длительность бесснежного периода в горах за каждый сезон, а также сделать многолетние выводы о сроках образования и схода снежного покрова, продолжительности его залегания на разных высотах. Сведения о высоте снеговой линии используются для определения площади одновременного снеготаяния и для расчета распределения снегозапасов по высоте. Наблюдения МСЗ за динамикой снеговой линии можно использовать и в прогностических связях как показатель снегозапасов на водосборе. Для отдельных водосборов возможно вы-

явление зависимости высоты снеговой линии и степени покрытия водосборов снегом от сумм положительных значений средней суточной температуры воздуха, накопленных ко дню гидрологической съемки.

Возможность оценки ледовой обстановки на озерах и водохранилищах по космическим снимкам в значительной степени определяется разрешающей способностью аппаратуры МСЗ и размерами водоемов. По спутниковым данным наблюдений можно определить сроки очищения ото льда малых и средних озер, получить генерализованную схему ледового состояния средних по размеру водохранилищ, картографировать ледовую обстановку на больших озерах. По сканерным многозональным космическим изображениям можно обнаружить некоторые детали ледовой обстановки. Контуры, разграничивающие различные состояния ледяного покрова на озере, можно с космического снимка (среднего или высокого разрешения) перенести на карту. Степень покрытия озера льдом оценивают отношением занятой льдом акватории к общей площади озера. Ряд последовательных снимков за весенний период помогает уточнить динамику очищения водохранилища ото льда. В ходе анализа многоспектральных космических изображений ледовой обстановки на озерах часто используют приборы (фотометры), синтезирующие по результатам обработки псевдоцветные изображения.

Оценка разливов и затопления речных пойм. Основной проблемой для использования спутниковой информации являются трудности дешифрирования границы разлива, неопределенность связей физиогномических компонентов поймы с частотой ее затопления, отсутствие надежных критериев для оценки точности результатов.

Пойма — это часть дна речной долины, затопляемая в периоды высокой воды, формирующаяся в результате отложения переносимых потоками наносов в ходе плановых деформаций речного русла. Космические изображения среднего разрешения обеспечивают установление границы поймы, площадей ее затопления на момент съемки, типа поймы. Полезная информация о состоянии поймы заключается в характеристике процентного соотношения затопленных и сухих частей поймы. В спектральном интервале 0,7–1,1 мкм более четко выделяются затопленные участки, а в диапазоне 0,5–0,7 мкм можно опознать направление течений речных вод и зоны их распределения. Основными дешифровочными признаками при выделении затопленных зон являются форма, размер, структура и местоположение деталей на изображении. Определяющим признаком при этом является контраст тона изображения: черный или почти черный тон соответствует затопленным или частично затопленным участкам. Задача распознавания сте-

пени затопления (одной из шести градаций 0–10, 11–30, 31–50, 51–70 и 71–100 %) элементарных участков поймы решается путем квантования оптической плотности в исследуемом участке по уровням. После распознавания всем элементам изображения однородной зоны придается одно значение плотности, в результате чего изображение участка поймы окажется разделенным по степени затопления. Спутниковая информация о затоплении речных пойм используется для контроля сведений об уровнях выхода воды на пойму, поиска связей размера затопленных площадей с уровнем и расходом воды, для наблюдений за продвижением волны половодья вдоль реки и фиксации катастрофических затоплений.

8.2.1. Измерение температуры водных поверхностей прибором AVHRR спутника NOAA

Температура поверхности океана (ТПО) является индикатором теплосодержания деятельного слоя океана, определяющего протекание крупномасштабных атмосферных процессов и формирующего погоду планеты. В качестве одного из параметров ТПО входит в многочисленные численные модели, описывающие динамику процессов, происходящих в атмосфере и океане. Измеренные значения ТПО используются для проверки результатов моделирования и корректировки соответствующих численных моделей. Приборы, позволяющие измерять ТПО в ИК и СВЧ диапазонах, установлены на многих спутниках. В данном примере излагаются результаты разработки пакета прикладных программ для измерения ТПО по данным прибора AVHRR (спутники NOAA-11, NOAA-12). Прибор AVHRR (The Advanced Very High Resolution Radiometer) установлен на полярных спутниках типа NOAA Национального управления по океаническим и атмосферным исследованиям США. Прибор обеспечивает разрешение на местности 1.1 км в пяти спектральных диапазонах: 0.58–0.68, 0.725–1.1, 3.55–3.93, 10.3–11.3, 11.5–12.5 мкм. Ширина полосы захвата — 3000 км. Прибор широко используется для изучения окружающей среды, и одним из важных его применений является измерение температуры морской поверхности. На первом этапе обработки данных AVHRR осуществляется расчет яркостной температуры и альбедо подстилающей поверхности. Расчет проводится в соответствии с технической документацией на NOAA. Расчет яркостной температуры осуществляется для 4-го и 5-го каналов прибора AVHRR.

Результаты расчета альбедо для 2-го спектрального канала прибора AVHRR приведены на рис. 8.34. Из исходного файла объемом

614,400 байт и размером 768×400 элементов изображения вырезается часть (400×200), включающая Финский залив, часть которого закрыта облаками (рис. 8.34). Эта часть файла исходных данных обрабатывается. Исходные данные приняты со спутника AVHRR в г. Санкт-Петербурге. На рис. 8.35 приведена гистограмма, показывающая распределение значений альбедо для рис. 8.34. По оси абсцисс отложены значения альбедо. По оси ординат отложена частота попаданий значений альбедо в каждый из интервалов шириной 0.10144, равной коэффициенту G.

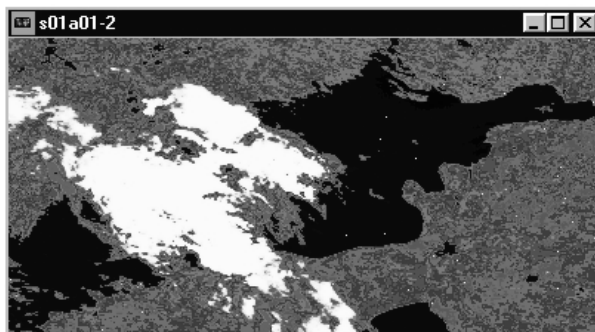


Рис. 8.34. Альбедо по результатам обработки данных 2-го канала AVHRR

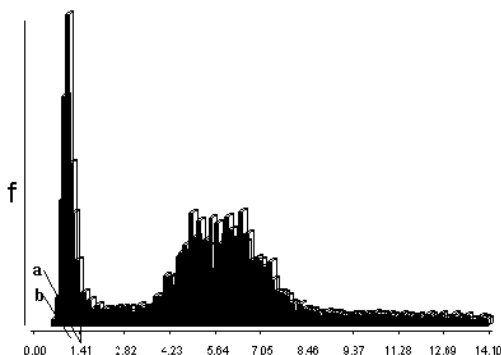


Рис. 8.35. Распределение значений альбедо для 2-го канала AVHRR

Результаты расчета яркостной температуры для 5-го спектрального канала прибора AVHRR приведены на рис. 8.36 для той же части файла исходных данных, что и на рис. 8.34

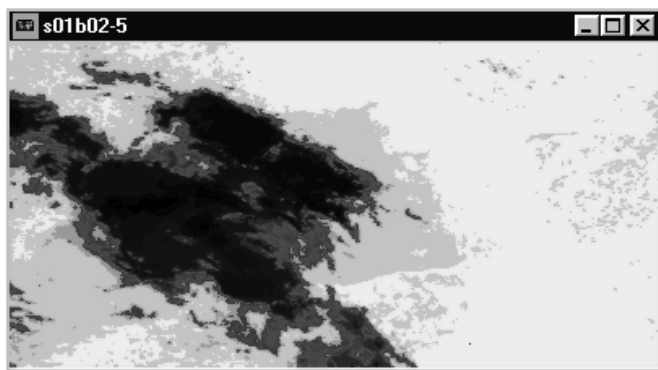


Рис. 8.36. Яркостная температура по данным 5-го канала AVHRR

На рис. 8.37 приведена гистограмма, показывающая распределение значений яркостной температуры для рис. 8.36. По оси абсцисс отложены значения яркостной температуры в градусах Кельвина. По оси ординат отложена частота попаданий значений альбедо в каждый из интервалов шириной 0.5 K.

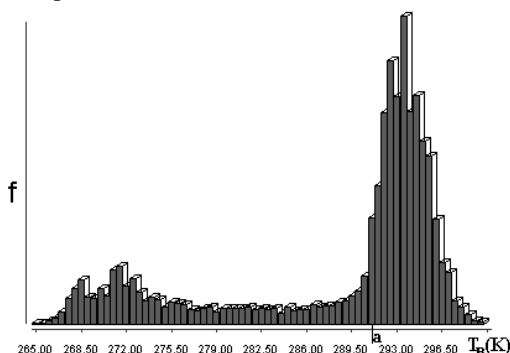


Рис. 8.37. Распределение значений яркостной температуры для 5-го канала AVHRR

Для того чтобы определить температуру морской поверхности по результатам расчета яркостной температуры, необходимо установить, какие участки моря не закрыты облаками. Облачность, даже очень слабая, может существенно исказить результаты определения температуры морской поверхности.

Установление участков безоблачного неба — сложная задача, относящаяся к распространенному при обработке спутниковой информации классу задач по классификации природных объектов. Один из наиболее известных алгоритмов, предназначенных для установления участков безоблачного неба, принадлежит Р. Саундерсу (R.W. Saunders). Схема этого алгоритма для дневных условий представлена на рис. 8.38.

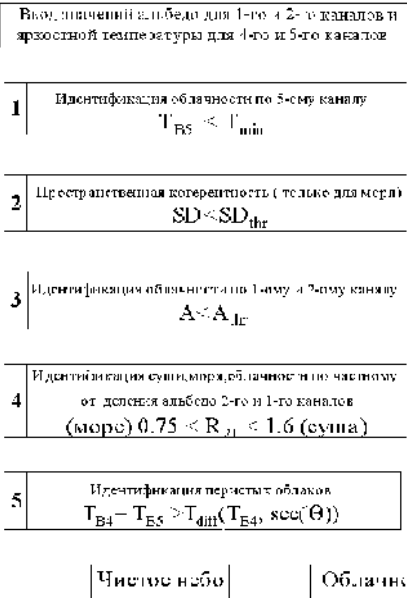


Рис. 8.38. Алгоритм для установления участков безоблачного неба

На 1-м шаге алгоритма (рис. 8.38) облако выявляется по значениям яркостной температуры для 5-го спектрального диапазона. С этой целью находят значения яркостной температуры для участков безоблачного неба над морем. От минимального из этих значений отнимается 2 К, полученное значение температуры принимается в качестве порогового — все точки с меньшей температурой считаются принадлежащими облаку. Эта процедура поясняется гистограммой на рис. 8.37. На нем пик с вершиной в районе 293 К сформирован излучением участков моря и суши при безоблачном небе.



Рис. 8.39. Маскирование облачности по значениям яркостной температуры 5-го канала

Значения яркостной температуры участков моря в основном лежат в интервале 293–296 К. От меньшего из этих значений отнимается 2 К, полученное значение 291 К принимается в качестве порогового. Маска, полученная таким образом, изображена на рис. 8.39. Темные точки принадлежат облаку, белые — участкам безоблачного неба.

8.2.2. Исследование загрязнения водной поверхности с использованием космической информации

В регионах, имеющих водные бассейны, на первом месте в списке экологических проблем стоит, как правило, загрязнение воды. Наблюдается дальнейшее увеличение масштабов загрязнения, за которым требуется соответствующий контроль. Однако получить в полном объеме картину загрязнений обширных водных бассейнов, применяя лишь традиционные методы наблюдения, чрезвычайно сложно. Эпизодичность локальных измерений, с одной стороны, и подвижность водной среды — с другой, определяют необходимость привлечения дистанционных методов контроля за загрязнением водных бассейнов. В этом отношении перспективным источником информации о состоянии водной среды являются наблюдения из космоса. Ценность материалов космических съемок заключается в непрерывной обзорности значительных площадей. В условиях широкого размаха антропогенных воздействий на окружающую среду данные, получаемые из космоса, приобретают особую актуальность, поскольку позволяют оценивать трансграничный перенос загрязняющих веществ. Обзорность космических изображений, их интеграционные особенности дают воз-

возможность лучше оценить взаимосвязи между различными проявлениями хозяйственной деятельности, а также последствия этой деятельности. Кризисное экологическое состояние Невской Губы побудило в 90-е гг. XX в. разработать пакет прикладных программ, ориентированных на обработку спутниковой информации. Это был опыт использования ГИС IDRISI и создания базы архивных спутниковых данных. Схема вызовов программных модулей в этом пакете показана на рис. 8.40.

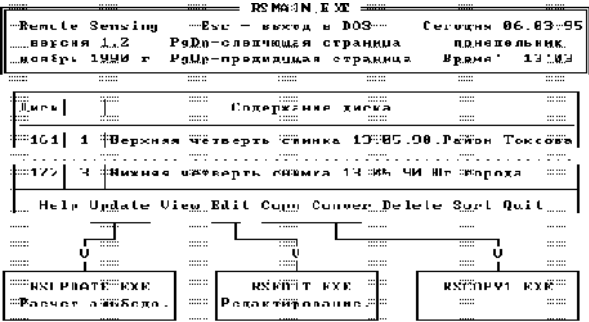


Рис. 8.40. Схема вызовов программных модулей в пакете прикладных программ для обработки спутниковой информации о Невской Губе

Основная программа RSMAN.EXE позволяла вводить информацию в базы данных, редактировать эту информацию, в также запускать из системы меню программные модули. Вызываемые программные модули написаны на языках TurboBASIC и FORTRAN и предназначены для преобразования данных, получаемых на магнитных лентах, отображения их на экране персонального компьютера и последующей обработки. При этом исходные величины сигналов пересчитываются в значения альбедо подстилающей поверхности.

Основное меню пакета содержит информацию о гибких магнитных дисках (ГМД), на которых хранятся спутниковые данные — номер диска, номер спектрального канала, содержание диска. Хранение данных на ГМД позволяет излишне не загружать жесткий диск, что с учетом очень больших объемов обрабатываемой информации (один снимок со спутника «Космос-1939» занимал несколько мегабайт) представляется весьма актуальным. Выбранный ГМД автоматически копируется на жесткий диск, после чего можно запустить одну из программ обработки данных. Первой запускается программа RSCOPY1.EXE, преобразующая спутниковую информацию (рис. 8.40). Исходные данные, получаемые с борта спутника «Космос-1939», поставлялись на

магнитных лентах. Информация была организована в файлы объемом до 5 Мбайт. Файл состоял из заголовка длиной 400 байт и 1300–1500 строк, непосредственно содержащих космическую информацию, поступающую со сканера МСУ-Э. Каждая строка содержит информацию, соответствующую сигналам от 997 элементов трех ПЗС-линеек для спектральных каналов 0.5–0.6, 0.6–0.7 и 0.8–0.9 мкм. В строке сигналы от спектральных каналов чередуются: первый, второй, третий, снова первый и т.д. Чтобы рассчитывать значения альbedo и отображать информацию на экране дисплея, исходные данные надо разделить по спектральным каналам. Эта процедура в программе RSCOPY1.EXE реализована следующим образом. Исходный файл разбивается на меньшие файлы, которые прочитываются строка за строкой с жесткого диска. Из первого файла удаляется заголовок, а из каждой строки — концевые нули. После этого исходная строка разбивается на три строки, содержащие информацию по отдельным спектральным каналам. К этим строкам добавляются концевые нули, а затем из строк формируются файлы объемом 5 Кбайт, включающие данные для пяти последовательных строк по каждому из спектральных каналов. Файлы записываются таким образом, что на одном ГМД хранится информация для одного кадра.

Оценка значений альbedo осуществляется в программе RSUPDATE.EXE на основе уравнения, определяющего зависимость потока уходящего в космос излучения с учетом влияния атмосферы. При обработке данных использовалось допущение, основанное на оценках радиометрических характеристик сканера МСУ-Э и заключающееся в том, что сигнал, регистрируемый ПЗС-линейкой на спутнике, линейно зависит от потока уходящего излучения. Вычисления в программе RSUPDATE.EXE (рис. 8.40) проводится следующим образом. Исходная спутниковая информация, разделенная по спектральным каналам, считывается порциями по 5 Кбайт. Каждый байт, число от 0 до 255 (единица квантования для ПЗС-линеек), подставляется в уравнение. Предварительно на основе знания подспутниковой обстановки вычисляются значения коэффициентов C1–C4.

Для оценки величины коэффициента используется реперная точка с известным по данным натурных измерений значением альbedo. Выбор этой точки осуществлялся для природных объектов, уверенно идентифицируемых на снимке, для которых сигнал остается приблизительно постоянным, а альbedo известно из результатов независимых измерений. На рис. 8.41 показан фрагмент снимка.

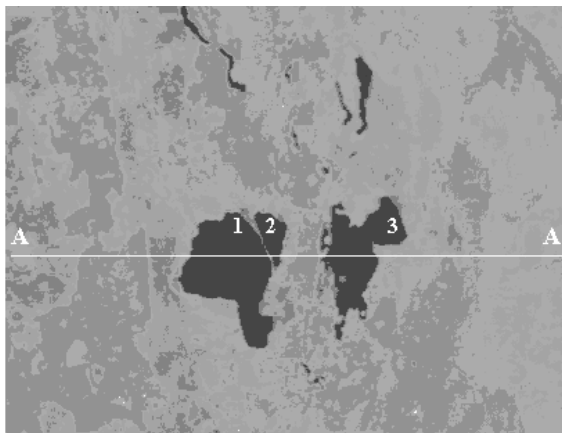


Рис. 8.41. Фрагмент снимка 13.05.89 г. спутника «Космос-1939» (канал 3). Район пос. Токсово, Ленинградская обл.: 1 — оз. Кавголо-вское, 2 — оз. Курголовское, 3 — оз. Хеппо-Ярви

Озера — единственные природные объекты для условий обрабатываемого снимка, пригодные для выбора реперной точки. Значения альбедо озера для условий весны известны из литературных данных. Исходя из проведенного анализа в качестве реперной точки выбран участок поверхности оз. Кавголо-вского, для которого сигнал оставался постоянным во всех трех спектральных каналах. Рассчитанные значения альбедо записываются на диск в том же формате, что и исходная информация, для обеспечения возможности визуализации исходных данных и значений альбедо одной и той же программой. Программа визуализации спутниковой информации RSVIEW.EXE работает с данными, предварительно скопированными на жесткий диск.

Снимок, полученный со спутника «Космос-1939», разбивается на четыре кадра, каждый из которых состоит из 325 строк по 997 байт. Каждый байт информации отображается на экране в элемент изображения (пиксел), цвет которого зависит, во-первых, от значения сигнала, а во-вторых, от интервалов, установленных в сменной таблице градации цвета при растровой форме представления информации. Возможность отображения информации с использованием различных таблиц предусматривается для того, чтобы пользователь мог выделить цветом те или иные особенности изменения альбедо водной поверхности (в каждом конкретном случае) при ограниченном наборе цветов, определяемом типом используемого видеоадаптера. Опыт эксплуата-

ции программы визуализации показал, что такой подход обеспечивает лучшее восприятие информации, чем построение изолиний. Для хранения и более быстрого отображения на экране дисплея визуализированной информации предусмотрено преобразование данных в формат .PCX. Пример визуализации спутниковой информации для Невской Губы приведен на рис. 8.42. На этом рисунке отображены результаты решения задачи по выявлению зон с аномальными значениями альбедо, которые обусловлены увеличением загрязнения Невской Губы вследствие строительства дамбы.

Границы области с аномальными значениями альбедо определялись с помощью специально разработанного алгоритма. При обработке участков, соответствующих незагрязненным зонам Невской Губы, были установлены необходимые статистические характеристики. Например, на рис. 8.42 вдоль линии AA — это область с номерами пикселей от 190 до 600. Для этой области установлено, что сигнал можно описать зависимостью $J = 22.5$ со средним квадратическим отклонением результата наблюдения 0.8. Соответственно сигналы, равные или превышающие 25, следует признать аномальными.

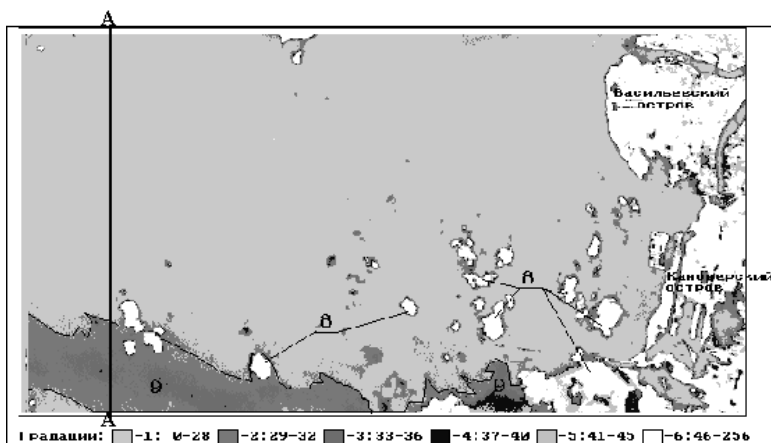


Рис. 8.42. Обработанный космический снимок южной части Невской Губы: 1 — облачность, 2 — область с аномальными значениями альбедо водной поверхности

Таким образом, была установлена граница области, расположенной вдоль южного берега Невской Губы, которая по значениям альбедо отличается от ее центральной части.

8.2.3. Радиолокационный мониторинг ледовой обстановки

Спутниковая информация является одним из основных видов гидрометеорологического обеспечения в Арктике и Антарктике. Ее роль возросла в связи с сокращением наземной сети береговых и островных полярных станций и свертыванием деятельности авиационной полярной разведки. Эффективным средством наблюдений за состоянием ледяного покрова являются спутниковые радиолокационные системы, позволяющие получать информацию независимо от освещенности (в любое время суток) и наличия облачного покрова.

В НИЦ «Планета» радиолокационные исследования ледяного покрова Арктики и Антарктики проводятся с 1983 г., с момента запуска первого океанографического спутника «Космос-1500». За эти годы спутниковые радиолокационные данные, принятые и оперативно обработанные в НИЦ «Планета», неоднократно использовались в чрезвычайных условиях при проводке и освобождении из ледового плена судов. НИЦ «Планета» на регулярной основе проводит работы по оперативному картированию ледовой обстановки по трассе Севморпути на основе данных ИСЗ «Океан» № 7 (функционирует с октября 1994 г.).

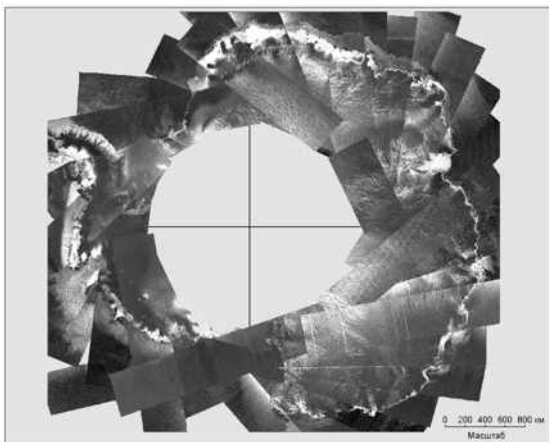


Рис. 8.43. Первая цифровая радиолокационная карта Антарктиды

Основные выходные информационные продукты следующие:

- повитковые радиолокационные карты ледовой обстановки на трассе Севморпути (оперативность доставки в прогностические подразделения Гидромецентра России и ААНИИ в течение 2–4 ч);

– декадные карты ледовой обстановки на трассе Севморпути (выполнялись в течение суток после завершения последней съемки декады);

– месячные карты ледовой обстановки на трассе Севморпути (выполнялись в течение суток после завершения последней съемки месяца);

– карты-схемы ледовой обстановки для акваторий северных и внутренних морей РФ. Данный информационный продукт производится на основе обработки спутниковых изображений видимого и ИК диапазонов ИСЗ «Метеор», NOAA, а также данных РЛС БО ИСЗ «Океан». Основой для тематического картирования является спутниковое изображение, приведенное к заданной картографической проекции, которое в интерактивном графическом режиме используется экспертом-дешифровщиком для выделения и оконтуривания зон с различными характеристиками ледяного покрытия и формирования графической карты ледовой обстановки.

На основе радиолокационных данных, полученных с ИСЗ «Космос-1500» с 21 января по 3 марта 1986 г., в НИЦ «Планета» впервые в мире была построена цифровая радиолокационная карта Антарктиды. Карта была составлена из 36 радиолокационных изображений (рис. 8.43).

Еще одним направлением работ являются спутниковые радиолокационные наблюдения за динамикой ледяного берега Антарктиды, а также за отколами и дрейфом гигантских айсбергов в Арктике (рис. 8.44, 8.45). С помощью радиолокационных измерений с ИСЗ серии «Океан» в 1986–2000 гг. проводились наблюдения за отколом трех гигантских айсбергов от шельфового ледника Фильхнера и их дрейфом в море Уэдделла.

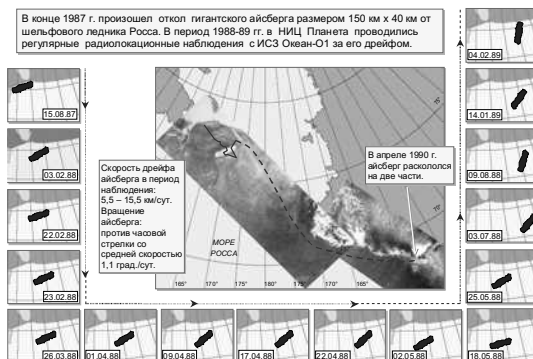


Рис. 8.44. Дрейф айсберга в море Росса. ИСЗ «Океан», РЛС БО

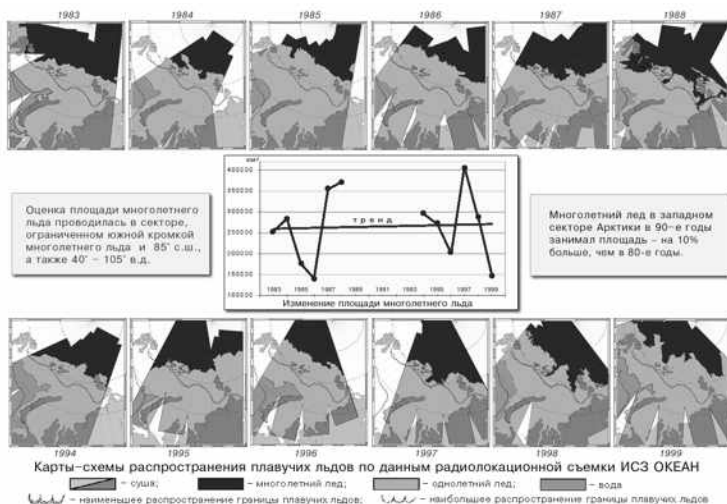


Рис. 8.45. Исследование многолетнего ледяного покрова Арктики. ИСЗ «Океан», РЛС БО

8.3. Контроль за состоянием растительности

Почвенное картографирование по космическим изображениям. Состояние почвенного покрова характеризуется многими параметрами, которые связаны с типами почв, определить границы которых возможно по данным спутниковых наблюдений. При анализе космических изображений, полученных в оптическом диапазоне, наряду с отражательными характеристиками (альbedo, коэффициент спектральной яркости и др.) используются и параметры, учитывающие качественное состояние почвенного покрова (цвет почвы, зависящий от химического и минерологического состава, ее эродированность, засоленность, заболоченность и др.). Текстура космических снимков открытых участков почвы отражает следы обработки, результаты эрозийных процессов, выходы солей, различие свойств компонентов комплексных почв.

Традиционной является классификация типов почв по их отражательным характеристикам с целью оценки состояния растительных объектов. Растительность, закрывая земную поверхность, мешает непосредственному изучению почв по космическому изображению и одновременно способствует выполнению этого процесса, будучи тесно связанной с почвами и являясь их индикатором. Отража-

тельная способность почв зависит от содержания в них гумуса (перегнойных веществ), соединений железа и других химических соединений, а также от влажности, механического (дисперсного) и минералогического состава, горизонтальной и вертикальной неоднородности строения земной поверхности. Качественные различия проявляются в значениях спектрального и пространственного распределения комплексной диэлектрической проницаемости — основной характеристики состояния почв. На интенсивность и спектральный состав отраженного излучения оказывают влияние гумусовые вещества (слабое и равномерное отражение по спектру), соединения железа (неравномерное отражение различных соединений по спектру), светлоокрашенные соединения — карбонаты, соединения кремния и алюминия, лишенные примесей (сильное и равномерное отражение по спектру излучения). Заметим, что оказывают влияние только те соединения, которые находятся на поверхности почвенных агрегатов. Значительное уменьшение отражательной способности почв наблюдается при повышении влажности и с увеличением размера почвенных агрегатов (механического состава почвы).

Эрозию — процесс разрушения почвенного покрова под воздействием поверхностных вод и ветра — обычно подразделяют на плоскостную (поверхностную) и линейную (овражного типа). Последняя хорошо дешифрируется на зимних снимках по характеру залегания снежного покрова: изображение имеет тонкий изрезанный рисунок, обусловленный неравномерным залеганием снега на вершинах и склонах оврагов (балок) и наличием древесно-кустарной растительности, покрывающей днища оврагов и имеющей на снимках темно-серый тон. На плоских равнинных безовражных территориях снег залегает ровным слоем и изображение характеризуется белым тоном и бесструктурным рисунком.

Методика дешифрирования почв, подверженных плоскостной эрозии, основана на различии спектральных характеристик генетических горизонтов почв. Так, в инфракрасной области излучения спектральные коэффициенты яркости генетических горизонтов дерново-подзолистых почв изменяются от 0,4 для гумусового горизонта до 0,7 для подзолистого горизонта. Засоление почвы достаточно хорошо прослеживается на космических снимках. Летом на солончаках образуется селевая корка, а менее засоленная почва покрывается растительностью. Зимой и в переходные сезоны года засоленные почвы (соры) более увлажнены, а потому хорошо выделяются на окружающем фоне. На космических изображениях распознаются сухие солончаки, солевые коры, солончаки пухлые и гипсовые коры.

Состояние земельных угодий и ход сельскохозяйственных работ. Спектральные коэффициенты отражения сельскохозяйственных культур формируются под влиянием многих факторов (тип и состояние почв; вид, структурные характеристики и состояние самих культур; условия съемки, атмосферные влияния). Каждый вид сельскохозяйственных культур имеет свое собственное спектральное отражение или свой набор признаков, зависящих от морфологии растений, вегетационного периода, геометрии покрова. Точная классификация этих культур может быть получена на основе многоспектрального анализа излучения, особенно в зеленом, красном и ближнем инфракрасном участках спектра. Отраженный от посевов сигнал представляет собой сложную комбинацию отражения от почвы и элементов растительности, а потому с ростом и развитием культур будет меняться в зависимости от того, насколько элементы растительности будут закрывать почву. Направление гряд (рядков) растительности (восток-запад, север-юг) также сказывается на общей картине отражения в разное время дня. Наибольшее изменение спектральных коэффициентов яркости происходит в ближней инфракрасной области, где они существенно увеличиваются с увеличением площади листового покрытия, биомассы, проективного покрытия и достигают в общей сложности 70–80 %. Влияние различия почв учитывается посредством либо непосредственной специальной коррекции наблюдений из космоса (например, на основе картографических сведений), либо косвенно определенного выбора тестовых участков, который производится с учетом их репрезентативности для исследуемых ограниченных регионов. Биометрические характеристики растительного покрова точнее определяются путем измерения в красной и инфракрасной областях спектра. Для получения сведений о перезимовке, фазах развития сельскохозяйственных культур, объемах биомассы, фитопатологических состояний, повреждений вредителями, продуктивности пастбищной растительности, ходе агротехнических мероприятий и других работ используются космические изображения среднего и высокого разрешения. На этих снимках, например, поля подсолнечника и кукурузы, а также пашни имеют темный (черный) и темно-серый тон изображения и однородную текстуру. Яровые и кормовые культуры (ячмень, овес, просо и др.), а также смешанные культуры (кукуруза с сорго) — однородный серый тон изображения. Светлым тоном отображаются стерня различных культур и посевы многолетних трав.

Оценка хода сельскохозяйственных работ производится путем сравнительного анализа космических изображений обследуемой территории. Дешифрирование вспашки и косовицы не вызывает особых

затруднений (темный тон изображения). Повторную вспашку, полив, боронование, культивирование однозначно оценить трудно, требуются дополнительные сведения и тщательный анализ. Основу анализа составляют снимки среднего разрешения, так как снимки высокого разрешения обладают меньшим охватом территории и меньшей периодичностью съемки.

Оценка состояния пустынно-пастбищной растительности. Определение состояния пастбищ производится в основном фотометрическим способом, основанным на зависимости коэффициентов яркости растительного покрова от параметров его состояния (надземной растительной массы, площади листовой поверхности, густоты стояния растений). Для расчета таких параметров используют коэффициенты яркости в отдельных участках спектра, а также отношение или разность спектральных характеристик. Непосредственное использование фотометрического способа по данным наблюдений из космоса затруднено ввиду анизотропии отражательных свойств земных объектов, различной освещенности отдельных точек снимаемой территории и искажающего влияния атмосферы. Поэтому данный способ требует дополнительного обеспечения комплексом наземных и самолетных измерений в эталонных (тестовых) участках. Для космических систем, имеющих разрешение 1–3 км, элемент изображения соответствует на местности квадрату со стороной 30–50 км, что и определяет размеры эталонных участков. Максимальное удаление участков друг от друга выбирается так, чтобы разница в высоте Солнца на крайних тестовых участках не превышала 3°. Участки обычно намечаются в пределах полосы 100–500 км, вытянутой в широтном направлении. Их суммарная площадь составляет около 5 % обследуемой территории. Коэффициенты яркости этих участков должны охватывать весь диапазон, в котором может изменяться этот параметр по всей обследуемой территории. Измерения коэффициента яркости производятся при высоте Солнца большей 40°, что позволяет пренебречь флуктуациями коэффициента в течение дня.

По данным измерений строятся графики зависимости оптической плотности изображения эталонных участков местности от их коэффициента яркости. Точность определения растительной массы пастбища определяется коэффициентом яркости почвы под растениями, для учета которого используются почвенные карты с основными типами почв исследуемого района. По этим картам в эталонных участках определяются спектральные коэффициенты яркости почв в рабочих участках спектра спутниковой аппаратуры. Урожайность пустынно-пастбищной растительности на каждом эталоне обследуемой террито-

рии определяется по их коэффициентам яркости и градуировочным кривым, причем используется та градуировочная кривая, которая соответствует коэффициенту яркости почвы в данном эталонном (тестовом) участке.

Изучение состояния лесной растительности. Для физико-географического изучения района, картирования лесов, оценки общей залесенности местности, лесосырьевых запасов, пространственного распределения основных лесообразующих пород, определения положения крупных лесных массивов, состояния лесозащитных насаждений используется многозональная космическая информация. Характер кривой спектрального отражения зеленой массы (листьев) растений определяется взаимодействием их с падающей радиацией и зависит от пигментной системы листа, толщины, плотности и анатомической структуры листовых пластины. В видимом участке спектра электромагнитного излучения поглощение обусловлено пигментами растений (хлорофилл, каротин), а в инфракрасной области — молекулами воды. В последнем случае низкое отражение (высокая излучаемость) листьев характеризует излучение как функцию действительной температуры поверхности растительности. Сильное отражение в ближней инфракрасной области спектра определяется различиями преломляющего индекса на внутренних поверхностях составных частей клетки, ее стенках и др. В этой области отражение увеличивается по мере старения листа (увеличение воздушных камер внутри листа). Геометрия растений, являясь переменной величиной, также влияет на общее отражение, независимо от спектральной области. Доминирующее влияние оказывает высота растений, изменяющая процентное содержание почвенного покрова, находящегося в тени, и площади, освещенной солнцем.

Границы древесно-кустарниковой растительности довольно хорошо дешифрируются на космических снимках по тону (оптической плотности) изображения. Для решения других задач большие возможности предоставляют различные методы классификации и распознавания. Описание классов может производиться по опорным данным с тестовых участков (темнохвойные, еловые леса; светлохвойные, сосновые леса; лиственные древесные породы, залесенные болота).

8.3.1. Мониторинг лесных массивов по данным дистанционного зондирования

Осуществление мониторинга лесов требует привлечения широкого спектра средств получения информации, важное место отводится

космическим системам дистанционного зондирования. Количественные и качественные характеристики лесов непрерывно изменяются в процессе естественного развития биогеоценозов и под воздействием различных антропогенных и природных факторов: его состав меняется, границы мигрируют. Особую опасность представляет деградация лесов в качественном отношении, поскольку на участках гарей, образовавшихся в результате пожаров и впоследствии очищенных от горелого леса, во многих случаях возникают малоценные пустыни или прогалины. Эта проблема является наиболее актуальной для Алтайского края, так как здесь леса играют ведущую роль в защите территории от пыльных бурь, замедляют процессы эрозии и дефляции. Кроме того, ленточные боры, протянувшиеся через всю территорию Алтайского края в северо-восточном направлении, являются реликтовыми, так как они произрастают на песчаных отложениях древней долины стока, где процессы опустынивания и господствующие ветры привели к образованию эоловых форм рельефа (дюн), которые очень хорошо дешифрируются внутри лесных массивов на космических изображениях благодаря характерной волнистой структуре и серповидной форме. Исследование заключается в оценке возможности выявления и картографической регистрации последствий крупных лесных пожаров с вычислением их параметров по материалам дистанционного зондирования. Решение этой проблемы другими средствами (наземными и аэровизуальным) связано со значительными затратами на получение необходимых данных. Космическая информация дает возможность оперативно решать экологические и природоохранные задачи.

Отличительной особенностью изложенной в данном исследовании методики регистрации площадей крупных лесных гарей является максимальная автоматизация обработки информации, в основу которой положена цифровая обработка полутоновых и контурных изображений с использованием картографической и тематической информации, позволяющей выполнить геометрическую коррекцию возникающих из-за нелинейности развертки искажений выделенных контуров гарей и определить их площадь.

Классификация лесных массивов Алтая по видовому составу.

Главное место в лесной растительности исследуемой территории занимают ленточные боры, расположенные в ложбинах древнего стока на сухих почвах легкого механического состава с относительно близким залеганием грунтовых вод (на рис. 8.46 — область 1).

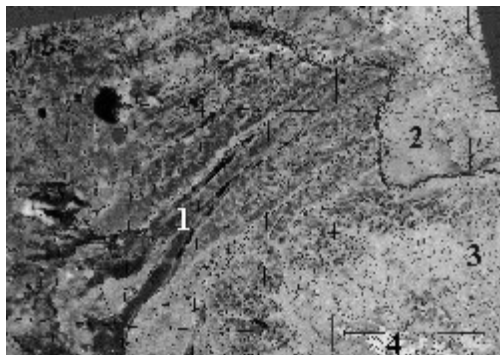


Рис. 8.46. Космический снимок территории Алтая, «Салют-1»

Древостой из сосны высотой от 17 до 21 м, имеющий разные возрастные характеристики, образует единственный сомкнутый ярус, подлесок не выражен. Разреженный травяной покров складывается несколькими видами степных и лугово-степных растений, хорошо развит лишайниковый ярус. Помимо ленточных боров на территории степных равнин встречаются колочные и байрачные березовые леса, небольшие по площади, приуроченные к западинам и крутым склонам балок северо-восточной экспозиции. На северо-востоке исследуемой территории в районе г. Барнаула появляются смешанные леса, сочетающие в себе поросли сосны и березы (2). В низкогорных районах распространены сосновые, березово-осиновые, пихтово-осиновые (3), в горных — пихтовые и кедровые леса (4). Большое влияние на изменение породного состава и типов леса в пределах горных лесов оказывает экспозиция склонов. Типы леса хорошо различаются на космических снимках, так как изменение лесорастительных условий проявляется в целом комплексе природных компонентов, включающем рельеф, условия грунтового увлажнения, почвы, травянистый покров. Об этом свидетельствует пример хорошего разделения на космических снимках, представленных на рис. 8.46–8.47, сухих сосновых лесов с лишайниковым покровом или остепненным разреженным травостоем на повышенных участках среди ложбин древнего стока (4) и влажных березовых травяных и березово-осиновых, часто заболоченных, занимающих понижения рельефа (3).



Рис. 8.47. Космический снимок лесного массива Алтая

Достоверность выделения различных пород в ленточных борах подтверждается результатами дешифрирования спектрзонального изображения (рис. 8.48).

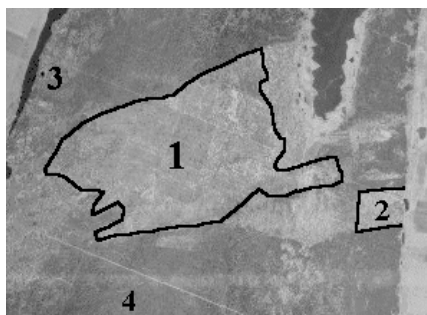


Рис. 8.48. Спектрзональное изображение ленточного бора.
ИСЗ «Ресурс-Ф1М»

Редколесья на космических снимках опознаются как осветленные пятна плавных очертаний среди массивов ленточных боров (2). В ложбинах древнего стока такие пятна, как правило, приурочены к повышенным местам, на которых произрастают сухие низкостелетные сосняки относительно малой полноты. Для гарей (1), образовавшихся в результате лесных пожаров и отображающихся на космическом сним-

ке и радиолокационном изображении (синтез Chv, Lhh, Lhv), характерны вытянутость в направлении господствующих ветров с юго-запада на северо-восток, плавная неизвилистая, но нечеткая, слегка смазанная линия границ (рис. 8.49, 8.50).

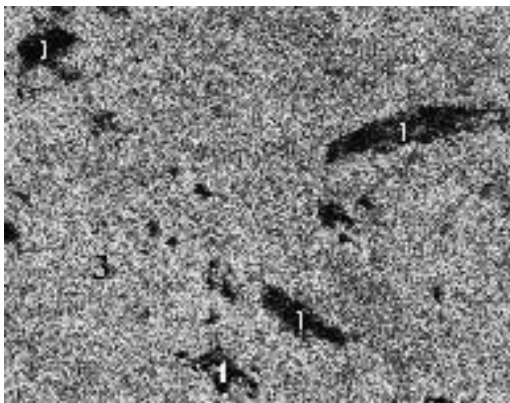


Рис. 8.49. Космический снимок лесного массива с горями (1)



Рис.8.50. Радиолокационное изображение лесного массива с горями (1)

Обработка изображений проводилась методом эквализации гистограмм, контрастирования. Границы выделов отделялись методом эквденсит. Сравнительный анализ космического снимка и спектрального изображения показал, что на повышенных участках после повреждения древостоя в результате пожаров лесовозобновление со-

сны затруднено. Современные гари пожаров выделялись на синтезированных сканерных изображениях МСУ-Э, МСУ-СК (системы «Ресурс» и «Мир-Природа») и AVHRR NOAA. На рис. 8.51 приведен пример дешифрирования гарей в Сузунском и Ларичихинском лесхозах по данным МСУ-СК.

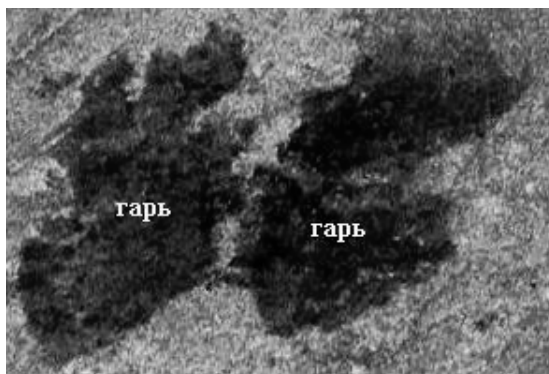


Рис. 8.51. Дешифрирование гарей в Сузунском и Ларичихинском лесхозах. ИСЗ «Ресурс», МСУ-СК

Вырубки лесных массивов на космических снимках изображаются, как правило, в виде прямоугольников и хорошо распознаются. Пример дешифрирования вырубок в приобском бору по материалам «Ресурс-Ф1М» и SIR-C\Л-SAR (1, 2, система «SPACE SHUTTLE», синтез Lhv, Chv, Ltp) приведен на рис. 8.52, 8.53. В период, прошедший между съемками, произошло зарастание вырубок деревьями лиственных пород (как правило, береза и осина), которые хорошо распознаются на радиолокационном изображении (на рис. 8.52 лиственным породам соответствует зеленый цвет, хвойным — розовый).

Между Барнаульской лентой бора и р. Алей, западнее г. Рубцовска по материалам дистанционного зондирования дешифрируется обширная область сплошной вырубки лесного массива «Скляихинский борок», который имел протяженность около 30 км. Лес был полностью сведен в период расцвета горного производства на Алтае.

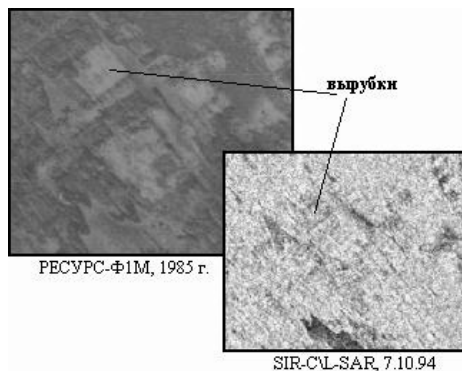


Рис. 8.52. Пример дешифрирования вырубок в приобском бору (по материалам «Ресурс-Ф1М» и SIR-C\VL-SAR)

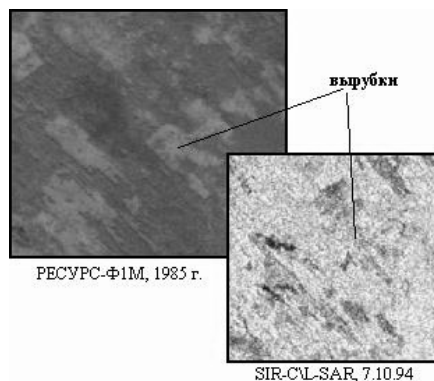


Рис. 8.53. Пример дешифрирования вырубок в приобском бору (по материалам «Ресурс-Ф1М» и системы «SPACE SHUTTLE»)

В настоящее время эта территория представляет собой волнистую песчаную поверхность, на которой произрастает кустарниковая растительность. Подобные области на территории Алтайского края находятся также в бывших Андроновской (район с. Баево) и Чупинской (район с. Усть-Порозиха) лентах бора. В Чупинской ленте в настоящее время идет восстановление леса. На рис. 8.54 изображен Склюихинский борок по данным сканера МСУ-Э (система «Космос», синтез 3 каналов), радиолокатора с синтезированной апертурой «Алмаз» (S-диапазон, НН-поляризация) и сканера МСУ-СК («Мир-Природа», синтез 3 каналов).

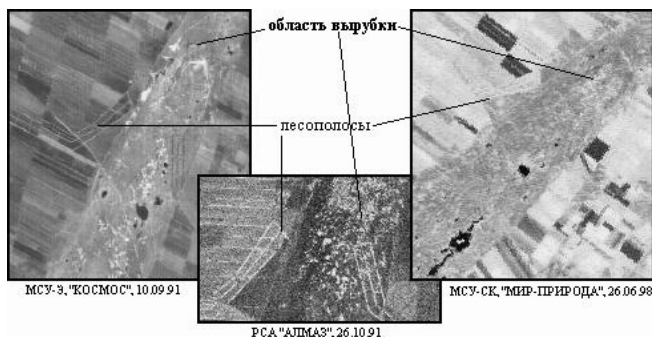


Рис. 8.54. Склоухинский борок

В лесоустройстве территории Алтайского края большое значение имеют защитные лесополосы, которые препятствуют распространению пылевых бурь, замедляют процессы эрозии и дефляции почв. Все лесополосы имеют искусственное происхождение. Самая крупная из них, шириной около 825 м и посаженная в начале 50-х гг., протянувшаяся через весь Алтай от р. Чарыш до Омской области, представлена на изображении МСУ-Э «Ресурс». (рис. 8.55).

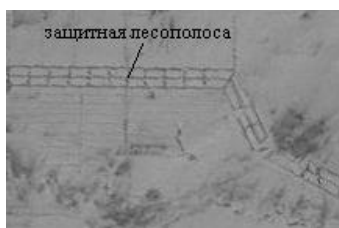


Рис. 8.55. Самая крупная защитная лесополоса Алтайского края

8.4. Мониторинг чрезвычайных ситуаций

8.4.1. Мониторинг наводнений

Ежегодно в мире расходы на проекты по защите от наводнений составляют около 500 млн дол. Поэтому решение задач прогнозирования, обнаружения, контроля и оценки последствий наводнений имеет важное экономическое и социальное значение.

Обширность речных пойм и быстрота протекающих на них процессов затопления, с одной стороны, и недостаточная густота сети гидрологических постов — с другой, затрудняют получение сведений о наводнениях наземными средствами. На основе космической инфор-

мации возможно определение основных гидрологических параметров, характеризующих процесс наводнения. Интеграция данных ДЗ в ГИС совместно с картографическими материалами, результатами наземных обследований и другой геокодированной информацией позволит получать принципиально новые информационные продукты.

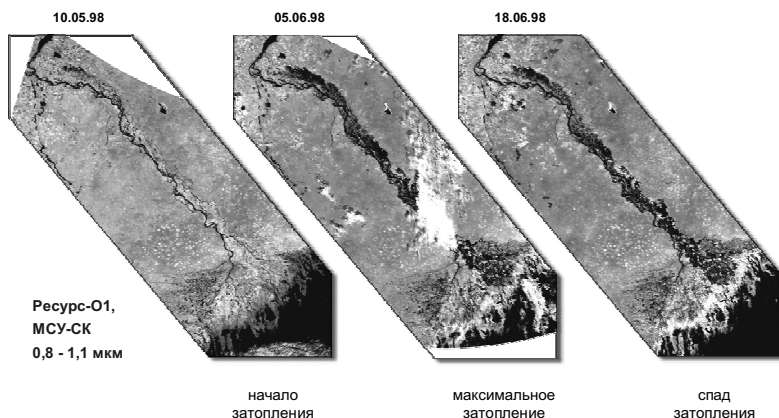


Рис. 8.56. Области затопления Волго-Ахтубинской поймы по спутниковым данным среднего разрешения (ИСЗ «Ресурс-01», диапазон 0,8–1,1 мкм)

Целью проекта НИЦ «Планета» является картирование районов наводнений на основе совместной цифровой обработки космической информации и комплексных гидрологических данных. Результаты картирования позволят прогнозировать зоны риска затопления, наблюдать за динамикой процессов затопления и опорожнения речных пойм и оценивать последствия наводнений. Данная работа осуществляется совместно с Государственным гидрологическим институтом Росгидромета. В качестве исследуемого объекта была выбрана Волго-Ахтубинская пойма. Исходной спутниковой информацией являются архивные и оперативные данные КА «Ресурс-01» (МСУ-Э, МСУ-СК), «Океан-0» (МСУ-В, МСУ-СК), «Океан-01». В ходе ее выполнения осуществлен сбор и анализ текущей и архивной спутниковой информации по территории Волго-Ахтубинской поймы. Создана информационная база данных, включающая в себя спутниковые изображения среднего разрешения МСУ-СК ИСЗ «Ресурс-01» и результаты их обработки, результаты наземных измерений на гидрологических постах.

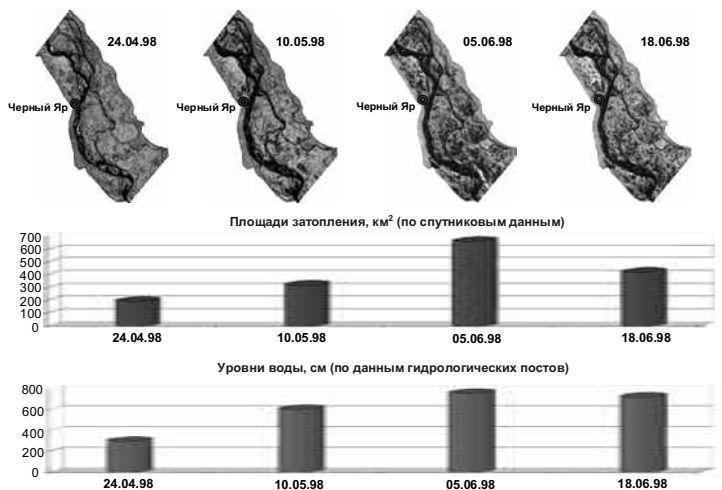


Рис. 8.57. Зависимости площадей затопления от уровня воды Волго-Ахтубинской поймы; площадь затопления; уровень воды. ИСЗ «Ресурс-01», МСУ-СК, диапазон 0,8–0,1 мкм

Разработана технология и проведена обработка спутниковых сканерных изображений среднего и высокого пространственного разрешения, приходящихся на разные фазы затопления Волго-Ахтубинской поймы. Обработка спутниковых данных включала в себя такие процедуры, как яркостная коррекция космических изображений, формирование картографической основы, трансформирование спутниковых данных в картографическую проекцию, выделение на снимках затопленных и незатопленных областей (рис. 8.56).

При определении затопленных и незатопленных территорий изображения преобразовывались к бинарному виду с использованием порогового и кластерного методов. На основе космических данных построены картограммы затоплений для семи участков Волго-Ахтубинской поймы. Для каждого из участков проведена оценка площади затопления. Построены графики зависимостей площадей затопления от значения уровня воды для некоторых участков Волго-Ахтубинской поймы (рис. 8.57). Полученные зависимости позволяют по измеренным на гидрологических постах значениям уровня воды оценивать площади затоплений поймы.

8.4.2. Наблюдение за лесными пожарами

Использование космических данных позволяет существенно улучшить противопожарную охрану лесов. Пожары, обнаруженные в течение 5–15 ч после их возникновения, обычно могут быть локализованы и потушены. По истечении данного срока чаще всего этого сделать не удается, что приводит к массовой гибели леса.

Технологии ДЗ для управления риском лесных пожаров можно подразделить на три направления:

- предпожарные обследования — наблюдение за влажностью горючих материалов в лесу и оценка пожароопасности (риска пожара);
- обнаружение и прогноз распространения пожаров для оптимизации мероприятий по их ликвидации;
- оценка ущерба от пожаров.



Рис. 8.58. Выделение очагов лесных и торфяных пожаров. Центральная часть Европейской территории России. ИСЗ NOAA-16, AVHRR, 03.09.02 г.

Для реализации мероприятий по второму направлению существует ряд оперативных и квазиоперативных систем, состоящих из трех компонентов:

- спутникового оперативного контроля;
- самолетного зондирования на базе ИК сканеров и СВЧ радиометров для обнаружения в условиях облачности и задымления;
- наземного пункта обработки данных.

Космическая информация используется для ежедневной оперативной оценки метеорологической и пожароопасной обстановки, обнаружения пожаров, контроля их динамики. В основном применяется информация с ИСЗ NOAA (рис. 8.58) и «Метеор», позволяющая в пожароопасные периоды давать оценку обстановки дважды в сутки. При обработке используются температурные ИК диапазоны для обнаружения «горячих точек» либо каналы видимого диапазона для идентификации дымовых шлейфов. Для обнаружения пожаров и оценки местоположения и масштабов может быть использована информация высокого и среднего разрешения с ИСЗ серии «Ресурс». Ограничение таких систем предупреждения связано с необходимостью иметь безоблачные условия для наблюдений. В связи с этим большую роль играют исследования, направленные на использование спутниковых микроволновых данных для задач изучения лесов.

Третье направление — оценка ущерба от пожаров, связано с использованием космических снимков высокого (5–40 м) и среднего (200 м) разрешения. Во втором случае картографирование крупных гарей (>200 га) проводится автоматизированно. С помощью такого метода в России обследована территория площадью более 150 млн га.

Мониторинг лесных пожаров в Алтайском крае. Возможность полного учета и оценки последствий пожаров до сих пор сдерживалась как слабой научной разработкой проблемы, так и отсутствием технически надежных и экономически эффективных методов. Развитие дистанционных методов исследований позволили регистрировать и оценивать динамику и последствия пожаров с любой степенью детальности, что дает возможность резко сократить объем наземных полевых работ по оценке послепожарного состояния лесов. Ежедневное слежение в пожароопасный период за появлением крупных гарей, определение и картографирование их площадей возможно с использованием сканерных космических снимков системы NOAA (сканер AVHRR), которая позволяет оперативно регистрировать очаги пожаров и получать объективные сведения о площадях гарей одновременно в границах крупных административных районов.

Сканер AVHRR позволяет получать информацию об отражательных свойствах объектов в видимом диапазоне и об их температуре, используя данные инфракрасных каналов, которые позволяют определять температуру поверхности с точностью 1°. Основным дешиф-

ровочным признаком очага пожара является его инфракрасное излучение, максимум которого приходится на спектральный диапазон 3.1–3.7 мкм, т.е. третий канал прибора AVHRR, и, следовательно, этот канал можно использовать для обнаружения пожаров, размеры которых значительно меньше пределов пространственного разрешения. Информация, поступающая с других спектральных каналов, помогает отделить облака, что очень важно, так как в третьем спектральном канале отклик от освещенных солнцем облаков сравним, а иногда и превышает отклик от пожара. Наиболее достоверно дымовые шлейфы выделяются на фоне подстилающей поверхности на мультиизображениях, представляющих собой синтез по цветам RGB трех из пяти каналов сканера при интерактивной работе в пакете PCI 6.0. Для наилучшего выделения объектов проводится коррекция гистограмм каждого из выбранных каналов линейным и квадратичным преобразованием, эквализацией и функцией обратной частоты.

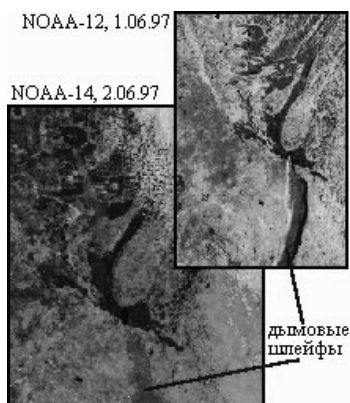


Рис. 8.59. Динамика развития пожаров в борах Алтайского края

На рис. 8.59, 8.60 представлена динамика развития пожаров в ленточных борах Алтайского края и Восточного Казахстана, а также в приобских лесах в период с июня по ноябрь, на которых выделены дымовые шлейфы и очаги пожаров. Гари в приобских лесах представлены также на синтезированном сканерном изображении (рис. 8.61).

Четвертый и пятый каналы AVHRR позволяют получать информацию о температуре и влажности земной поверхности и могут быть использованы для обнаружения и прогноза пожароопасных районов.

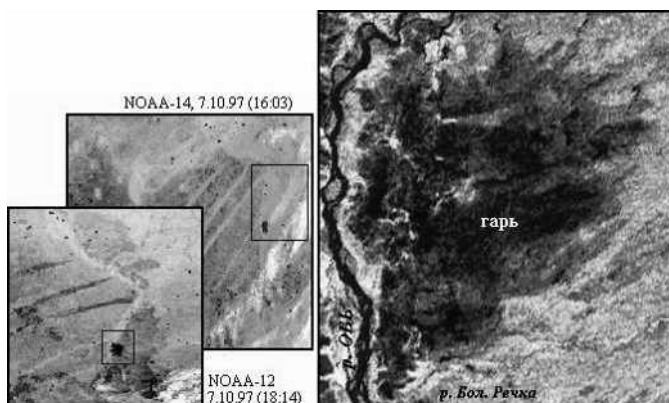


Рис. 8.60. Пожары и гари в ленточных борах Алтайского края и Восточного Казахстана

На снимках МСЗ NOAA пожарища выявляются по темно-серому и темному тону, что соответствует изображению площадей, пройденных сильными низовыми и верховыми пожарами. Низкие спектральные яркости изображения обусловлены черной поверхностью гарей, образующейся в результате полного выгорания напочвенного покрова, подростка и подлеска, а также обугливания валежника. Неровный характер кромки гарей связан с различными видами и интенсивностью пожаров в течение суток, неравномерным пожарным созреванием типов насаждений, различными категориями площадей, встречающимися на пути распространения пожара и, наконец, направлением ветра во время их действия. Из-за мелкомасштабности сканерных изображений NOAA не выявляются площади пожарищ с насаждениями, пройденными слабыми низовыми пожарами. Такие насаждения располагаются на периферии гарей и имеют незначительные повреждения огнем. Они выражаются в неполном и неравномерном выгорании напочвенного покрова, в частичном отмирании подростка и подлеска, а также в появлении нагара на части деревьев. Перечисленные повреждения не приносят существенных изменений в состояние лесных сообществ, не нарушают их природоохранных и ресурсных функций и не сопровождаются экономическим ущербом. Поэтому такие участки леса не учитывались при вычислении площадей гарей. В исследовании также использовались снимки, полученные сканером высокого разрешения МСУ-Э, отдельных участков ленточных боров.

Для площадной оценки участков леса, пройденных пожарами, исходное изображение трансформировалось в проекцию топографической карты (равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса-Крюгера) с целью корректировки искажений, вносимых разверткой сканера, а также возникающих из-за кривизны Земли. Подготовка цифровых топографических основ масштаба 1:200000 и 1:1000000 выполнялась пакетом программ Vector Maker, разработанным в лаборатории обработки изображений Алтайского госуниверситета. Пересчет изображений проводился по опорным точкам методом наименьших квадратов. Квадратичный полином использовался для трансформации изображения МСУ-Э, а кубический — для AVHRR, так как значительный вклад в искажения вносит кривизна Земли. Географическая привязка очагов пожаров и вычисление площадей гарей проводились на совмещенных с цифровой картографической основой космических изображениях методом выделения пороговых значений яркостей, соответствующих участкам гарей. На рис. 8.61 представлен результат совмещения и выделения наиболее крупных гарей по синтезированному (синтез 3 каналов) изображению МСУ-Э от 22.09.97 г.

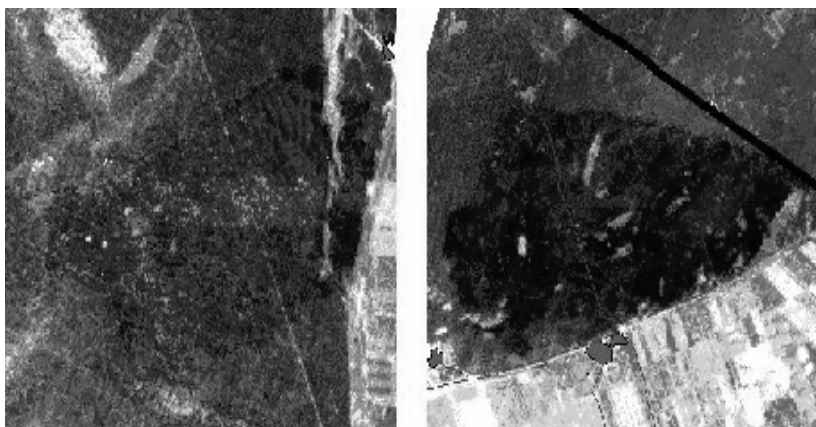


Рис. 8.61. Выделения крупных гарей по синтезированному изображению МСУ-Э.

Синтез проводился в пакете PCI 6.0. Основные результаты оценки последствий лесных пожаров приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Результаты оценки последствий лесных пожаров
(по данным МСУ-Э и AVHRR)

Координаты центров гарей, град		Площади гарей, га
с. ш	в. д.	
50°30	80°30	17633
50°35	80°10	24519
50°53	80°05	15383
51°20	80°20	19385
51°30	80°00	15710
51°20	79°35	7295
51°40	79°50	13257

На рис. 8.62 представлены сканерное синтезированное изображение гарей в Колыванском бору и окрестности Колыванского озера по данным МСУ-СК от 26.06.98 г. (система «Мир-Природа»), пожары в пойме р. Оби и приобских смешанных лесах, полученные в результате синхронных наземных наблюдений. Колыванский бор является уникальным, так как в данной широтной зоне это единственный лесной массив, в котором произрастает чистая сосна. Летом 1997 г. большая часть бора сгорела.

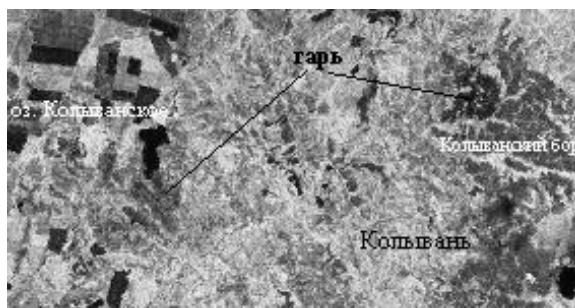


Рис. 8.62. Сканерное синтезированное изображение гарей в Колыванском бору (по данным МСУ-СК, «Мир-Природа»)

Все наиболее крупные лесные гары, образовавшиеся в результате лесных пожаров на территории Алтайского края и Восточного Казахстана по данным МСУ-Э (3-й канал) и NOAA, трансформированного в проекцию Гаусса-Крюгера и совмещенного с картографической основой, и МСУ-СК («Мир-Природа») отображены на рис. 8.63 и 8.64.

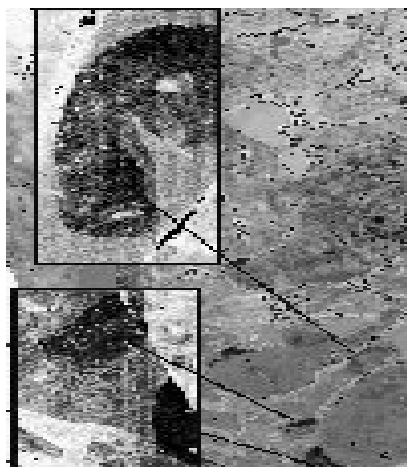


Рис. 8. 63. Лесные гари на территории Алтайского края и Восточного Казахстана (по данным МСУ-Э и NOAA)

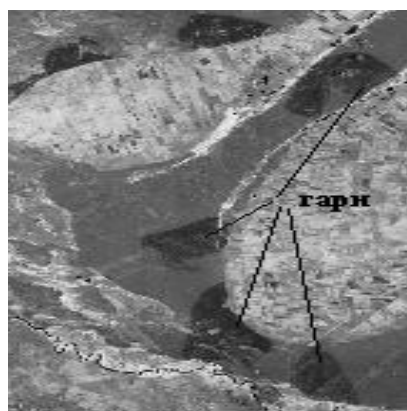


Рис. 8.64. Лесные гари на территории Алтайского края (МСУ-Э)

В конце апреля – начале мая 1999 г. на территории Алтайского края установилась жаркая засушливая погода, вследствие чего возникло множество пожаров в ленточных борах, лесах Горного Алтая и на участках пастбищ. Очаги пожаров и дымовые шлейфы от них представлены на синтезированных изображениях AVHRR NOAA (рис.

8.65). Участки степных пожаров, возникших в результате сельхозпа-
лов, на изображениях выделяются красными точками.

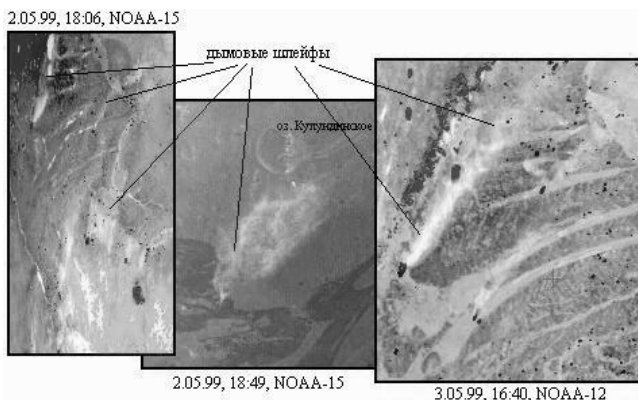


Рис. 8.65. Очаги пожаров и дымовые шлейфы на синтезированных
изображениях AVHRR NOAA

Прогнозирование пожаров по космическим снимкам. Оценка параметров, характеризующих состояние лесов как одного из компонентов биосферы, относится к числу приоритетных задач использования данных многоспектральных спутниковых измерений. Существующие методы обработки многоспектральных изображений можно разделить на два класса:

- 1) линейные комбинации спектральных каналов с коэффициентами, полученными на основе полевых измерений;
- 2) индексы-отношений яркостей спектральных каналов, называемые вегетационными индексами.

Метод линейных комбинаций каналов требует большого объема вычислений и громоздких полевых измерений, поэтому для изучения динамики состояния растительных ценозов в данной работе использовалась концепция нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI, характеризующего интенсивность процессов фотосинтеза в зеленых фракциях растительности и контраст земной вегетирующей растительности с другими природными образованиями.

В процессе обработки изображений использовались выборки данных NOAA, полученных за период с июня по сентябрь. Пересчет на вегетационный индекс

$$NDVI = \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1},$$

где L_1 — значение коэффициентов отражения в спектральном интервале поглощения радиации хлорофиллом; L_2 — значение коэффициентов отражения в ближней инфракрасной области спектра, проводился с учетом калибровочных коэффициентов каждого канала сканера AVHRR. Это позволило получить значения индексов NDVI в безразмерной шкале. Нулевые значения NDVI, соответствующие зеркалу озер и участкам гарей, исключались из гистограммы распределения индексов.

В 1997 г. сложились погодные условия для развития сильной засухи, повторяющейся в этой зоне Западной Сибири с периодом в 12 лет. За последние 30 лет это самая сильная засуха в Алтайском крае. На изображении (рис. 8.66) выделяются зоны, имеющие самый низкий коэффициент NDVI. Это объясняется началом засухи в Кулундинской степи (1) и южной части Алейской степи (2). Ранее по весенним снимкам эти области выделялись как первые освободившиеся от снега и с просохшей почвой. Начало засухи пришлось на период развития всходов озимых культур на сельскохозяйственных полях, поэтому результаты обработки изображений позволили предположить неурожай зерновых культур в степной части Алтайского края. Естественные степи южнее р. Иртыша (3) выделяются как полностью лишенные растительности вследствие засухи, произошедшей в весенний период.

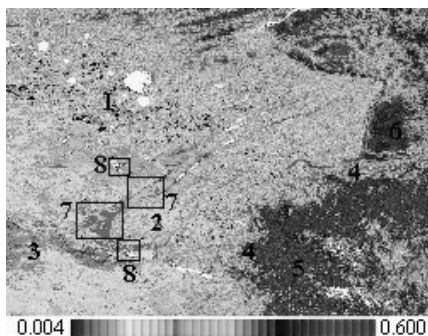


Рис. 8.66. Космическое изображение с выделением зон самых низких значений коэффициента NDVI (AVHRR, спутник NOAA)

В предгорьях Алтая наблюдается повышение индекса NDVI (4), так как эта территория покрыта естественной травяной растительностью. Самое высокое значение NDVI имеют лесные массивы, расположенные в Горном Алтае (5) и на северо-востоке Алтайского края в районе г. Барнаула (6), которые содержат большой процент примеси

лиственных пород (березы, осины). В ленточных борах в этот период по сравнительно невысоким значениям NDVI выделяется область сухих лесов (7), которая при последующем мониторинге состояния растительности рассматривалась как пожароопасная. Это предположение базировалось на результатах наблюдений за развитием пожаров на территории Восточного Казахстана (8), очаги которых хорошо дешифрируются по низким NDVI. Прогноз пожароопасного состояния подтвердился, так как на этом участке лесного массива произошел ряд крупных пожаров, отобразившихся на снимках от 1.07.97 г. (область 6) и от 22.09.97 г. (область 3).

На изображении от 1.07.97 г. (рис. 8.67) границы области засухи в Кулундинской степи (1) и южной части Алейской степи (2) расширились, но значения NDVI увеличились в связи с развитием сельскохозяйственной растительности и наличием на этих территориях небольших березовых колков (рощиц).

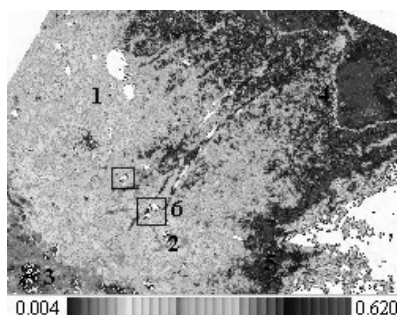


Рис. 8.67. Синтезированное изображение с выделением областей засухи (AVHRR спутник NOAA)

Юго-западнее Алтайского края (3) коэффициент растительности практически не изменился. В центре района начались степные пожары. Значения NDVI в северо-восточных районах (4) сравнялись со значениями в предгорных областях (5) вследствие развития растительности на сельскохозяйственных полях.

В период с июля по сентябрь в Алтайском крае дождей практически не было, поэтому снимок (рис. 8.68) отображает низкие значения NDVI не только в области засухи, но и на участках, где был собран хороший урожай зерновых культур, а также участках с преобладанием естественной разнотравно-злаковой степной растительности. Это предгорные остепненные территории и луга в пойме р. Оби.

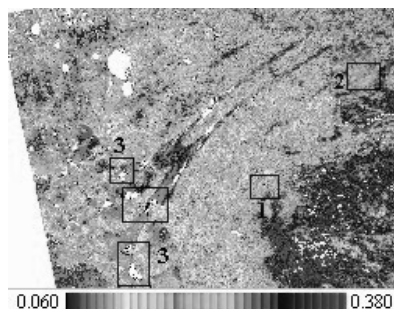


Рис. 8.68. Синтезированное изображение с выделением зон низких значений NDVI (AVHRR спутник NOAA)

В связи со средней температурой конца сентября начала октября 25°C и полным отсутствием дождей на этих участках начали развиваться степные пожары. Пик степных пожаров (около 200) пришелся на начало октября, что наблюдается на изображении NOAA от 7.10.97 г. в виде мелких точек размером от 1 до 3 пикселей (рис. 8.69).

В частности, произошло возгорание покрытых сухой травой сопков, прилегающих к березово-осиновому массиву и сосновому лесу в Колыванском бору (1). На изображении от 22.09.97 г. в приобских лесах (2) выделяется область сухих с низким индексом NDVI пожароопасных лесов, где 7.10.97 г. было зафиксировано начало пожара в правобережной пойме р. Оби, очаг которого развился в крупнейший пожар, продолжавшийся до 23.10.97 г. Один из последних снимков перед установлением снежного покрова показывает, что максимальное количество гарей пришлось на участки с наименьшим индексом NDVI.

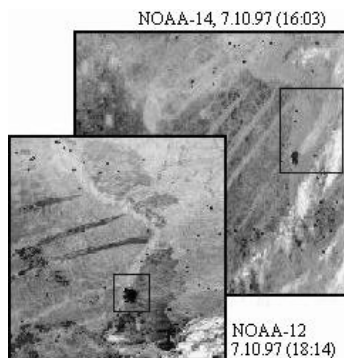


Рис. 8.69. Пик степных пожаров (AVHRR спутник NOAA)

Сравнительный анализ весенне-осенних изображений NOAA и почвенной карты территории Алтайского края показал, что наиболее подвержены засухе каштановые почвы с легким механическим составом (легко и среднесуглинистые), а также черноземы южные малогумусные средние и маломощные. Наиболее часто пожарам подвергались леса, произрастающие на дерново-подзолистых слабоосолоделых песчаных почвах на эоловых песках. Менее подверглись пожарам леса, расположенные на дерново-слабоподзолистых почвах.

В рассматриваемом проекте проведено оперативное слежение в пожароопасный период за развитием пожаров и появлением крупных гарей с использованием сканерных космических снимков системы NOAA (сканер AVHRR), которая позволяет регистрировать очаги пожаров и получать объективные сведения о площадях гарей одновременно в границах крупных административных районов. Трансформирование исходных изображений в проекцию топографической карты позволило оценить последствия лесных пожаров и вычислить площадь гарей с точностью, допустимой масштабом карты. Пересчет коэффициентов отражения в вегетационный индекс NDVI с учетом калибровочных коэффициентов каждого канала сканера AVHRR позволил оценить границы засухи и выделить пожароопасные участки лесных массивов и степей. Полученные результаты применены в области экологического мониторинга, экологического картирования территорий.

8.5. Исследование долговременных изменений природной среды

8.5.1. Мониторинг опустынивания

Согласно данным ЮНЕП (Программа ООН по окружающей среде) в настоящее время опустыниванием охвачено порядка 70 % всех засушливых земель, что составляет около четверти земной суши. Опустынивание наносит огромный социально-экономический ущерб, от последствий которого страдает одна шестая часть населения земного шара.

В России зоной наиболее интенсивного опустынивания является территория Калмыкии. Калмыкия расположена в северо-западной части Прикаспийской низменности. Ее наибольшая протяженность с запада на восток составляет 420 км, с севера на юг — 450 км, площадь — 74 000 км². Наибольшие темпы деградации почвенно-растительного покрова наблюдаются в районе Черных земель (около 40 % территории Калмыкии), где с 1952 по 1991 г. площадь очагов опустынивания увеличилась более чем в 10 раз. Калмыкия включена ЮНЕП в список

территорий, подверженных наиболее интенсивным процессам опустынивания.

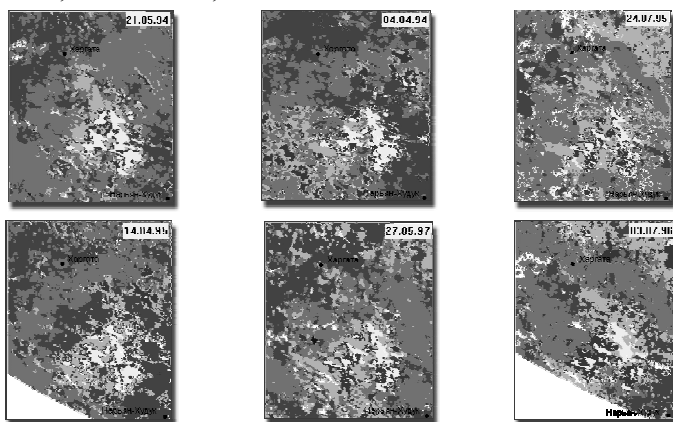
Для мониторинга процессов опустынивания на территории Калмыкии необходимо осуществлять сбор информации о состоянии почвенно-растительного покрова несколько раз в периоды максимумов вегетационного цикла (конец мая — начало июня и сентябрь) с интервалом 1–2 недели. При этом нужно одновременно охватывать обширные территории. Эффективным средством решения данной задачи является ДЗЗ из космоса. Оперативные КС позволяют с высокой периодичностью (от 1 до 15 дней) производить съемку территорий размерами от нескольких десятков до нескольких тысяч километров.

Основные цели рассматриваемого проекта НИЦ «Планета»:

- регулярное картирование районов опустынивания в Калмыкии на основе совместной обработки и анализа комплексной космической, картографической и наземной информации;

- построение многолетних рядов данных, позволяющих определять тренды динамики площадей очагов опустынивания.

В рассматриваемом проекте используется информация с КС «Ресурс-О1», «Океан-О1», NOAA.



Цифровые тематические карты Черных земель Калмыкии, показывающие динамику процессов опустынивания

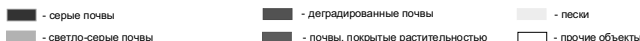


Рис. 8.70. Динамика состояния почвенно-растительного покрова Черных земель Калмыкии, ИСЗ «Ресурс-01»

При исследовании процессов опустынивания данные ДЗ должны обеспечивать пользователя информацией об объектах или явлениях, имеющих мелкий масштаб, но затрагивающих обширные территории. Аппаратура с высоким пространственным разрешением, позволяющая выделять мелкомасштабные структуры, имеет очень малую полосу обзора и низкую периодичность съемки. Поэтому перекрытие всей исследуемой территории информацией высокого разрешения оказывается либо технически невозможным, либо очень дорогостоящим. Информация среднего и особенно низкого пространственного разрешения не всегда позволяет выделять объекты, характеризующие процесс опустынивания с достаточной степенью точности. Оптимальный подход к решению данной проблемы заключается в комбинировании различных видов космической информации. Аппаратурой с высоким разрешением производится съемка тестовых участков; затем полученные результаты экстраполируются на всю исследуемую территорию на основе информации среднего и низкого разрешения. На рис. 8.70 представлена динамика состояния почвенно-растительного покрова Черных земель Калмыкии на основе комбинированной космической съемки исследуемого района аппаратурой с различным разрешением.

В результате проводимых исследований организована регулярная космическая съемка районов опустынивания Калмыкии с помощью аппаратуры с различным пространственным разрешением; осуществлен сбор комплексной картографической информации по исследуемому региону, необходимой для валидации результатов обработки космических изображений; проведена автоматизированная цифровая обработка и интерпретация различных видов космической информации; построены цифровые карты региона опустынивания в Калмыкии, содержащие информацию о различных видах почвенно-растительного покрова и других объектах, представляющих интерес для мониторинга опустынивания и деградации почв; проведена валидация полученных результатов с привлечением базы географически привязанных данных по исследуемому региону.

На основе сопоставления информации высокого и среднего пространственного разрешения показано, что данные среднего разрешения позволяют выделять основные типы природных образований на территории Черных земель Калмыкии и могут быть использованы для мониторинга процессов опустынивания в региональном масштабе. В рассматриваемом проекте построены тематические карты района опустынивания на основе многолетних спутниковых данных (рис. 8.70).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аннотированный справочник основных законодательных, нормативных, методических и информационных документов по охране атмосферного воздуха. СПб.: НИИ Атмосфера, 2000.

Арманд Н.А. Интернет и космические методы в экологии России / Н.А. Арманд, Ю.А. Кравцов, Е.Б. Кудашев, В.П. Мясников, М.Д. Равев, В.П. Саворский, М.Т. Смирнов, Ю.Г. Тищенко // Инженерно-экологический журнал. 2000. № 5. С. 2–19.

Берлянд М.В. К научным основам централизованного контроля загрязнения воздуха и промышленных выбросов в атмосферу / М.В. Берлянд, Н.Ш. Вольберг // Метеорология и гидрология. 1985. № 1. С. 33–41.

Гарбук С.В. Космические системы дистанционного зондирования земли / С.В. Гарбук, В.Е. Гершензон. М.: Изд-во А и Б, 1997. 296 с.

Герасимов И.П. Научные основы мониторинга окружающей среды. Мониторинг состояния окружающей среды / И.П. Герасимов // Тр. I Сов.-англ. симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 252 с.

Горохов В.Л. Статистическая обработка космических РЛС-изображений озера Ладога / В.Л. Горохов, А.А. Бузников, Я.В. Логачев // Тез. докл. V Междунар. конф. «Региональная информатика-96». СПб., 1996. С. 303.

Долотовская Л.З. Место и роль системы производственного экологического мониторинга при внедрении на предприятиях международных стандартов серии ISO-14000 / Л.З. Долотовская // Экологические системы и приборы. 2000. № 8.

Еремеев В.А. Сравнительный анализ сезонных оценок концентраций морского льда, полученных с использованием спутниковых данных ОКЕАН-01, SSM/I, и RADARSAT / В.А. Еремеев, И.Н. Мордвинцев и др. // Исслед. Земли из космоса (РАН). 2001. № 4. С. 46–52.

Инженерная экология / под ред. В.А. Медведева. М.: Гардарики, 2002. 690 с.

Измалков В.И. Техногенная и экологическая безопасность и управление риском / В.И. Измалков, А.В. Измалков. СПб: НИЦЭБ РАН, 1998. 482 с.

Израэль Ю.А. Допустимая нагрузка на биосферу / Ю.А. Израэль // Всесторонний анализ окружающей природной среды: тр. II Сов.-амер. симпозиума. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 12–20.

Израэль Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценки изменений состояния окружающей природной среды. Основы мо-

ниторинга / Ю.А. Израэль // Метеорология и гидрология. 1974. №7. С. 3–8.

Израэль Ю.А. Концепция мониторинга состояния биосферы / Ю.А. Израэль // Тр. I Сов-англ. симпозиума. Л.: Гидрометеоздат, 1977. С. 10–26.

Кадлип В.И. Российско-Британский спутниковый экологический мониторинг на основе Web- и Интернет-технологий / В.И. Кадлип, Ю.А. Кравцов, Е.Б. Кудашев, М.Д. Раев, О.В. Сюнтеренко, Н.А. Арманд, В.П. Саворский, М.Т. Смирнов, Ю.Г. Тищенко, В.П. Мясников // Информационное общество. 2000. №2. С. 59–64.

Кимстач В.А. Концепция системы экологического мониторинга России / В.А. Кимстач, И.Д. Фридман, Е.С. Дмитриев, Л.С. Язвин, Е.А. Нейман // Метеорология и гидрология. 1992. № 10.

Кондратьев К.Я. Концепция регионального геоинформационного мониторинга / К.Я. Кондратьев, В.Ф. Крапивин, Е.С. Пшенин // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 6. С. 3–10.

Кудашев Е.Б. Интегрирование информационных ресурсов исследований Земли из космоса / Е.Б. Кудашев, Н.А. Арманд, Ю.А. Кравцов, В.П. Мясников, М.Д. Раев, В.П. Саворский, М.Т. Смирнов, Ю.Г. Тищенко // Тр. Всерос. конф. «ТЕЛЕМАТИКА 99». СПб., 1999. С. 98–99.

Моисеев Н.Н. Экология и образование / Н.Н. Моисеев. М.: ЮНИКАМ, 1996. 217 с.

Майкл Н. ДеМерс. Географические информационные системы / Майкл Н. ДеМерс. М.: Дата+, 1999. 490 с.

Мясников В.П. Информационные технологии и информационные ресурсы космического экологического мониторинга / В.П. Мясников, Н.А. Арманд, Ю.А. Кравцов, Е.Б. Кудашев и др. // Вестн. РФФИ. 2000. №2. С. 30–37.

Николь Н. Электронные таблицы Excel 5.0 для квалифицированных пользователей / Н. Николь, Р. Альбрехт. М.: ЭКОМ, 1995. 304 с.

Новоселова О.А. Единая государственная система экологического мониторинга в России / О.А. Новоселова // Интегрированные информационные системы поддержки принятия решений на областном уровне в России: тр. межд. Конф. ЮНЕП/ОЕСД. М., 1995.

Окружающая среда и здоровье: подходы к оценке риска / под ред. А.П. Щербо. СПб.: МАПО, 2002. 370 с.

Переведенцев Ю.П. Гидрометеорологические основы охраны окружающей среды / Ю.П. Переведенцев, Ю.Г. Хабутдинов, А.А. Николаев; Казан. ун-т. Казань, 2004. 133 с.

Перечень веществ, продуктов, производственных процессов, бытовых и природных факторов, канцерогенных для человека: гигиенические нормативы. ГН 1.1.725-98, ГКСЭН РФ. М., 1995. 12 с.

Перечень нормативных и методических документов по обеспечению государственного экологического мониторинга: справочник. Пермь: ФГУ УралНИИ «Экология», 2000. – 320 с.

Петров В.В. Экологическое право России / В.В. Петров. – М.: БЕГ, 1995. 557 с.

Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха / под ред. С.С. Чичерина. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 364 с.

Растоскуев В.В. Метод фильтрации облачности для данных прибора AVHRR, относящихся к региону Балтийского моря / В.В. Растоскуев, Е.В. Шалина // Исслед. Земли из космоса. 1996. №1. С. 47–55.

Ревунков Г.И. Базы и банки данных и знаний / Г.И. Ревунков и др. М.: Высшая школа, 1992. 367 с.

Руководство по контролю источников загрязнения атмосферы. ОНД-90. СПб., 1992. Ч. 1, 2.

Состояние и охрана окружающей среды Пермской области в 20001 г.: гос. доклад. Пермь.: Агенство «Стиль-МГ», 2002. 190 с.

Состояние и охрана окружающей среды Пермской области в 2003 г. – Пермь, 2004. 180 с.

Список приоритетных веществ, содержащихся в воздушной среде // М-во здравоохранения РФ. М., 1997. 40 с.

Справочник потребителя спутниковой информации / под ред. В.В. Асмуса, О.Е. Милехина. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 105 с.

Справочник по удельным показателям выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для некоторых производственных источников загрязнения атмосферы / под ред. В.Б. Миляева. СПб., 2002.

Тикуннов С.В. Географические информационные системы: сущность, структура, перспективы / С.В. Тикуннов // Итоги науки и техники. Сер. Картография. М.: Изд-во ВИНТИ, 1991. С. 6–80.

Толмачева Н.И. Основы метеорологических наблюдений / Н.И. Толмачева, Л.Н. Ермакова; Перм. ун-т. Пермь, 2005. 260 с.

Толмачева Н.И. Космические методы экологического мониторинга / Н.И. Толмачева, Л.С. Шкляева; Перм. ун-т. Пермь, 2006. 296 с.

Толмачева Н.И. Метеорологические радиолокаторы и радионавигационные системы управления воздушным движением / Н.И. Толмачева, О.Ю. Булгакова; Перм. ун-т. Пермь, 2007. 154 с.

Толмачева Н.И. Дистанционные методы исследования мезометеорологических процессов / Н.И. Толмачева/ Перм. ун-т. Пермь, 2010. 200 с.

Толмачева Н.И. Методы и средства гидрометеорологических измерений (для метеорологов) / Н.И. Толмачева/ Перм. ун-т. Пермь, 2011. 223 с.

Утехин В.Д. Мониторинг и проблемы служб слежения за природной средой. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем / В.Д. Утехин. – Л.: Гидрометеиздат, 1999. Т. II. 258 с.

Снижение негативного воздействия выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта на окружающую среду: Федеральная целевая программа / М-во транспорта РФ. М., 2001.

Френкель М.О. Межрегиональный экомониторинг Волжского бассейна / М.О. Френкель. Киров, 1997. 176 с.

Шкляева Л.С. Статистические методы в климатологии / Л.С. Шкляева; Перм. ун-т. Пермь, 2003. 128 с.

Экологические проблемы Северо-Запада России и пути их решения / под ред. С.Г. Инге-Вечтомова, К.Я. Кондратьева, А.К. Фролова. СПб., 1997. 528 с.

Bjorgo E. Analysis of merged SMMR-SSMI time series of Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978-1995 / E. Bjorgo, O.M. Johannessen, M.W. Miles // Geophysical Research Letters. – 1997. Vol. 24, № 4. P. 413-416.

Douglas D.C. Multisensor Satellite Monitoring of Arctic Sea-Ice in Conditions of Global Change and Detection of Contemporary Changes in Sea Ice and Ice Sheets / D.C. Douglas, G.I. Belchansky // Proc. of Conference on Global Change, Boulder, Colorado, USA. October 4-6. 2001. P. 3–8.

Ferster W. Cost, financing woes threaten navy project / W. Ferster // Space News. 1999. Vol. 10, № 34. P. 3–18.

Johannessen O.M. The slumbering bear of the Kara Sea / O.M. Johannessen, L.H. Petterson, L.P. Bobylev, V.V. Rastoskuev, E.V. Shalina, V.A. Volkov // GIS Europe. 1997. Vol. 6, №5. P. 20–22

GIS by ESRI. User's Guide. 1. Understanding GIS. The ARC/INFO Method. 2. PC ARC/INFO. 3. PC ARCPLOT. 4. PC ARCEDIT. 5. SML. USA, Redlans: Environmental System Research Institute, 1994.

Iannotta B. SPOT Image plans strategy of efficiency / B. Iannotta // Space News. 1999. Vol. 10, № 38. P. 16.

Учебное издание

***Толмачева Наталья Игоревна
Шкляева Людмила Сергеевна***

**КОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА**

Учебное пособие

Редактор *Л.В. Хлебникова*
Корректор *Н.И.Перова*
Компьютерная верстка *Н.И. Толмачевой*

Подписано в печать 20.04.2012. Формат 60х84 1/16.
Усл. печ. л.17,21. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел Пермского государственного национа-
льного исследовательского университета.
614990. Пермь, ул. Букирева, 15

Типография Пермского государственного национального
исследовательского университета
614990. Пермь, ул. Букирева, 15