

Владимирский государственный университет

Т. А. ТРИФОНОВА Н. В. МИЩЕНКО

**ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ
В ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Учебное пособие

Владимир 2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Т. А. ТРИФОНОВА Н. В. МИЩЕНКО

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ
В ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2023

ISBN 978-5-9984-1850-1

© Трифонова Т. А., Мищенко Н. В., 2023

УДК 574
ББК 20.1

Рецензенты:

Доктор географических наук, профессор
зав. кафедрой биогеографии Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова
С. М. Малхазова

Кандидат технических наук
доцент кафедры физики и прикладной математики
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
С. И. Абрахин

Трифонова, Т. А. Дистанционные методы в экологических исследованиях [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Т. А. Трифонова, Н. В. Мищенко ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023. – 192 с. – ISBN 978-5-9984-1850-1. – Электрон. дан. (10,1 Мб). – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод DVD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены физические основы дистанционного зондирования Земли, особенности спутников, используемых при проведении почвенного и экологического мониторинга. Приведены примеры различных исследований с применением материалов дистанционного зондирования.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 06.03.02 «Почвоведение» и 05.03.06 «Экология и природопользование». Может быть использовано при изучении дисциплин «Дистанционные методы инвентаризации и мониторинга почвенного покрова», «Экология», «Аэрокосмические методы в экологических исследованиях», а также при подготовке курсовых и дипломных проектов.

Рекомендовано для формирования общепрофессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 83. Табл. 10. Библиогр.: 49 назв.

ISBN 978-5-9984-1850-1 © Трифонова Т. А., Мищенко Н. В., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	7
1.1. Физические основы формирования изображения	9
1.2. Основные типы материалов дистанционного зондирования	10
1.3. Влияние атмосферы на съемку Земли из космоса.....	13
1.4. Влияние параметров орбит и атмосферы на качественные характеристики материалов дистанционного зондирования	14
1.5. Масштаб, обзорность и повторяемость снимков.....	20
1.6. Понятие о разрешении материалов дистанционного зондирования	21
1.7. Технология формирования изображения Земли в разных спектральных диапазонах.....	30
1.8. Лазерное дистанционное зондирование	36
<i>Вопросы к главе 1</i>	40
<i>Библиографические ссылки</i>	41
Глава 2. СПУТНИКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ. КОСМОДРОМЫ ...	42
2.1. Исторический обзор отечественных ресурсных и метеорологических спутников.....	42
2.2. Современная российская орбитальная группировка дистанционного зондирования	45
2.3. Зарубежные спутники, применяемые для изучения природных ресурсов.....	64
<i>Вопросы к главе 2</i>	79
<i>Библиографические ссылки</i>	79

Глава 3. ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ОСНОВЫ ТЕМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ.....	80
3.1. Визуальный анализ ДДЗ.....	82
3.2. Классификационные методы анализа.....	84
3.3. Спектральные профили.....	88
3.4. Зональные отношения.....	90
<i>Вопросы к главе 3</i>	103
<i>Библиографические ссылки</i>	103
Глава 4. СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	105
4.1. Космические эксперименты на борту Международной космической станции.....	105
4.2. Программа запуска малых космических аппаратов «УниверСат».....	115
4.3. Дистанционные методы в исследовании почвенного покрова и землепользовании.....	117
4.4. Изучение растительного покрова, его состояния и продуктивности.....	125
4.5. Космический мониторинг «цветения» водоемов.....	131
4.6. Использование ДДЗ в чрезвычайных ситуациях.....	141
4.7. Комплексная оценка почвенно-растительного покрова в бассейне реки.....	148
<i>Вопросы к главе 4</i>	161
<i>Библиографические ссылки</i>	161
Глава 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ....	163
Практическая работа № 1. Анализ информативности изображений, полученных в различных диапазонах электромагнитного спектра.....	166
Практическая работа № 2. Визуальное дешифрирование космических снимков.....	174

Практическая работа № 3. Создание карт земельных угодий по космоснимкам.....	181
Практическая работа № 4. оценка земельных угодий по материалам дистанционного зондирования.....	181
Практическая работа № 5. Оценка показателей продуктивности наземных экосистем по данным дистанционного зондирования	182
Практическая работа № 6. Автоматизированное дешифрирование космических снимков.....	183
Практическая работа № 7. оценка состояния земельных угодий с использованием NDVI	185
<i>Библиографические ссылки</i>	187
ТЕМЫ ДЛЯ ДОКЛАДОВ.....	189
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	190
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	191

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросам изменения состояния окружающей среды придается большое значение, поскольку все большие территории подвергаются антропогенному воздействию, в первую очередь из-за технического развития цивилизации, требующего новых энергетических ресурсов, а также из-за роста населения земного шара, что влечет за собой увеличение площади сельскохозяйственных земель и т. д. Указанные проблемы приводят к ухудшению экологического состояния окружающей среды, а иногда даже к катастрофе. Подобное техногенное воздействие на данном этапе развития человечества настолько серьезно, что нарушенные ландшафты уже не могут восстанавливаться самостоятельно, а значит, требуется их искусственное восстановление. Для принятия правильных управленческих решений в сфере экологии необходим непрерывный мониторинг происходящих в окружающей среде процессов. Поскольку территория нашей страны огромна, то такой объективный, непрерывный, оперативный мониторинг может быть обеспечен только при использовании материалов и методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) совместно с традиционными общепринятыми методами мониторинга.

Глава 1. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Дистанционное зондирование Земли – это метод получения информации с использованием аппаратуры, установленной на борту аэро- или космических аппаратов (КА), и основной источник поддержания оперативности и актуальности геоинформационной системы (ГИС). Одним из самых современных направлений ее развития считается сближение ГИС-технологий и обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) [1].

В процессе дистанционного зондирования (ДЗ) объекты, которые должны быть зарегистрированы съемочной аппаратурой, находятся на значительном расстоянии от нее (это могут быть сотни и тысячи километров). Благодаря этому происходит генерализация изображения, увеличивается обзорность – на одной снимке может быть отображен целый регион или полушарие Земли.

Космический снимок – двумерное изображение, полученное в результате дистанционной регистрации техническими средствами собственного или отраженного излучения и предназначенное для обнаружения, качественного и количественного изучения объектов, явлений и процессов путем дешифрирования, измерения и картографирования.

В съемочном процессе участвуют:

- источник электромагнитного излучения (Солнце, подстилающая поверхность, радар);
- снимаемый объект (подстилающая поверхность);
- передающая излучение среда (атмосфера Земли);
- средства приема и регистрации излучения (датчик на КА, т. е. устройство, собирающее отраженное от Земли или излученное Землей электромагнитное излучение, преобразующее его в электрический сигнал и представляющее сигнал в форме кода, удобного для передачи по каналам связи);
- средства бортовой обработки информации и передачи ее на пункты приема, носитель этих средств;
- средства приема и первичной обработки видеоинформации.

Благодаря использованию в процессе дистанционного зондирования специальной аппаратуры, на снимке могут быть зафиксированы

излучения с различными длинами волн (рентгеновское, ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное, радиоволны). Природно-антропогенные объекты различаются по своим способностям поглощать и отражать электромагнитное излучение, которое фиксируется камерами, что дает возможность на расстоянии идентифицировать объекты, изучать их свойства.

Свойства космических снимков

Обзорность снимков позволяет охватить съемкой большие территории на один момент времени, следовательно, их состояние будет зафиксировано при одинаковых условиях. Это дает возможность проводить глобальный или планетарный мониторинг.

Комплексное отображение компонентов геосферы – снимок фиксирует на один момент времени все антропогенные объекты и составляющие геосферы (биосферу, атмосферу, литосферу, гидросферу), что создает условия для изучения их взаимосвязей и взаимодействий.

Повторяемость съемки – может быть различной в зависимости от целей исследователей. Подобное свойство космоснимков позволяет регулярно, оперативно и объективно следить за состоянием объектов, что очень важно, например, для проведения мониторинга окружающей среды.

Генерализация изображения подразумевает обобщение изображения, может быть геометрической и тоновой. Процесс обобщения зависит от природных особенностей территории, состояния атмосферы, а также характеристик снимка (спектральный диапазон, разрешение, масштаб и др.).

Генерализация – важное достоинство космоснимков. Результатом генерализации является избавление от частных объектов на земной поверхности, упрощение форм, спрямление линий, обобщение цветов и тонов. Отдельные детали могут сливаться в единую структуру. Необходимую величину генерализации получают, используя специальные средства (например, можно выбрать подходящее разрешение и т. д.).

При генерализации на первый план выступают наиболее важные свойства, поэтому ее используют в ландшафтном картографировании для выделения ландшафтных структур, относящихся к различным

уровням. На генерализованных изображениях проявляется новое содержание, их можно использовать также и для тематического картографирования.

Однако генерализация может оказывать не только положительное влияние, но и затруднять процесс дешифрирования снимков и приводить к ошибкам, поскольку чрезмерное обобщение уменьшает точность картографирования.

1.1. Физические основы формирования изображения

Съемка Земли из космоса возможна потому, что объекты на ее поверхности испускают или отражают электромагнитные волны. Электромагнитный спектр включает совокупность электромагнитного излучения, которое классифицируется по длине волны и частоте (рис. 1.1).

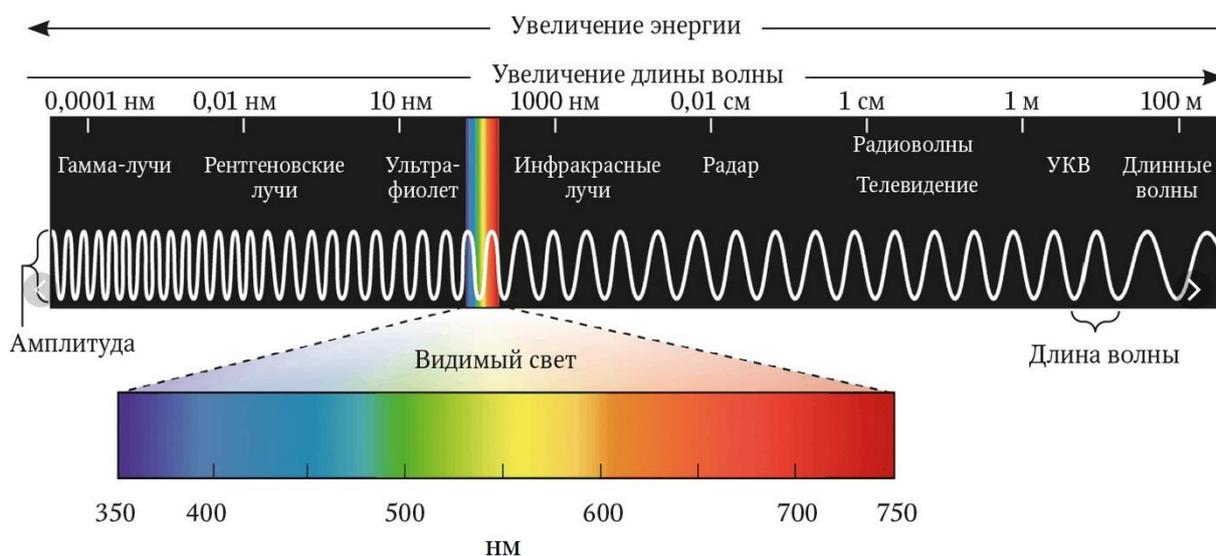


Рис. 1.1. Электромагнитный спектр

Съемочная аппаратура регистрирует различные виды излучений. Например, может фиксироваться отраженное объектами излучение Солнца (зависит от условий освещения). Также природные и антропогенные объекты сами могут быть источниками волн определенной длины (например, радиоволн); нагретые тела испускают тепловое излучение. В дистанционном зондировании применяется и искусственное излучение: оно создается источником на космическом аппарате,

направляется на Землю, отражается и фиксируется специальным устройством.

При проведении дистанционного зондирования в основном используются ультрафиолетовое (УФ), видимое, инфракрасное (ИК) излучения и радиоволны. Виды ИК-излучения:

- а) ближнее ИК (0,8 – 1,5 мкм);
- б) среднее ИК (1,5 – 3 мкм);
- в) дальнее (больше 3 мкм).

В ближнем и среднем ИК-диапазоне преобладает отраженное излучение Солнца, а в дальнем (тепловом) – собственное излучение Земли.

Длины волн УФ и видимого излучения обычно выражают в нанометрах (нм), ИК – микрометрах (мкм), радиоизлучения – в миллиметрах (мм), сантиметрах (см), дециметрах (дм), метрах (м).

1.2. Основные типы материалов дистанционного зондирования

В зависимости от спектрального диапазона, задействованного в космической съемке, дистанционные данные подразделяются на три основных типа:

- снимки в видимом и ближнем инфракрасном (световом) диапазоне;
- снимки в тепловом инфракрасном диапазоне;
- снимки в радиодиапазоне.

По количеству одновременно используемых при съемке спектральных каналов съемочные системы могут быть панхроматическими (однозональными) и многозональными.

Панхроматический снимок представляет собой изображение, выполненное в одной широкой зоне спектра, которая соответствует его видимому диапазону. Панхроматическое изображение выглядит черно-белым; оно регистрирует суммарное отражение природных объектов, может использоваться в качестве точной топографической основы, а также совместно с многозональными снимками в процессе цифровой обработки, совмещаться с многозональной информацией более низкого разрешения (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Панхроматический снимок

Многозональные снимки – это серии снимков, сделанных одновременно в нескольких узких спектральных зонах (каналах). Чаще всего каналов около 10. Съемку с использованием большого числа (более 10) узких съемочных зон называют *гиперспектральной*.

Многозональные снимки позволяют тщательнее распознавать изучаемые объекты. Снимок в одной зоне выглядит как черно-белый (рис. 1.3). Изучать изображения можно как в каждой зоне отдельно, так и комбинировать каналы. В результате комбинации каналов получают *синтезированные изображения*, которые в зависимости от выбранных зон спектра могут быть выполнены в реальных цветах или ложных.

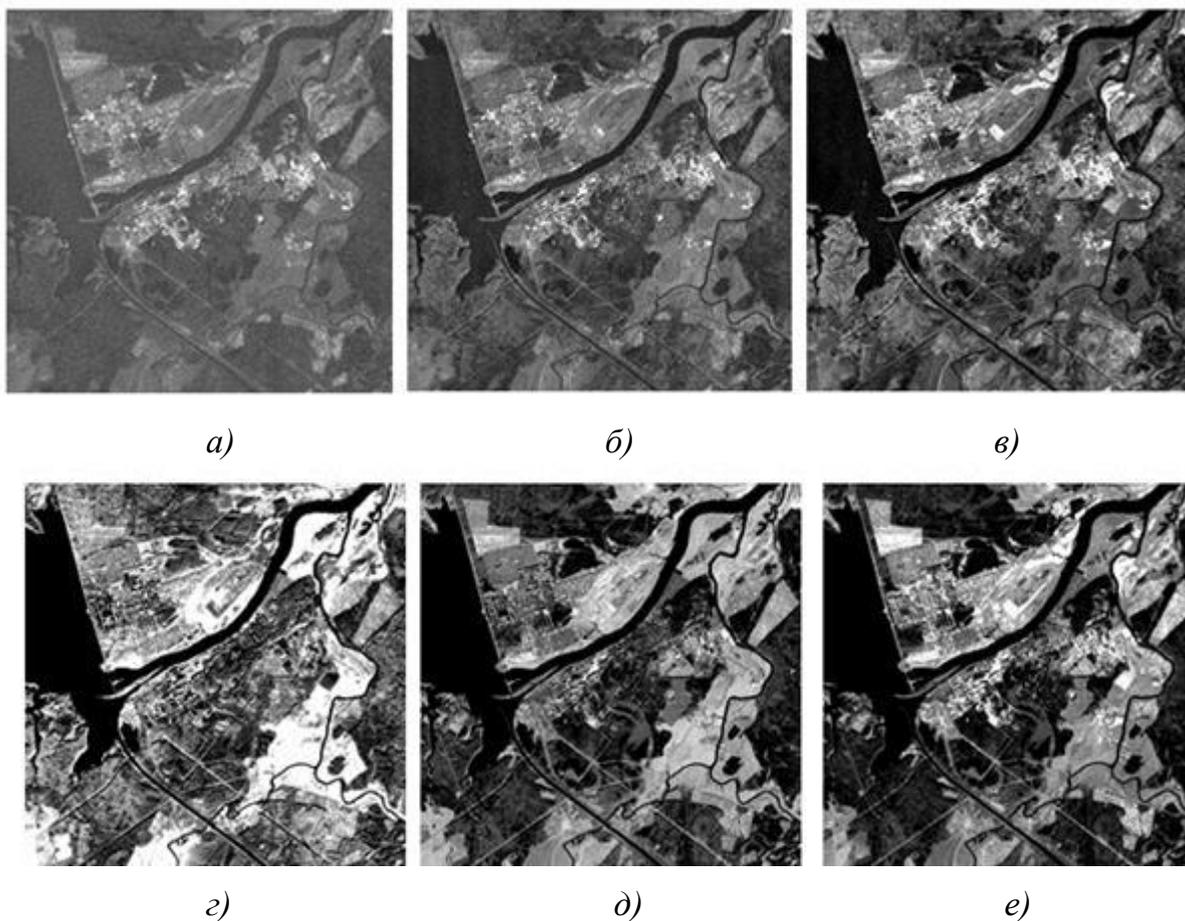


Рис. 1.3. Пример многозонального снимка территории в районе г. Дубна Московской области, полученные с КА Landsat-7 в диапазонах: а – 0,45 – 0,52 мкм; б – 0,52 – 0,60 мкм; в – 0,63 – 0,69 мкм; г – 0,76 – 0,90 мкм; д – 1,55 – 1,75 мкм; е – 2,08 – 2,35 мкм [2]

Для получения изображений, соответствующих реальным цветам, используют «синий – зеленый – красный» спектральные каналы.

Псевдоцветные изображения создаются в каналах, которые не воспринимает глаз человека, – это ближний и средний ИК-диапазоны, тепловые каналы, радиодиапазон. Для просмотра каналам придается определенный цвет, а также используется синтез цветов.

В том случае, когда появляется необходимость следить за объектом, имеющим резкий контраст с окружающей средой, в одном узком диапазоне спектра можно использовать спектрзональные изображения, т. е. изображения, полученные отдельно в нужном спектральном интервале. Такие изображения называются *спектральными*.

1.3. Влияние атмосферы на съемку Земли из космоса

Влияние атмосферы на съёмку из космоса проявляется в следующих процессах: экранирующее влияние облачности, поглощение солнечных лучей, рассеивание, влияние атмосферной дымки и др. [3; 4].

Облачность обычно закрывает более половины территории земного шара, а некоторые участки большую часть года остаются закрытыми плотными облаками. Облака создают помехи для проведения дистанционного зондирования во многих диапазонах электромагнитного спектра. Примером затруднений, создаваемых облаками, может служить работа спутника «Ландсат», который облетает всю территорию земного шара за 18 суток и, следовательно, потенциально за это время может покрыть ее съемкой, но при условии, что этому не будет препятствовать облачность. В реальности спутнику потребуется 10 лет.

Необходимо минимизировать отрицательное влияние облачности и знать условия ее распространения на различных участках. Для этого были проведены специальные исследования по классификации условий облачности на основе данных статистики по ее распределению, собранных метеоспутниками, и составлены карты, характеризующие глобальное распределение облачности. Наиболее благоприятные для проведения съемок – субтропические районы, наибольшие затруднения наблюдаются в Антарктике и экваториальных тропических зонах. Статистические исследования также показали, что облачность над каждой точкой земного шара, как правило, сохраняется не более 3 – 5 дней.

Поглощение лучей атмосферой. В безоблачных условиях не все лучи проходят через атмосферу, так как она поглощает часть их. Однако необходимо учитывать, что поглощение зависит от длины волны и процесс является избирательным.

Через атмосферу не проходит большая часть гамма-излучения, рентгеновского и ультрафиолетового, а также коротковолновая часть видимой зоны, к которой относятся фиолетовая и сине-зеленая зоны спектра. В инфракрасной области задерживаются средняя и дальняя (тепловая) области.

Для того чтобы уменьшить влияние на качество съемки поглощения лучей атмосферой, выбираются зоны электромагнитного спектра, где этот процесс минимальный или отсутствует. Данные участки называются «окнами прозрачности»; их достаточно много в различных зонах спектра (рис. 1.4). Так, дальнее (тепловое) инфракрасное излучение хорошо поглощается в атмосфере парниковыми газами, но и в этом диапазоне можно выполнять съемку, если использовать три «окна прозрачности»: они узкие, но указанные волны хорошо проходят через атмосферу.

Хорошей прозрачностью атмосфера обладает, например, в радиодиапазоне.

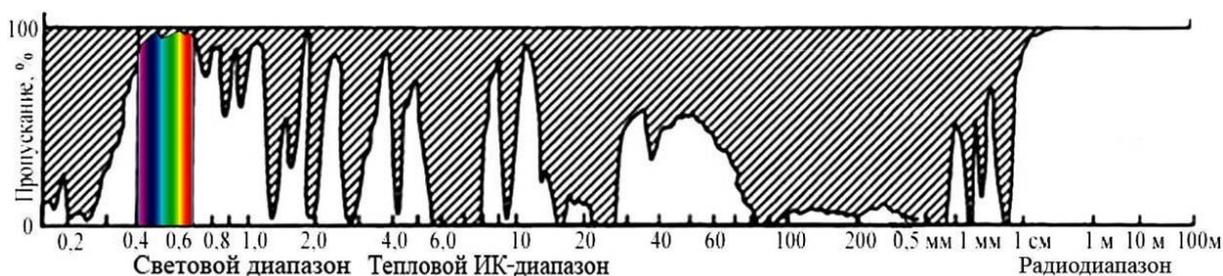


Рис 1.4. «Окна прозрачности»

Рассеивание лучей и дымка. Во время прохождения через большую толщу атмосферы лучи не только поглощаются, но и рассеиваются. Этот процесс проходит по-разному в разных участках спектра. Например, наиболее этому подвержены синяя и голубая зоны спектра видимого диапазона. Рассеивание определяется состоянием и чистотой атмосферы и исключить влияние этого фактора невозможно. Чем больше пылевых частиц в воздухе, тем сильнее рассеивание. Атмосферная дымка изменяет передачу цвета, ухудшается контрастность снимка.

1.4. Влияние параметров орбит и атмосферы на качественные характеристики материалов дистанционного зондирования

Дистанционное зондирование проводится с помощью аппаратуры, находящейся на борту космического аппарата, который движется по определенной орбите. Ее характеристики оказывают прямое влия-

ние на качественные характеристики получаемых данных. К параметрам орбиты, которые необходимо учитывать, относятся высота, форма, наклон, время обращения, положение орбиты по отношению к Солнцу.

Форма орбит. Для дистанционного мониторинга Земли в основном используется группировка спутников, находящихся на замкнутых орбитах, которые могут быть круговыми или эллиптическими (рис. 1.5).

Для наблюдения из космоса целесообразнее использование круговых орбит, поскольку на таких орбитах спутник движется примерно на одинаковом расстоянии от Земли. Некоторые колебания расстояния обусловлены тем, что земная поверхность имеет неправильную геометрическую форму. Для эллиптических орбит расстояние до поверхности Земли изменяется от минимального в перигее до максимального в апогее.

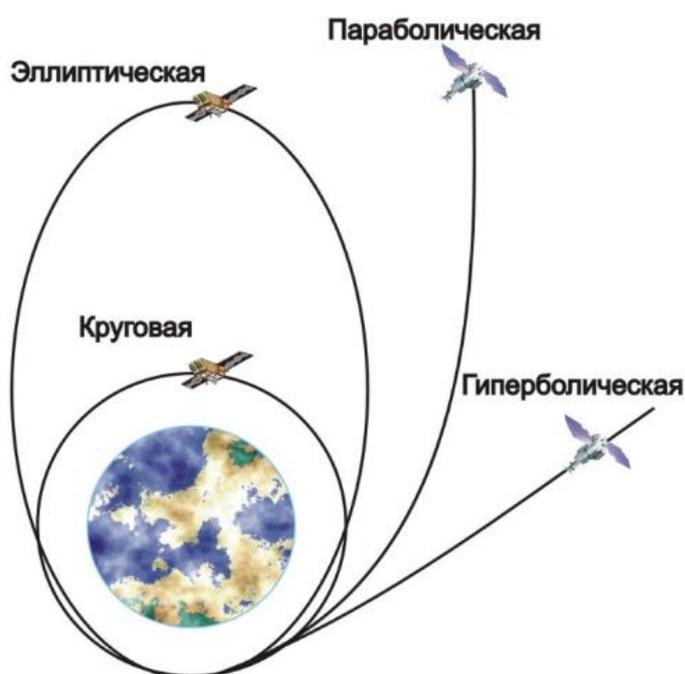


Рис. 1.5. Форма орбит

Наклонение орбиты (i) представляет собой угол между плоскостью орбиты и плоскостью экватора (рис. 1.6).

Различают орбиты *экваториальные*, где отклонение отсутствует, *полярные* (с наклоном 90°) и *наклонные*, занимающие промежуточное положение. Наклонные орбиты могут быть *прямыми* (имеют северо-

восточное направление восходящего витка) и *обратными* (имеют северо-западное направление восходящего витка).

При движении по орбите спутник проделывает путь, который называется **трассой**, являющейся, по сути, проекцией орбиты на земную поверхность (рис. 1.7).

Наклонение определяет широтный пояс, охватываемый съемкой. Например, спутники, имеющие наклон орбиты 30° , покрывают зону между 30° с. ш. и 30° ю. ш.

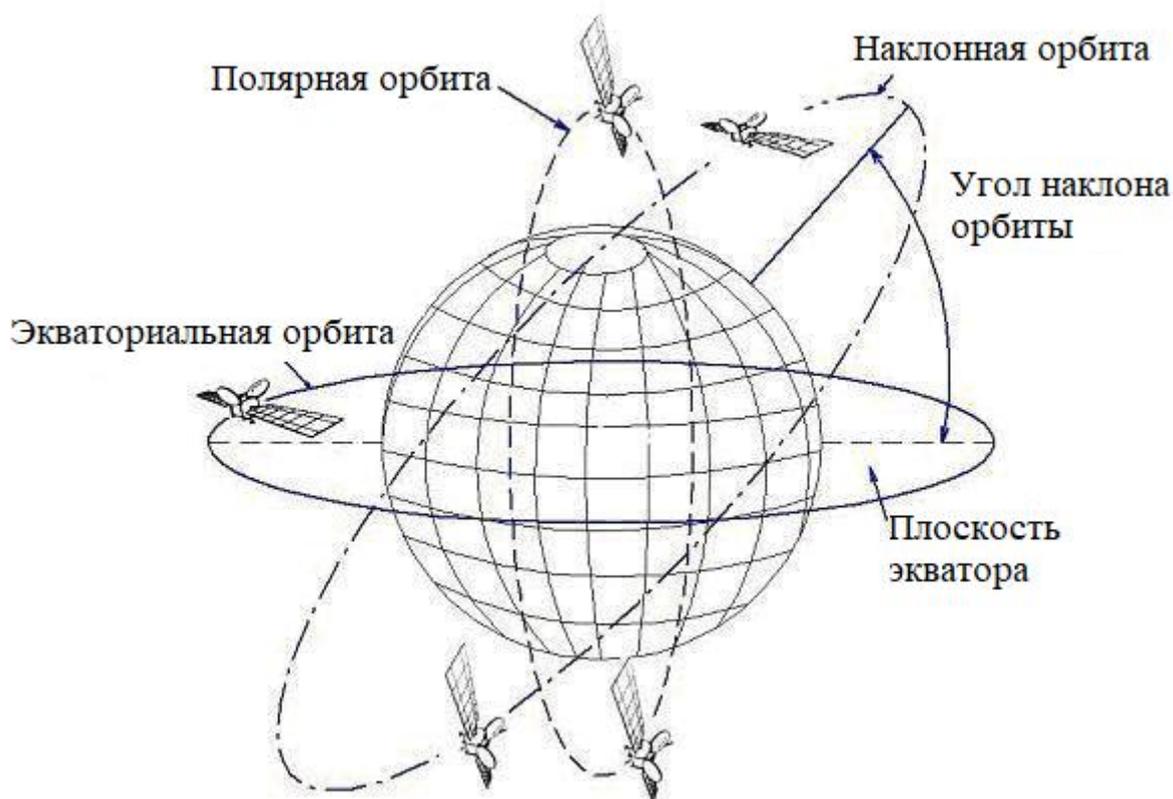


Рис. 1.6. Наклонение орбиты

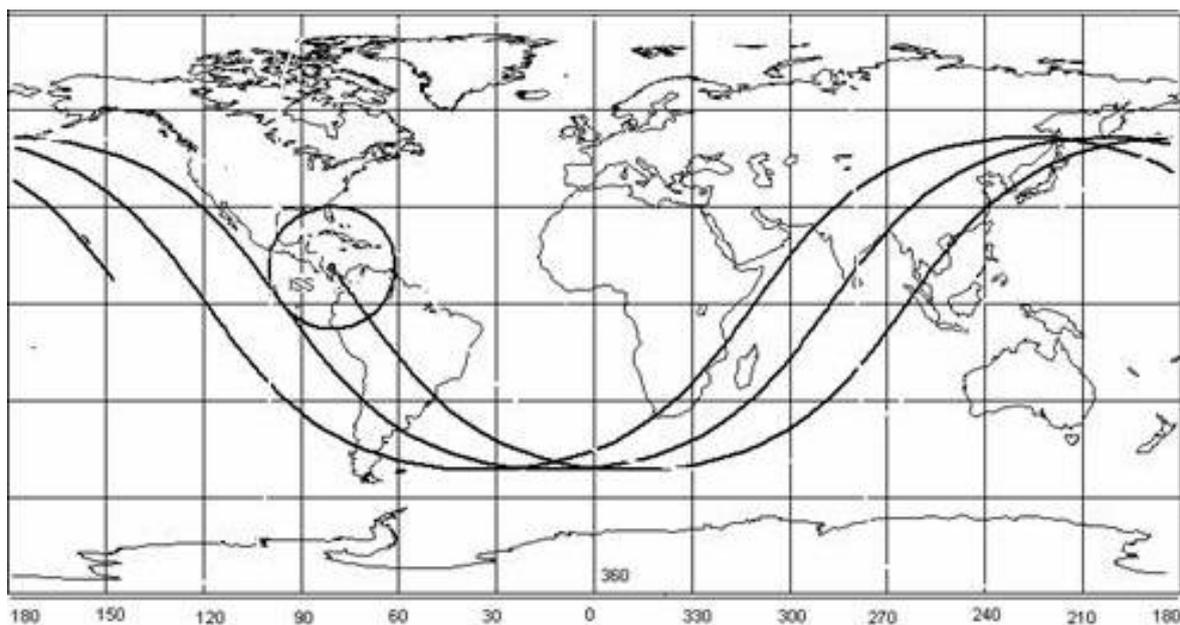


Рис. 1.7. Трасса спутника

Высота. В зависимости от предназначения спутники могут находиться на орбитах высотой от нескольких сотен километров до десятков тысяч километров. Нижняя граница высоты полета спутников определяется земной атмосферой. Чем граница ближе к поверхности Земли, тем сильнее будет тормозить аппарат. Аппараты, находящиеся на высоте 200 км, нуждаются в постоянной коррекции курса, иначе они сойдут с орбиты за несколько дней. Средняя продолжительность существования объектов на 400-километровой орбите (на такой высоте летает МКС) составляет примерно один год. Спутники, находящиеся на орбитах более 800 км, практически не подвергаются воздействию земной атмосферы и могут пребывать в космосе длительное время.

По высоте можно выделить три группы наиболее часто используемых орбит (рис. 1.8):

100 – 500 км – орбиты для пилотируемых кораблей и орбитальных станций (чаще 200 – 400 км);

500 – 2000 км – орбиты для ресурсных и метеорологических спутников (ресурсные – 600 – 900 км, метеорологические – 900 – 1400 км);

36 000 – 40 000 км – орбиты для геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ). Скорость их движения равна скорости

вращения Земли, поэтому они постоянно находятся над одной ее точкой.

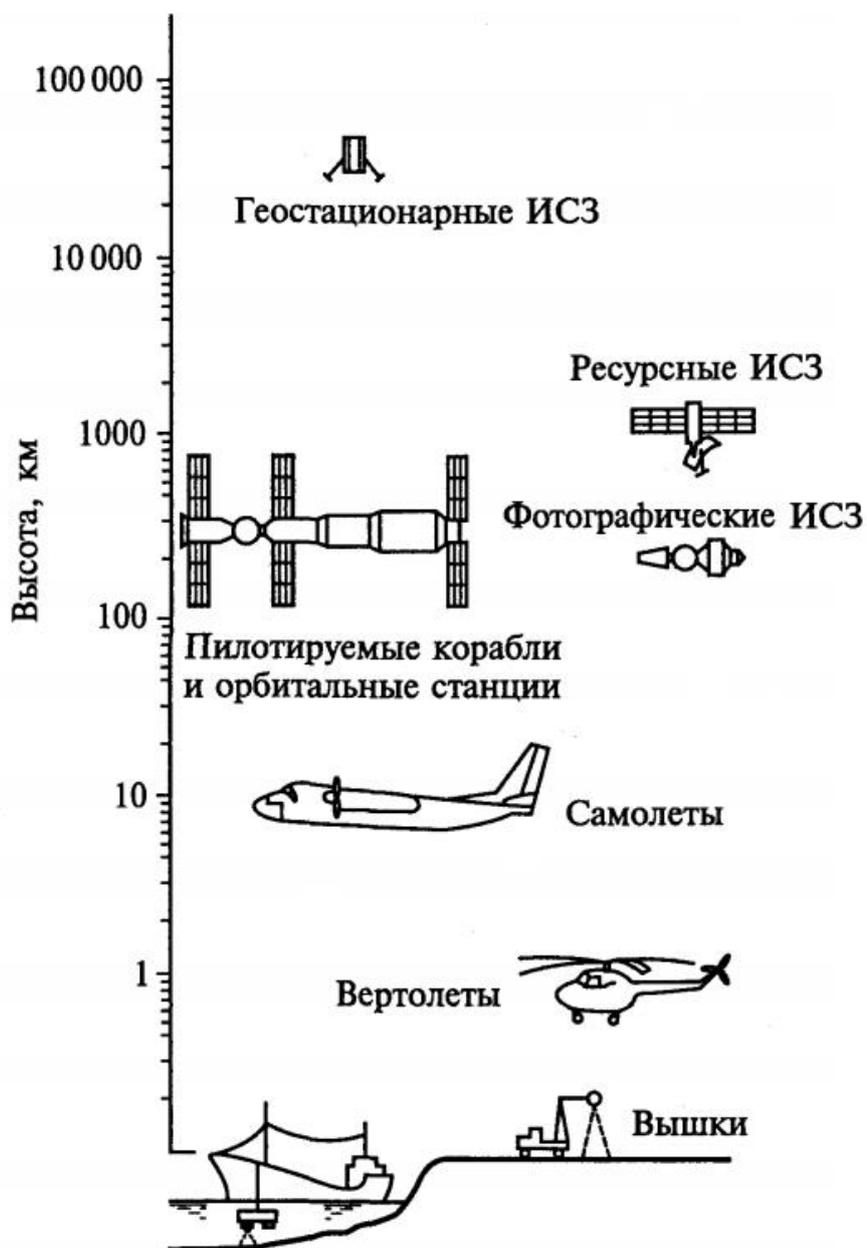


Рис. 1.8. Высоты, на которых находятся аппараты дистанционного зондирования

Период обращения (T) – время, за которое спутник делает один виток вокруг Земли; оно определяет количество витков за сутки и *межвитковое расстояние*.

Если спутник движется по околоземной орбите со скоростью 11 км/с, то один оборот вокруг Земли займет 1,5 ч; за 24 ч он сделает примерно 16 витков. В данном случае межвитковое расстояние будет

составлять $22,5^\circ$, что соответствует 2500 км на экваторе, а один снимок в этом случае способен охватить территорию площадью 100 – 200 км. Соответственно, между снимками, сделанными на соседних витках, будут разрывы. Если трасса спутника будет повторяться каждые сутки, то разрывы сохранятся и территория не будет заснята. Для того чтобы покрыть съемкой всю территорию, трассу рассчитывают таким образом, чтобы каждые сутки спутник смещался, что позволит аппаратуре фотографировать соседние участки. Таким образом, постепенно, за несколько суток можно сфотографировать всю территорию. Такую возможность дают квазипериодические орбиты.

Для постоянного наблюдения одного и того же участка Земли используют *геостационарные орбиты* ($T = 24$ ч, высота – 36 000 км). Геостационарные спутники размещают на экваториальной орбите. Они как бы висят над одной точкой, поэтому несколько таких спутников, расположенных на равных расстояниях друг от друга, обеспечивают постоянный обзор всей поверхности Земли, за исключением полярных областей.

Суточные геосинхронные периодические спутники находятся на наклонной орбите ($T = 24$ ч). Космический аппарат будет появляться над одной и той же точкой через каждые 24 ч.

Положение орбиты по отношению к Солнцу – это угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце. Для того чтобы получить снимки при постоянных условиях освещения, спутники выводят на *солнечно-синхронные орбиты*. Двигаясь по ним, спутник проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время. Условия освещения будут одинаковыми при нахождении спутника над одной и той же территорией. На солнечно-синхронной орбите спутники могут перемещаться над границей освещенной и неосвещенной Солнцем территории или всегда быть в освещенной области, или наоборот – всегда в ночной. Солнечно-синхронные орбиты в большинстве случаев – круговые, характеризуются высотой 600 – 800 км и наклоном около 98° . Если будет увеличиваться высота полета ИСЗ, то и наклон орбиты необходимо изменить. В результате он не будет охватывать съемкой полярные районы.

1.5. Масштаб, обзорность и повторяемость снимков

Масштаб и обзорность снимков

По **масштабу** космические снимки делятся на следующие группы:

1) *мелкомасштабные* (от 1: 10 000 000 до 1: 100 000 000) – их получают с геостационарных и метеоспутников на околоземных орбитах;

2) *среднемасштабные* (от 1:1000 000 до 1:10 000 000) – их получают с пилотируемых кораблей и орбитальных станций;

3) *крупномасштабные* (крупнее 1 : 1 000 000) – их получают со специальных картографических спутников.

Обзорность характеризует площадь, которую охватывает снимок. По данному параметру снимки классифицируются следующим образом:

1) *глобальные* – обеспечивают обзор целого полушария Земли; подобные снимки можно получить с геостационарных спутников. Снимки охватывают территории площадью в десятки и сотни миллионов квадратных километров;

2) *региональные* – содержат изображение части материка или крупного региона; такие изображения можно получить с метеорологических и ресурсных спутников. Охватывают территории площадью в миллионы квадратных километров. Ширина зоны охвата съемкой варьируется от 500 до 3000 км;

3) *локальные* – на них отражается часть региона; для их получения используют орбитальные станции, ресурсные и картографические спутники. Снимки обеспечивают обзор территории в десятки тысяч километров.

Повторяемость съемки

Для проведения экологического мониторинга, исследования ландшафтов, природно-антропогенных объектов, кроме технических и пространственных параметров съемки, важны ее временные характеристики и повторяемость. Выделяют следующие виды снимков:

1. *Съемка с периодической повторяемостью*. Временной интервал между съемкой, зависящий от особенностей орбиты и съемочной аппаратуры, может существенно различаться и составлять от не-

скольких минут до 16 – 18 сут. Периодическую повторяемость обеспечивают практически все спутники на околоземных орбитах, а промежуток между съемкой выбирается исходя из возможностей аппаратуры и целевого назначения материалов дистанционного зондирования. Геостационарные спутники находятся над одним районом Земли и позволяют проводить многократную внутрисуточную съемку. Метеорологические спутники обеспечивают ежесуточную съемку, т. е. за сутки они облетают и фотографируют всю земную поверхность. У ресурсных спутников временной интервал больше и зависит от пространственного разрешения сканеров. Аппаратура среднего разрешения позволяет обеспечить повторяемость в 5 сут. Аппаратура высокого разрешения имеет меньший охват территории, соответственно, больше времени уходит на съемку всей поверхности Земли, поэтому периодичность будет составлять 16 – 18 сут.

2. *Периодическая, ограниченно регулируемая съемка* задействуется в том случае, когда нет необходимости постоянно наблюдать за объектами. Съемка выполняется редко, но при необходимости интервал может быть уменьшен.

3. *Регулируемая съемка.* Период получения материалов дистанционного зондирования в этом случае полностью регулируется оператором, имеется возможность выбирать как территорию, так и временной интервал. Такой вариант дистанционного зондирования можно реализовать на орбитальных станциях и фотографических спутниках, работающих непродолжительное время.

1.6. Понятие о разрешении материалов дистанционного зондирования

В дистанционном зондировании используют четыре типа разрешения: спектральное, радиометрическое, временное, пространственное.

Спектральное разрешение – ширина спектральной зоны съемки, измеряется нанометрами (нм) или микрометрами (мкм). Снимки различаются по спектральному разрешению.

Низким считается спектральное разрешение в сотни нанометров. Оно характерно для панхроматических снимков и снимков, получаемых инфракрасными радиометрами.

Среднее спектральное разрешение (около 100 нм) характерно для мультиспектральных снимков, которые делят весь снимаемый диапазон на 5 – 10 спектральных каналов (зон). Чаще всего изображение состоит из трех основных цветов (синий, зеленый, красный) и нескольких инфракрасных частей.

Самое высокое пространственное разрешение имеют *гиперспектральные снимки* (до 10 нм). Они делят спектр на множество узких диапазонов (примерно 100 – 200 каналов). Гиперспектральные снимки не так доступны, как мультиспектральные. Космических аппаратов, на борту которых установлены гиперспектральные сенсоры, немного (рис. 1.9).

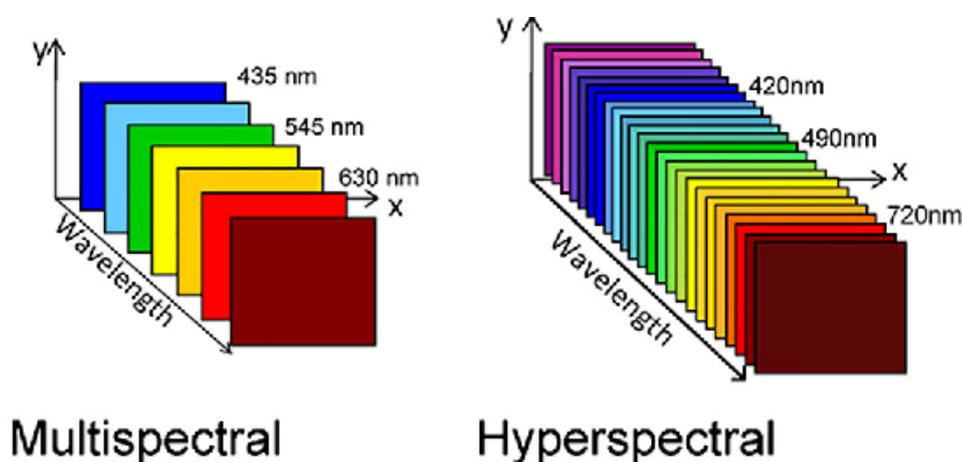


Рис. 1.9. Мультиспектральная и гиперспектральная съемка

Повышение спектрального разрешения позволяет подробнее классифицировать объекты, например на основе знаний о полосах поглощения воды, хлорофилла, минералов, газов в атмосфере. Так, например, первый канал Landsat TM чувствителен к энергии между 0,45 и 0,52 мкм в видимой части спектра. Спектральные каналы могут быть узкими, как, например у третьего канала Landsat TM, чувствительность которого находится между 0,63 и 0,69 мкм, или широкими, как у панхроматического сенсора SPOT (0,51 – 0,73 мкм).

Радиометрическое (яркостное) разрешение – это число уровней яркости, регистрируемых приемником излучения. Оно может быть выражено также в битах (2 уровня – 1 бит, 4 уровня – 2 бит, 16 уровней – 4 бит, 64 уровня – 6 бит, 256 уровней – 8 бит, 1024 уровня – 10 бит).

Временное разрешение – максимальная частота получения изображения одной и той же территории данным типом сенсоров.

Пространственное разрешение – это минимальная линейная величина объекта, которая отображается на снимке, или участок на земле, которому соответствует каждый пиксель на изображении. Снимок пространственным разрешением 1 м имеет размер пиксела 1×1 м. Следовательно, наилучшее пространственное разрешение описывается наименьшим значением. Так, пространственное разрешение 79 м хуже, чем пространственное разрешение 10 м (рис. 1.10).

Нельзя путать термины «масштаб» и «пространственное разрешение», так как масштаб – это отношение расстояния на карте к соответствующему реальному расстоянию на земле. Масштаб съемки менее важен, чем разрешение, поскольку, как правило, в нем не работают, а увеличивают снимки в несколько раз; чем выше разрешение, тем большее увеличение можно использовать.

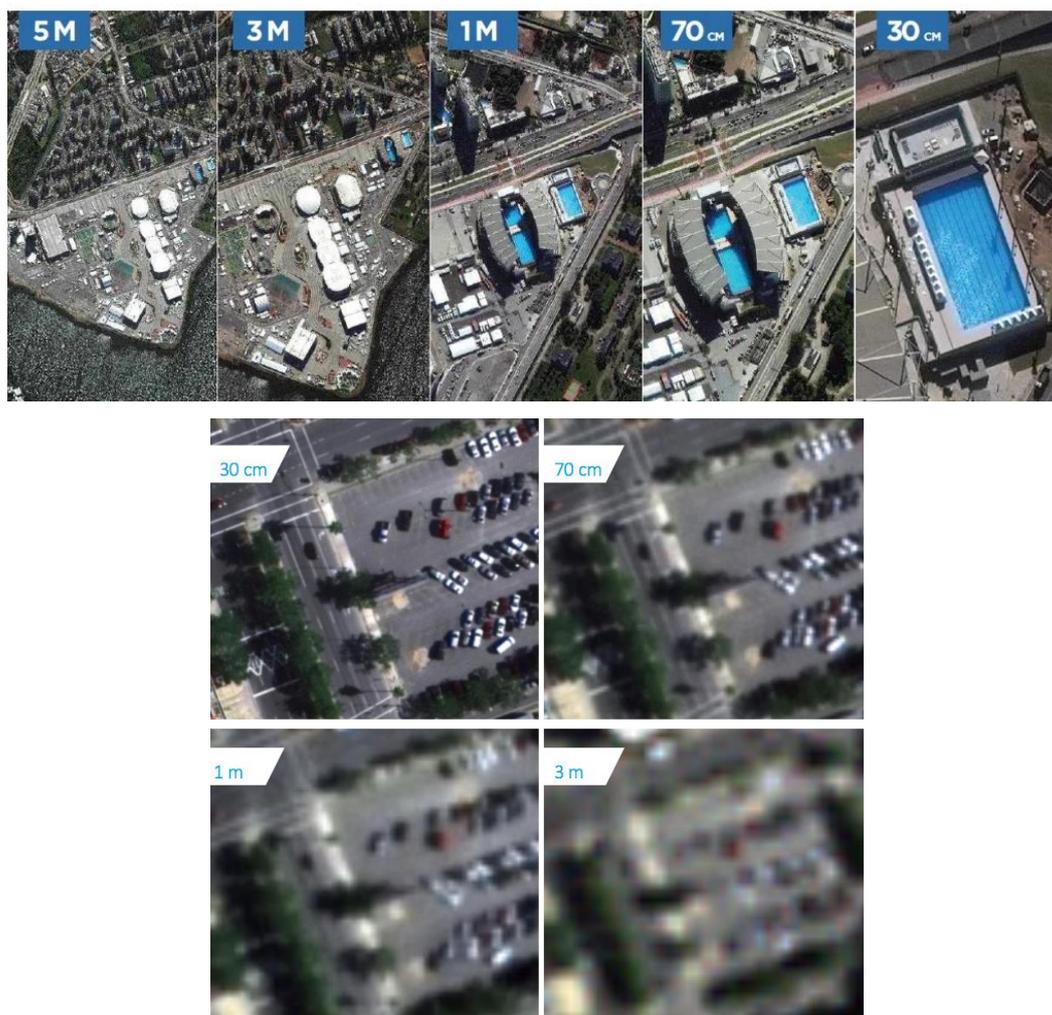


Рис. 1.10. Снимки с разным пространственным разрешением

Понятие пикселя. Цифровые материалы дистанционного зондирования, которые получают с использованием современных сканеров, относятся к растровым изображениям и являются матрицей элементов, которые называют пикселями. Один пиксель отражает наименьший участок поверхности Земли. Понятия «пиксель» и «пространственное разрешение» взаимосвязаны, но характеризуют разные объекты. Пространственное разрешение – это характеристика съёмочной аппаратуры, а пиксель характеризует изображение, которое передает данный сенсор. Так, если пространственное разрешение сканера составляет 10 м, то каждый пиксель будет соответствовать участку поверхности размером 10×10 м. Если исходное изображение уменьшить в четыре раза, то каждый пиксель будет соответствовать участку размером 40×40 м, а пространственное разрешение остается тем же. Пиксели могут быть чистыми и смешанными. Чистые пиксели содержат только однородную информацию. Если в пикселе содержится разнородная информация, то его называют смешанным.

Числовое значение чистого пикселя характеризует усредненную яркость частей объекта определенного класса. Числовое значение смешанного пикселя – это усреднение спектральных откликов объектов разного типа. Количество смешанных пикселей возрастает по мере снижения пространственного разрешения. Вместе с тем повышение пространственного разрешения за счет увеличения числа пикселей приводит к повышению стоимости цифровых снимков.

В настоящее время нет единой **классификации типов пространственного разрешения**. Наиболее часто используют следующее разделение снимков по уровню их разрешения:

- снимки очень низкого разрешения (десятки километров);
- низкого разрешения (километры);
- среднего разрешения (сотни метров);
- высокого разрешения (10 – 100 м);
- сверхвысокого разрешения (менее 10 м).

Съёмку среднего разрешения (сотни метров) активно используют в метеорологии и мониторинге глобальных процессов на Земле. С ее помощью специалисты оперативно получают всю информацию о состоянии атмосферы нашей планеты и процессах, протекающих в ней – таких как формирование ураганов, пылевых бурь и т. д. Спутники со средним пространственным разрешением – основной источ-

ник информации о состоянии морей и океанов, например о ледовой обстановке. Основными преимуществами этих снимков считаются оперативность получения данных (до одного раза в час) и глобальность охвата. Например, КА Terra MODIS имеет ширину полосы охвата в 2330 км (рис. 1.11).

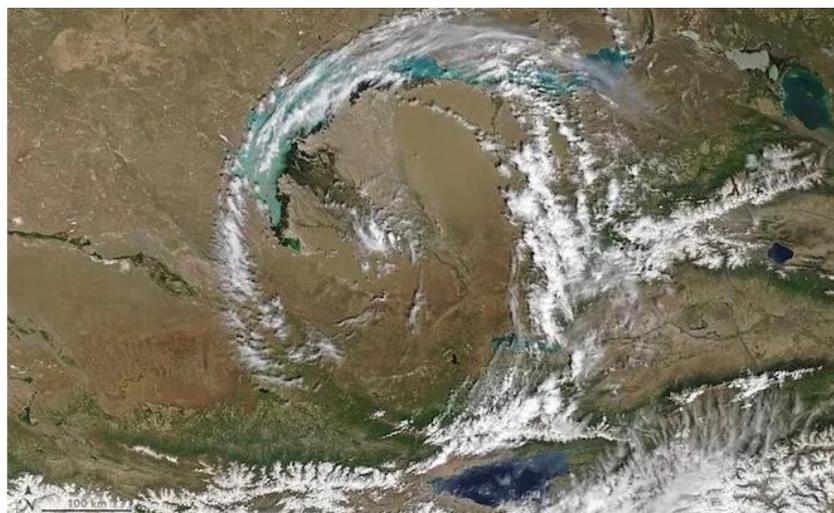


Рис. 1.11. Изображение территории Казахстана, полученное со спутника Terra MODIS (пространственное разрешение 250 м)

Космическая съёмка со средним разрешением широко используется многими государственными структурами (например, МЧС и Гидрометцентр). Данный вид дистанционного зондирования применяют в экологическом мониторинге, при контроле пожаров, наводнений, оценке ущерба от стихийных бедствий, мониторинге снежного покрова, паводков и др. Снимки среднего разрешения важны в составлении прогноза погоды для крупного региона и в целом для мониторинга климатических изменений на государственном уровне.

Съёмка высокого разрешения (10 – 100 м) используется чаще всего. Исследователи всего мира применяют материалы дистанционного зондирования высокого разрешения для решения самых разнообразных задач, а студенты с их помощью изучают методы аэрокосмического мониторинга, правила дешифрирования объектов, космическую съёмку и методы её обработки. Сканеры, выполняющие съёмку высокого разрешения, обычно характеризуются наличием большого количества спектральных диапазонов. Пример снимка высокого разрешения, который получен аппаратурой, установленной на спутнике Landsat-8, приведен на рис. 1.12.



*Рис. 1.12. Снимок со спутника Landsat-8
(пространственное разрешение 15 м)*

Снимки высокого разрешения используются в различных областях, например:

- мониторинг развития сельскохозяйственных культур;
- инвентаризация сельскохозяйственных угодий, создание планов землепользования, точечное земледелие;
- поиск полезных ископаемых;
- мониторинг мелких и средних водоёмов;
- мониторинг чрезвычайных ситуаций;
- инвентаризация и оценка состояния лесов;
- широкий круг задач в области охраны окружающей среды и т. д.

По данным высокого пространственного разрешения также можно проводить работы по созданию и обновлению топографических карт масштабом от 1:100 000 и меньше. Именно данные высокого пространственного разрешения большинство популярных приложений используют в качестве единой подложки с космическими снимками всей территории Земли. Еще одним важным преимуществом данных снимков является то, что благодаря большой площади снимка (200 – 300 км по ширине) покрытие обновляется с хорошей регулярностью – каждые 2 – 3 дня на одну и ту же территорию.

К спутникам, несущим аппаратуру высокого пространственного разрешения, относятся: «Метеор-М», Landsat-8, Sentinel-2, Terra Aster и др. (рис. 1.13, 1.14).

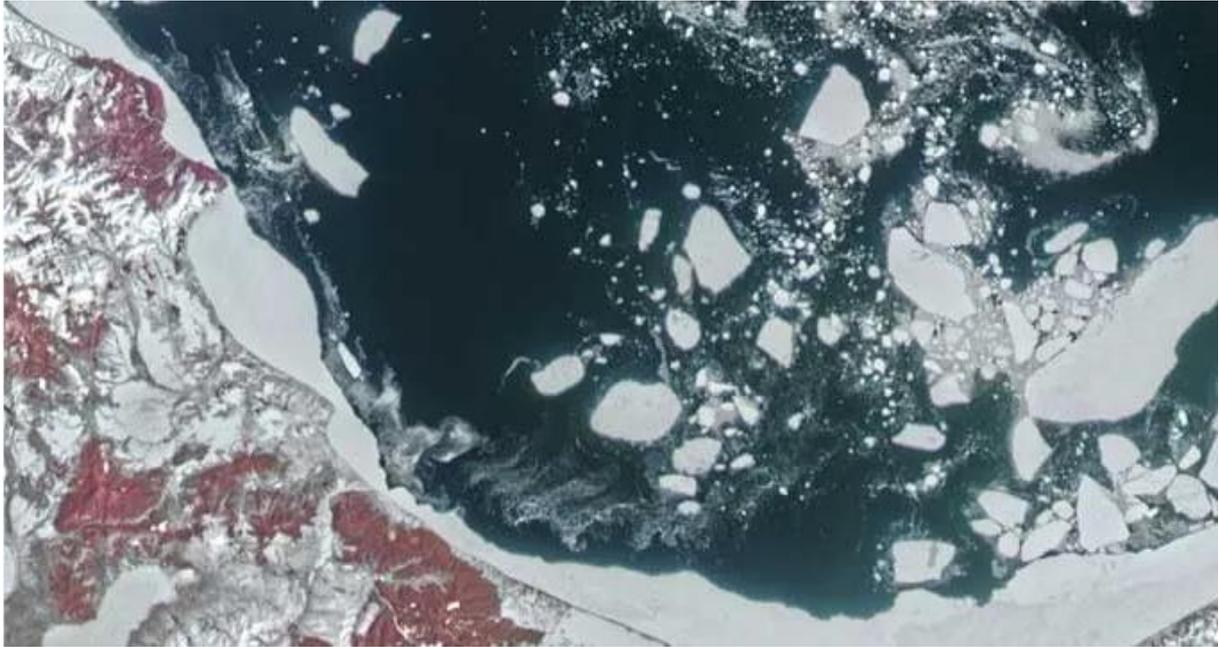


Рис. 1.13. Снимок со спутника «Метеор-М» (пространственное разрешение 50 м)

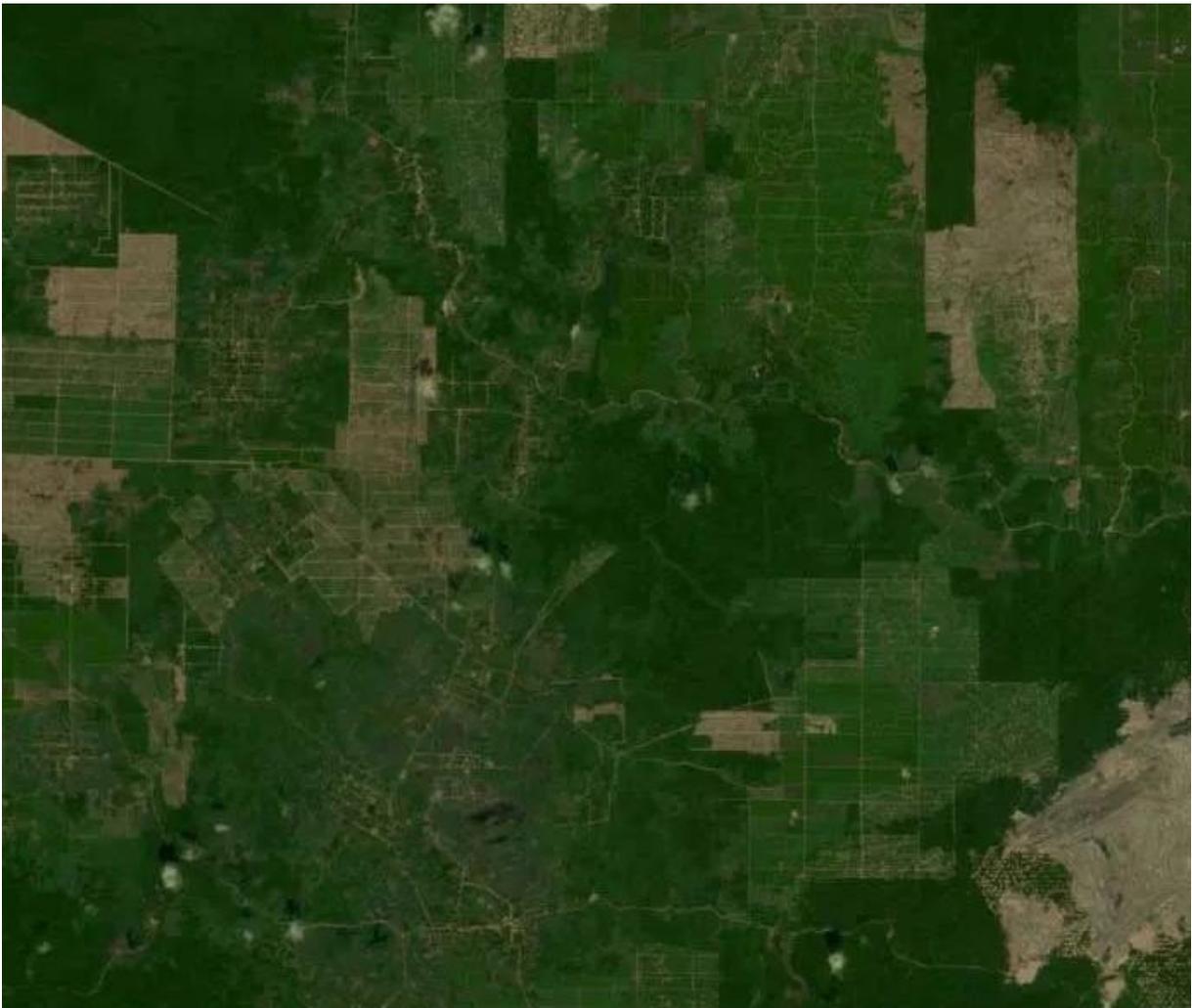


Рис. 1.14. Снимок со спутника Deimos-1 (пространственное разрешение 22 м)

Однако снимки с высоким разрешением не всегда позволяют решить поставленные задачи. В определенных ситуациях необходимо использовать более высокое разрешение.

Снимки сверхвысокого разрешения (менее 10 м). Впервые подобные космические снимки были получены в 1980-е годы. Первоначально сканеры высокого разрешения были установлены на военных спутниках и применялись в разведывательных целях. Советский спутник «Комета» имел камеру КВР-1000, которая обеспечивала съемку с пространственным разрешением 2 м.

В современном мире материалы со сверхвысоким пространственным разрешением стали дешевле и доступнее, их качество совершенствуется, поэтому они широко применяются. Создание группировки PlanetScore дало возможность обновлять покрытие каждые сутки.

Основные направления использования снимков сверхвысокого разрешения:

1. Создание и обновление топографических и специальных карт вплоть до масштаба 1:25 000.
2. Создание цифровых моделей рельефа с точностью 5 – 10 м по высоте.
3. Инвентаризация и контроль строительства объектов инфраструктуры, транспортировки и добычи нефти и газа.
4. Мониторинг экологического состояния территорий в районах добычи, переработки, транспортировки нефти и газа, других полезных ископаемых.
5. Обновление топографической подосновы для разработки проектов схем территориального планирования муниципальных районов и субъектов Российской Федерации.
6. Выполнение лесоустроительных работ, инвентаризация лесов, регулярный контроль лесопользования и мониторинг состояния лесов.
7. Инвентаризация сельскохозяйственных угодий, мониторинг состояния посевов, оценка засоренности, выявление вредителей и болезней сельскохозяйственных культур, прогнозирование урожайности.
8. Мониторинг и прогнозирование процессов заболачивания и опустынивания, засоления, карста, эрозии, степных пожаров и т. п.

В настоящее время практически у каждой развитой страны есть собственные спутники сверхвысокого пространственного разрешения, которые активно используются в государственных целях. Примеры спутников с высоким пространственным разрешением: «Канопус-В», GaoFen, ZiYuan-2, SPOT-6, 7 и др. (рис. 1.15).



*Рис. 1.15. Снимок со спутника GaoFen
(пространственное разрешение 2 м)*

Сканеры со сверхвысоким разрешением совершенствуются. 24 сентября 1999 года был запущен спутник Ikonos со сверхвысоким пространственным разрешением – 1 м. Практически следом за ним, 18 октября 2001 года, был запущен спутник, позволяющий делать изображения с разрешением 0,6 м – QuickBird. Компания GeoEye (ныне Maxar Technologies) улучшила разрешение до 0,3 м (WorldView-3) (рис. 1.16).



*Рис. 1.16. Снимок со спутника WorldView-3
(пространственное разрешение 0,3 м)*

1.7. Технология формирования изображения Земли в разных спектральных диапазонах

Технологию формирования изображения в процессе дистанционного зондирования Земли определяет вид съемки. В соответствии с *физическими принципами получения изображения* съемочные системы могут быть (рис. 1.17):

- пассивными;
- активными.

Пассивные съемочные системы регистрируют отраженную объектом энергию от естественного источника излучения (Солнца) или излучаемую объектом энергию. К подобным системам относятся:

- фотографические;
- телевизионные;
- многоканальные сканеры;
- СВЧ радиометры.

Активные съемочные системы регистрируют отраженное от поверхности Земли излучение, сформированное самой съемочной системой. Преимущество таких систем перед пассивными заключается в том, что они не зависят от времени суток и (частично) от погодных условий.

К активным системам относятся:

- радиолокационные съемочные системы;
- лидары (оптические локаторы), которые используют мощные лазеры для формирования когерентного излучения в оптическом диапазоне.

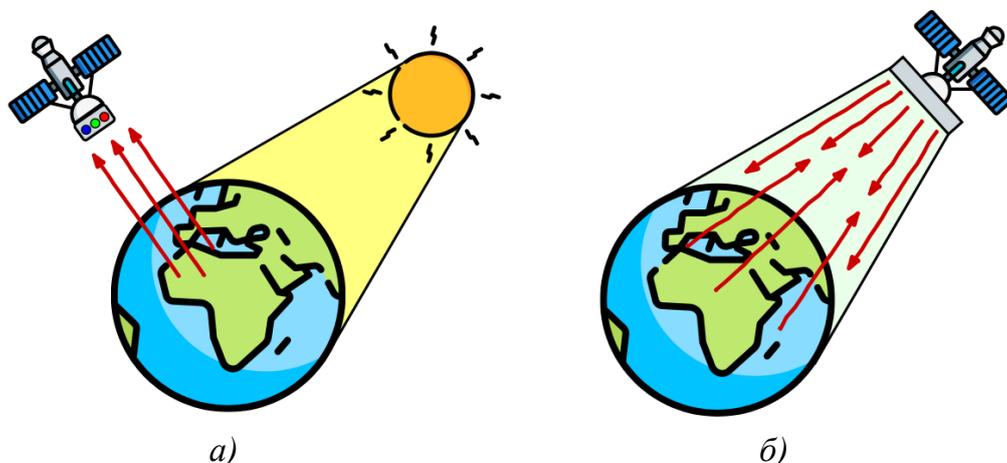


Рис. 1.17. Съемка из космоса: а – пассивная; б – активная

С точки зрения геометрии формирования изображения все съёмочные системы можно разделить:

- на кадровые;
- сканерные.

В кадровых съёмочных системах изображение формируется практически мгновенно, по законам центральной проекции. (Все точки кадра фиксируются в единый момент времени).

В сканерных съёмочных системах изображение формируется последовательно, поэлементно путем просмотра объекта сканирования одним из способов: оптико-механическим, оптико-электронным, электронным, радиолокационным.

Яркость каждого элемента в сканерном изображении пропорциональна яркости энергии, отраженной от участка объекта сканирования, который проецировался в данный момент на приемник излучения.

Геометрическое положение элемента в сканерном изображении зависит от используемого способа сканирования. Законы сканирования вдоль и поперек направления полета различны. Сканирование вдоль направления полета выполняется за счет движения носителя. Сканирование поперек полета выполняется оптико-механическим устройством, электронным или радиолокационным способом [5].

В различных зонах спектра используют различные технические системы для формирования изображения (рис. 1.18).

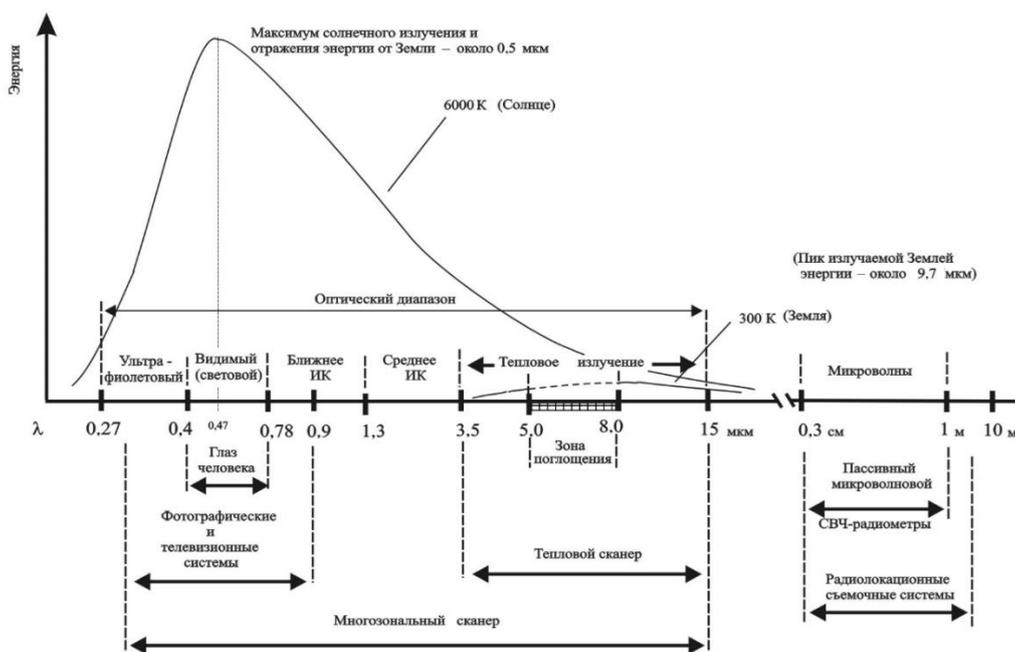


Рис. 1.18. Технические средства получения данных дистанционного зондирования в разных спектральных диапазонах [5]

Космические снимки в световом диапазоне

Световой диапазон складывается из видимого, ближнего и среднего ИК-диапазонов, к нему относится основная доля солнечной радиации. Для большей части светового диапазона атмосфера Земли прозрачна, но подобное излучение не проходит через облака. Оказывает влияние на съемку в данном диапазоне и рассеивание коротковолнового излучения в атмосфере. Например, голубая часть спектра рассеивается, что снижает контрастность и качество снимка.

Для получения снимков в световом диапазоне используется различная аппаратура. Первые снимки из космоса были получены с использованием фотографических систем.

Фотографические снимки – снимки, полученные с помощью фотоаппаратов, находящихся на борту авиационного или космического носителя, и обработанные после приземления спускаемого аппарата. В зависимости от использования фотоматериалов фотоснимки подразделяются на черно-белые, цветные, спектрзональные, многозональные, синтезированные.

Черно-белые снимки, или однозональные, обычно отражают видимую часть спектра. Излучение регистрируется в одной, но достаточно широкой зоне спектра.

Для получения *цветных снимков* применяют двух- и трехслойные фотоматериалы (синий, красный, зеленый).

Спектрзональные снимки также получают на двух- и трехслойных фотоматериалах, но на таких пленках отсутствует слой, чувствительный к синей зоне спектра, поскольку коротковолновые лучи сильно рассеиваются атмосферой, вместо него используется слой, чувствительный к ИК-лучам. Такие снимки позволяют подчеркнуть различия предметов, которые выявляются по яркости в ближней ИК-области, обеспечивают хорошее цветовое разделение изучаемых объектов. Однако они дают изображение в преднамеренно искаженных (ложных) цветах.

Многозональные снимки получают с помощью специальных фотоаппаратов, которые оснащены несколькими объективами (4 – 6). Каждый объектив снабжен определенным светофильтром и проводит съемку в определенной зоне спектра. В результате получают 4 – 6 зональных снимков одной и той же территории, каждый из которых

отображает определенный спектральный диапазон, что улучшает анализ и интерпретацию материалов дистанционного зондирования.

Из многозональных снимков можно получить цветные снимки, которые называют *синтезированными*. При этом каждому зональному снимку с помощью светофильтра придают определенный цвет, а затем соединяют изображения. Цвета на снимке могут соответствовать реальности либо быть ложными.

Телевизионные снимки получают с помощью телевизионной камеры, установленной на борту носителя. В интервалах между экспозициями изображение считывается электромагнитным лучом и передается по радиоканалам на Землю, что обеспечивает оперативное получение снимков пользователем одновременно с процессом съемки.

Геометрические искажения телевизионных снимков зависят от наклона оси съемочной камеры относительно поверхности Земли, а разрешающая способность определяется освещенностью местности и техническими параметрами съемки.

Свойства телевизионных снимков различаются: они могут быть узко- и широкополосными, иметь разные устройства развертки в оптическом канале или в канале формирования радиосигнала, разные видеоусилители и т. п. Подобные снимки могут охватывать полосу местности шириной от 1 до 2 тыс. км, в зависимости от высоты полета и фокусного расстояния объектива. Изображение всей планеты получают с высокоорбитальных спутников, но они содержат мало подробностей и по своему разрешению сильно уступают фотографическим снимкам.

Телевизионная съемка проводится в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Чаще всего получают плоские черно-белые или цветные изображения, реже используется аппаратура для получения стереоскопического изображения.

Оптико-электронные сканеры, как и телесъемка, обеспечивают оперативное слежение за объектами. Существует два вида подобного оборудования: оптико-механические сканеры и сканеры на основе линеек приборов с зарядовой связью (ПЗС).

В *оптико-механических сканерах* сканирующим элементом является качающееся зеркало. Оно просматривает местность поперек движения космического аппарата и посылает излучение в объектив.

Затем излучение попадает на фотоприемник, где луч преобразуется в электрический импульс, который по радиоканалам передается на Землю. Наземная аппаратура преобразует полученный сигнал в изображения на фотопленках или магнитных носителях.

Колебание зеркала создает строку изображения; сканерное изображение получают за счет сложения отдельных строк по мере продвижения космического аппарата. Просмотр полосы местности путем сканирования называется строчной разверткой. Внешне снимки, полученные с помощью сканеров, отличаются наличием растровых полос, которые на снимках хорошего разрешения заметны лишь при увеличении.

Масштаб снимка вдоль линии движения аппарата остается неизменным, но вдоль строки изменяется – он уменьшается к ее краям, что приводит к геометрическим искажениям, которые могут быть устранены обработкой снимков на компьютере. Важная особенность сканерной съемки – поступление информации со спутника в цифровой форме, что облегчает ее компьютерную обработку. По качеству сканерная съемка уступает фотографической, так как разрешение сканерных снимков несколько меньше.

Чаще всего используют многозональную сканерную съемку. В этом случае применяется несколько зеркал, при этом каждое зеркало воспринимает определенную зону спектра.

Сканеры на основе линеек ПЗС, или электронные сканеры, отличаются повышенным разрешением при оперативной съемке.

ПЗС представляет собой линейку или матрицу, состоящую из нескольких тысяч миниатюрных (10 – 20 мкм) светочувствительных элементов-детекторов. Их малые размеры гарантируют высокое разрешение подобных снимков. Линейный ряд детекторов (линейка ПЗС) обеспечивает строку снимка, накопление строк происходит за счет движения носителя аппаратуры. Такая аппаратура, по сравнению со сканерной съемкой, не имеет колеблющегося или вращающегося элемента конструкции, поэтому позволяет получать снимки с лучшими геометрическими свойствами. Важным достоинством этого вида съемки также является возможность настройки детекторов на заданный спектральный диапазон, вплоть до монохроматического.

Снимки в тепловом ИК-диапазоне

Тепловой ИК-диапазон достаточно широк и охватывает зону от 3 до 1000 мкм. Но большая часть его лучей не пропускается атмосферой. Имеются только три «окна прозрачности» с длинами волн 3 – 5, 8 – 14, 30 – 80 мкм, первые два из них и используются для съемки. Пространственное разрешение снимков первоначально измерялось в километрах, сейчас – до сотен метров. Температурное разрешение составляет десятые доли градуса. Съемку можно вести ночью – на затененной стороне Земли, а также в условиях полярной ночи. Облачность мешает съемке, так как в этом случае регистрируется температура верхней кромки облаков, а не земной поверхности.

Тепловые снимки можно рассматривать как псевдоцветные, поскольку в них фактически осуществляется сдвиг спектрального диапазона в зону видимого спектра: в результате холодные объекты выглядят светлыми, а теплые – темными.

Съемка в тепловом диапазоне обычно дополняет другие виды съемки, так как работает в «своем» спектральном диапазоне. Она используется при изучении различных явлений, связанных с выделением тепловой энергии, например при мониторинге лесных пожаров, тепловых или атомных электростанций.

Снимки в радиодиапазоне

Для дистанционного зондирования может быть использован ультракоротковолновый диапазон радиоволн с длиной волны 1 мм – 10 м (точнее 1 мм – 1 м). Он называется сверхвысокочастотным (СВЧ) в отечественной литературе и микроволновым – в американской. Этот диапазон в значительной степени свободен от влияния атмосферы.

Различают *пассивную радиометрию*, при которой фиксируется собственное излучение Земли (получают радиометрические снимки), и *активную радиометрию*, когда фиксируется отраженное искусственное излучение (получают радиолокационные снимки).

Пассивная радиометрическая съемка осуществляется с помощью микроволновых радиометров, которые регистрируют микроволновое излучение. По сигналам радиоизлучения строится радиометрический снимок, на котором изображаются объекты, характеризующи-

еся различными излучательными свойствами в заданном диапазоне. Например, излучение металлов очень незначительно, излучение растительности и сухой почвы характеризуется коэффициентом 0,9, воды – 0,3. Радиометрические снимки позволяют выявить почвы с различной влажностью, воды с разной степенью солености и определить степень промерзания грунтов, возраст морских льдов и т. п.

Метод пассивной радиометрии перспективен, но пока находится на стадии разработки и применяется ограниченно.

Для получения радиолокационных снимков на носителе устанавливается активный источник радиоизлучения с антенной, действующий по принципу просмотра местности поперек маршрута. Посылаемый к Земле сигнал по-разному отражается поверхностью и улавливается регистрирующей аппаратурой. На полученных снимках отражаются шероховатость поверхности, микрорельеф, состав пород.

Радиолокационные снимки могут применяться в океанологических исследованиях для изучения волнения и приповерхностных ветров, в геологии – для поиска линз подземных вод, в сельском хозяйстве – для изучения состояния растительности, а также картографирования земель и др.

Пассивная и активная радиосъемка отличается от остальных видов съемки своей всепогодностью в силу того, что атмосфера абсолютно прозрачна для волн этого диапазона, и может проводиться в любое время суток.

1.8. Лазерное дистанционное зондирование

Создание лазера привело к разработке различных приборов дистанционного зондирования окружающей среды, которые получили название «лидары» (аббревиатура английских слов Light Detection Ranging, что означает «световой локатор»).

Лазер представляет собой источник монохроматического когерентного излучения, характеризующийся высокой направленностью и большой плотностью энергии. Основной физический процесс, определяющий действие лазеров, – это вынужденное испускание излучения. Оно происходит при взаимодействии фотона с возбужденным атомом при точном совпадении энергии фотона с энергией возбужденного атома (или молекулы).

В лазерах различные виды энергии преобразуются в энергию лазерного излучения. Главным элементом лазера служит **активная среда** – это вещество, в котором распределение частиц (атомов, молекул или ионов) по энергетическим состояниям не является равновесным и хотя бы для одной пары уровней энергии существует инверсия населенностей. Для образования активной среды используют воздействие света, электрических разрядов в газах, химические реакции, бомбардировку электронными пучками и другие методы накачки. Активная среда расположена между зеркалами, образующими *оптический резонатор*.

Большинство лидаров построены на основе следующих принципов (рис. 1.19). Лазерное излучение передается через оптический блок в направлении мишени (изучаемый объект). Излучение, преобразованное объектом, собирается приемной оптикой и направляется в спектроанализатор, служащий для выделения интервала длин волн, в котором проводятся наблюдения и, соответственно, отсекает фоновое излучение на других длинах волн. После спектроанализатора излучение поступает в систему фотодетектирования. Сигнал фотодетектора может подвергаться аналоговой или цифровой обработке.

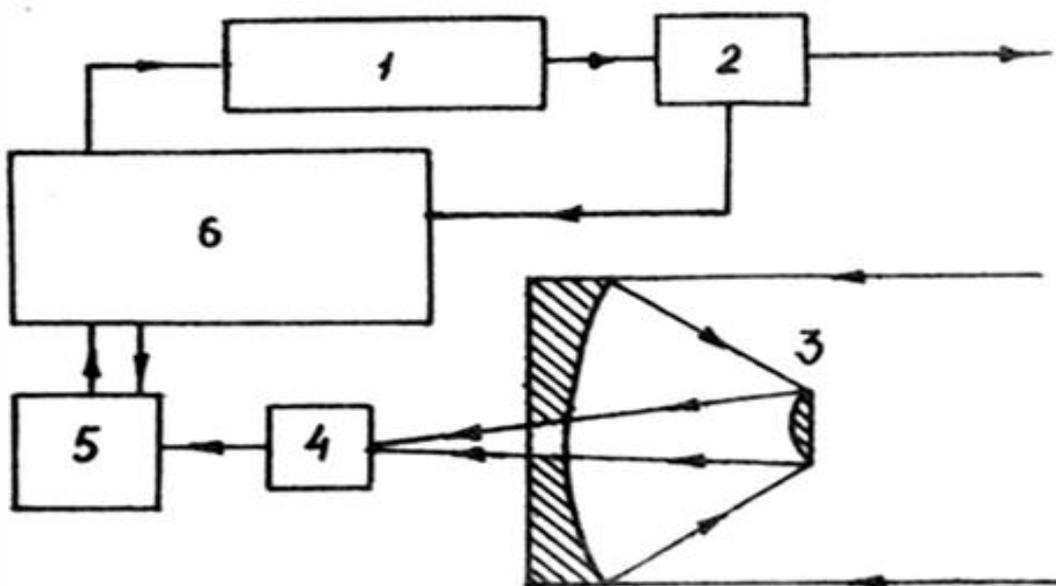


Рис. 1.19. Функциональная схема лидара: 1 – лазер; 2 – выходное оптическое устройство; 3 – приемное оптическое устройство; 4 – спектроанализатор; 5 – система фотодетектирования; 6 – система сбора и обработки данных [6]

Приемные оптические устройства лидаров построены на основе *телескопических систем*. Они должны соответствовать следующим требованиям: изображение, создаваемое оптической системой, должно иметь минимальные aberrации; материал оптических элементов должен пропускать излучение в исследуемой области спектра с минимальными потерями; оптическая система должна обеспечивать наибольшую светосилу, позволяющую полностью реализовать разрешающую способность спектроанализатора.

В качестве *спектроанализаторов* применяют абсорбционные фильтры, интерференционные фильтры и диспергирующие приборы. Абсорбционные фильтры необходимы для ослабления лазерного излучения и выделения спектральных интервалов большой ширины (десятки и сотни нанометров) из излучения, принимаемого от объекта. Для выделения узкого спектрального диапазона (единицы и доли нанометров) обычно используют интерференционные фильтры, например интерферометры «Фабри-Перо» – для выделения очень узких спектральных линий (ангстремы). В случае когда требуется измерение всего спектра исследуемого излучения, используются полихроматоры и спектрометры.

Фотодетекторы подходят для преобразования электромагнитного излучения в электрический сигнал. Важными характеристиками фотодетекторов считаются: область спектральной чувствительности, квантовый выход, частотная характеристика, усиление по току, темновой ток, габариты и устойчивость к различным воздействиям. Для диапазона длин волн от 200 до 1000 нм обычно используют фотоэлектрические умножители, обладающие высоким коэффициентом усиления и малым шумом, – они способны регистрировать отдельные фотоны.

Лазеры разделяют на импульсные и непрерывные; работающие в ИК, видимой или УФ области спектра; высокой и низкой мощности и т. д. Наиболее важной представляется **классификация, основанная на природе активной среды**, по которой лазеры делятся на газовые, твердотельные (с твердой диэлектрической активной средой – кристаллом или стеклом), на красителях, жидкостные, полупроводниковые.

Среди *газовых лазеров* наибольший интерес для исследования окружающей среды представляет азотный лазер. Благодаря короткой

длине волны излучения он используется для возбуждения флуоресценции большого класса органических веществ.

Твердотельные лазеры характеризуются высокой мощностью и малой длительностью импульса излучения. Возможность преобразования частоты генерации способствовала их широкому применению для зондирования водной поверхности (длина волны генерации второй гармоники излучения лазера на иттрий-алюминиевом гранате лежит в области максимальной прозрачности воды). Недостаток твердотельных лазеров – низкая частота генерации импульсов и малая долговечность.

Лазеры на красителях имеют широкий диапазон перестройки длин волн излучения от ближнего ультрафиолетового диапазона (300 нм) до ближнего инфракрасного (950 нм); благодаря этому они широко используются для избирательного возбуждения флуоресценции различных органических веществ. Такие лазеры имеют высокую мощность, частоту повторения импульсов до 1 кГц, длительность импульса от 5 до 250 нс.

В настоящее время методы лазерного дистанционного зондирования основываются на следующих процессах:

1. Рэлеевское рассеяние – лазерное излучение, упруго рассеянное атомами или молекулами; наблюдается на исходной частоте.

2. Рассеяние Ми – лазерное излучение, рассеянное малыми частицами, размер которых сравним с длиной волны излучения; наблюдается на исходной частоте.

3. Комбинационное рассеяние – лазерное излучение, рассеянное молекулами; наблюдается с некоторым частотным сдвигом, характеризующим данные молекулы.

4. Резонансное рассеяние – лазерное излучение, которое на частоте определенного электронного перехода в атоме, рассеивается с большим сечением и наблюдается на исходной частоте.

5. Флуоресценция – лазерное излучение, которое на частоте определенного электронного перехода в атоме или молекуле, претерпевает поглощение с последующим излучением на более низкой частоте.

6. Поглощение – ослабление лазерного пучка наблюдается, если частота излучения попадает в полосу поглощения данной молекулы.

7. Дифференциальное поглощение и рассеяние (ДПР) – дифференциальное ослабление двух лазерных пучков определяется по их сигналам обратного рассеяния; при этом частота излучения в одном из пучков настраивается близко к частоте данного молекулярного перехода, в то время как частота второго – несколько в стороне от частоты перехода.

Одним из первых лидаров был оптический дальномер, использовавший в качестве источника излучения твердотельный лазер на рубине. В настоящее время дальномеры позволяют определять расстояние до предмета с точностью до сантиметров на дистанции в сотни километров и широко используются в геодезии, метеорологии, астрономии, навигации.

Такие свойства лазеров, как высокая мощность, монохроматичность, малая длительность импульсов и высокая направленность светового пучка, прошли испытания первоначально при зондировании атмосферы. Лазеры позволяют проводить измерения как основных, так и малых составляющих атмосферы естественного и антропогенного происхождения. Лидары также используются для определения термических, структурных и динамических характеристик атмосферы, океана и подстилающих поверхностей; для распознавания определенных мишеней, таких как нефтяные пятна, по спектральным характеристикам [7; 8].

Вопросы к главе 1

1. В чем заключаются физические основы дистанционного зондирования?
2. Как получают многозональные космические снимки?
3. Какие основные типы материалов дистанционного зондирования в зависимости от спектрального диапазона вы знаете?
4. Как атмосфера влияет на качество съемки?
5. Какие параметры орбиты влияют на съемку из космоса?
6. Какие орбиты называют квазипериодическими?
7. Что характеризует разрешение космического снимка?

Библиографические ссылки

1. Трифонова Т. А., Мищенко Н. В., Краснощеков А. Н. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях : учеб. пособие для вузов. М. : Акад. Проект, 2005. 352 с.

2. Методика тематической обработки многозональных изображений КА Landsat-7 [Электронный ресурс]. URL: <https://poznayka.org/s19778t1.html> (дата обращения: 15.05.2023).

3. Кондратьев К. Я., Смоктий О. И., Козодеров В. В. Влияние атмосферы на исследование природных ресурсов из космоса. М. : Наука, 1985. 185 с.

4. Шульц С. С. Земля из космоса. Л. : Недра, 1984. 114 с.

5. Аэрокосмические съемки [Электронный ресурс]. URL: <https://poznayka.org/s81679t1.html> (дата обращения: 15.05.2023).

6. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование : пер. с англ. М. : Мир, 1987. 550 с.

7. Chappell E. W., Frank M. W., Newcomb J. M. // Appl. Opt. 1985. V. 24. P. 74; Ibid. 1984. V. 23. P. 139.

8. Seigl H. O., Robbins J. C. // ITC J 1985. V. 3. P. 162.

Глава 2. СПУТНИКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ. КОСМОДРОМЫ

В главе приведен обзор природно-ресурсных спутников и съемочной аппаратуры, данные с которых используются при мониторинге окружающей среды.

2.1. Исторический обзор отечественных ресурсных и метеорологических спутников

Метеорологическая система «Метеор»

Решение о создании системы «Метеор» было принято в 1960 году. Она включает метеорологические ИСЗ и наземную сеть пунктов приема информации и служб контроля работы бортовой аппаратуры. Созданию специализированных метеорологических ИСЗ предшествовали всесторонние экспериментальные исследования бортовой электротехнической, радиотехнической, электронной аппаратуры в условиях космического пространства. Первоначально спутники носили название «Космос». На основе многочисленных исследований был испытан первый советский метеорологический ИСЗ «Космос-122» (25 июня 1966 года) с комплектом приборов метеонаблюдений. Затем последовали запуски спутников «Космос-144» (28 февраля 1967 года) и «Космос-156» (27 апреля 1967 года), они работали совместно с пунктами приема, обработки и распространения метеоинформации.

Спутник системы «Метеор» впервые выведен на орбиту в апреле 1968 года; это была полярная орбита, не солнечно-синхронная, высота составляла 1000 км. Позднее орбиту скорректировали, она стала солнечно-синхронной, высота снизилась до 650 км, скорость движения спутника – около 15 оборотов за 24 ч. Появилась возможность изменять трассу, чтобы направлять спутник в нужный район.

На спутниках «Метеор» размещали *многозональные сканирующие устройства малого и среднего разрешения (МСУ-М и МСУ-С)*. МСУ-М вело съемку в четырех каналах (0,5 – 0,6; 0,6 – 0,7; 0,7 – 0,8; 0,8 – 1,1 мкм), элемент сканирования характеризовался размером 1/1,7 км и полосой съемки приблизительно 2000 км. Снимок формировался в среднем масштабе (1: 12 000 000). МСУ-С позволяло снимать в двух

спектральных каналах (0,58 – 0,7; 0,7 – 1,1 мкм), элемент сканирования был размером 280 м, изображение записывалось до 1984 года в масштабе 1: 25 00 000, позже – 1 : 5 000 000. Устройство охватывает полосу шириной 1400 км.

Сканеры малого и среднего разрешения спутников «Метеор» давали возможность покрыть съемкой всю территорию страны за 4 – 5 суток, поставляя соответственно 32 и 12 изображений в сутки. Расположенные на Земле станции приема обеспечивали оперативный режим прямой передачи материалов на всю территорию страны, радиус их действия был 2,5 тыс. км. Существовала также возможность получить данные и для остальных районов Земли, но для них прямой передачи не было, они передавались только после записи на бортовые устройства.

Благодаря названным ИСЗ стало возможным быстро получать снимки любой территории страны, поэтому подобное оборудование стали активно использовать в лесном хозяйстве, гидрологических и ландшафтных исследованиях, при анализе структуры землепользования.

Для детального слежения за сельскохозяйственными посадками требовались более качественные изображения, поэтому была создана сканирующая система высокого разрешения «Фрагмент». Данным сканером был оснащен спутник «Метеор-30», выведенный на орбиту в 1980 году. Он поставлял снимки в интегральном (0,4 – 0,7 мкм) и четырех зональных (0,5 – 0,6; 0,6 – 0,7; 0,7 – 0,8; 0,8 – 1,1 мкм) каналах разрешением 85 м, шириной охвата около 90 км. «Фрагмент» показал свою эффективность и был установлен на аппараты «Космос-1680» и «Космос-1939».

Снимки, полученные системой «Фрагмент», были использованы для тематического среднемасштабного картографирования и мониторинга природных и антропогенных объектов и процессов. С их помощью были выявлены линейные и кольцевые структуры, обнаружены глубинные нарушения земной коры.

На спутнике «Метеор-30» были установлены два экспериментальных сканера. Первый – *оптико-механический среднего разрешения с конической разверткой МСУ-СК* с полосой обзора 600 км и разрешением 240 м, работающий в четырех спектральных каналах. В нем благодаря коническому сканированию обеспечивались постоянные

фотометрические и геометрические условия, а также одинаковое разрешение вдоль строки.

Второй вид экспериментальной аппаратуры – *оптико-электронный сканер высокого разрешения с плоскостной разверткой МСУ-Э*. Сканер обладал способностью выполнять съемку высокого разрешения (30 м) благодаря приемникам излучения на основе приборов с зарядовой связью. Съемка велась в трех спектральных каналах.

Спутники серии «Ресурс»

Специально для изучения природных ресурсов были созданы космические аппараты серии «Ресурс-Ф». На спутниках «Ресурс-Ф1» с 1974 года размещались трехканальная многозональная фотографическая камера КАТЭ-200 и две камеры сверхвысокого разрешения КФА-1000, ведущие спектрозональную съемку с высоты 270 км. Фотограмметрическую съемку начали вести в 1978 году с помощью панхроматической камеры КФА-3000, которая обладала сверхвысоким разрешением. Она была установлена на борту ИСЗ «Ресурс-Ф3». Многозональная фотокамера МК-4 начала эксплуатироваться с 1987 года на борту «Ресурс-Ф2».

С 1985 года ИСЗ данной серии начали передавать снимки на Землю в оперативном режиме, что было обозначено индексом «О» в их названии. Первым спутником этой серии стал «Ресурс-О1 № 1». Спутники начали оснащать пятиканальным коническим сканером (с добавлением теплового канала) среднего разрешения МСУ-СК и трехканальным оптико-электронным сканером МСУ-Э. Конический сканер обеспечивал получение снимков в полосе обзора 600 км. Различные спектральные диапазоны отличались пространственным разрешением.

Снимки со спутников серии «Ресурс» стали основой формирования фонда снимков с ресурсных спутников в России.

Каждый спектральный диапазон датчиков спутников «Ресурс-О1» применялся для определенных целей:

1) диапазон 0,5 – 0,6 мкм – для определения состояния растительности;

2) по диапазону 0,6 – 0,7 мкм можно определять видовой состав растений (по смещению полос поглощения света хлорофиллом);

3) диапазон 0,7 – 0,8, 0,8 – 0,9 мкм эффективен при определении состава биомассы в прибрежных водах и конфигурации береговых линий в водоемах;

4) в диапазоне 0,8 – 1,1 мкм хорошо проявляется рельеф местности;

5) тепловой ИК-участок (10,4 – 12,6 мкм) используется для определения температуры подстилающей поверхности.

Данные, передаваемые со спутников «Ресурс-О1», позволяли осуществлять оперативный контроль за экологической ситуацией и использовались для измерения концентрации газов и аэрозолей, изучения динамики облачного покрова, мониторинга наводнений, картографирования и классификации снежного покрова, лесов, измерения биомассы и площадей, определения состава лесных массивов, инвентаризации сельскохозяйственных угодий и прогнозирования урожаев, топографического картографирования, информационного обеспечения проведения земельной реформы, рационального землепользования и хозяйственной деятельности, наблюдения за ростом городов и др.

2.2. Современная российская орбитальная группировка дистанционного зондирования

В настоящее время российская орбитальная группировка дистанционного зондирования Земли состоит из космических аппаратов серий «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М», «Электро-Л» и «Арктика-М». В 2023 году готовится к запуску первый аппарат радиолокационного зондирования «Кондор-ФКА» [1].

Космический комплекс «Метеор-3М»

Комплекс «Метеор-3М» – многофункциональный космический аппарат для решения гидрометеорологических, океанографических, гелиогеофизических задач. Он обеспечивает непрерывный процесс съемки сканирующим устройством малого разрешения и применяется для прогнозирования стихийных бедствий. Космические аппараты, входящие в состав орбитальной части космического комплекса, находятся на околокруговой солнечно-синхронной орбите с углом наклона $98,85^\circ$ (рис. 2.1 – 2.3):

- «Метеор-М» № 1 – запущен 17 сентября 2009 года;
- «Метеор-М» № 2 – 8 июля 2014 года;
- «Метеор-М» № 2-2 – 5 июля 2019 года.

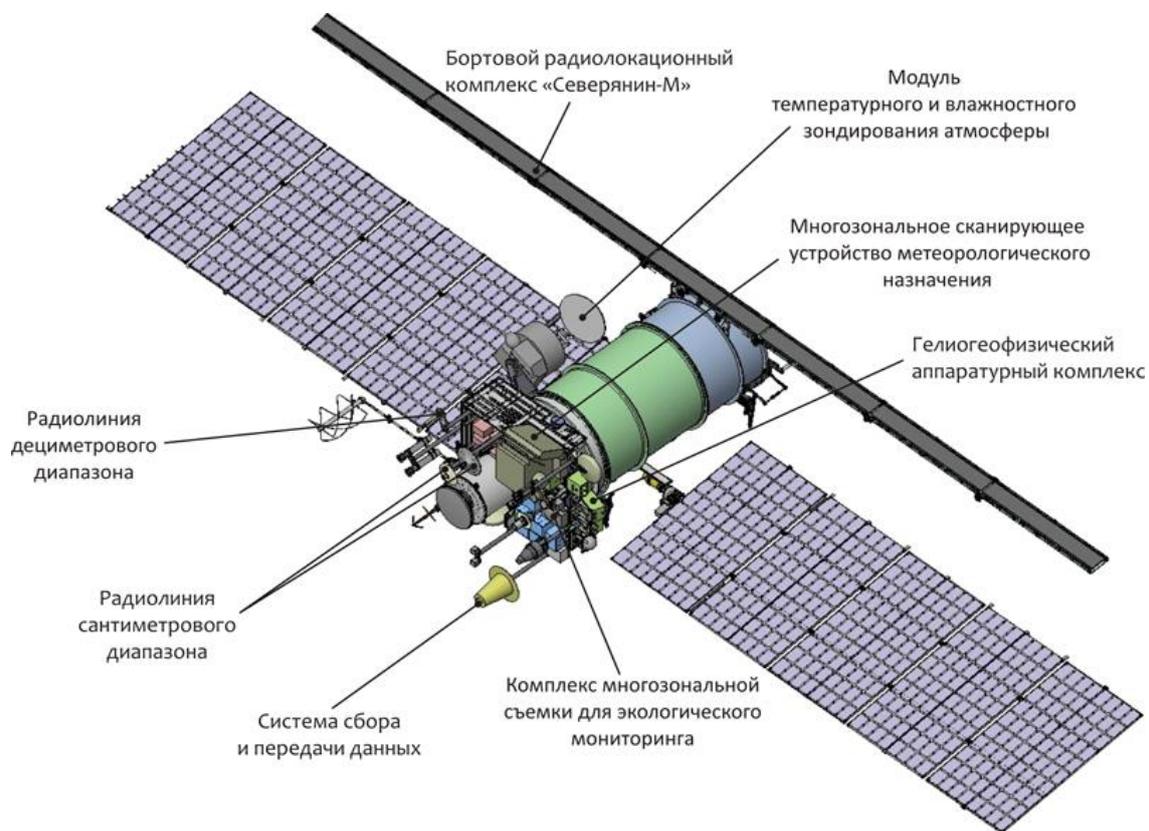


Рис. 2.1. «Метеор-3М»



Рис. 2.2. «Метеор-2М» [1]

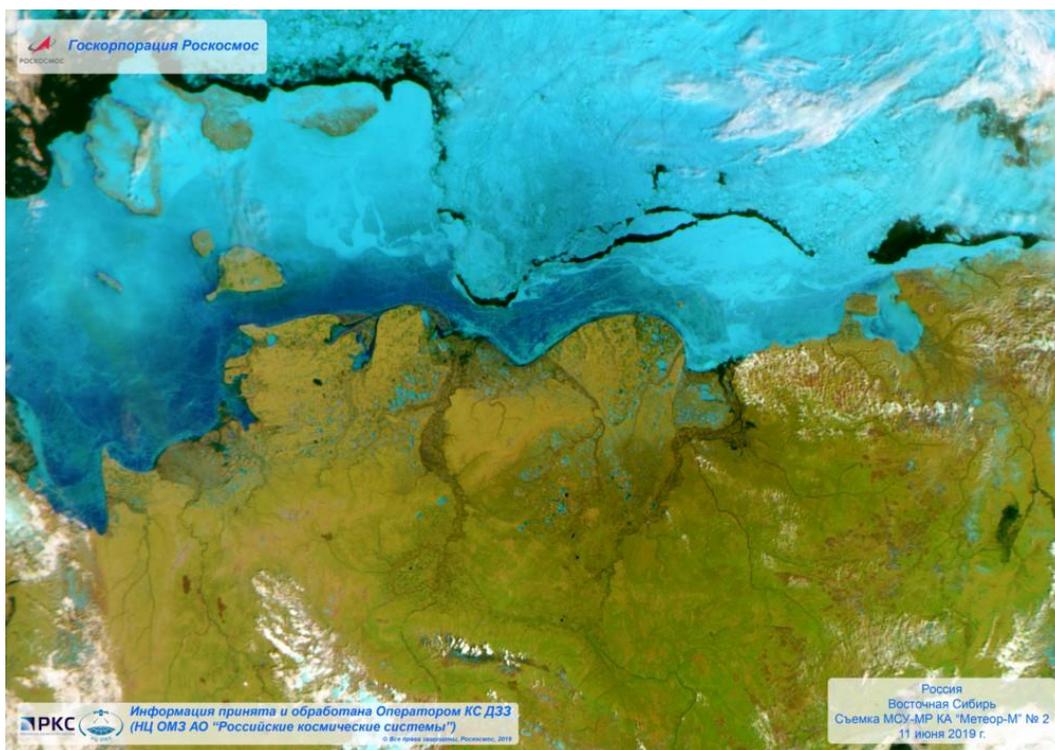


Рис. 2.3. Пример снимка с космического аппарата «Метеор-3М» [1]

Информация, получаемая с космического комплекса:

- глобальные и локальные изображения облачности, поверхности Земли, ледового и снежного покровов в видимом, ИК и микроволновом диапазонах;
- данные для определения температуры морской поверхности и температуры подстилающей поверхности;
- радиолокационные изображения земной поверхности;
- данные о распределении озона в атмосфере и его общее содержание;
- информация о гелиогеофизической обстановке в околоземном космическом пространстве;
- данные о спектральной плотности энергетических яркостей уходящего излучения для определения вертикального профиля температуры и влажности в атмосфере, а также для оценки составляющих радиационного баланса системы «Земля – атмосфера».

На основе данных аппаратов «Метеор-М» строятся обзорные и локальные карты облачности. Глобальные данные научных приборов позволяют отслеживать траектории перемещения тайфунов, которые относятся к опаснейшим явлениям природы. Данные о тайфунах

используются для проведения судов рекомендованными курсами и своевременного оповещения населения. Специальные сообщения с координатами тропических циклонов передаются всем заинтересованным странам и организациям.

Космический комплекс «Метеор-3М» включает следующую аппаратуру:

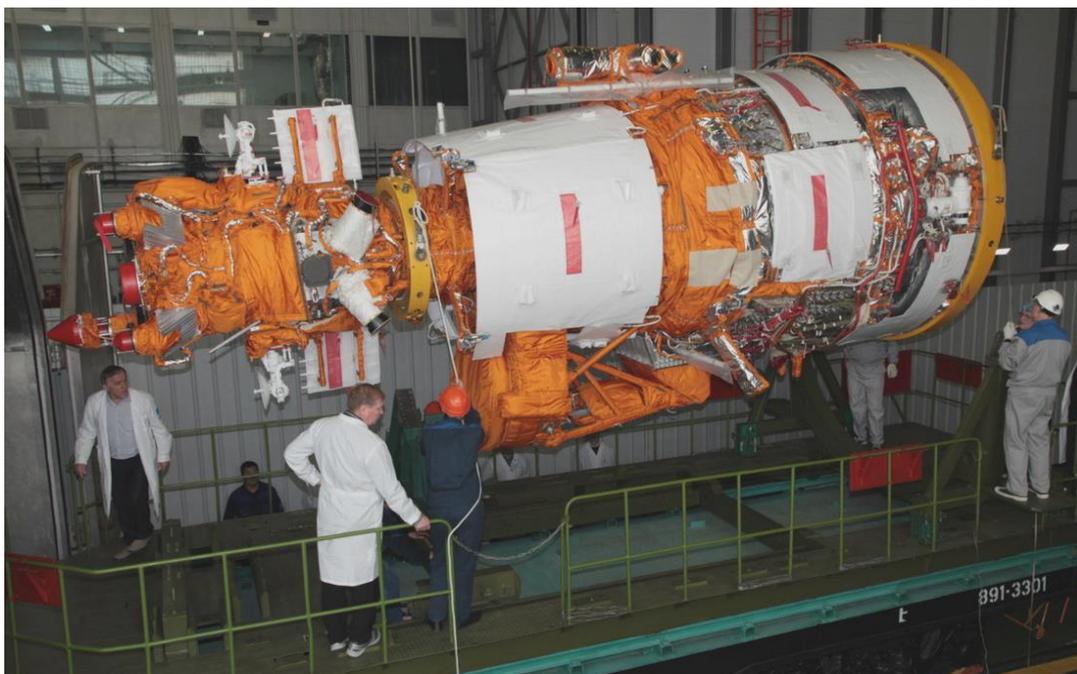
- 1) *многоканальное сканирующее устройство малого разрешения (разрешение 1000 м);*
- 2) *комплекс многоканальной спутниковой съемки среднего разрешения (разрешение 60 или 120 м);*
- 3) *радиолокационный комплекс;*
- 4) *радиометрическую аппаратуру (для оценки температур и влажности), инфракрасный Фурье-спектрометр;*
- 5) *гелиогеофизический аппаратный комплекс (для изучения радиационной обстановки в верхних слоях атмосферы, ионосферы и магнитосферы).*

Космический комплекс «Ресурс-П»

В составе орбитальной группировки ДЗЗ «Роскосмоса» работает космический комплекс «Ресурс-П» (рис. 2.4), состоящий из трех космических аппаратов. Комплекс предназначен для высокодетального, детального, широкозахватного и гиперспектрального оптико-электронного наблюдения поверхности Земли и передачи данных по радиоканалу на наземные пункты приема информации.

Космические аппараты серии «Ресурс-П» совместно с наземными пунктами приема информации образуют единую комплексную систему наблюдения. За счет глубокой интеграции технологий, реализованных при создании космического комплекса, возможности системы значительно выше возможностей трех автономно работающих аппаратов:

- «Ресурс-П» № 1 – запущен 25 июня 2013 года;
- «Ресурс-П» № 2 – 26 декабря 2014 года;
- «Ресурс-П» № 3 – 13 марта 2016 года.



а)



б)

Рис. 2.4. Космический аппарат серии «Ресурс-П»: а – подготовка спутника;
б – элементы спутника

Информация, получаемая с космического комплекса:

- мониторинг загрязнения окружающей среды;
- контроль состояния заповедных территорий;
- данные для поиска полезных ископаемых;
- мониторинг ледовой ситуации;
- оценка состояния природных ресурсов и их инвентаризация;
- развитие чрезвычайных ситуаций;
- контроль состояния социально-экономической инфраструктуры;
- картографирование, подготовка кадастровых планов.

Целевая аппаратура космических аппаратов «Ресурс-П» обеспечивает съемку земной поверхности в панхроматическом, спектрально-нальном, широкозахватном и гиперспектральном режимах в любом сочетании. Информация может передаваться в реальном времени и в записи по высокоскоростной радиолинии.

В оборудование космического комплекса входит:

1) *оптико-электронная аппаратура «Геотон-Л1»* с длиннофокусным линзовым объективом с системой приема и преобразования информации «Сангур-1У», разрешение – 1 м (панхроматический диапазон), 3 – 4 м (в узких спектральных диапазонах);

2) *гиперспектральная аппаратура* (дает возможность обработать до 216 спектральных каналов со спектральным разрешением от 5 до 10 нм);

3) *комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры;*

4) *бортовая аппаратура системы высокоскоростной радиолинии связи* (обеспечивает передачу информации с космического аппарата на наземный пункт приема информации).

Космический комплекс «Канопус-В»

В составе орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли «Роскосмоса» работает космический комплекс «Канопус-В» (рис. 2.5). Он предназначен для панхроматической съемки с разрешением 2,5 м и многозональной съемки с разрешением 12 м (рис. 2.6).

В настоящий момент на орбите в составе комплекса работают пять космических аппаратов:

- «Канопус-В-ИК» – запущен 14 июля 2017 года;
- «Канопус-В» № 3 – 1 февраля 2018 года;
- «Канопус-В» № 4 – 1 февраля 2018 года;
- «Канопус-В» № 5 – 27 декабря 2018 года;
- «Канопус-В» № 6 – 27 декабря 2018 года.



Рис. 2.5. Космический комплекс «Канопус-В»



Рис. 2.6. Космические снимки с аппарата «Канопус-В» [1]

В состав целевой аппаратуры космического аппарата входят панхроматическая съемочная система и многозональная съемочная

система. С их помощью осуществляется съемка участков поверхности Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Впервые в мировой практике на КА «Канопус-В» применен кадрово-сканирующий принцип съемки, позволяющий получить данные высокого геометрического качества, обладающие высокими изобразительными свойствами. На космическом аппарате «Канопус-В» установлена телекомандная система международного диапазона (S-диапазона), что повышает эффективность работы космического комплекса при реализации международных проектов.

Космический аппарат оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В-ИК» предназначен для решения оперативных задач. Поэтому, в дополнение к традиционному для «Канопус-В» оборудованию, он оснащен многоканальным радиометром среднего и дальнего инфракрасных диапазонов. Аппаратура «Канопус-В-ИК» позволяет получать качественно новую информацию за счет более высокого пространственного разрешения и широкой полосы захвата – 2000 км. Но главное достоинство прибора – способность обнаруживать малоразмерные очаги пожара площадью всего 25 м², что значительно упрощает борьбу с ними.

Космический комплекс «Электро-Л»

Космические аппараты «Электро-Л» входят в состав геостационарной гидрометеорологической космической системы «Электро» и предназначены для получения и предварительной обработки многоспектральных снимков облачности и подстилающей земной поверхности в пределах всего наблюдаемого диска Земли, получения гелиофизических данных на высоте орбиты, выполнения телекоммуникационных функций по распространению, обмену гидрометеорологическими и гелиогеофизическими данными, ретрансляции сигналов от аварийных радиобуев системы КОСПАС-САРСАТ (рис. 2.7, 2.8). Разрешение на местности в видимом диапазоне – 1000 м, в инфракрасном – 4000 м.

В настоящее время орбитальная часть комплекса включает три космических аппарата «Электро-Л»:

- «Электро-Л» № 1 – запущен 20 января 2011 года;
- «Электро-Л» № 2 – 11 декабря 2015 года;
- «Электро-Л» № 3 – 24 декабря 2019 года.

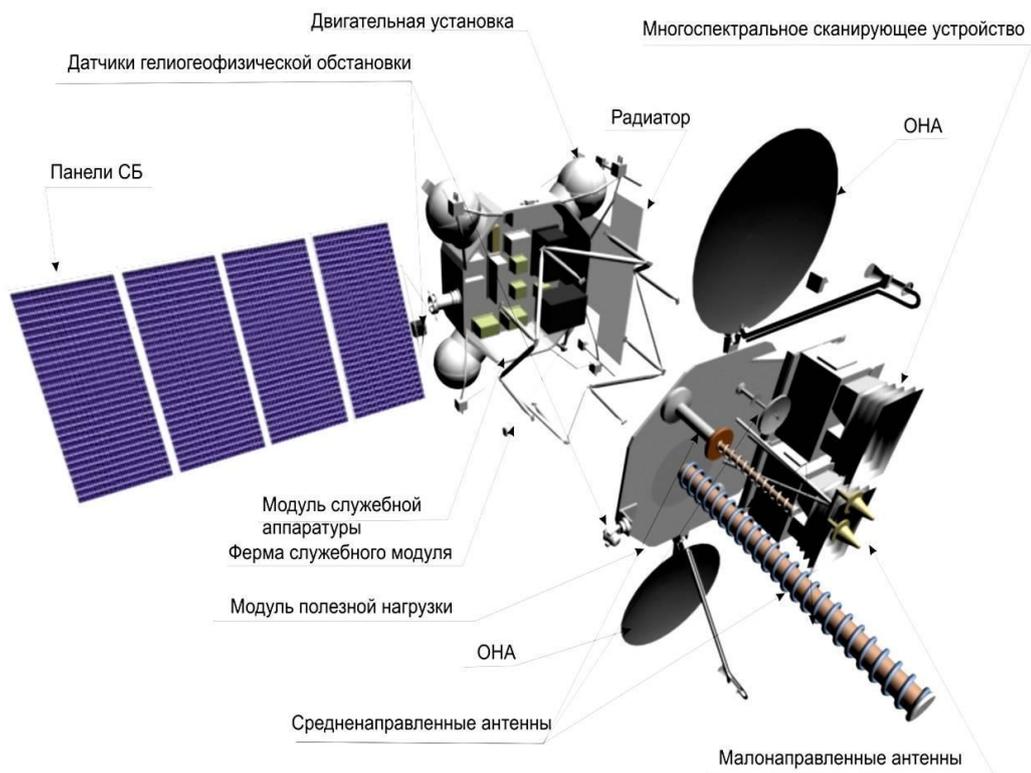


Рис. 2.7. Космический аппарат «Электро-Л»: СБ – солнечная батарея; ОНА – остронаправленная антенна

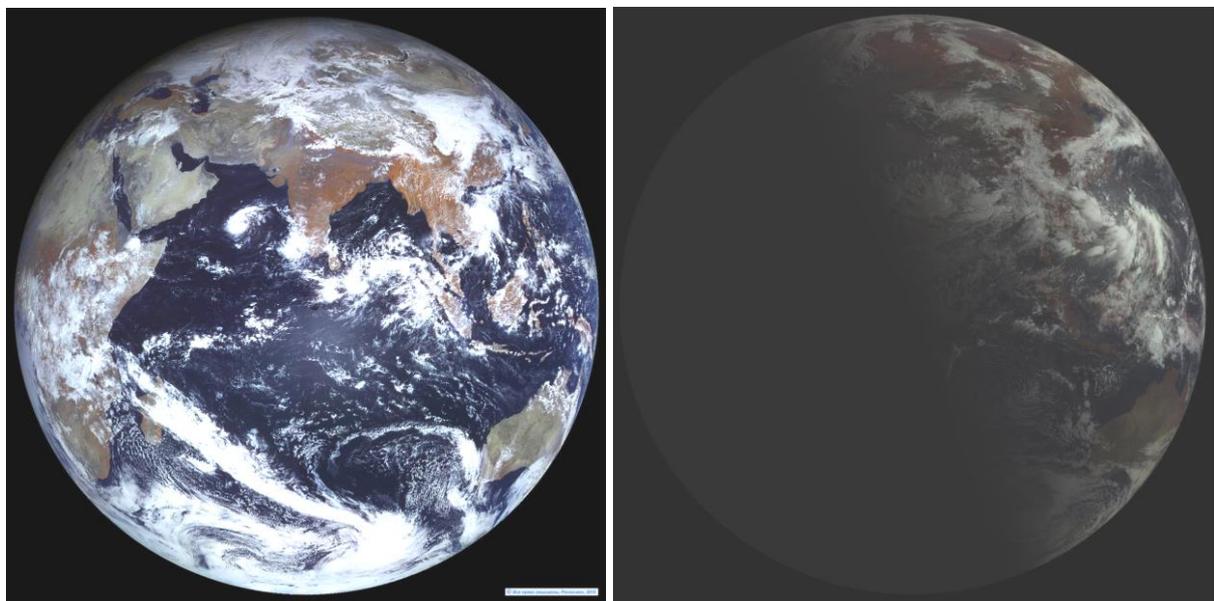


Рис. 2.8. Снимки Земли с космического аппарата «Электро-Л» [1]

Космический аппарат «Электро-Л» построен по модульному принципу и состоит из **космической платформы «Навигатор», комплекса целевой аппаратуры и адаптера:**

1) *многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения* применяется для многоспектральной съемки (видимый диапазон, ближний, средний и дальний тепловой ИК-диапазоны) облачности и подстилающей поверхности видимой части диска Земли;

2) *гелиогеофизический аппаратный комплекс* используется для наблюдения за солнечной активностью, изучения геомагнитного поля, слежения за радиационной обстановкой в околоземном космическом пространстве;

3) *бортовая система сбора данных* обеспечивает сбор данных и создает единый информационный комплект данных, который передается на Землю;

4) *бортовой радиотехнический комплекс* предназначен для передачи и обмена гидрометеорологическими данными между станциями космической связи, а также ретрансляции сигналов от аварийных радиобуев на станции приема информации международной космической системы поиска и спасения КОСПАС-САРСАТ.

Гидрометеорологический комплекс «Арктика-М»

Два космических аппарата «Арктика-М» в составе высокоэллиптической гидрометеорологической космической системы (ВГКС) «Арктика-М» обеспечивают круглосуточный всепогодный мониторинг поверхности Земли и морей Северного Ледовитого океана, а также постоянную и надежную связь и другие телекоммуникационные услуги, что способствует динамичному социально-экономическому развитию северных регионов России.

28 февраля 2021 года ракета-носитель «Союз-2.1б» с разгонным блоком «Фрегат» вывела на орбиту первый гидрометеорологический спутник «Арктика-М» (рис. 2.9), а 22 марта получены первые снимки. Аппарат находится на высокоэллиптической орбите с высотой апогея 37 400 – 39 800 км, перигея – 600 – 3 000 км.

В будущем в группировку войдут как минимум два подобных спутника, которые попеременно будут сменять друг друга на рабочем участке орбиты, расположенном в районе ее апогея. Они обеспечат

круглосуточный всепогодный мониторинг поверхности Земли и морей Северного Ледовитого океана, а также постоянную и надежную связь.



Рис. 2.9. Гидрометеорологический спутник «Арктика-М»

Основные задачи КА «Арктика-М»:

- многозональная съемка земной поверхности;
- получение и передача на рабочем участке орбиты гелиогеофизических данных подразделениям «Росгидромета»;
- ретрансляция метеоинформации с платформ сбора данных;
- ретрансляция сигналов от аварийных радиобуев системы КО-СПАС-САРСАТ.

КА «Арктика-М» построен по модульному принципу. Его конструктивно-компоновочная схема включает в себя два модуля:

- модуль бортового комплекса целевой аппаратуры;
- служебный модуль (орбитальная платформа).

На борту находится следующее **оборудование**:

- 1) *многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения (МСУ-ГСМ);*
- 2) *гелиогеофизический аппаратный комплекс (ГТАК);*
- 3) *бортовая система сбора данных (БССД);*
- 4) *бортовой радиотехнический комплекс (БРТК).*

Космодромы и другие площадки запуска

Космодром Байконур. Космодром Байконур – первый и крупнейший в мире космодром, находится на территории Казахстана, которая арендована Россией. С 4 октября 1957 года по 24 февраля 2023 года с космодрома Байконур выполнен 1531 орбитальный пуск ракет-носителей, на околоземные орбиты и отлетные траектории выведены 1989 космических аппаратов (рис. 2.10).

Космодром Байконур – это мощный научно-испытательный комплекс, который включает:

- 4 действующих стартовых комплекса для пусков ракет-носителей;
- 13 монтажно-испытательных корпусов, в которых размещены 34 технических комплекса для предстартовой подготовки ракет-носителей, космических аппаратов и разгонных блоков, а также заправочно-нейтрализационная и заправочная станции для их заправки компонентами ракетного топлива и сжатыми газами;
- измерительный комплекс с современным информационно-вычислительным центром для контроля за полётом ракет-носителей, разгонных блоков, управления космическими аппаратами, а также обработки измерительной информации;
- кислородно-азотное производство;
- 600 трансформаторных подстанций;
- два аэродрома («Крайний» и «Юбилейный»);
- железнодорожные пути;
- автомобильные дороги;

- линии электропередач;
- линии связи.



а)



б)

Рис. 2.10. Космодром «Байконур»: а – стартовая площадка; б – подготовка спутника

Космодром Плесецк. Космодром Плесецк (1-й Государственный испытательный космодром Министерства обороны Российской Федерации) – самый северный и один из крупнейших космодромов мира, обеспечивающий часть российских и международных космических программ, связанных с оборонными, а также прикладными, научными и коммерческими пусками непилотируемых космических аппаратов (рис. 2.11).



а)



б)

Рис. 2.11. Космодром Плесецк: а – стартовая площадка; б – старт ракеты

Космодром расположен в Плесецком районе Архангельской области.

На космодроме эксплуатируются ракеты-носители лёгкого класса («Ангара-1.2», «Союз-2.1в», «Рокот»), среднего класса («Союз-2.1а», «Союз-2.1б»), тяжелого класса («Ангара-А5»). Технические средства космодрома позволяют проводить запуски различных космических аппаратов на все типы орбит, включая геостационарную.

С 17 марта 1966 года по 1 декабря 2022 года с космодрома Плесецк выполнены 1657 орбитальных пусков ракет-носителей, на орбиты выведены 2139 космических аппаратов (рис. 2.12).

Космодром представляет собой масштабный научно-технический комплекс, включающий следующие объекты космической инфраструктуры:

- стартовые комплексы с пусковыми установками ракет-носителей «Союз-2», «Ангара», «Рокот»;
- технические комплексы подготовки ракет-носителей и космических аппаратов;
- многофункциональную заправочно-нейтрализационную станцию (ЗНС) для заправки ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов компонентами ракетных топлив;
- кислородно-азотный завод;
- измерительный комплекс с вычислительным центром;
- аэродром;
- вспомогательные сооружения и объекты энергоснабжения.

Космодром Плесецк входит в структуру Космических войск Российской Федерации.

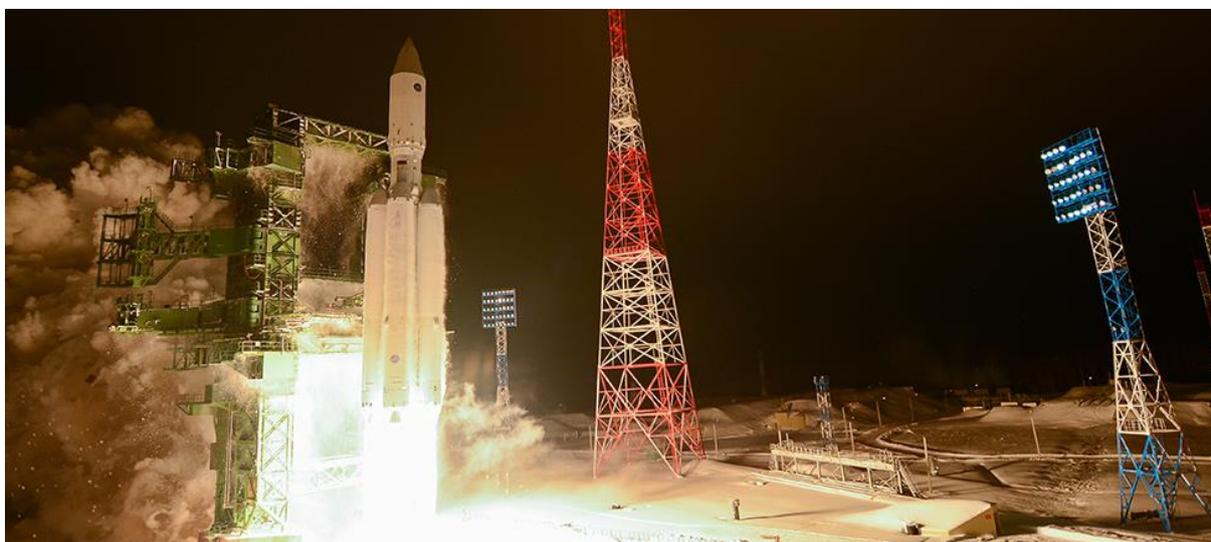


Рис. 2.12. Запуск ракеты с космодрома Плесецк

Космодром Восточный. Космодром Восточный стал одним из самых масштабных проектов России XXI века (рис. 2.13). Строительство космодрома, особенно в природных условиях Амурской об-

ласти – это сложная инженерно-техническая задача. С 28 апреля 2016 года по 22 октября 2022 года с космодрома Восточный выполнены 12 орбитальных пусков ракет-носителей, на орбиты выведены 294 космических аппарата.



Рис. 2.13. Космодром Восточный

На Восточном пока одна стартовая площадка – для пусков ракет-носителей «Союз-2». Кроме того, сейчас активно строится вторая площадка – для запуска новой ракеты «Ангара» (рис. 2.14). Ракеты такого класса будут способны выводить на орбиту полезный груз массой до 37,5 т. Для сравнения: масса полезной нагрузки ракеты «Союз-2» – не более 7,4 т.



Рис. 2.14. Строительство стартовой площадки

Стартовый комплекс под ракету «Союз-2» введен в строй в 2016 году. Он оборудован уникальной конструкцией, которой нет на других российских космодромах (Байконур и Плесецк) – это мобильная башня обслуживания. 1600-тонная конструкция высотой 52 м позволяет проводить все работы по подготовке к старту в самых

сложных климатических условиях. Кроме того, мобильная башня обеспечивает высокий уровень безопасности работников.

Унифицированный технический комплекс предназначен для подготовки перед стартом, в том числе заправки топливом (рис. 2.15). Впервые в истории российской космонавтики разработчики объединили в один комплекс склад блоков, монтажно-испытательные корпуса ракеты-носителя и космических аппаратов, а также ноу-хау – трансбордерную галерею (транспортную магистраль) и заправочно-нейтрализационную станцию. Такое техническое решение снижает риски при транспортировке изделий и значительно экономит время на проведение работ.



а)



б)

*Рис. 2.15. Унифицированный технический комплекс космодрома Восточный:
а – общий вид; б – подготовка ракеты*

Когда Восточный запустят в полную силу, то у российской космической отрасли появится современный универсальный космодром на собственной территории. Восточный строится в расчете на то, что в будущем основные запуски будут осуществляться именно с него.

Помимо того, что Восточный – это пусковая площадка, это также огромный узел связи и управления, оснащенный передовым оборудованием для управления полетами космических аппаратов. Командно-измерительный пункт космодрома позволяет управлять космическими аппаратами российской орбитальной группировки, российским сегментом МКС, космическими кораблями.

Космодром Свободный (Амурской область). Он был образован 1 марта 1996 года как 2-й Государственный испытательный космодром Министерства обороны Российской Федерации. Расформирован 9 февраля 2007 года.

С 4 марта 1997 года по 25 апреля 2006 года с космодрома Свободный выполнены пять орбитальных пусков ракет-носителей «Старт-1», на орбиты выведены пять космических аппаратов.

Космодром Капустин Яр (Астраханская область). Основан 13 мая 1946 года как Государственный центральный научно-исследовательский испытательный полигон Министерства Вооруженных Сил СССР (ныне – 4-й Государственный центральный межвидовой полигон Министерства обороны Российской Федерации).

С 27 октября 1961 года по 19 июня 2008 года с космодрома Капустин Яр выполнен 101 орбитальный пуск ракет-носителей, на орбиты выведены 90 космических аппаратов.

Ясненское ракетное соединение. С 12 июля 2006 года по 25 марта 2015 года из Ясненского ракетного соединения выполнены 10 орбитальных пусков ракет-носителей «Днепр», на орбиты выведены 90 космических аппаратов.

Российско-европейский проект «Союз» в Гвианском космическом центре (рис. 2.16). Гвианский космический центр (ГКЦ) – европейский космодром вблизи города Куру во Французской Гвиане (департамент Франции в Южной Америке). Его расположение около экватора обеспечивает 15%-е преимущество по полезной нагрузке по сравнению с запусками в восточном направлении с американского космодрома на мысе Канаверал и 40%-е – при запусках с космодрома

Байконур. С начала 1970-х годов ГКЦ используется для запусков космических аппаратов ракетами-носителями семейства «Ариан». Космодром используется в интересах совместных европейских космических программ. Руководство работой ГКЦ осуществляет Французский национальный космический центр (CNES).



Рис. 2.16. Запуск ракеты «Союз» в Гвианском космическом центре

С 21 октября 2011 года по 10 февраля 2022 года из Гвианского космического центра выполнены 27 орбитальных пусков ракет-носителей «Союз-СТ», на околоземные орбиты и отлетные траектории выведен 101 космический аппарат (рис. 2.17).



Рис. 2.17. Инфраструктура проекта «Союз» в Гвианском космическом центре

Запуск космических аппаратов выполняют на основе совместных европейско-российских пусковых расчетов. Подготовку ракет-носителей «Союз-СТ» и эксплуатацию поставленного российской стороной наземного технологического оборудования контролируют российские специалисты.

Плавучая платформа «Одиссей». С 28 марта 1999 года по 26 мая 2014 года с подвижной стартовой платформы «Одиссей» в Тихом океане по программе «Морской старт» выполнены 36 орбитальных пусков ракет космического назначения «Зенит-3SL», на орбиты выведены 32 космических аппарата.

Подводные лодки. С 7 июля 1998 года по 26 мая 2006 года с российских подводных лодок выполнены три орбитальных пуска ракет-носителей, на орбиты выведены три космических аппарата.

2.3. Зарубежные спутники, применяемые для изучения природных ресурсов

Спутники серии Landsat

Американские спутники серии Landsat предназначены для исследования природных ресурсов Земли (первоначально назывались ERTS – Earth Resources Technological Satellite) [2].

Спутник Landsat-1 был запущен в 1972 году и использовался до 1978 года. Когда запись на магнитную ленту перестала работать, космический аппарат был выведен из эксплуатации. За время своей работы спутник получил более 150 000 спектрональных сканерных (MSS) кадров по всему миру.



Рис. 2.18. Landsat-8

С 1975 года были выполнены еще восемь запусков спутников Landsat (Landsat-6 не смог достичь орбиты). В настоящее время на орбите работают спутники Landsat-7 (с 1999 года), Landsat-8 (был запущен 11 февраля 2013 года) и Landsat-9 (запущен в 2021 году) (рис. 2.18, 2.19). Собранные данные предоставляют актуальную информацию для помощи специалистам, управляющим земельными участками и принимающим решения, касающиеся

оценки состояния природных ресурсов и окружающей среды.



Рис. 2.19. Landsat-9

Спутники Landsat работают на полярных, солнечно-синхронных орбитах, частота повторной съемки на экваторе – 16 – 18 дней, высота орбиты составляет 700 км. На спутниках данной серии находится несколько видов съемочной аппаратуры (рис. 2.20).



Рис. 2.20. Пример снимка со спутника Landsat. Комбинированное изображение Санкт-Петербурга

Оптико-механический сканер *MSS (Multi Spectral Scanner)* начали использовать с первых полетов (1972 год). Он давал изображение в зеленом, красном и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. MSS на спутнике Landsat-3 был дополнен тепловым инфракрасным каналом. Разрешение на местности для MSS составляет 80 м для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов и 240 м – для теплового инфракрасного диапазона, ширина захвата на местности – 185 км.

Другой вид аппаратуры – трехобъективная телевизионная камера *RVB*. Впоследствии (на спутнике Landsat-3) она была заменена монохроматической камерой (работала в зоне 0,5 – 0,7 мкм), а на четвертом спутнике серии Landsat этот вид аппаратуры был снят. Запущенный в 1982 году он был оснащен сканирующей системой второго поколения «Тематический картограф» (*TM – Thematic Mapper*), которая работала в семи спектральных диапазонах видимой, ближней инфракрасной, средней инфракрасной и тепловой инфракрасной частей спектра.

Разрешение на местности для видимой, ближней и средней инфракрасной областей составляло 30 м, а в тепловой инфракрасной области – 120 м. Ширина захвата на местности для обоих сканеров – 185 км.

С 1999 года работает спутник **Landsat-7**. На его борту находится сканер *Enhanced Thematic Mapper (ETM+)*, оснащенный панхроматическим каналом с разрешением 15 м, разрешение теплового канала улучшилось до 60 м. Космические снимки, получаемые КА Landsat-7, характеризуются широкой полосой захвата (185 км). На сегодняшний день глобальный архив снимков Landsat-7 содержит покрытие практически всей поверхности Земли, причем некоторые регионы отсняты многократно.

Космоснимки Landsat имеют большее количество цветных диапазонов, что позволяет проводить их спектральный анализ для реше-

ния многих задач. Так, установленная на Landsat-7 съемочная аппаратура ETM+ имеет восемь спектральных диапазонов (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Спектральные каналы Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)

Полоса	Длина волны, мкм	Разрешение, м
Полоса 1 – синий	0,45 – 0,52	30
Диапазон 2 – зеленый	0,52 – 0,60	30
Диапазон 3 – красный	0,63 – 0,69	30
Диапазон 4 – NIR	0,77 – 0,90	30
Диапазон 5 – SWIR 1	1,55 – 1,75	30
Диапазон 6 – тепловой	10,40 – 12,50	60* (30)
Диапазон 7 – SWIR 2	2,09 – 2,35	30
Полоса 8 – панхроматическая	0,52 – 0,90	15

* Полоса ETM + 6 получена с разрешением 60 м, но в поставляемых продуктах данные пересчитываются до 30-метровых пикселей.

31 мая 2003 года на борту спутника Landsat-7 произошел сбой в работе. Он был вызван отказом корректора линии сканирования (SLC). Неисправность была необратимой, но тем не менее Landsat-7 ETM+ продолжал производить съемку в режиме “SLC-off”. Для решения этой проблемы и обеспечения потребителей материалами новой съемки был разработан новый продукт, с помощью которого отсутствующие пиксели изображения от ранее полученных изображений спутника Landsat-7 заменялись на примерные величины, выведенные совместно зарегистрированными, совместимыми с гистограммой кадрами SLC-on.

Спутник **Landsat-8** (запущен в 2013 году) получает данные с использованием двух наборов инструментов – Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS).

Набор инструментов *Operational Land Imager (OLI)* – основной на спутнике. В OLI используется схема, включающая длинные линейные массивы фотодатчиков, снимающие сразу всю ширину поля зрения спутника (185 км). OLI получает изображения в девяти спектральных диапазонах видимого света и ближнего ИК (табл. 2.2, рис. 2.21, 2.22), семь из которых близки к тем, которые использовались в

более ранних инструментах Thematic Mapper (TM) и Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) с предыдущих спутников Landsat, за счет чего обеспечиваются преемственность и совместимость с ранее накопленным массивом данных Landsat. Добавлены два новых диапазона, канал 1 (темно-синий и фиолетовый) для изучения прибрежных вод и аэрозолей и канал 9 (ближний ИК) для упрощения поиска облаков на снимках.

Таблица 2.2

*Спектральные каналы Landsat-8 Operational Land Imager (OLI)
и тепловизионного инфракрасного датчика (TIRS)*

Полоса	Длина волны, мкм	Разрешение, м
Полоса 1 – ультра-синий (прибрежная зона/аэрозоль)	0,435 – 0,451	30
Диапазон 2 – синий	0,452 – 0,512	30
Диапазон 3 – зелёный	0,533 – 0,590	30
Диапазон 4 – красный	0,636 – 0,673	30
Диапазон 5 – NIR	0,851 – 0,879	30
Диапазон 6 – SWIR 1	1,566 – 1,651	30
Диапазон 7 – SWIR 2	2,107 – 2,294	30
Диапазон 8 – панхроматический	0,503 – 0,676	15
Диапазон 9 – Cirrus	1,363 – 1,384	30
Диапазон 10 – термический 1	10,60 – 11,19	100* (30)
Диапазон 11 – термический 2	11,50 – 12,51	100* (30)

*Полосы TIRS получают с разрешением 100 м, но в поставляемых продуктах данные пересчитываются до 30-метровых пикселей.



Рис. 2.21. Одно из первых изображений с Landsat-8. Fort Collins, Колорадо, США. Естественные цвета (OLI; каналы 2 (синий), 3 (зелёный) и 4 (красный))



Рис. 2.22. Одно из первых изображений с Landsat-8. Fort Collins, Колорадо, США. Искусственные цвета (OLI; каналы 3 (зелёный), 5 (ближний ИК 1) и 7 (ближний ИК 2) изображены соответственно как синий, зелёный и красный)

Инструмент *Thermal InfraRed Sensor (TIRS)* был создан в центре NASA Goddard Space Flight Center и предназначен для получения изображений в дальнем ИК-диапазоне. Инструмент TIRS использует тот же принцип получения изображений, что и OLI, и также имеет полосу обзора в 185 км. Изображения получают в двух каналах дальнего (теплого) ИК-диапазона, 10 и 11, которые совместно работают в том же диапазоне, что и канал TIRS на более ранних спутниках программы Landsat (см. табл. 2.2).

В 2021 году был запущен **Landsat-9**. Новый спутник похож на предыдущий, но имеет несколько новаций, в том числе возможность отправлять данные с более высоким радиометрическим разрешением. Благодаря этому спутник может обнаруживать более тонкие различия в ландшафте по сравнению со старыми спутниками, особенно над водой или густыми лесами. Landsat-9 может различать более 16 000 оттенков цвета с заданной длиной волны. В то время как Landsat-8 всё ещё находится на орбите, спутник Landsat-9 заменяет Landsat-7 (для сравнения: Landsat-7 может обнаруживать только 256 оттенков). На борту спутника есть пара датчиков, в том числе Operational Land Imager 2, используемый для обнаружения видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного света в девяти длинах волн. Второй датчик Thermal Infrared Sensor 2 предназначен для обнаружения теплового излучения на двух длинах волн и используется для измерения температуры поверхности земли и любых температурных изменений.

Ожидается, что два спутника, Landsat-9 и Landsat-8, будут собирать около 1500 изображений поверхности планеты ежедневно и охватывать весь земной шар каждые восемь дней.

Проект Европейского космического агентства (ЕКА) Sentinel

Космические аппараты **Sentinel-2A** (с 2015 года), **2B** (с 2017 года) – это проект Европейского космического агентства (ЕКА) Sentinel. В 2024 году планируется запуск Sentinel-2C и Sentinel-2D, которые будут оснащены оптико-электронным мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, что гарантирует отображение различий в состоянии растительности, в том числе и временные изменения, а также сводит к минимуму влияние атмосферы на качество съемки. Орбита высотой в среднем 785 км, наличие в миссии двух спутников позволяют проводить повторные съемки каждые 5 дней на экваторе и каждые 2 – 3 дня в средних широтах (табл. 2.3).

Основные технические характеристики КА Sentinel-2A, 2B:

Наименование КА.....	Sentinel-2A, 2B
Разработчики.....	EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне – Airbus Defence and Space)
Оператор.....	Европейское космическое агентство (ESA)
Ракета-носитель.....	РН Vega (Франция)
Дата запуска.....	23 июня 2015 года (Sentinel-2A), 7 марта 2017 года (Sentinel-2B)
Орбита.....	солнечно-синхронная
высота, км	786
наклонение, град	98,5
масса КА, кг	1200
Расчетный срок функционирования (лет).....	7

Таблица 2.3

Основные режимы съемки серии Sentinel

Режим съемки	VNIR										SWIR		
Спектральные каналы	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	9	10	11	12
Спектральный диапазон, мкм	0,44	0,49	0,56	0,66	0,70	0,74	0,78	0,84	0,86	0,94	1,38	1,61	2,19
Пространственное разрешение (в надире), м	60	10	10	10	20	20	20	10	20	60	60	20	20
Ширина полосы съемки, км	290												
Периодичность съемки, сутки	От 5 (на экваторе) до 2-3 (в средних широтах)												

Спутниковая система наблюдений SPOT

SPOT (System Probatoire D'Observation de la Terra) – спутниковая система наблюдений за поверхностью Земли, разработанная Францией совместно с Бельгией и Швецией, начала функционировать с момента запуска **SPOT-1** в 1986 году.

Спутники находятся на субполярной, солнечно-синхронной орбите высотой 800 км. Над одной и той же точкой поверхности планеты они оказываются каждые 26 дней при одинаковой высоте Солнца.

На спутниках установлены оптико-электронные сканеры, устройства магнитной записи и аппаратура для передачи информации на Землю. Сканеры осуществляют многозональную съемку в трех спектральных диапазонах с разрешением 20 м или в одном панхроматическом канале с разрешением 10 м.

Съемочный аппарат с помощью системы зеркал имеет возможность вести съемку с отклонением от вертикали до 27° в ту или иную сторону перпендикулярно траектории полета. Этот способ позволяет устранить длительные перерывы в съемке. Отклонение полосы съемки от трассы при периоде повторения 26 суток дает возможность получать снимки через 1 – 4 дня (4 суток – для приэкваториальных территорий и 2 – 3 суток – для территорий около широты 45°). Такие снимки относятся к периодическим частично регулируемым.

Съемка может осуществляться в полосе шириной до 475 км в обе стороны от траектории. Ширина захватываемой каждым из аппаратов полосы изменяется от 60 км в надире до 80 км при максимальном угле отклонения.

В 2002 году был запущен **SPOT-5**, оснащенный высокоточным стереоскопическим детектором, позволяющим получать стереопары для топографических целей и построения моделей рельефа, и двумя

камерами высокого разрешения (High Resolution Geometric imagers), позволяющими получать черно-белые изображения с разрешением 2,5 м и цветные – с разрешением 10 м. Кроме того, на SPOT-5 установлена камера Vegetation 2, позволяющая получать практически ежедневно снимки всей поверхности Земли с разрешением 1 км.

Основное приложение дистанционных данных, полученных со спутника SPOT-5, – создание трехмерных карт поверхности Земли, исследование состояния растительности вблизи крупных городов и экологический мониторинг.

Новое поколение спутников этой серии представляют **SPOT-6** и **SPOT-7**. Они аналогичны и образуют группировку спутников для получения изображений Земли, предназначенных для обеспечения непрерывности данных с высоким разрешением и широким диапазоном вплоть до 2024 года.

SPOT-6 был выведен на солнечно-синхронную орбиту индийской ракетой-носителем PSLV с космодрома имени Сатиша Дхавана на острове Шрихарикота в 2012 году. Он обладает более высокими возможностями по сравнению со своими предшественниками и ведет съемку Земли с разрешением до 1,5 м в панхроматическом режиме и до 6 м в режиме многоспектральной съемки. SPOT-7 выведен на орбиту в 2014 году (рис. 2.23, 2.24).

Технические характеристики бортовой аппаратуры:

Наименование съемочной аппаратуры.....	NAOMI
Спектральные диапазоны, мкм...	панхроматический: 0,45 – 0,75 синий: 0,45 – 0,52 зеленый: 0,53 – 0,60 красный: 0,62 – 0,69 ближний ИК: 0,76 – 0,89
Число элементов линейки.....	7000 (PAN), 1750 (MS)
Разрешение на местности MS, м.....	8 (после обработки – 6)
Ширина полосы обзора, км.....	800
Ширина полосы съемки, км.....	60

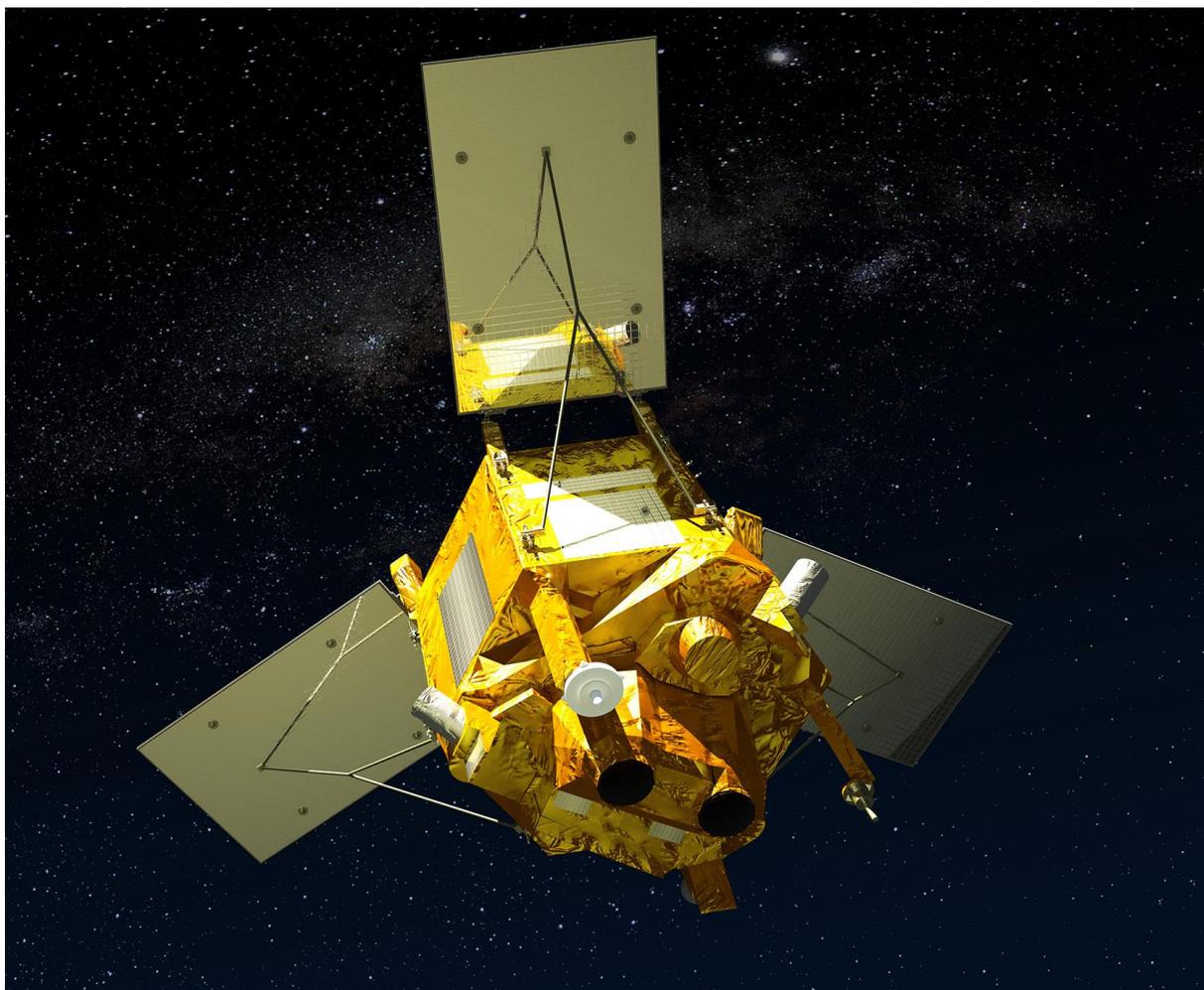


Рис. 2.23. Спутник SPOT-7

SPOT совместно с КА группировки Pleiades образуют единую систему. Четыре КА – Pleiades-1/2 и SPOT 6/7 – размещены в одной орбитальной плоскости и равномерно разнесены по фазовому углу на 90° друг от друга. Это позволяет получать съемку одной и той же территории два раза в день как в более широкой полосе с высоким разрешением с помощью спутников SPOT, так и в режиме детализированной съемки со сверхвысоким разрешением с помощью аппаратов Pleiades.



a)



b)

Рис. 2.24. Фотографии со спутника SPOT-7: а – Ferrari World, Abu Dhabi United Arab Emirates; б – Airplane Graveyard Tucson, AZ

Спутники Pleiades («Плеяды»)

Pleiades satellites (Плеяды) – новое семейство спутников ДЗЗ сверхвысокого пространственного разрешения, состоящее из двух одинаковых спутников **Pleiades-1A** и **Pleiades-1B**. Pleiades-1A выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 694 км 16 декабря 2011 года, Pleiades-1B запущен 2 декабря 2012 года (табл. 2.4, рис. 2.25, 2.26).

Таблица 2.4

Основные характеристики аппаратуры Pleiades

Параметр	Режим съемки	
	панхроматический	мультиспектральный
Спектральный диапазон, мкм	0,48 – 0,83	0,43 – 0,55 (синий)
		0,49 – 0,61 (зеленый)
		0,60 – 0,72 (красный)
		0,79 – 0,95 (ближний ИК)
Пространственное разрешение (в надире), м	0,5	2
Полоса обзора, км	800	–
Ширина полосы съемки, км	20	–

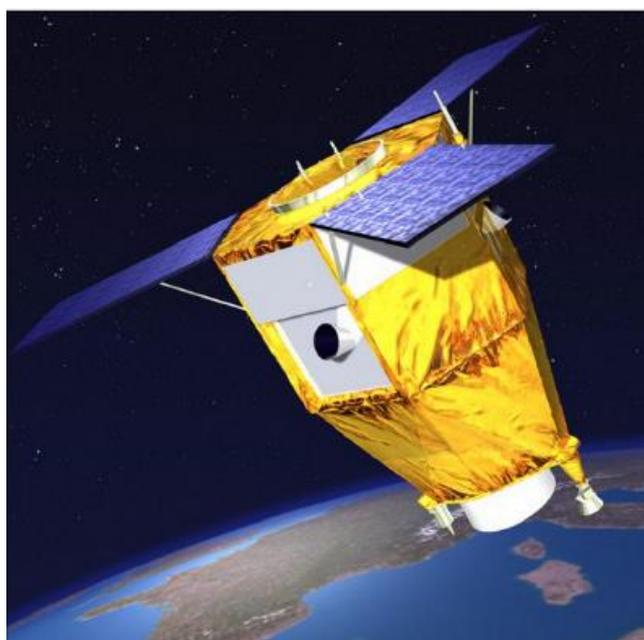


Рис. 2.25. КА Pleiades

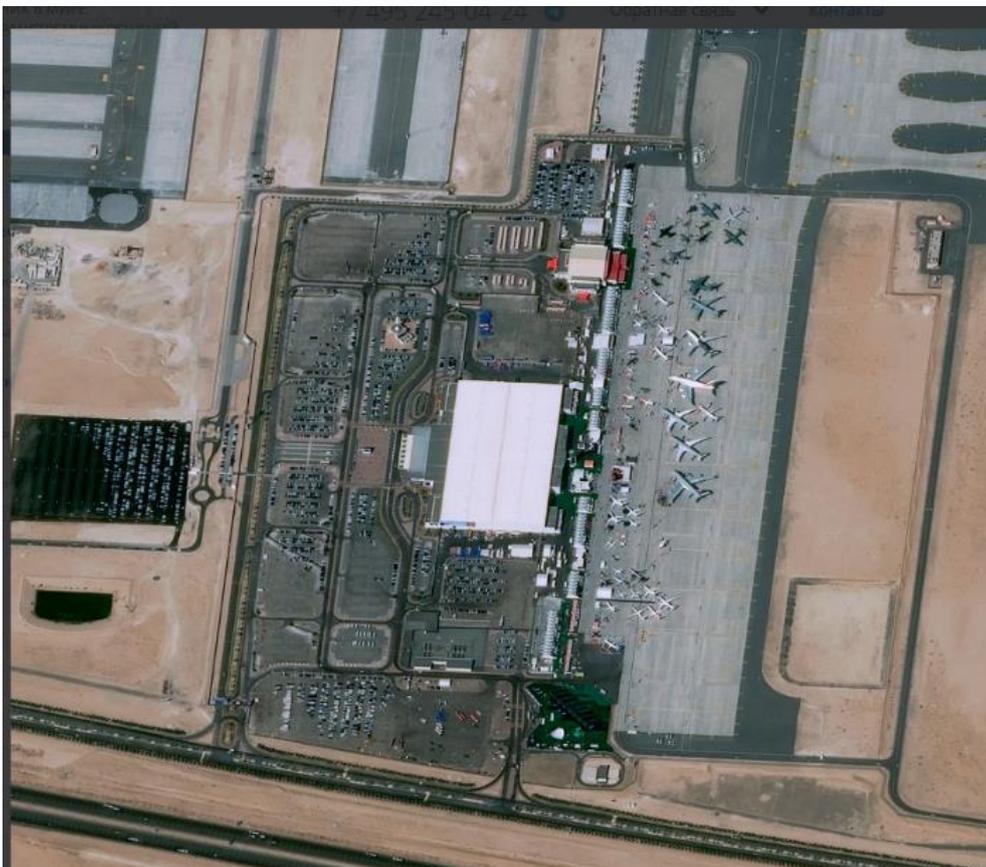


Рис. 2.26. Примеры снимков КА Pleiades

Pleiades передают данные, отличающиеся широкой полосой съемки (20 км), высокой точностью геопозиционирования (меньше 4,5 м (СЕ90)), без использования наземных опорных точек, а также возможностью автоматизированного получения ортотрансформированных продуктов в течение 30 мин. Кроме того, Pleiades satellites способны получать однопроходные стереопары и триплеты, а также вести съёмку участков до 100 × 100 км с одного витка.

Спутники серии Terra/Aqua

Начало американской программе Terra (EOS AM-1) положил запуск спутника Terra в 1999 году, второй спутник серии Aqua приступил к работе в 2002 году. Спутники выведены на солнечно-синхронную, полярную орбиту высотой 705 км, период обращения – 98,8 мин (табл. 2.5).

КА Terra оснащен пятью удаленными датчиками и предназначен для мониторинга состояния окружающей среды Земли и текущих изменений в ее климате:

1. *MODIS* – спектрорадиометр среднего разрешения (до 250 м), имеет 36 спектральных каналов в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах и позволяет проводить регулярную, 2 – 3 раза в сутки (полоса обзора – 2230 км), съемку одной территории с разрешением до 250 м. Это дает возможность на основе полученных данных анализировать метеорологическую ситуацию, выполнять расчет температур, автоматическое детектирование очагов пожаров, расчет вегетационного индекса, а также решать задачи, связанные с изучением природных ресурсов и мониторингом экологической ситуации в регионах.

2. *CERES* (Облака и система лучистой энергии Земли).

3. *MISR* (Многоугольный спектрорадиометр).

4. *MOPITT* (Измерения загрязнения в тропосфере).

5. *ASTER* – усовершенствованный космический радиометр теплового излучения и отражения, создающий изображения облаков, льда, воды и поверхности Земли с высоким разрешением с помощью трех различных подсистем датчиков. Он фиксирует коротковолновое инфракрасное излучение (SWIR), тепловое инфракрасное (TIR), видимое и ближнее инфракрасное (VNIR). Снимки содержат 14 мультиспектральных каналов.

тиспектральных диапазонов (от видимого до теплового инфракрасного). SWIR прекратил работу в 2008 году.

Технические характеристики спутника Terra:

Наименование КА.....	Terra (EOS-AM-1)
Страна.....	США
Разработчик.....	Lockheed Martin
Оператор.....	NASA
Ракета-носитель (РН).....	Atlas-2AS
Дата запуска.....	18.12.1999
Орбита.....	солнечно-синхронная, утренняя
Высота, км.....	705
Наклонение, град.....	98,3
Платформа.....	нет
Съемочная аппаратура.....	ASTER, CERES, MISR, MODIS, MOPITT
Углы отклонения, град...	$\pm 8,55 - 24$
Срок активного существования, лет.....	5
Период повторного наблюдения, сутки.....	16
Размер КА, м \times м.....	нет
Масса КА, кг.....	5190

КА Aqua в настоящее время передает высококачественные данные с четырех приборов:

1. *MODIS* – назначение, аналогичное на Terra.
2. *AIRS* предназначен для измерения влажности, температуры, характеристик облачного покрова и парниковых газов в атмосфере.
3. *AMSU* используется совместно с *AIRS* для получения точных профилей температур атмосферы и обеспечивает измерение температуры атмосферы до высоты в 40 км.
4. *CERES* предназначен для сканирования верхних слоёв атмосферы. Используя данные с отображающих приборов на борту Aqua, CERES способен определять свойства облаков, включая их высоту, толщину и размеры частиц.

Таблица 2.5

Основные характеристики аппаратуры MODIS на борту спутников Terra/Aqua

Номера каналов	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника)
1 – 2	0,62 – 0,88	250	2300	1 – 2 раза в сутки в зависимости от широты места съемки
3 – 7	0,46 – 2,16	500	2300	
8 – 19	0,41 – 0,97	1000	2300	
20 – 25	3,66 – 4,55	1000	2300	
26	1,36 – 1,39	1000	2300	
27 – 36	6,54 – 14,39	1000	2300	

Вопросы к главе 2

1. Из каких космических аппаратов состоит современная российская орбитальная группировка?
2. Каковы основные особенности комплекса «Метеор-3М»?
3. В каких целях используется информация, получаемая с космического комплекса «Ресурс-П»?
4. Какие космодромы, с которых запускают космические аппараты в России, вы знаете?
5. Какие зарубежные спутники можно использовать для изучения природных ресурсов?

Библиографические ссылки

1. Дистанционное зондирование Земли [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/24707/> (дата обращения: 21.05.2023).
2. 45 лет вокруг света [Электронный ресурс]. URL: <https://innoter.com/articles/45-let-vokrug-sveta/> (дата обращения: 21.05.2023).

Глава 3. ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ОСНОВЫ ТЕМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Данные дистанционного зондирования (ДДЗ) поставляют большой объем информации о местности. Однако это информация первичная, она требует дальнейшей обработки, т. е. интерпретации имеющихся данных для получения информации о свойствах исследуемых объектов. Для этого в последнее время активно применяется **геоинформационный анализ ДДЗ**, который обеспечивает оперативность и объективность получаемой информации и использует разнообразные методы для поэтапной обработки ДДЗ. Можно выделить несколько стадий обработки данных в дистанционном зондировании [1; 2].

На первом этапе обработки осуществляется импорт данных, полученных со спутника, либо сканирование данных (рис. 3.1).

Второй этап предполагает анализ данных для последующего составления плана их обработки.

На третьем этапе выполняется регистрация изображения, затем оно переводится в определенную картографическую проекцию.

На четвертом этапе возможно объединение или комбинирование нескольких изображений с целью получения целостной картины об исследуемом объекте или явлении.

На следующем этапе изображение, синтезированное из нескольких других, подвергается обработке по улучшению качества и приведению всех его характеристик к единым показателям.

На шестом этапе происходит автоматизированная классификация объектов изображения и группирование по свойствам (атрибутам). Этот этап существенно упрощает процесс организации атрибутивных данных на основе автоматизированного решения этой задачи.

Следующий этап формирует основу для применения ГИС-технологий: создаются структуры атрибутивных данных в соответствии с требованиями конкретной ГИС, а также структура связей позиционных и атрибутивных данных.

Восьмой этап предполагает векторизацию растрового изображения с использованием данных классификации и организованной связи «координаты – атрибуты». На этом этапе происходит существенное (на 2 – 3 порядка) сжатие исходных данных при сохранении информации о выбранных объектах.

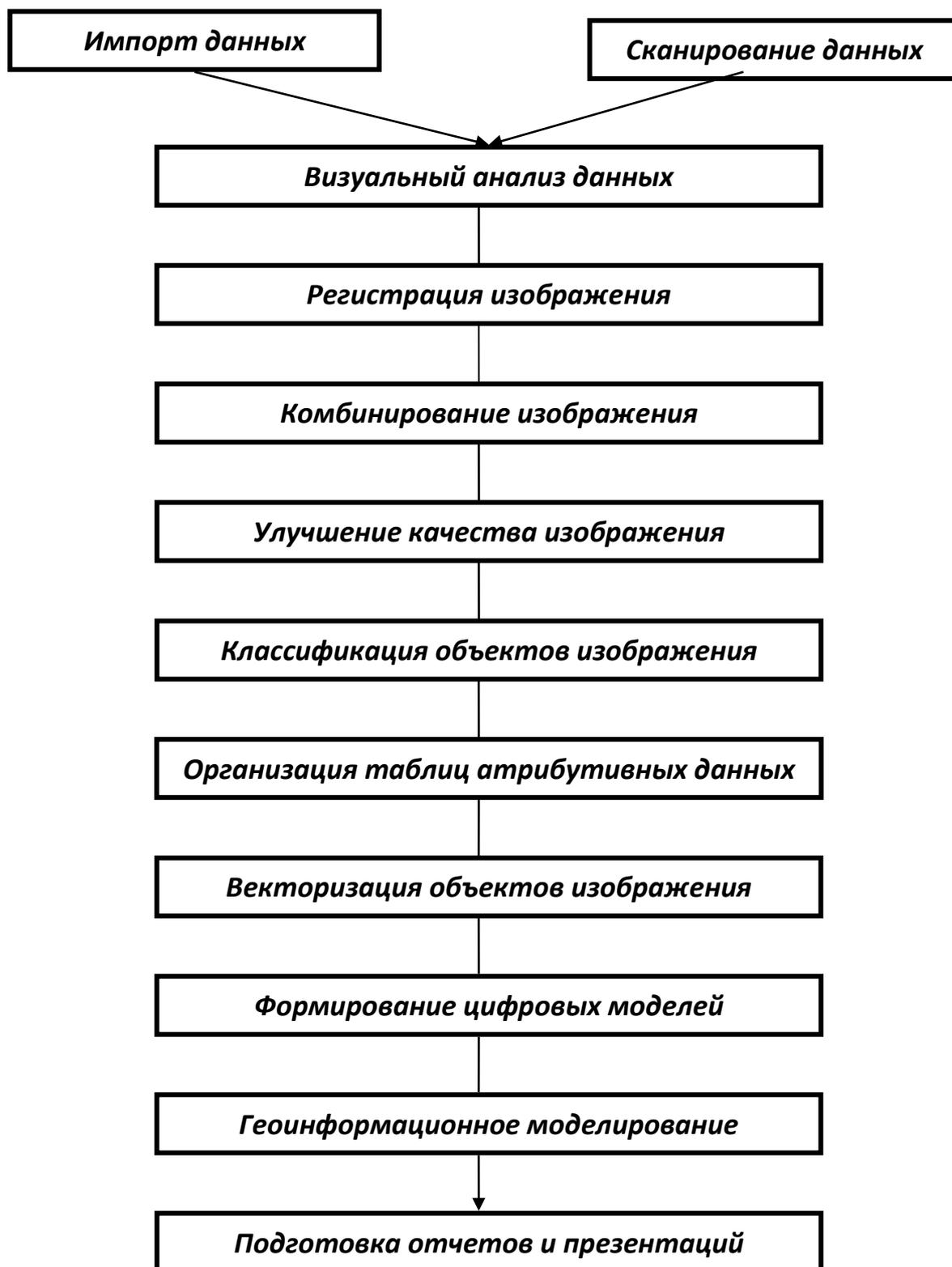


Рис. 3.1. Технологическая схема обработки ГДЗ в ГИС-технологиях [3]

На девятом этапе строят цифровую модель как основу хранения данных и моделирования в ГИС.

На десятом этапе выполняются процедуры геоинформационного моделирования, которые могут повторно включить ряд процедур, таких как комбинирование объектов, ректификация, классификация и др.

Геоинформационный анализ (ГИС-анализ) – многоаспектное понятие. По методам и результатам обработки анализ в геоинформатике подразделяют на качественный и количественный, по способам обработки – на визуальный автоматизированный, статистический и анализ рядов данных. По качественному уровню анализа данных его подразделяют на системный, обобщенный, семантический (смысловой), параметрический (оценочный).

Первым этапом ГИС-анализа традиционно является визуальный анализ изображений.

3.1. Визуальный анализ ДЗ

В процессе обработки космический снимок сканируется, в результате чего создается его информационная цифровая модель в растровом формате. Подобная же модель получается при использовании цифровых фотокамер и сканировании карт, хотя и с большей структурной определенностью и классифицированностью.

Визуальный качественный анализ, как правило, предшествует автоматической обработке снимков и включает следующие действия: оценку характера растрового изображения как самостоятельного объекта; выявление системы объектов, подлежащих опознанию и интерпретации; оценку особенностей визуального восприятия объектов; определение иерархии классов анализа изображения; выделение и оценку признаков, по которым будут проводиться опознание и интерпретация; оценку степени классифицированности растрового изображения применительно к имеющимся программно-техническим средствам обработки изображений.

Уровни визуального анализа

Интерпретируемые объекты требуют различного визуального и индикационного анализа. Обычно выделяют четыре уровня визуаль-

ного анализа: обобщенный, формальный, непосредственный семантический и опосредованный семантический.

Обобщенный уровень анализа данных начинается с рассмотрения всего растрового изображения без разбиения его на отдельные объекты. Ведущая роль отводится иконическим характеристикам, по которым проводится классификация изображения. Затем рассматриваются отдельные объекты на изображении (также по иконическим характеристикам).

На следующем этапе выбираются статистические методы обработки и модели для описания данных, при этом используются в основном статистические признаки.

На заключительном этапе обобщенного анализа выявляются взаимосвязи между объектами изображения.

Формальный уровень анализа направлен на исследование объекта безотносительно ко всему изображению. По существу, это анализ структуры и частей структуры изображения по некоторым «формальным признакам»: средняя величина деталей изображения; экстремальные значения и распределение деталей; характер чередования деталей; средняя оптическая плотность и ее экстремальные значения; периодичность колебания оптических плотностей и т. п.

Непосредственный семантический уровень анализа связан со смысловым восприятием внешних объектов природной обстановки – гидрографических, почвенно-растительных, антропогенных – и их комплексов.

При анализе отдельных объектов, представленных на растровом изображении, в основном используются прямые дешифровочные признаки, но могут быть задействованы и косвенные признаки. Это означает, что визуальный анализ дополняется индикационным.

В результате каждый класс внешних объектов характеризуется своей структурой, своим набором дешифровочных признаков. Так, например, элементы гидрографической сети опознаются по своим прямым признакам (цвет, извилистость и др.), типы болот и их разновидности – по сочетанию прямых и косвенных признаков: характерной форме, неоднородному тону и своеобразному рисунку, геоморфологическому положению, характеру микрорельефа, угнетенному характеру древостоя.

Опосредованный семантический уровень анализа связан с индикационным, логическим анализом элементов объектов. К ним относятся, например, внутренние компоненты ландшафта – горные породы и геологическое строение, гидрогеологические условия и др. Для их анализа применяются индикаторы, которые включают группу косвенных и комплексных индикационных признаков.

Косвенные индикаторы (частные индикаторы) – это индикаторы, которые условно могут быть разделены на группы в соответствии с основными внешними компонентами ландшафта: геоморфологические, гидрографические, геоботанические, почвенные, антропогенные и др. Данные индикаторы коррелятивно связаны с литогенной основой ландшафта. Корреляция обычно носит множественный характер. На практике применяют системы индикаторов разного порядка, находящиеся в установленных отношениях между собой, – «индикационные группы».

К *комплексным индикаторам* относится макроструктура фотоизображения, связанная с внутренним строением ландшафта.

Каждый класс внутренних компонентов ландшафта характеризуется определенной внешней структурой, своим набором *дешифровочных признаков*.

Визуальный анализ выполняют по прямым и косвенным дешифровочным признакам. Дешифровочные признаки – это свойства объектов или их взаимосвязей, которые позволяют по фотоизображению распознавать сами объекты. Признаки дешифрирования природно-антропогенных объектов описаны в главе 5.

3.2. Классификационные методы анализа

Под **классификацией** следует понимать методы обработки информации при изучении новых объектов и явлений, основанные на отнесении изучаемых объектов к известным классам и, если требуется, образовании новых классов и их упорядочении. Наиболее развит такой подход в теории и методах обработки данных дистанционного зондирования. Это обусловлено огромным объемом первичной информации, получаемой с помощью космических снимков, которую невозможно обработать вручную.

Обычно анализу подвергаются растровые изображения. Следует выделить несколько процедур классификации при обработке первичных данных в ГИС-технологиях: без обучения (автономная, неконтролируемая), с обучением и специальная. Кроме того, в зависимости от поставленной цели классификация может быть многоклассовой или одноклассовой. Большинство подобных методов реализуются с помощью кластерного анализа.

В процессе классификации пиксели, составляющие непрерывное растровое изображение, разбиваются на несколько категорий на основании их файловых спектральных значений. Каждый пиксель получает новое значение, входящее в заранее заданное дискретное множество, исходя из его первоначального значения, которое входило в непрерывное множество. Таким образом, классификация – это преобразование непрерывного растрового изображения в тематическое, которое может содержать такие классы, как, например, типы земельных угодий или ландшафтов. Качество классификации во многом зависит от исходных данных.

Классификация без обучения (неконтролируемая, автономная, или кластер-анализ) представляет собой автоматический метод нахождения категорий данных. Она позволяет пользователю задать основные руководящие принципы для определения модели классификации в виде некоторых статистических характеристик, но само определение классов и отнесение пикселей изображения к тому или другому из них происходит полностью автоматически.

Автономная классификация обычно используется, когда имеется информация о том, что исходные наборы данных принадлежат к известным классам или подклассам. Неконтролируемая классификация автоматически идентифицирует кластеры подобных данных.

Процедура классификации из общего набора данных выделяет те объекты, которые принадлежат к известным классам. При этом необходимо задавать некоторые параметры или признаки, которые служат основой для анализа и отнесения к известному классу. Для простой классификации определяют только входной и выходной наборы данных. После этого программа автоматически выполняет классификацию, используя заданные параметры класса.

Существует два вида классификации без обучения: параметрическая и непараметрическая.

Параметрическая классификация наиболее широко представлена в ГИС-технологиях. Она требует знания пределов численных значений параметров исследуемых объектов и явлений.

Непараметрическая классификация менее известна, применяется реже и основана на информации о степени близости между исследуемыми объектами. Именно эта ветвь классификации более открыта для интеллектуализации классификационных процедур, поскольку в ней больше эвристических процедур, чем в параметрической классификации.

Классификация с обучением позволяет не только выявить объекты, но и определить для них новые классы в отсутствие существующих. Она начинается с определения областей обучения (обучающих выборок, эталонов), выделяемых посредством компьютерной графики, которые хранятся в соответствующем наборе данных.

В процессе классификации ищут области, содержащие пиксели, соответствующие эталонам. В результате получается набор данных, содержащий набор назначенных классов. Классы будут иметь те же самые имена, что и области обучения. При этом сохраняется возможность редактировать параметры каждого класса.

Результаты любой контролируемой или неконтролируемой классификации могут быть использованы последовательно. Можно выполнить неконтролируемую классификацию данных, затем использовать ее результаты как входные данные для контролируемой классификации, для уменьшения числа классов.

Наиболее целесообразно применять контролируемую классификацию, если известны классы, в которые входят исследуемые объекты.

К **специальным видам классификации** относится *одноклассовая*. Данный способ применяется, когда нужно выделить одну группу объектов или ограниченное число классов. Этот подход широко применяется при исследовании природных ресурсов.

Существуют различные способы создания одного класса. Например, используют диаграмму рассеивания для обозначения спектральной области класса выделяемых объектов. Такой подход целесо-

образен, когда класс можно легко выделить в спектральном пространстве (водная поверхность).

Специальная классификация может выполняться на основе задания параметров или соотношения между параметрами. При этом исследователю неизвестно, чему в действительности может соответствовать такое соотношение параметров. Такие совокупности называют *виртуальным набором данных*.

К данному способу классификации относится и *классификация с наложением «маски»*. Математически это соответствует введению неких ограничений, но визуально это решают, выделяя оптические характеристики некой пространственной области – «маски» и тем самым исключая ее пространственное определение. Например, при выполнении классификации только областей с растительностью маскируют все, «что не растительность». Затем проводят классификацию выделенных районов. Можно использовать маскирование не для исключения, а для включения классифицируемых регионов. Эти процедуры реализуются методами геоинформационного моделирования.

Один из эффективных методов применения классификации как интеллектуальной технологии в ГИС – векторизация данных. Классификация в этом случае служит для выделения изображений, которые впоследствии будут векторизоваться. Особенно эффективно эта процедура может использоваться для векторизации сканированных картографических изображений.

Другой подход к применению классификации – анализ и улучшение качества изображения. Эти методы создают локальные области классов, состоящие из небольшого числа ячеек. Можно сглаживать или выборочно фильтровать эти данные, уменьшая число локальных областей.

Результаты классификации используются для интерпретации и идентификации областей, объектов и явлений. Ячейки или их совокупности в наборе данных сопоставляют с конкретными числовыми значениями, определяющими классы или характеристики класса. Классы могут идентифицировать растительность, полезные ископаемые, экологическую ситуацию.

3.3. Спектральные профили

Солнечное электромагнитное излучение, достигая земной поверхности, частично поглощается, а частично отражается от нее. Все объекты земной поверхности испускают электромагнитное излучение, которое содержит как собственное, так и отраженное от них солнечное излучение. Характер электромагнитного излучения зависит от вида и состояния объекта, на этом базируется их изучение дистанционными методами.

Изображение в видимой части спектра формируется в основном за счет отраженного излучения, величину которого характеризуют несколькими параметрами. Для исследования ландшафтов используются коэффициенты интегральной и спектральной яркости [4].

Коэффициент интегральной (ахроматической) яркости (R), или коэффициент яркости (альбедо) – это отношение интегральной яркости объекта в данном направлении B к яркости идеально рассеивающей, полностью отражающей радиацию поверхности в том же направлении B° при одинаковых условиях их освещения,

$$R = B/B^\circ.$$

Значение R может составлять от 1 до 0, при этом максимальное значение R соответствует свежевывавшему снегу, минимальные коэффициенты имеют черноземные почвы, асфальт и др.

Однако объекты земной поверхности отражают световой поток по-разному в разных зонах спектра – это зависит от спектральной отражательной способности объектов, которая характеризуется через **коэффициент спектральной яркости (КСЯ)**, который определяется аналогично коэффициенту яркости по отношению монохроматических яркостей):

$$R_\lambda = B_\lambda/B^\circ_\lambda,$$

где λ – длина волны.

Коэффициент яркости представляется в табличной форме, коэффициент спектральной яркости – в табличной и графической в виде *спектральных профилей* (спектральных кривых отражения). Очевидно, что коэффициент спектральной яркости содержит больше инфор-

мации, чем интегральный. Он часто позволяет выявлять существенные различия свойств объектов, коэффициенты яркости которых примерно одинаковы. Характер спектральных кривых отражения – один из дешифровочных признаков природных и антропогенных объектов. Метод дешифрирования, основанный на анализе спектральных кривых объектов, называют *спектрометрическим*.

Объекты распознаются по характерным длинам волн в спектральном распределении КСЯ. Дешифрирование объектов осуществляется путем определения длин волн, на которые приходятся минимумы или максимумы КСЯ. Например, известняк отражает падающий на него световой поток в зоне 0,45 – 0,5 мкм намного сильнее, чем красный алевролит, а отражение в зоне 0,65 – 0,7 мкм для красного алевролита намного больше, чем известняка, в то же время в зоне 0,575 – 0,6 мкм отражательная способность обеих пород одинакова, здесь их спектральные кривые пересекаются.

По спектральной отражательной способности в видимой области спектра все многообразие объектов на Земле делят на четыре класса (рис. 3.2).

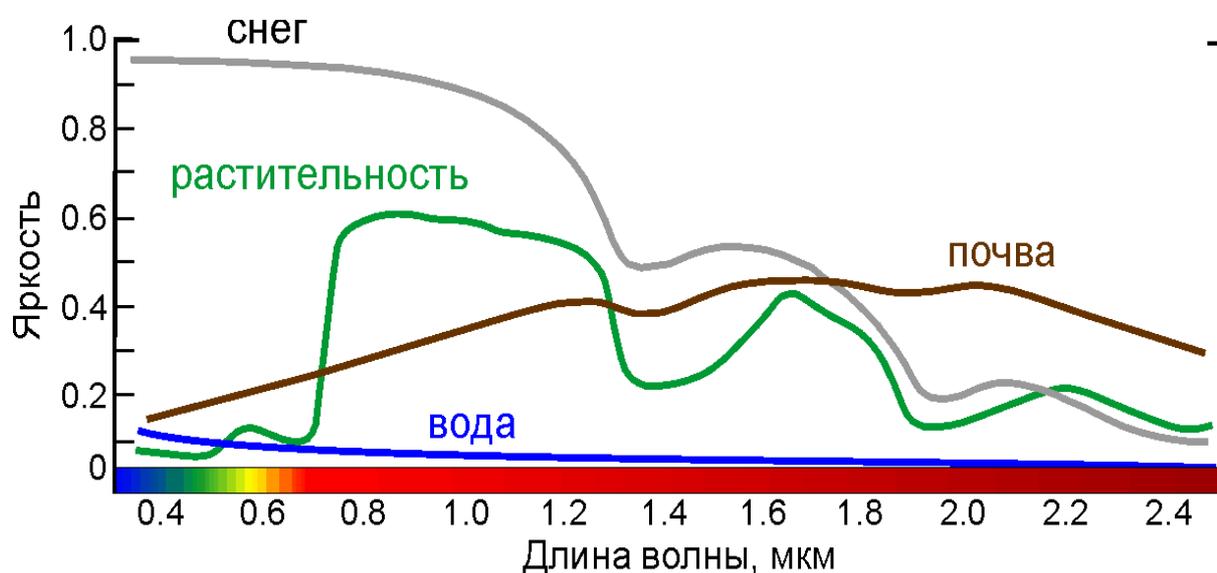


Рис. 3.2. Спектральные профили природных объектов

1-й класс (горные породы и почвы) – объекты характеризуются низким коэффициентом спектральной яркости в коротковолновой ча-

сти спектра. По мере движения от коротковолновой части к ближней ИК-зоне он постепенно повышается.

2-й класс (растительный покров) – имеет резко различающиеся по зонам коэффициенты спектральной яркости (низкий – в коротковолновой (сине-фиолетовой) и в красной частях спектра; высокий – в зеленой (0,55 мкм) и ближней ИК-зонах).

3-й класс (водные поверхности) – при общем низком коэффициенте спектральной яркости во всех зонах R уменьшается от коротковолновой к ближней ИК части спектра.

4-й класс (снежные поверхности) – при общем высоком коэффициенте спектральной яркости слабое понижение наблюдается в ближней ИК-зоне.

Внутри каждого класса также существуют различия. Например, на отражательную способность снега сильно влияет его влажность, которая снижает коэффициент спектральной яркости. Благодаря различиям в отражательной способности разных видов деревьев, главным образом лиственных и хвойных, их можно опознать на космических снимках.

3.4. Зональные отношения

Признаки, характеризующие спектральный контраст, – это количественные характеристики спектрального контраста между двумя спектральными зонами λ_1 и λ_2 ; они позволяют отделить влияние факторов, определяющих форму спектрального распределения КСЯ, от факторов, приводящих к его равномерному изменению.

В настоящее время существует большой набор различного рода признаков (зональных отношений). В качестве примеров приведем некоторые из них:

- простая зональность – $D(\lambda_1, \lambda_2) = r(\lambda_1) - r(\lambda_2)$;
- простое зональное отношение – $Q(\lambda_1, \lambda_2) = r(\lambda_1)/r(\lambda_2)$;
- корень квадратный простого деления – $SQ(\lambda_1, \lambda_2) = (r(\lambda_1)/r(\lambda_2))^{1/2}$;
- сложное деление – $D_1 = r(\lambda_1)/(r(\lambda_1) + r(\lambda_2))$;

- сложное деление – $D_2 = (r(\lambda_1) - r(\lambda_2))/r(\lambda_1)$;
- сложное зональное отношение (вегетационный индекс) – $V = (r(\lambda_1) - r(\lambda_2))/(r(\lambda_1) + r(\lambda_2))$.

Названные признаки широко используются в различных исследованиях. Так, признак D (0,65 – 0,45) линейно зависит от содержания в почве окиси железа, для которой характерно значительное увеличение КСЯ при переходе от сине-зеленого к красному участку видимого диапазона. Использование зональных отношений в двух участках спектра значительно уточняет и упрощает дистанционные измерения фитомассы, так как при изменении высоты Солнца, состояния атмосферы, влажности почвы, вида ее обработки, угла наклона объекта и эталона зональное отношение меняется незначительно. При этом выбираются такие участки спектра, в которых земная вегетирующая растительность имеет различную отражательную способность. Используются простые зональные отношения волн различной длины с максимумами чувствительности 0,75 и 0,67 мкм, 0,78 и 0,66 мкм, 0,800 и 0,675 мкм.

Индексы, используемые для характеристики почвенно-растительного покрова

Метод вегетационных индексов позволяет получать количественные оценки проективного покрытия растительностью.

Для определения фитомассы используется коэффициент простого зонального отношения q , или вегетационный индекс, основанный на отношении каналов ближнего ИК и красного излучений. Он определяется делением коэффициента яркости в ближней части ИК-спектра p_1 на коэффициент яркости в красной части спектра p_2 :

$$q = p_1/p_2.$$

Отношение каналов позволяет убрать многие факторы, затрудняющие дистанционное определение фитомассы. Выбор каналов красного и ближнего ИК-спектра при этом подходе объясняется спектральными свойствами зелёной растительности. Расчет базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений (рис. 3.3).

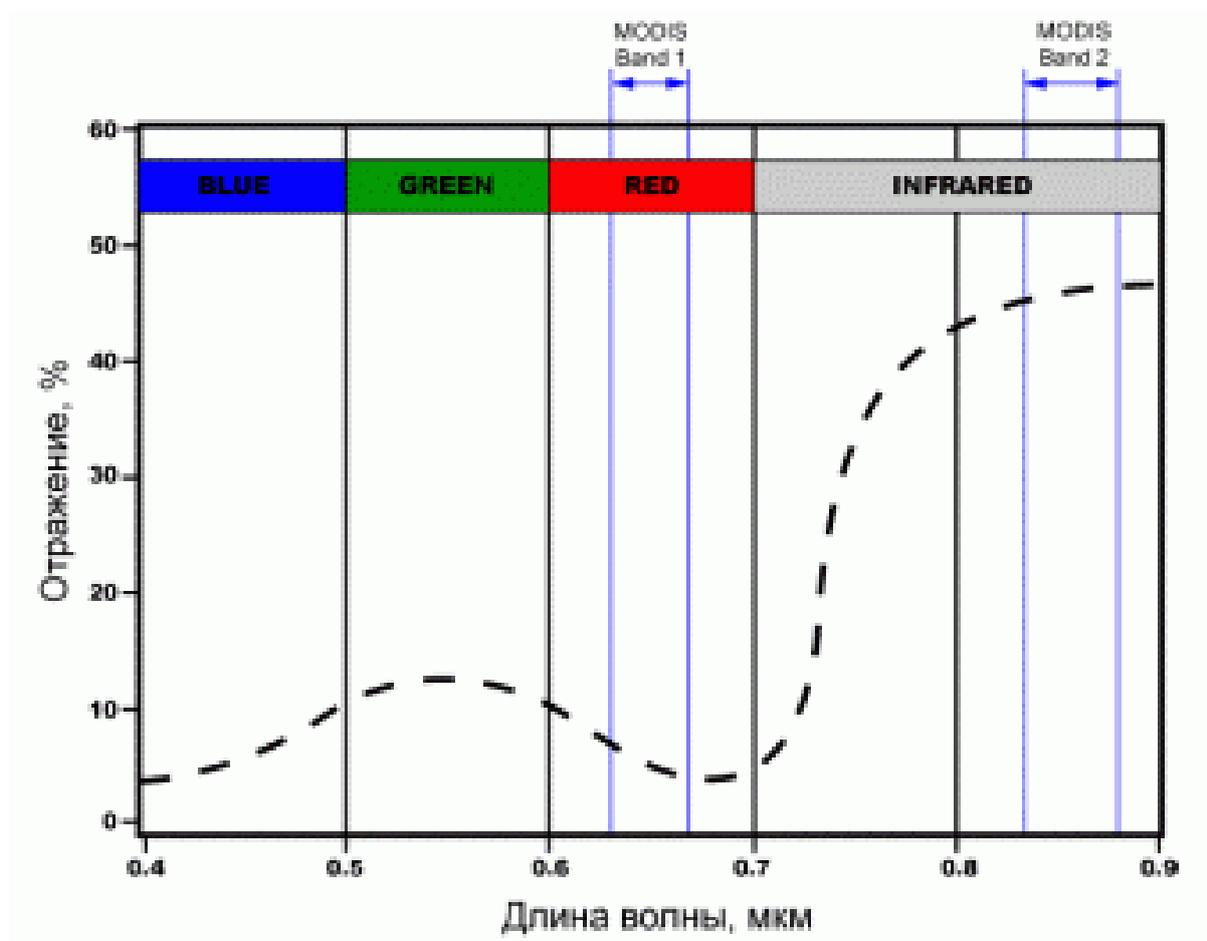


Рис. 3.3. Спектральный профиль растений [5]

На красный диапазон (0,6 – 0,7 мкм) приходится максимум поглощения солнечного излучения хлорофиллом высших растений, на инфракрасный диапазон (0,7 – 1,0 мкм) – максимум отражения. Высокое содержание хлорофилла, высокий уровень фотосинтеза сопровождаются большим поглощением в красной области спектра и высоким отражением в ближней инфракрасной.

Вегетационные индексы рассчитываются по следующим формулам:

$$R_{45} = CH4/CH5,$$

$$R_{46} = CH4/CH6 \text{ и т. д.,}$$

где CH4, CH5, CH6, CH7 – яркость в диапазоне длин волн соответственно 0,5 – 0,6, 0,6 – 0,7, 0,7 – 0,8 и 0,8 – 1,1 мкм, отвечающих 4, 5, 6 и 7 каналу MSS Landsat.

Для оценки состояния растений используется также коэффициент сложного зонального отношения Q , в котором разность зональных коэффициентов яркости нормализуется к их сумме:

$$Q = (p_1 - p_2)/(p_1 + p_2),$$

где p_1 – коэффициент яркости в ближней ИК части спектра; p_2 – коэффициент яркости в красной части спектра.

Этот индекс называют **вегетационным индексом нормализованной разности (NDVI)**.

Применение нормализованной разности красного и ближнего инфракрасного диапазонов уменьшает влияние условий освещения, дымки, облачности и повышает точность получаемых данных:

$$NDVI = (CH7 - CH5)/(CH7 + CH5).$$

Для аппаратуры Landsat

$$ND6 = (CH6 - CH5)/(CH6 + CH5),$$

$$ND7 = (CH7 - CH5)/(CH7 + CH5).$$

Вегетационный индекс NDVI подчеркивает контраст между зеленой растительностью и другими природными объектами, например почвами и сухой растительностью, позволяет идентифицировать зеленую растительность, оценить ее состояние и проективное покрытие. На территориях с невысоким проективным покрытием на индекс оказывает влияние и почвенный покров (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Индекс NDVI для сельхозугодий [6]

Наблюдается корреляция между фитопродуктивностью экосистем и NDVI (рис. 3.5).

Это свойство довольно активно используется для регионального картографирования и анализа различных типов ландшафтов, оценки ресурсов и площадей биосистем в масштабе стран и континентов. Однако чаще всего расчет NDVI употребляется на основе серии разновременных (разносезонных) снимков с заданным временным разрешением, что позволяет получить динамическую картину процессов изменения границ и характеристик различных типов растительности (месячные вариации, сезонные вариации, годовые вариации).

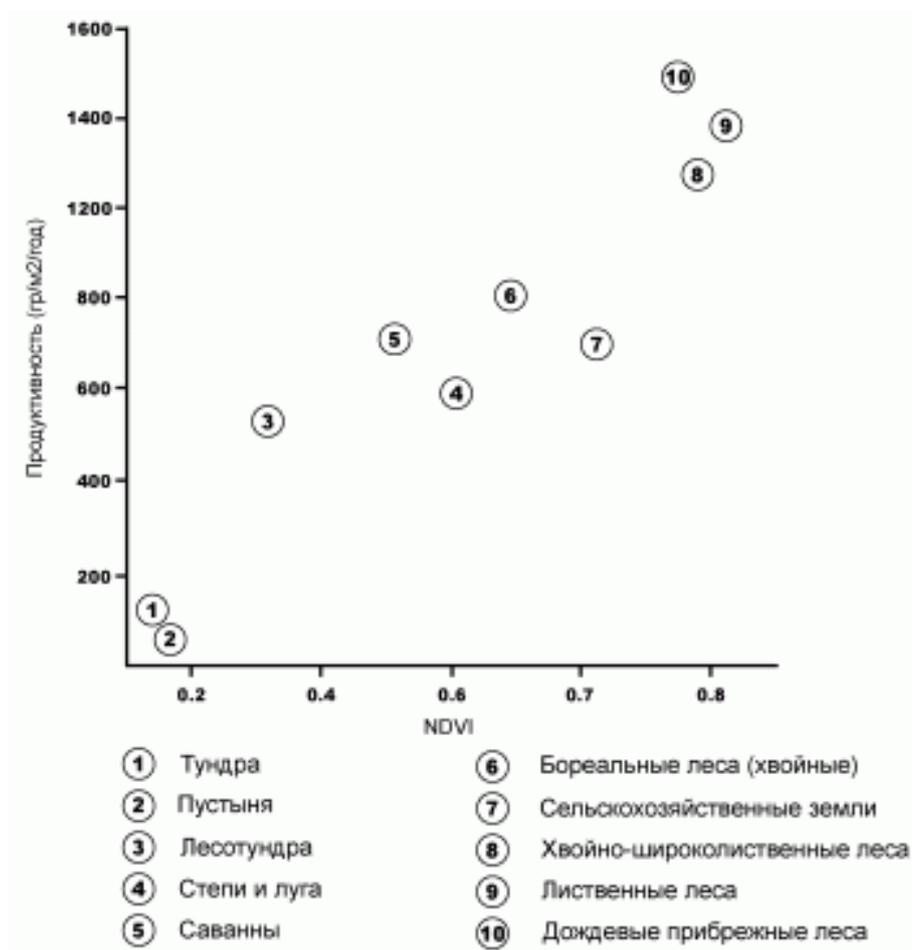


Рис. 3.5. Продуктивность экосистем и индекс NDVI [5]

Будучи искусственным безразмерным показателем, NDVI предназначен для измерения эколого-климатических характеристик растительности, но в то же время может показывать значительную корреляцию и с другими параметрами:

- биомассой;
- влажностью и минеральной (органической) насыщенностью почвы;
- испаряемостью (эвапотранспирацией);
- объемом выпадаемых осадков;
- мощностью и характеристиками снежного покрова.

Зависимость между этими параметрами и NDVI, как правило, не прямая и связана с особенностями исследуемой территории, ее климатическими и экологическими характеристиками. Благодаря всем этим особенностям, карты NDVI часто используются как один из промежуточных дополнительных слоев для проведения более сложных типов анализа, в результате чего получают карты продуктивности лесов и сельхозземель, карты типов ландшафтов, растительности и природных зон, почвенные, аридные, фито-гидрологические и другие эколого-климатические карты. Также на его основе возможно получение численных данных для использования в расчетах оценки и прогнозирования урожайности и продуктивности, биологического разнообразия, степени нарушенности и ущерба от различных естественных и антропогенных бедствий, аварий и т. д. Часто эти данные используются для вычисления других, универсальных и территориально привязанных индексов: LAI – индекс листовой поверхности, FPAR – индекс фотосинтетической активной радиации, поглощаемый растительностью, и пр.

В целом главное преимущество NDVI – легкость его получения: для вычисления индекса не требуются дополнительные данные и методики, кроме непосредственно самой космической съемки и знания ее параметров.

Так, благодаря минимальному временному разрешению данных MODIS/Terra, вычисление NDVI на их основе может давать оперативную информацию об эколого-климатической обстановке и позволяет отслеживать динамику различных параметров с периодичностью до одной недели. Большой пространственный охват дает возможность проводить мониторинг территорий, соразмерный с площадями областей и целых стран. Данные же камер высокого разрешения (типа Landsat, IRS, Aster) позволяют следить за состоянием объектов размерами вплоть до отдельного поля или лесного выдела.

Другой информативный способ мониторинга – **трансформированный вегетационный индекс (TVI или TQ):**

$$TQ = (Q + 0,5)^{1/2},$$

$$TVI6 = (ND6 + 0,5)^{1/2},$$

$$TVI7 = (ND7 + 0,5)^{1/2}.$$

Трансформированный вегетационный индекс вводится для того, чтобы избежать отрицательных значений NDVI при малых значениях яркости почвы.

Методы цифровой обработки изображений, в частности вегетационные индексы, используют для контроля динамики растительного покрова, оценки фитомассы, продуктивности и состояния растительного покрова.

Индексы LAI и FPAR

LAI (индекс листовой поверхности, Leaf Area Index) характеризует отношение суммарной площади односторонней поверхности листьев на участке к его площади (m^2/m^2) и считается важным показателем активности фотосинтетических процессов. Он также применяется в моделях углеродного баланса, в анализе фитопродуктивности, расчёте фитомассы.

LAI определяют как наземными, так и дистанционными методами. Для определения индекса по ДДЗ используют многозональные снимки и рассчитанные по ним вегетационные индексы. Наиболее часто с этой целью применяют нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI – Normal Difference Vegetation Index). Общая схема получения дистанционной оценки LAI через вегетационные индексы базируется на восстановлении нелинейной регрессии. Так, проведенное на основе снимков Landsat-8 исследование показало, что значения NDVI и LAI хорошо коррелируют между собой, а эта статистическая связь может быть с удовлетворительной точностью описана формулой экспоненциальной регрессии.

Главное преимущество наземных прямых измерений – максимальное соответствие оценок LAI действительному состоянию растительности, поэтому методы, основанные на таких измерениях, обычно используют для калибровки дистанционных методов измерения LAI [7].

FPAR – индекс, характеризующий долю поглощенной фотосинтетически активной радиации в спектральном диапазоне 0,4 – 0,7 нм, является безразмерной величиной.

LAI/FPAR вычисляются ежедневно по данным MODIS и доступны в виде готовых продуктов [8].

Индексы, используемые для мониторинга водных объектов и снежного покрова

Водные индексы, которые рассчитываются по дистанционным данным, используются для мониторинга затопления территорий, выявления уровня горючих материалов в пожароопасных зонах, расчета влагозапаса снежного покрова, увлажнения растительного покрова и многих других задач [9]. Вода способна поглощать ближние инфракрасные волны, поэтому благодаря использованию в расчетах NIR и SWIR каналов можно выделить контуры водных объектов и влажных почв.

Нормализованный разностный водный индекс (NDWI)

NDWI существует в двух вариантах. Первый вариант определяется по формуле

$$NDWI = (NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2),$$

где NIR – ближний инфракрасный диапазон; SWIR2 – коротковолновый инфракрасный диапазон.

Значения указанного индекса колеблются в диапазоне от –1 до 1. Он применяется для анализа содержания влаги в растительности (рис. 3.6). Обычный диапазон для зеленой растительности составляет от –0,1 до 0,4. Считается, что водные объекты принимают значения от 0,2 до 1, объекты, не содержащие влагу, – значения меньше 0. Данный индекс позволяет хорошо идентифицировать водоемы на космоснимках.

Второй вариант рассчитывается с учетом зеленого и ближнего инфракрасного спектров:

$$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR),$$

где NIR – ближний инфракрасный диапазон; GREEN – зеленый диапазон.

Этот вариант в основном применяется для мониторинга водных объектов. Значения меньше 0,3 означают отсутствие воды.

В случае расчета NDWI с использованием данных Sentinel-2 для мониторинга засухи на сельскохозяйственных территориях используются следующие каналы: 8А (864 нм) и 11 (1610 нм) или 8А (864 нм) и 12 (2200 нм). Для дешифрирования водоемов подойдут каналы зеленый 3 (559 нм) и NIR 8А (864 нм).

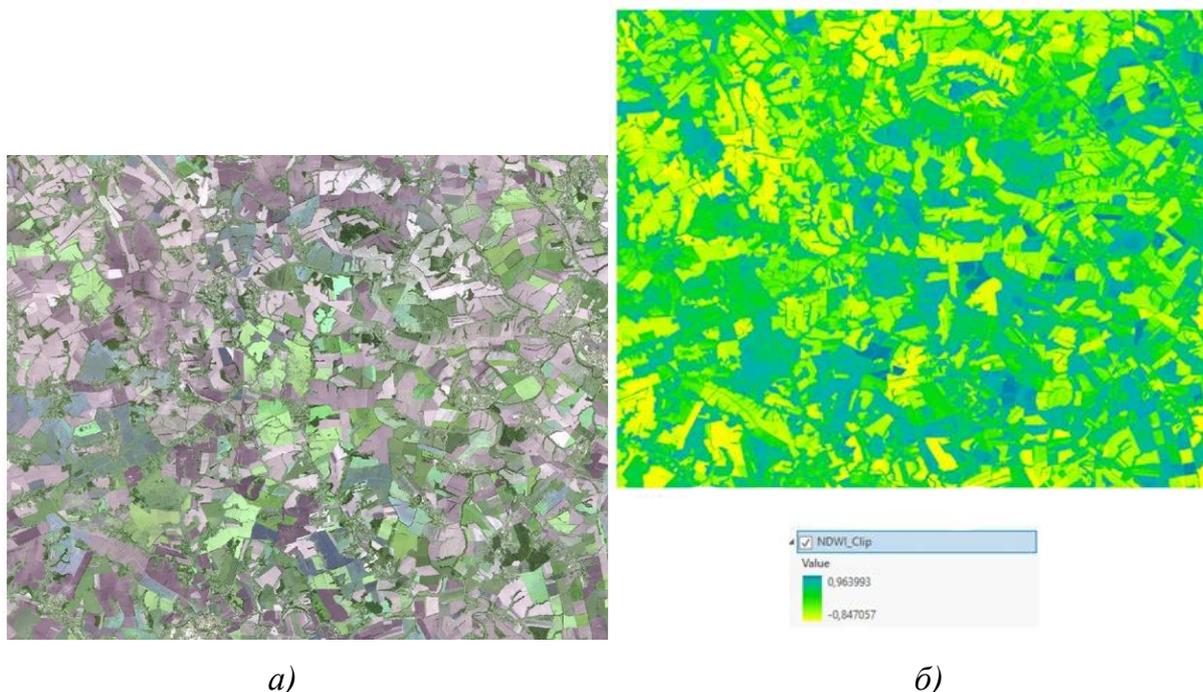


Рис. 3.6. Снимок со спутника Sentinel-2B (город Ливны, площадь 2260 км²):
а – естественные цвета; б – перерасчет в NDWI

Индекс влагостойкости WRI

С помощью индекса WRI (Water Ratio Index) можно определить количество влаги в растительном покрове. Техника расчета основана на отношении между двумя видимыми диапазонами света (зеленого и красного) и коротковолнового и средневолнового инфракрасных диапазонов.

WRI рассчитывается по формуле

$$WRI = (GREEN + RED)/(NIR + SWIR2),$$

где GREEN – зеленый диапазон; RED – красный диапазон; NIR – ближний инфракрасный диапазон; SWIR2 – коротковолновый инфракрасный диапазон.

Значения индекса колеблются от 0 до 3. Обычно значения от 1 и выше обозначают, что на снимке – водные объекты или объекты, содержащие влагу.

Пример использования индекса WRI приведен на рис. 3.7. Его высокие значения соответствуют территориям с влажным растительным покровом и водным объектам. Видно, что в центральной части снимка (рис. 3.7, а) имеются яркие объекты, которые предположительно являются полями, которые были орошены. По представленной шкале (рис. 3.7, б) можно судить о степени увлажнения полей.

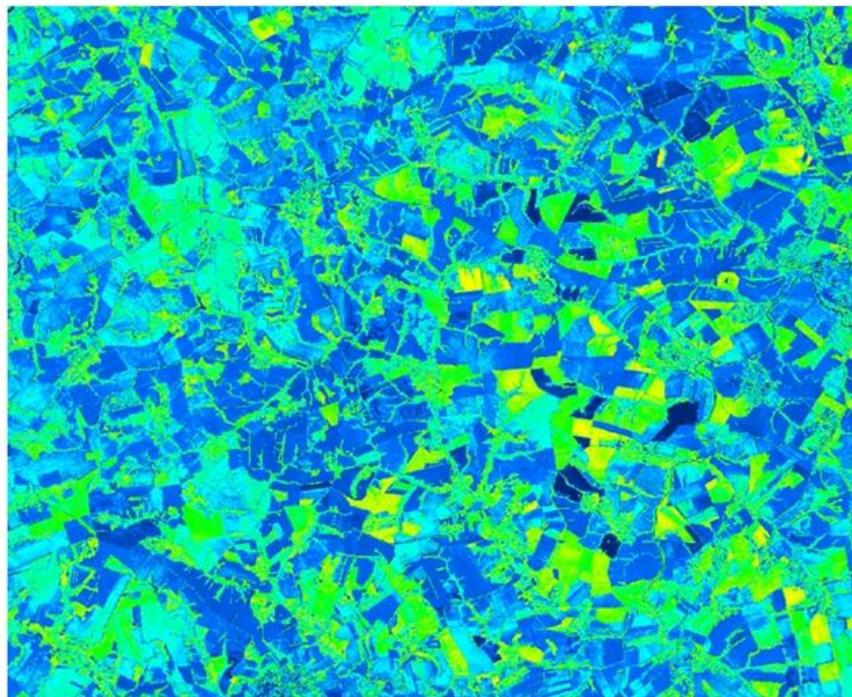


Рис. 3.7. Снимок со спутника Sentinel-2B (город Ливны, площадь 2260 км²) и перерасчет в WRI, шкала значений индекса WRI: от 0 до 1 – на поверхности отсутствует вода; от 1 до 2,5 – растения, в которых содержится влага; от 2,5 до 3,8 (максимальное значение индекса в области) – водные объекты

Модифицированный нормализованный разностный водный индекс (MNDWI)

Индекс MNDWI рассчитывается по формуле

$$\text{MNDWI} = (\text{GREEN} - \text{SWIR2}) / (\text{GREEN} + \text{SWIR2}),$$

где GREEN – зеленый диапазон; SWIR2 – коротковолновый инфракрасный диапазон.

Значения этого индекса изменяются в диапазоне от –1 до 1. Для водных объектов значение больше 0. Данный индекс можно применять с теми же целями, что и NDWI, но MNDWI имеет определенные преимущества при работе с застроенными территориями, поскольку зеленый диапазон, вместо NIR-диапазона, позволяет лучше различать постройки и водные объекты.

Стандартизованный индекс различий снежного покрова (NDSI)

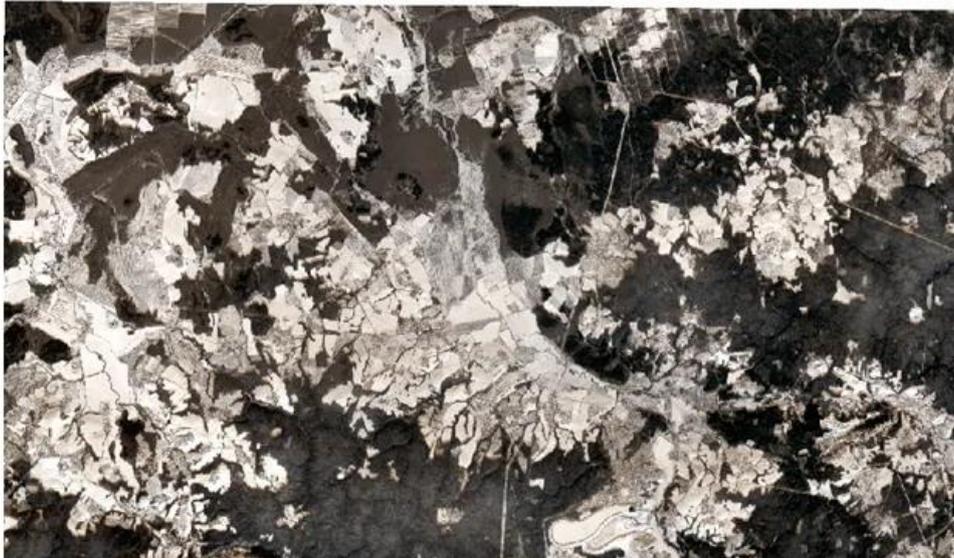
Индекс NDSI представляет собой нормализованную разницу каналов зеленого и коротковолнового инфракрасного. На спектральных снимках снег не просто отличить от облаков, так как по яркости данные объекты похожи. Но на определенной длине волны снег поглощает солнечные лучи и выглядит на снимках немного темнее, чем облака.

NDSI рассчитывается по формуле

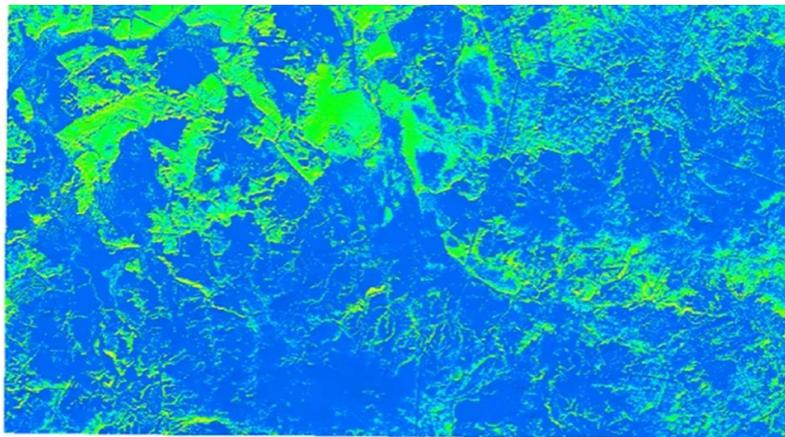
$$\text{NDSI} = (\text{GREEN} - \text{SWIR1}) / (\text{GREEN} + \text{SWIR1}),$$

где GREEN – зеленый диапазон; SWIR1 – коротковолновый инфракрасный диапазон.

Значения этого индекса изменяются в диапазоне от –1 до 1. Вероятность наличия снега пропорциональна тому, насколько значение пикселя NDSI близко к 1. Пример расчета индекса приведен на рис. 3.8. По снимкам можно определить, что территория практически полностью покрыта снегом. Высокое значение индекса соответствует синему цвету на приведенном растре.



а)



б)

Рис. 3.8. Снимок со спутника Sentinel-2B: а – участок площадью 1042 км² на границе Московской и Тверской областей; б – перерасчет в NDSI, участок площадью 1042 км² на границе Московской и Тверской областей

Индекс мутности NDTI

Индекс мутности (NDTI – The Normalized Difference Thermal Index) характеризует снижение прозрачности воды по причине присутствия неорганических и органических примесей, а также цветения воды.

В расчете NDTI используется только видимый диапазон:

$$\text{NDTI} = (\text{RED} - \text{GREEN}) / (\text{RED} + \text{GREEN}),$$

где RED – красный диапазон; GREEN – зеленый диапазон.

Значения этого индекса колеблются в диапазоне от -1 до 1 . Мутность воды отражают значения от $0,4$ до 1 . Пример использования данного индекса продемонстрирован на рис. 3.9, где изображена река в натуральных цветах и результаты расчета NDTI.

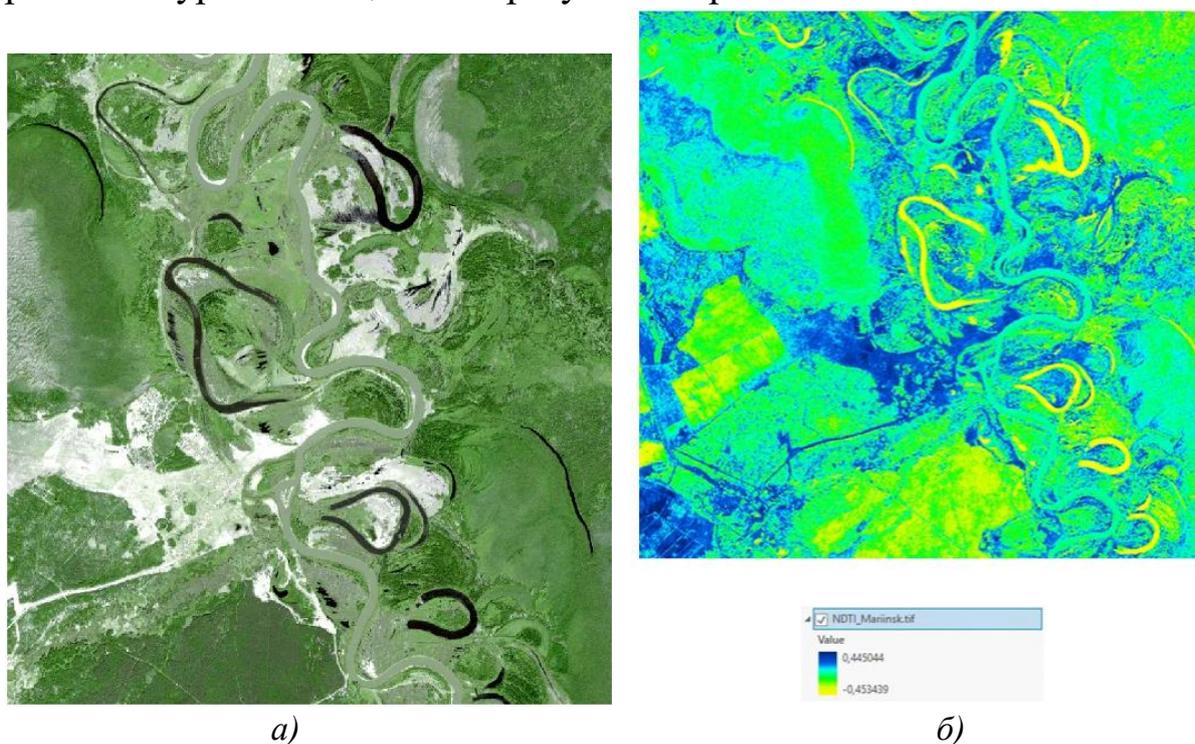


Рис. 3.9. Снимок со спутника Sentinel-2B: а – река Кия; б – перерасчет в NDTI, река Кия

Нормализованный разностный индекс хлорофилла (NDCI)

Индекс NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index) применяется для определения хлорофилла *a* во внутренних и прибрежных водах, в том числе и мутных. Фотосинтетические пигменты водорослей, в частности хлорофилл *a*, являются индикаторами распространения фитопланктона в водоемах. Данный индекс используется для мониторинга биомассы фитопланктона, его площадного распространения и эвтрофикации водоемов.

Для расчета NDCI используется отношение разности спектральных яркостей в двух каналах (ближний инфракрасный, 705 нм и красный, 665 нм) к их сумме [10; 11]:

$$NDCI = \frac{Rrs(705) - Rrs(665)}{Rrs(705) + Rrs(665)},$$

где $Rrs(705)$ – спектральная яркость в ближнем ИК-канале, $Rrs = 705$ нм; $Rrs(665)$ – спектральная яркость в красном канале, $Rrs = 665$ нм.

Вопросы к главе 3

1. Что характеризует коэффициент спектральной яркости?
2. В чем особенности спектральных профилей основных природных объектов?
3. Каковы основные этапы анализа и обработки космических снимков?
4. Какие индексы применяются для оценки состояния растительного покрова?
5. Какие индексы можно использовать для характеристики водных объектов?

Библиографические ссылки

1. Географические информационные системы. Обработка и анализ растровых изображений. М. : Дата+, 2002. 112 с.
2. *Савиных В. П., Цветков В. Я.* Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. М. : Каргеоцентр-Геодезиздат, 2001. 228 с.
3. *Иванников А. Д., Кулагин В. П., Тихонов А. Н.* Геоинформатика. М. : МАКС Пресс, 2001. 349 с.
4. *Шахраманьян М. А.* Новые информационные технологии в задачах обеспечения национальной безопасности России (природно-техногенные аспекты) : монография. М. : ФЦ ВНИИ ГОЧС, 2003. 398 с.
5. NDVI: теория и практика [Электронный ресурс]. URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi2.html> (дата обращения: 07.06.2023).
6. Сельское хозяйство [Электронный ресурс]. URL: <http://prom.aero/catalog/selskoe-hozyajstvo> (дата обращения: 10.06.2023).
7. Определение индекса листовой поверхности (LAI) по данным дистанционного зондирования и наземной полевой заверки [Электронный ресурс]. URL: conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4529 (дата обращения: 10.06.2023).

8. Воронина П. В., Мамаш Е. А. Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS [Электронный ресурс] // ЖВТ. 2014. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-tematicheskikh-zadach-monitoringa-selskogo-hozyaystva-s-ispolzovaniem-dannyh-distantsionnogo-zondirovaniya-modis> (дата обращения: 19.06.2023).

9. Виды водных индексов и их применение [Электронный ресурс]. URL: <https://innoter.com/articles/vidy-vodnykh-indeksov-i-ikh-primenenie> (дата обращения: 19.06.2023).

10. Лагута А. А., Погорелов А. В. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «А» в Краснодарском водохранилище по данным спутниковых снимков [Электронный ресурс] // ВХР. 2021. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvenno-vremennaya-izmenchivost-kontsentratsii-hlorofilla-a-v-krasnodarskom-vodohranilische-po-dannym-sputnikovyh-snimkov> (дата обращения: 19.04.2023).

11. *Sachidananda Mishra, Deepak R. Mishra*. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters, Remote Sensing of Environment. Vol. 117. 2012. P. 394 – 406. ISSN 0034-4257. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711003737> (дата обращения: 19.06.2023).

Глава 4. СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

4.1. Космические эксперименты на борту Международной космической станции

Международная космическая станция (МКС) – крупнейший международный проект, пилотируемая орбитальная станция, используемая как многоцелевой космический исследовательский комплекс [1].

Сегодня МКС представляет собой совместный проект, в котором участвуют космические агентства «Роскосмос», NASA (США), JAXA (Япония), CSA (Канада), ESA (страны Европы).

Программа создания Международной космической станции – логическое продолжение современного этапа развития космонавтики. Усилиями в первую очередь советской и российской космонавтики доказана возможность длительных пилотируемых полетов, определены направления деятельности для создания внеземных производств.

Проект МКС объединяет ресурсы, научно-технические достижения и опыт западных стран и России, способствует развитию национальных экономик и эффективному использованию космоса в интересах мирового сообщества, взаимопониманию государств. Создание Международной космической станции – необходимая ступень развития человечества в плане использования ресурсов Земли и Солнечной системы.

В создании станции принимали участие: Россия, США, Канада, Япония, Германия, Франция, Испания, Италия, Дания, Бельгия, Нидерланды, Норвегия, Швеция и Швейцария. **20 ноября 1998 года** – дата начала реализации программы МКС после старта российского функционального грузового блока «Заря», который стал базовым элементом МКС. Роль России в этом проекте – одна из ведущих. Опыт, накопленный российской космонавтикой за период эксплуатации собственных пилотируемых орбитальных станций, во многом стал практической базой для создания МКС.

С 2000 года станция является постоянно обитаемой. На её борту, сменяя друг друга, по несколько месяцев работают экипажи основных экспедиций, в состав которых входят российские кос-

монавты и американские астронавты. До февраля 2003 года экипаж на смену доставляли на МКС американские корабли «Спейс шаттл». Российские корабли «Союз», имеющие большой ресурс пребывания в космосе, служили в качестве средства спасения экипажа в случае необходимости срочного покидания станции.

Станция преимущественно делится на две основные части: российский и американский сегменты. Российский сегмент (РС МКС) управляется из подмосковного Центра управления полетами в г. Королёве, американский сегмент (АС МКС) – из аналогичного по назначению центра в г. Хьюстон, штат Техас.

В феврале 2023 года грузовой корабль «Прогресс МС-22» доставил на Международную космическую станцию российский **малогабаритный радиолокатор**, предназначенный для наблюдения Земли в интересах природопользования, экологического контроля и мониторинга чрезвычайных ситуаций (рис. 4.1).

Радиолокатор с синтезированной апертурой на основе микрополосковых активных фазированных антенных решеток планируется испытать в рамках эксперимента «Напор-миниРСА».

Радиолокатор намечается установить на внешней поверхности многоцелевого лабораторного модуля «Наука» во время одного из российских выходов в открытый космос в этом году. Данные с него будут передаваться на наземные приемные станции через российскую систему высокоскоростной передачи информации.

Радиолокационные наблюдения позволяют решать широкий круг задач социально-экономической сферы, в частности:

- контроль состояния посевов сельскохозяйственных культур и лесных массивов;
- всепогодное оперативное наблюдение структуры морского волнения, обнаружение мест загрязнения моря нефтепродуктами, включая определение направления и скорости ветра;
- всепогодное и всесезонное получение информации о ледовых полях в северных районах, обнаружение трещин, разводий, оценка толщины и сплоченности льда для обеспечения проводки судов в районах ледовых полей, контроль за передвижением судов;
- картографирование местности, особенно районов с рельефом и закрытых облачностью, оперативный контроль динамики разлива рек, наводнений, последствий природных катастроф;

- изучение геологических структур с целью выявления полезных ископаемых;
- мониторинг состояния нефтегазопроводов и смещения земной поверхности в сейсмически напряженных районах.

Для дистанционного зондирования Земли с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой характерны следующие особенности:

- возможность достижения достаточно высокого (на уровне оптических систем) линейного разрешения на местности;
- возможность адаптивного наблюдения местности с различной детальностью и, соответственно, различной шириной полосы наблюдения;
- независимость от условий освещенности исследуемого района;
- независимость наблюдения от времени суток и погодных условий в районе съемки.

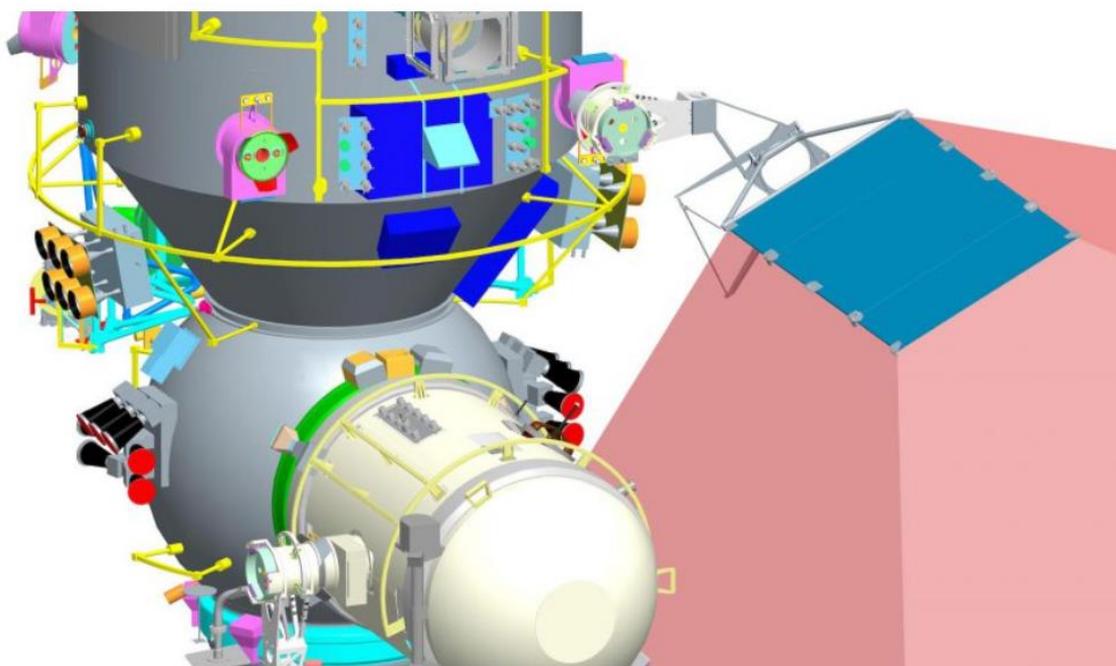


Рис. 4.1. Российский радиолокатор для наблюдения Земли на борту МКС [2]

Космический эксперимент «Экон-М»

Космический эксперимент «Экон-М» заключается в фотосъемке территории Российской Федерации и зарубежных государств с целью экологического обследования районов деятельности человека

Используемое оборудование: цифровой фотоаппарат Nikon D3X с объективом $F = 800$ мм.

Объекты исследований:

- экологическое состояние атмосферы, почвы, акваторий рек, морей и океанов в районах морских портов, нефтяных терминалов и платформ морского бурения, промышленных предприятий и аэропортов, крупных городов мира, космодромов и стартовых (наземных и морских) объектов космической инфраструктуры России и зарубежных государств;

- районы экологических бедствий, техногенных аварий и катастроф (аварий на АЭС, извержений вулканов, наводнений, пожаров, аномальных явлений в атмосфере и на поверхности Земли, в акватории Мирового океана и т. д).

Важно *изучение экологического состояния морских прибрежных акваторий*. Известно, что воды всех рек, впадающих в моря, загрязнены практически всеми известными современной экологии поллютантами. Отличие состоит лишь в концентрации каждого из загрязнителей в пробах речной воды. В этом смысле нефтепродукты и минеральные взвеси – наиболее доступные для наблюдений индикаторы качества речных вод. Обильные загрязнения особенно характерны для вод, выносимых в море по многочисленным рукавам и протокам равнинных рек, впадающих в мелководные участки моря и образующих своими наносами развитую дельту.

Источником загрязнений морских вод также являются небольшие горные реки, в бассейнах которых в результате ливней или бурного таяния снега возникают сели.

К числу других источников загрязнения относятся морские порты, прибрежные города, загрязняющие акватории бытовыми и промышленными стоками.

Наблюдения показывают, что загрязнение поверхностных вод морей происходит вдоль побережья на незначительном удалении от источников загрязнения. В качестве примера представлены космические фотоснимки, полученные в процессе выполнения космического эксперимента «Экон-М», на которых в явном виде просматриваются загрязнения морских прибрежных акваторий (рис. 4.2).



Прибрежная зона г. Адлера



Прибрежная зона н.п. Бабушара (Абхазия)



г. Багуми (Грузия)



Нефтеплатформы Кашаганского месторождения (Казахстан)

Рис. 4.2. Фотоснимки, полученные в процессе выполнения космического эксперимента «Экон-М» [1]

Источниками атмосферных загрязнений и экологических бедствий часто выступают *пожары*. Работая на борту российского сегмента МКС, космонавты проводят наблюдения очагов возгораний на территории Российской Федерации и зарубежных государств.

Полученные в рамках эксперимента «Экон-М» результаты позволяют оценить интенсивность и площадь загрязнения, определить направление их распространения, осуществить координатную привязку к населённым пунктам или другим географическим объектам, спрогнозировать динамику развития событий и т. д. (рис. 4.3).

Контроль экологического состояния подлежат *районы извержения вулканов* (рис. 4.4). Подобные катастрофы разрушают жилые и промышленные объекты, сжигают посевы, уничтожают скот и приводят к человеческим жертвам. Вулканические извержения выбрасывают на большую высоту в атмосферу такое количество веще-

ства (пепла и газа), что сказывается на погоде на планете в течение долгого времени.

Таким образом, система регулярных наблюдений и контроль за развитием опасных процессов и явлений, проводимые космонавтами с борта российского сегмента МКС в рамках эксперимента «Экон-М», позволяют не только фиксировать природные и антропогенные процессы, но и прогнозировать динамику их развития, что существенно снижает наносимый ими ущерб.



Пожар лесных массивов (Иркутская область)



Пожар лесных массивов (Австралия)

Рис. 4.3. Фотоснимки очагов пожаров, полученные в процессе выполнения космического эксперимента «Экон-М» [1]



Рис. 4.4. Фотоснимки извержения вулкана Этна (Италия), полученные в процессе выполнения космического эксперимента «Экон-М» [1]

Космический эксперимент «Сценарий»

Космический эксперимент «Сценарий» нацелен на подготовку и выполнение на борту МКС наблюдений земной поверхности и атмосферы Земли с целью отработки методов оценки развития катастрофических и потенциально опасных явлений.

Используемое оборудование – «Видеоспектральная система», «Фотоспектральная система».

Эксперимент включает фото-, фотоспектральную, видеоспектральную и ИК-съемку земной поверхности с помощью ручной и стационарной аппаратуры, контроль перемещения объектов на земной поверхности и обеспечение передачи результатов эксперимента на Землю по каналам связи.

Наземная часть эксперимента предусматривает экспресс-анализ результатов, создание на основе полученной информации специальных математических моделей и оценку развития катастрофических и потенциально опасных явлений.

Развитие многих катастрофических явлений (например, наводнений, оползней, пожаров и др.) можно оценить по изменению площади наблюдаемых объектов во времени. В ходе космического эксперимента «Сценарий» в РС МКС была разработана технология оценки развития некоторых катастроф и потенциально опасных явлений на основе изменения площади наблюдаемых объектов. Разработанный метод расчета площадей позволяет с помощью созданного программно-математического обеспечения выявлять динамику катастрофического процесса и оценивать его дальнейшее развитие. Использование материалов фотосъемки с РС МКС, применение разработанного метода и специального программно-математического обеспечения для обработки снимков позволили, например, рассчитать площадь оползней, возникших в процессе катастрофического наводнения в районе города Крымска 6 – 7 июля 2012 года.

Дальнейшая реализация эксперимента во многом связана с отработкой методик применения перспективных образцов научной аппаратуры для ДЗЗ. Использование новых образцов научной аппаратуры (гиперспектрометр, радиометр инфракрасный высокого разрешения (РИВР), система ориентирования видеоспектральной аппаратуры (СОВА)) позволит существенно повысить объём и полноту дан-

ных для оценки развития катастрофических и потенциально опасных явлений.

Космический эксперимент «Ураган»

В рамках космического эксперимента «Ураган» проводятся разработка и испытание автоматических космических систем, осуществляющих непрерывный мониторинг различных объектов на земной поверхности. Например, проводится слежение за состоянием ледников (рис. 4.5).

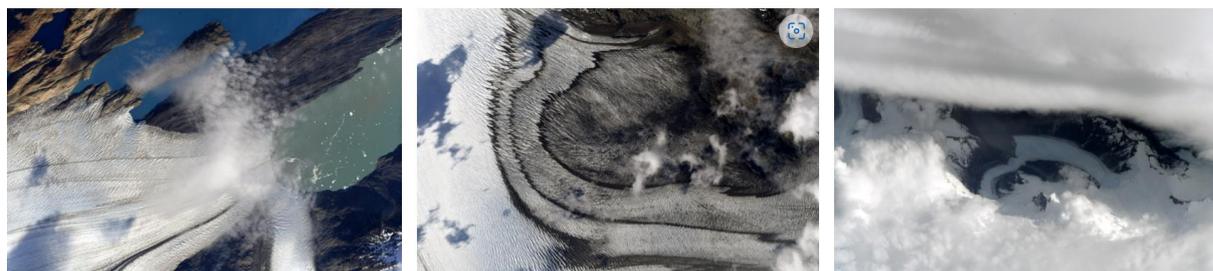


Рис. 4.5. Анализ динамики таяния ледников в Патагонии [1]

Также один из примеров – применение научной аппаратуры «Икарус», разработанной по соглашению между госкорпорацией «Роскосмос» и Германским центром авиации и космонавтики. «Икарус» позволяет отслеживать перемещения животных и птиц на земной поверхности. С этой целью на исследуемых объектах размещаются миниатюрные (массой 5 г) датчики, в состав которых входят приемники спутниковой навигационной системы, вычислительное устройство, аккумулятор, солнечная батарея, приемопередатчик, акселерометр, магнитометр, датчик температуры (рис. 4.6).

Информация от датчика поступает на МКС, снабженную специальными мощными приемными антеннами, и затем по штатным каналам связи доставляется в московский Центр управления полетами.

Пройдя предварительную проверку и обработку, данные от датчиков передаются российским и немецким ученым – участникам эксперимента. По полученной информации ученые отслеживают миграции животных и их состояние. Важно отметить, что комплексное использование всех данных космического эксперимента «Ураган» позволяет не только отследить пути перемещения животных,

но и понять причины изменения их миграционных путей с помощью оценки экологической обстановки.



Рис. 4.6. Мониторинг передвижения животных [1]

В рамках эксперимента «Ураган» разрабатываются и создаются специальные системы для автоматической ориентации научной аппаратуры на объекты исследований. Первый экземпляр такой аппаратуры СОВА-1-426 (система ориентации видеоспектральной аппаратуры) уже доставлен на борт МКС и успешно используется при выполнении экспериментов. При этом обеспечивается построение оптимальных программ наблюдения исследуемых объектов, что впервые в мире реализовано на борту космического аппарата.

Космический эксперимент «УФ-атмосфера»

Цель космического эксперимента «УФ-атмосфера» – получение карты свечения ночной атмосферы Земли в полосе длин волн ближнего ультрафиолета в пределах широт, доступных для наблюдения с орбиты МКС.

Свечение атмосферы считается одним из индикаторов состояния как самой атмосферы и происходящих в ней процессов, так и околоземного пространства (магнитосферы). Мониторинг УФ-

свечения атмосферы позволит получить данные о географических и временных изменениях интенсивности, которые могут быть последствиями геомагнитных метеорологических (например, цунами) возмущений в верхних слоях атмосферы.

Научные задачи эксперимента: мониторинг и картографирование УФ-излучения атмосферы; измерение энергичных транзиентных атмосферных явлений грозового происхождения («спрайтов», «джеттов», «эльфов» и др.), регистрация гравитационных волн от цунами, биолюминесценции океана; изучение воздействия высокоэнергичного космического излучения на атмосферу Земли (рис. 4.7).

Дополнительная и важная прикладная задача эксперимента – показать возможность регистрации и отслеживания космического мусора на околоземных орбитах.

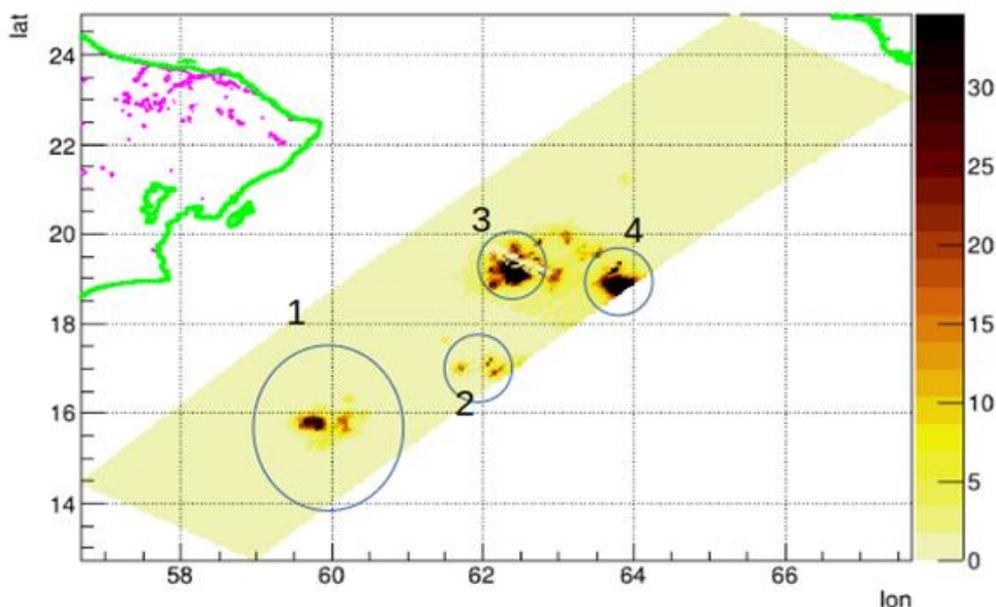


Рис. 4.7. Карта УФ-излучения над районом активного рыбного промысла [1]

Другой важный результат работы – измерение внегрозовых вспышек с кривой свечения, подобной широкому атмосферному ливню, создаваемому сверхэнергичными внегалактическими частицами (космическими лучами предельно высоких энергий, или КЛ ПВЭ). Причина этих событий пока не выяснена, обсуждаются различные гипотезы.

4.2. Программа запуска малых космических аппаратов «УниверСат»

Программу запуска малых космических аппаратов «УниверСат» реализует госкорпорация «Роскосмос» в целях содействия развитию научно-технического потенциала молодежи в интересах ракетно-космической отрасли, а также осуществления космических экспериментов образовательными организациями [3] (рис. 4.8, 4.9).

В рамках данной программы, например, проводится оперативный мониторинг гелиогеофизических параметров в космическом пространстве (мониторинг «космической погоды»), трекинг воздушных судов.



Участники программы



Амурский
государственный
университет



Московский
государственный
технический
университет



Научно-
исследовательский
институт
ядерной физики



Московский
государственный
университет



Новосибирский
государственный
университет



Физический
институт



Институт
прикладной
геофизики

Рис. 4.8. Группировка малых космических аппаратов «УниверСат» и участники программы [3]

В рамках программы российские вузы получили возможность бесплатно запускать космические аппараты, созданные студентами на базе университетских мощностей, на платформе «Кубсат».

По состоянию на осень 2020 года было запущено семь спутников, которые отправлялись в космос с разных космодромов, двумя отдельными блоками.

1. Блок аппаратов «УниверСат-2019»: «Сократ» (НИИЯФ МГУ), «ВДНХ-80» (НИИЯФ МГУ) и «АмурСат» (АмГУ-1), запущен 05 июля 2019 года с космодрома Восточный.

2. Блок аппаратов «УниверСат-2020»: «ДЕКАРТ» (НИИЯФ МГУ), «Норби» (НГУ), «Ярило № 1» и «Ярило № 2» (МГТУ им. Н. Э. Баумана), запущен 28 сентября 2020 года с космодрома Плесецк. Группировка из двух наноспутников «Ярило» используется для исследования солнечной активности и радиационной обстановки на низкой околоземной орбите. Особенность миссии – наличие на аппаратах экспериментальной раскрываемой конструкции типа «Солнечный парус», предназначенной для разведения спутников по орбите и построения группировки.

«Роскосмос» и «Росгидромет» подписали целый ряд соглашений о сотрудничестве с российскими вузами по результатам двух пусков в рамках программы «УниверСат». Также вузы продолжают работу в направлении увеличения функционала аппаратов, выполненных на основе платформы «Кубсат».



Рис. 4.9. Малые спутники [3]

4.3. Дистанционные методы в исследовании почвенного покрова и землепользовании

Дистанционное изучение почв, растительности, водных объектов возможно с помощью измерения отраженной или излученной солнечной радиации [4]. Спектры отражения зависят от химических и минералогических свойств отражающих поверхностей почв и от внешних (по отношению к объекту) метеорологических условий. Например, механический состав почвы видоизменяет соотношение между количеством и величиной отраженной радиации, в то время как спектральные характеристики гумуса различаются и по климатическим зонам. Применение лидарных методов исследования избавляет от необходимости учитывать эти параметры, поскольку лазерное излучение на частоте определенного перехода в атоме или молекуле претерпевает поглощение с последующим излучением на более низкой частоте и не зависит от внешних условий.

Цель дистанционных методов изучения почвы заключается в использовании данных о распределении и количестве разных видов радиации для получения информации о ее физических и химических свойствах.

Принципы и методы дешифрирования почв первоначально были разработаны применительно к использованию аэроснимков для **почвенного картографирования** в крупных и средних масштабах. Космические снимки стали использовать при составлении и корректировке средне-, мелкомасштабных и обзорных почвенных карт.

Картографирование почв

Дешифрирование аэроснимков в процессе картографирования почв включает *генетическое дешифрирование и контурное*. Генетическое дешифрирование позволяет установить почвенное содержание контура, его необходимо проводить в полевых условиях. Контурное дешифрирование обеспечивает точное проведение границ между различными почвами.

Для дешифрирования почв можно использовать прямые дешифровочные признаки (тон, цвет, размер и форма контуров, рисунок изображения поверхности, а при многозональных снимках – спектральный образ объекта), но всегда необходимо учитывать, что почва

как целостный природный объект не изображается непосредственно на снимках. Только в случае распашки и отсутствия посевов на снимках видна ее поверхность и проявляются отдельные ее свойства (гумусированность, влажность, карбонатность, засоленность, механический состав и другие свойства верхнего слоя). Однако одной поверхности почв недостаточно, чтобы определить отдельные разности почв. Поэтому в почвенном дешифрировании важную роль играют косвенные признаки: формы рельефа, растительность, геологическое строение местности и результаты хозяйственной деятельности человека, компоненты ландшафта. Для дешифрирования почв залесенных территорий, аллювиальных, луговых, болотных почв наибольший эффект дает применение спектрональных снимков.

Прямое дешифрирование. Тон и цвет фотоизображения почвы зависят от содержания гумуса; характера увлажнения почвы; содержания в почве легкорастворимых солей, карбонатов, гипса; гранулометрического состава почвы.

Структура фотоизображения почвы возникает чаще всего по причине неоднородности почвенного покрова в пределах контура и определяется:

- микрокомбинациями (комплексы и пятнистости) почвенного покрова, которые образуют на аэроизображении мелкую пятнистость;
- мезокомбинациями (сочетания и вариации), которые дают на изображении крупную пятнистость и полосчатость;
- припахиванием подзолистого горизонта, в результате чего на снимках появляется мелкая прерывистая полосчатость;
- эрозией почвы, которая изображается линиями неправильной формы.

Использование земельного массива определяет его форму и размер. Природные контуры почти никогда не бывают правильными, прямоугольными, их размер и форма зависят от особенностей рельефа территории – чем крупнее элементы рельефа, тем более крупные контуры. Контуры сельскохозяйственных угодий имеют ровные, правильные границы; они не являются границами почвенных контуров, а определяются структурой посевов.

Косвенное дешифрирование. Важный косвенный признак почвенного дешифрирования – рельеф, от его характера зависят тип

увлажнения, степень смытости, оглеение, степень оподзоленности и другие генетические признаки почв.

Дешифрирование растительности также дает большой материал для почвенного картографирования. Ельники, осиновые насаждения приурочены чаще всего к почвам тяжелого и среднего гранулометрического состава. Сосновые леса произрастают на почвах легкого гранулометрического состава. Низинные болотные почвы покрыты более темноокрашенной растительностью, контуры верховых болот из-за светлоокрашенной поверхности мхов имеют на снимках светлые пятна.

Для установления почвенных контуров территорий, покрытых кустарниками и культурной растительностью, необходимы полевые исследования, так как в камеральных условиях они выявляются плохо.

Так, например, почвы таежно-лесной зоны дешифрируются по косвенным дешифровочным признакам (рельеф и растительность).

Распаханные дерново-подзолистые почвы на фотоснимках имеют более светлый тон по сравнению с другими почвами. Гранулометрический состав этих почв коррелирует с рельефом и изображается разными тонами: песчаные и супесчаные подзолистые почвы выглядят более светлыми, средне- и темносуглинистые – более темными.

Подзолистые и дерново-подзолистые под лесами почвы на фотоснимках различаются плохо. Подзолистые и дерново-подзолистые глеевые почвы характеризуются зернистой структурой темного цвета, располагаются чаще всего в понижениях и не распаиваются.

Почвы низинных и переходных болот имеют неоднородный тон, который создается окнами воды, кочками, различной болотной растительностью, и крупнопятнистый рисунок, обусловленный порослями леса и кустарника по краям болот. Почвы верховых болот дешифрируются по светлому тону изображения и мелкозернистой структуре.

Почвы речных долин имеют различный тон в зависимости от увлажнения и приурочены к долинам рек.

Известно, что наибольший эффект дает применение аэроснимков при картографировании почв в районах с пестрым почвенным покровом, где пестрота связана с наличием мезо- и микрорельефа. При работе со снимками в разных природных зонах нашей страны число выделяемых на почвенных картах контуров почв и структур почвен-

ного покрова на единицу площади возрастает в 1,5 – 5 раз по сравнению с картами, составленными без них, а информативность карт становится богаче благодаря отображению элементарных почвенных структур.

Большой информативностью обладают космические снимки. При разрешении космических снимков на местности 20 – 25 м во всех природных зонах теоретически должно отобразиться более 80 % пойменных и овражно-балочных почв. Однако из-за незначительных контрастов в южно-таежной зоне отображается меньший процент почв долин, а в лесостепной и степной зонах – до 100 % пойменных и овражно-балочных почв.

Важное свойство космических снимков состоит в том, что один снимок охватывает большую территорию при одинаковых условиях съемки, что обеспечивает надежность дешифрирования почвенного покрова. Крупномасштабные снимки (1:100 000 и крупнее) содержат готовые генерализованные контуры почв для их отображений на почвенных картах. На этих снимках хорошо видна внутриконтурная неоднородность почвенного покрова в виде различного рисунка изображения почв.

На космических снимках средних и мелких масштабов происходит значительная генерализация, внутриконтурный рисунок практически исчезает. Поэтому необходимо увеличение космических снимков масштабом 1:1 000 000 до масштаба 1:200 000.

Дешифрирование почвенного покрова различных природных зон на космических снимках разных типов (масштабом 1:1 000 000 и увеличенных) показало, что в подзоне дерново-подзолистых почв при составлении мелкомасштабных и обзорных почвенных карт дешифрирование следует проводить на увеличенных снимках. На них появляются детали, характеризующие формы, размеры объектов, характер границ, внутриконтурная неоднородность, облегчающие дешифрирование почвенного покрова и дающие обоснование правомерности выделения того или иного контура, видимого на неувеличенных снимках, используемых для контроля величины выделяемых контуров.

Однако составление карты – не единственный способ применения дистанционных методов в почвоведении. В настоящее время разрабатываются разнообразные методики использования дистанционных материалов для изучения свойств почв. Почвоведы на основе

знания свойств и состояний конкретной почвы стремятся выявить связи между почвенными процессами и внешними их проявлениями, которые регистрируются дистанционной аппаратурой. Создаются новые модели, связывающие отражательную способность почвы с ее физическими свойствами, например влажностью, содержанием органического вещества, наличием минеральных пленок, механическим составом, структурой, свойствами поверхности.

Изучение свойств почв на основе ДДЗ

Гумусированность почв. Гумус имеет темный цвет, почти черный у черноземов. Чем светлее ареалы почвенного покрова на снимках, тем при прочих равных условиях меньше гумуса содержит почва. Эксперименты показали, что изменение содержания гумуса до 7 % влияет на отражательные свойства почв и может фиксироваться на снимках. При большом содержании гумуса цвет почвы меняется мало, его изменения маскируются другими факторами. Следовательно, космические снимки можно использовать для изучения относительно бедных органическим веществом почв, но они практически не пригодны для оценки содержания гумуса в черноземах, в которых содержание гумуса варьируется от 6 до 12 %.

Влажность почвы очень непостоянна во времени. Однако оценка этого показателя имеет большое практическое значение для сельского хозяйства. Влага в почве находится в различных состояниях. Воздушно-сухая почва характеризуется прочносвязанной водой, которая не влияет на ее отражательные способности. Гигроскопическая, или рыхлосвязанная, влага определяет влажность почвы, влияющую на ее цвет и физические свойства (мягкость, пластичность). Отражательные свойства почв наиболее тесно связаны именно с этим видом влаги при ее следующих градациях: 1 – 5 % – для песчаных почв, 2 – 12 % – для супесчаных почв и 4 – 22 % – для суглинистых.

Свободная, или гравитационная, влага, свойственная мокрой почве, в целом не влияет на ее отражательные свойства, но при большом избытке иногда даже несколько увеличивает процент отраженного излучения и осветляет почвы.

Для оценки влажности можно использовать и тепловые снимки, поскольку сухие и влажные почвы отличаются по теплоемкости и температуре поверхности, особенно в периоды их нагревания Солн-

цем. Например, избыточное увлажнение почв дешифрируется по потемнению фототона изображения в ближней инфракрасной области.

По снимкам распознают различные неблагоприятные процессы. **Щебнистость почвы** вызывает потемнение ее поверхности, заиливание на поймах после половодья приводит к осветлению. В виде осветленных ареалов на снимках проявляются участки водной и ветровой эрозии почв.

Засоление почв отражается на снимках только в случае появления солевых налетов на поверхности. Это характерно для солончаков, но не для солонцов, которые имеют накопления соли на некоторой глубине. В сухом состоянии засоленные почвы светлее незасоленных, а во влажном, наоборот, темнее. Поэтому для изучения по снимкам ареалов засоления почв важно знать погодные условия.

Эродированность почв отражается благодаря формам водной эрозии. Плоскостной смыв дешифрируется по чередованию светлых пятен смытых почв на возвышенных участках и темных пятен намывных почв в понижениях. Дефляция определяется по светлым пятнам выдувания почв, которые вытянуты по направлению ветра.

Развитие дистанционных методов может быть весьма полезным в оценке **вклада почв в радиационный баланс** суши (потоки тепла из почвы и в почву, медленный перенос тепла, излучение земной поверхностью). Дистанционные измерения температуры поверхности и альбедо в соответствии с имеющимися метеорологическими данными могут быть надежной основой для прогноза эвапотранспирации экосистем. Сейчас благодаря измерениям теплоотражения с поверхности суши можно ежедневно получать сведения о запасах влаги в почве. Следовательно, возможен мониторинг водосборных бассейнов и прогноз объема стока, а также эрозионной опасности. Можно фиксировать также динамику иссушения поверхности почвенных горизонтов и увязывать ее с режимами верховодки и грунтовых вод.

Экстенсивные и системные наблюдения могут быть основанием для экстраполяции данных по физическим и химическим свойствам почв в одной точке на целые почвенные ландшафты.

Сбор систематических спутниковых данных в определенные моменты времени может быть полезен для оценки динамики глобальных процессов, определяемых характером ландшафтов, почвообразующими породами, климатическими изменениями.

Дистанционные методы предоставляют большие возможности для мониторинга почвенных ресурсов в мировом масштабе для оценки роли почв в динамике парниковых газов и глобальных изменениях климата, связанных с нарушением пространственных закономерностей альбедо и эвапотранспирации. В изучении экосистем на глобальном и региональном уровнях дистанционные методы могут обеспечить систематизацию и достоверную экстраполяцию данных единичных натуральных наблюдений, недостаточных для характеристики обширных территорий.

Рост общественной заинтересованности в расширении пахотных площадей с целью увеличения производства продуктов питания заставляет обращаться к дистанционным методам как надежному средству ускорения работ по почвенной съемке, мониторингу почвенных условий, потенциальной продуктивности почв и их ответных реакций на антропогенные воздействия.

Использование ДДЗ для изучения структуры землепользования

Методы цифровой обработки космических и аэроснимков позволяют более эффективно решать вопросы рационального использования земельных ресурсов. Данные методы сейчас широко используются в различных отраслях сельского хозяйства. Объясняется это большими площадями сельскохозяйственных угодий и тем, что культурная растительность хорошо дешифрируется по снимкам.

Основные виды работ по **учету земель и проведению землеустроительных мероприятий** проводят на основе аэроснимков масштабом 1:25 000, 1:10 000 и крупнее, дешифрирование которых позволяет получать данные о местоположении и характеристике контуров объектов, подлежащих учету.

Контурами и объектами сельскохозяйственного дешифрирования являются: границы землепользования; пашни; залежи, сенокосы; пастбища; сады; виноградники; земли, непригодные или малопригодные для использования в сельском хозяйстве; резкие формы рельефа, некоторые объекты топографического дешифрирования. Распознавание отдельных видов культур в данном случае не производится. При дешифрировании показывают фактическое состояние сельскохозяйственных угодий в момент съемки.

На основе крупномасштабного дешифрирования проводятся **работы по составлению земельного кадастра** на территорию России. В процессе этой работы на разные виды землепользования создаются планы различных масштабов (от 1:500 и мельче). Земельный кадастр должен обеспечить учет и оценку земель в масштабе всей страны, а также юридическую основу землепользования.

В последнее время для изучения структуры землепользования активно привлекаются и космические снимки. Виды использования земель на них дешифрируются с разной степенью детальности.

В США разработана единая для всего мира **классификация видов земельных угодий на основе аэро- и космоснимков**. Она имеет четыре уровня. Первый уровень детальности подразумевает выделение девяти категорий угодий: городские и застроенные земли; сельскохозяйственные земли; естественные пастбища; леса; водные поверхности; незаселенные заболоченные земли; территории, лишенные растительного покрова; тундры; снега и льды. На данном уровне используются снимки с разрешением на местности 70 – 100 м. Во второй уровень входят 35 категорий, которые выделяются по снимкам с более высоким разрешением. На третьем и четвертом уровнях происходит еще более детальное деление по категориям, при этом кроме космических снимков используют и другие дополнительные источники.

Карты видов использования земель, составленные на основе космоснимков, по качеству не уступают аналогичным картам, выполненным по крупномасштабным планам землепользования, и характеризуются высокой детальностью, точностью и оперативностью. Достоверность дешифрирования видов земель составляет 80 – 90 %. Составленные по космоснимкам карты видов использования земель обычно имеют масштаб в 2 – 4 раза крупнее исходного съемочного материала. Наиболее распространенными масштабами карт являются 1:50 000 – 1: 2 500 000. Карты масштабом крупнее 1: 1 000 000 предназначены для изучения земельных ресурсов на уровне области, а карты более мелких масштабов – на уровне крупных регионов и страны.

Методика выявления видов использования земель по космоснимкам в настоящее время наиболее разработана и активно приме-

няется на практике. Но наряду с этим постоянно появляются и новые направления использования космических снимков.

Космоснимки позволяют выделить озимые культуры в различном состоянии; определить площадь и проективное покрытие растительности; дать прогноз о будущем урожае, определить вегетационный индекс растительности (NDVI), который характеризует состояние сельхозкультур. Кроме того, используя более ранние снимки, можно определить площадь и качество растительности, погибшей в результате чрезвычайных ситуаций (ЧС), – как в площадных единицах, так и в процентах.

4.4. Изучение растительного покрова, его состояния и продуктивности

Растительность в первую очередь отображается на космических снимках и хорошо определяется по прямым признакам; практически на всех снимках четко различаются лесные и безлесные территории. По космическим снимкам также можно проследить границы растительных сообществ или переходные зоны, распределение внутри сообществ растений разных видов, смену растительности при движении с севера на юг или от равнин к горам.

Растительный покров часто является индикатором для дешифрирования подстилающих пород, почв и т. п. Методы цифровой обработки космических снимков позволяют проводить картографирование растительного покрова, а также изучать его состояние, динамику, нарушенность и т. п.

Изучение состояния лесных угодий

Исследование лесных массивов проводится с целью развития методов их рационального использования, включая задачи их охраны и контроля воспроизводства, для чего с успехом используется геоинформационный анализ космических снимков на базе современного программного обеспечения, что позволяет существенно повысить оперативность и точность лесоустроительных работ и изучение антропогенной нагрузки на лесные массивы. Геоинформационные методы обработки космических снимков основаны на анализе их спектральной отражательной способности.

Спектральная отражательная способность лесных насаждений и кустарников изменяется в зависимости от сезона года и фазы вегетации. Все многообразие кривых отражения лесных насаждений и кустарников можно свести к четырем основным типам (рис. 4.10).

Тип 1 характеризует отражательную способность лиственных пород деревьев в зимний период и на снимках отображается почти нейтральным серым фоном с чуть заметным желтоватым или буроватым оттенком. Наиболее темными являются береза и лиственница молодых древостоев, более светлыми – дуб молодого древостоя, далее – липа спелого древостоя и осина молодого древостоя. Самой светлой в этот период оказывается береза спелого древостоя. Кривая показывает, что отражательная способность постепенно и очень незначительно возрастает от фиолетового к красному концу спектра, оставаясь почти без изменений на всем протяжении ближней области ИК-спектра и сохраняя тот уровень, которого она достигает на красном участке.

Тип 2 соответствует темно-зеленому малонасыщенному фону и характеризует отражательную способность хвойных пород лесов в зимний период (самая темная порода – сосна, у нее коэффициент яркости даже в максимуме (550 нм) равен лишь 0,021). У данных объектов отражательная способность во всей видимой области спектра остается на низком уровне, около длины волны 550 нм наблюдается слабый максимум. В ближней области ИК-спектра отражательная способность повышенная, однако невысокая для растительных образований.

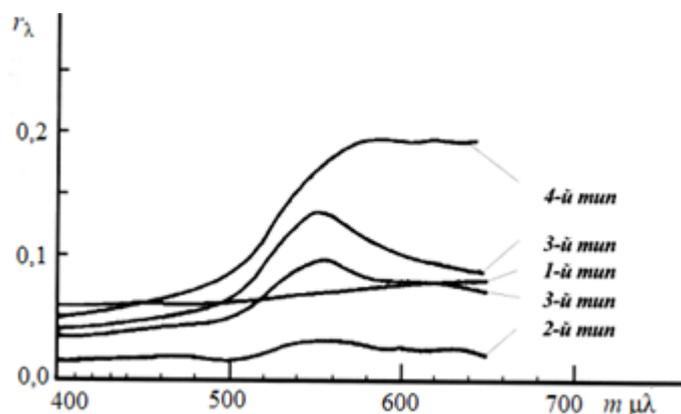


Рис. 4.10. Типичные спектральные профили лесных насаждений

К типу 3 относятся древостой лиственных пород с молодой листвой и хвойные породы с молодой хвоей. По мере развития молодой листвы и хвои (фаза «полный лист») насаждения несколько темнеют. В фазе «поздняя зелень» отражательная способность лиственных пород снова становится высокой, притом более высокой, чем в фазе «молодой лист», т. е. лиственные леса светлеют, а хвойные породы, наоборот, становятся более темными, приближаясь к зимней окраске.

Кривая (см. рис. 4.10) показывает, что отражательная способность в видимой области спектра для указанных объектов заметно выше, чем в предыдущем типе, максимум наблюдается в желто-зеленых лучах (550 нм). Отражательная способность в ближней области ИК-спектра, начиная с 700 нм, резко возрастает и остается очень высокой на всем протяжении этой области. Отражательная способность лесов в ближней области ИК-спектра, начиная с 700 нм, оказывается различной у разных пород. Самыми темными являются сосна и ель, более светлыми – береза и осина.

Тип 4 соответствует оранжево-красному фону и осенней окраске всех лиственных лесов. Отражательная способность остается в диапазоне 400 – 500 нм такой же, как и в предыдущем типе, однако возрастает в красном и ближнем участках ИК-спектра.

Инвентаризация лесов. Традиционно аэро- и космоснимки применяются для инвентаризации лесов и охраны их от пожаров, болезней, вредителей [1].

При картографировании лесного фонда считается целесообразным выделять две зоны. Первая зона – это территория, которая активно используется в народном хозяйстве. На ней проводят лесоустроительные работы, в основном по материалам наземных исследований. Второй вид – это территория лесного фонда, которую не намечается вовлекать в активную хозяйственную деятельность в ближайшее время. Здесь осуществляют лесоинвентаризацию на основе аэро- и космоснимков.

При проведении инвентаризации используют фотостатистический и картографический методы. Фотостатистическая инвентаризация подразумевает сплошное дешифрирование космических снимков. По ним проводят стратификацию территории (разделение ее на выделы-страты). Затем по аэроснимкам масштабом 1:5 000 – 1:10 000 вы-

полняют выборочное дешифрирование фотопроб площадью около 1 га для определения средних таксационных характеристик (высота, диаметр крон, сомкнутость полога) и контроля правильности дешифрирования космоснимков. Часть фотопроб обследуется на местности. По проведенным исследованиям составляют планы лесонасаждений и карты лесхозов в масштабе 1:50 000 – 1:100 000.

Картографическая инвентаризация проводится без определения таксационных показателей и основана также на дешифрировании космических снимков, которое сопровождается выборочным дешифрированием аэроснимков и наземным обследованием. В результате составляются карты лесов в масштабе 1: 100 000 – 1 : 200 000.

Оценки нарушенности лесов. Космические снимки позволяют следить за состоянием лесов и выделять территории, нарушенные в результате хозяйственной деятельности или по естественным причинам.

Для изучения нарушенности лесов используются в основном следующие материалы:

- *космические снимки среднего разрешения со спутника «Ресурс» (МСУ-СК)* применяют для дешифрирования крупных нарушений, вызванных хозяйственной деятельностью человека (сельскохозяйственные территории, массивы сплошных вырубок и молодых вторичных лесов). Их использование позволяет исключить из дальнейшего анализа более дорогостоящие снимки высокого разрешения;

- *космические снимки высокого разрешения (Landsat ETM⁺, «Ресурс» МСУ-Э, SPOT HRV)* применяют для детального выявления участков, нарушенных хозяйственной деятельностью человека, и коррекции границ малонарушенных лесных территорий.

Использование только космических снимков среднего разрешения (МСУ-СК) является недостаточно для выявления ряда объектов, значимых с точки зрения антропогенной нарушенности ландшафтов. По этим снимкам не могут быть выявлены многие линейные объекты (большинство лесовозных и иных хозяйственных дорог), мелкие вырубки и участки сельскохозяйственных угодий, участки вторичных лесов на их месте, мелкие карьеры и т. д. Наиболее затруднено выявление по этим снимкам небольших по площади антропогенно нарушенных территорий в условиях горных и предгорных ландшафтов с мелкомасштабной мозаикой различных типов экосистем.

Использование исключительно космических снимков высокого разрешения вызывает затруднения также и по погодным (отсутствие безоблачных дней летом) и финансовым причинам.

Оценка нарушенности лесов основана на анализе спектральной отражательной способности лесных насаждений и кустарников. В настоящее время разработаны цифровые методы обработки космоснимков с целью расчета площадей лесов, учета вырубок, дешифрирования типов лесов, расчета объемов сгоревшего леса и площадей гарей и т. п.

Например, контроль рубки лесов может быть осуществлен путем кластерного анализа и дешифрирования по спектральным кривым вырубок различной степени давности на основе специального программного обеспечения. Вырубки разделяют на свежие и старые. Анализ снимков позволяет определить площадь территории, на которой вырублены леса в различные промежутки времени, а также, при использовании более ранних снимков, определить типы растительности, росшей на этих местах, и их площади.

Травяной покров

Дешифрирование различных видов травяного покрова и оценка его состояния основаны на анализе его спектральной отражательной способности с использованием специальных геоинформационных технологий.

Рассмотрим спектральную отражательную способность травяных покровов. По характеру средних кривых (спектральные профили) можно выделить четыре типа (рис. 4.11).

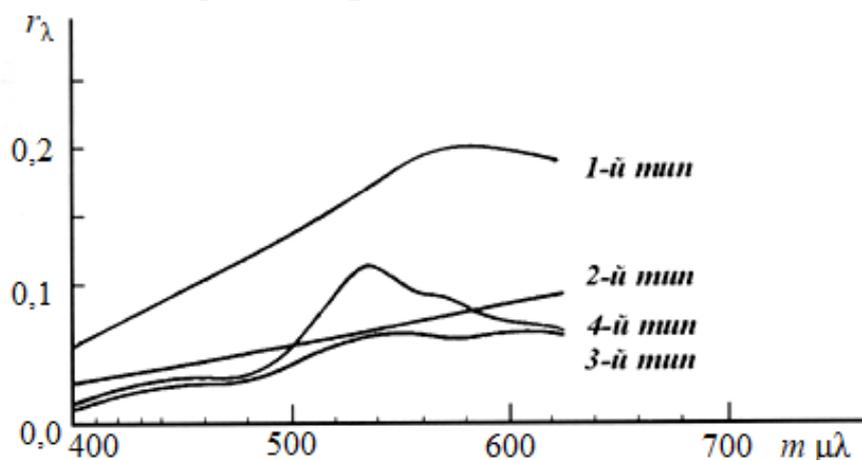


Рис. 4.11. Спектральные профили травяных покровов

Тип 1 характерен для высохших летних трав и пустынь, которые обладают песочно-желтой окраской. Кривая показывает характерную для данных объектов высокую отражательную способность по всему спектру. Она круто поднимается вверх от фиолетового к красному концу спектра, около 600 нм наблюдается максимум. В ближней области ИК-спектра кривая продолжает подниматься.

Тип 2 характеризует старую прошлогоднюю (побуревшую) траву после таяния снега, заросли полыни и бурьяна в конце лета, когда они начинают засыхать. Объекты, относящиеся к данному типу, обладают серовато-буровой окраской и меньшей яркостью по сравнению с первым типом. Кривая отражения данного типа расположена ниже предыдущей, имеет более пологий вид и постепенно поднимается вверх в направлении от фиолетового к красному участку спектра.

Тип 3 характеризует суходольные луга, поймы рек и целинные степи в конце летнего периода. Указанные природные объекты имеют зеленоватую окраску. Кривая похожа на кривую второго типа, но имеет максимум около длины волны 560 нм, что характерно для растительности. В ближней ИК-области спектра отражательная способность увеличивается (эффект Вуда).

Тип 4 характеризует травяные покровы с сочной густой растительностью, имеющие ярко-зеленую окраску. Кривая отражения имеет резко выраженный максимум в желто-зеленых лучах (около 550 нм). На ней хорошо прослеживается эффект Вуда – в ближней ИК-области растения имеют максимальную отражательную способность, которая с увеличением длины волны снижается (начиная с длины волны 700 нм кривая круто поднимается вверх и около 850 нм достигает максимума).

Таким образом, можно отметить сезонные изменения кривых отражательной способности травяной растительности. Весной молодая сочная зелень соответствует на снимках кривой четвертого типа, затем, по мере увядания, кривая переходит в третий и второй типы.

Кривые спектральной отражательной способности цветущих лугов зависят от вида цветущих растений и их цвета. Полевые и огородные культуры сходны по отражательной способности с травяными покровами и имеют похожий сезонный ход кривых.

В некоторых случаях средние кривые спектральной отражательной способности различных природных объектов совпадают, в результате возникают затруднения с их дешифрированием.

Например, сравнение кривых отражения травяных покровов и лесов показывает, что кривая отражения травяных покровов четвертого типа в видимой области спектра совпадает с кривой отражения лиственных лесов третьего типа, а кривая травяных покровов третьего типа – с кривой лесных насаждений хвойных пород летнего периода.

Поздней осенью до появления снега и ранней весной после таяния снега средние кривые отражения обнажений и почв, травяных покровов второго типа и лесных насаждений первого типа очень похожи, вследствие этого контраст ландшафта на снимках снижается и дешифрирование объектов не может быть выполнено.

Необходимо отметить, что описанные типы кривых спектральной отражательной способности являются усредненными. Вместе с тем каждый ландшафт характеризуется индивидуальными особенностями и уникальными взаимосвязями компонентов. Следовательно, для правильного распознавания и описания образов необходимо предварительное изучение отражательной способности объектов, характерных для данного типа ландшафта, в различных условиях и состояниях.

Для изучения состояния растительного покрова используют методы, основанные на линейных комбинациях спектральных каналов, или вегетационные индексы.

4.5. Космический мониторинг «цветения» водоемов

Космический мониторинг позволяет оперативно отслеживать состояние водных объектов, в частности изучать такие явления, как эвтрофикация пресных водоемов и размножение токсичных красных водорослей в морской воде.

Мониторинг эвтрофикации водохранилищ

Специалисты «ТЕРРА ТЕХ», дочерней компании холдинга «Российские космические системы» (РКС, входит в госкорпорацию «Роскосмос»), проводят исследование динамики «цветения» (эвтрофикации) водохранилищ Волги с использованием технологий ДЗЗ [5].

«Цветение» воды характерно для всех водоемов в летнее время. Продолжительный теплый период, экстремальная жара, сброс коммунальных стоков и вынос удобрений с полей вызывают интенсивное размножение сине-зеленых водорослей. Эвтрофикация изменяет качество воды и мест пляжного отдыха, нарушает режим работы гидротехнических сооружений и влияет на рыбное хозяйство (рис. 4.12).

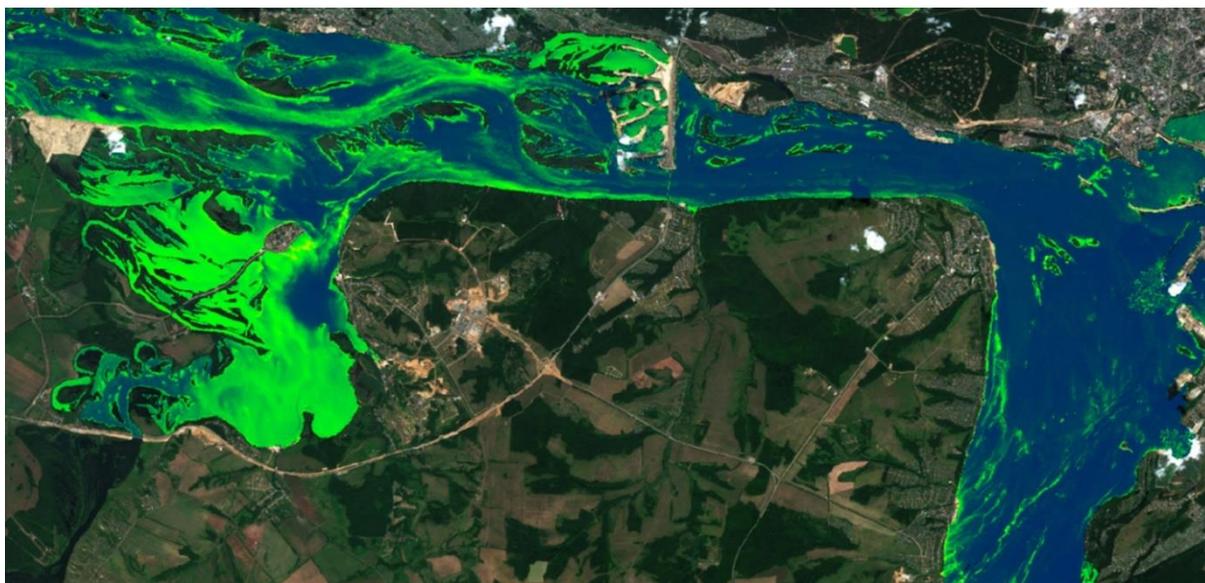


Рис. 4.12. «Цветение» водоемов [6]

В качестве примера рассмотрим мониторинг по космическим снимкам высокого пространственного разрешения «цветения» участков Куйбышевского и Чебоксарского водохранилищ за летние месяцы 2020 – 2022 годов. Были использованы снимки спутника дистанционного зондирования Земли «Канопус-В», данные из открытых источников и спутниковые изображения с орбитальных группировок зарубежных государств.

Водохранилища расположены на пойменных участках речной долины, поэтому из-за разложения растительных остатков затопленных земель они насыщены фосфором и изначально подвержены процессу эвтрофикации. Замедленный сток и наличие плотин способствуют заилению и обмелению водохранилищ, что также благоприятствует росту водорослей.

Заращение водоемов может быть естественным и антропогенным. Естественная эвтрофикация связана с обмелением водных объ-

ектов в результате накопления донных отложений. Этот процесс может длиться тысячи и десятки тысяч лет.

Антропогенная эвтрофикация вызвана поступлением азота, фосфора и других элементов с коммунальными стоками, дождевым смывом удобрений с полей и в результате разрушения побережий. Она развивается за считанные годы, особенно в водоёмах с замедленным стоком – озёрах, водохранилищах, прудах и прибрежной зоне внутренних морей.

Последствия изменения водоемов при эвтрофикации:

- уменьшение прозрачности воды;
- снижение содержания кислорода и связанные с этим заморы рыб;
- изменение термического режима водоема;
- подщелачивание воды;
- сокращение площадей нерестилищ;
- изменение видового состава водных организмов в сторону упрощения сообществ;
- появление благоприятных условий для развития патогенной микрофлоры и возбудителей кишечных заболеваний;
- засорение берегов остатками водной растительности;
- неприятный запах из-за гниения водорослей и др.

Часть изменений, происходящих в водоемах при эвтрофикации, может быть определена по космическим снимкам. Они помогают отследить динамику процесса и спланировать полевые исследования, так как дают возможность дешифровать места высокой концентрации водорослей, их площадь и направление перемещения.

Расчет нормализованного разностного индекса хлорофилла NDCI позволяет определить концентрацию фитопланктона.

На Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах был выполнен комплекс наземных и дистанционных исследований.

В процессе наземного мониторинга, который длился уже длительное время и был начат до космического эксперимента, были определены содержание хлорофилла и базовые показатели: мутности, минерализации, химического состава, содержания микропластика и др. Продемонстрировано соответствие между рассчитанными значениями NDCI и содержанием хлорофилла в воде: оба показателя повышены по побережьям, между островами и в заливах (например, в

месте впадения реки Казанки в Волгу). По мере удаления от побережья значение NDCI падает, как и содержание хлорофилла – из-за больших глубин здесь ниже температура водных масс и меньше влияние стока с суши.

Наблюдения на участке Куйбышевского водохранилища на территории Республики Татарстан от Зеленодольска до Казани в период с мая 2020 года по август 2022 года позволили получить следующие результаты (рис. 4.13).



Рис. 4.13. «Цветение» воды на Куйбышевском водохранилище [6]

В мае рост водорослей незначителен: вегетационный период в самом начале, а температура воды недостаточно высокая. Единичные скопления водорослей зафиксированы по побережьям, воды которых хорошо прогреваются ввиду малых глубин. Снимки 2021 и 2022 годов отличаются наличием полей с небольшой концентрацией водорослей в акваториях Казани, Свияжска и Введенской слободы, что может быть связано с теплой погодой, выносом сточных вод и характером речного русла (наличие длинных узких островов замедляет течение).

В начале июля площади скоплений водорослей у побережий увеличиваются, зафиксировано движение полей хлорофилла вниз по течению. Акватории Казани и Введенской слободы покрыты большим количеством водорослей, которых особенно много между островами и у мостов. Наиболее интенсивно «цветение» в начале июля 2021 года, наименее – в 2022 году.

Конец июля отличается снижением концентрации водорослей у побережий и их более интенсивным выносом с течением – зафиксированы продольные поля хлорофилла в центре русла. Снимок 2021 года отражает наиболее сильное «цветение» воды.

К августу количество водорослей резко снижается. Сохраняется скопление у Свияжска, появляется движущееся поле хлорофилла на правом берегу Волги у Верхнего Услона, что связано с геометрией русла – река резко поворачивает, и водоросли скапливаются между островами.

Изучена акватория Чебоксарского водохранилища от границы Чувашии с Республикой Марий Эл до города Мариинский посад в период с мая 2020 года по июль 2022 года (рис. 4.14).



Рис. 4.14. «Цветение» воды на Чебоксарском водохранилище [6]

В мае рост водорослей незначителен: вегетационный период в самом начале, а температура воды недостаточно высокая. Единичные скопления водорослей зафиксированы по побережьям, воды которых хорошо прогреваются ввиду малых глубин. Снимок 2022 года отличается наличием поля с небольшой концентрацией водорослей между островами к югу от села Сидельниково.

К концу июня – началу июля площади скоплений водорослей у побережий и между островами увеличиваются. Зафиксированы поля хлорофилла по всей поверхности русла. Появился участок с повышенным значением NDCI западнее поселка Сосновка на левом берегу Волги. Скопление водорослей к югу от Сидельниково увеличилось – значение NDCI для этого участка повышено по сравнению с майским. Наиболее интенсивно «цветение» в начале июля 2021 года – максимальное скопление водорослей отмечено выше плотины Чебоксарской ГЭС, что связано с ее барьерной ролью.

Конец июля и начало августа отличаются снижением концентрации водорослей. Сохраняются участки с повышенным NDCI между островами южнее Сидельниково и западнее Сосновки. Снимок 2021 года отражает наиболее сильное «цветение» воды. Заметно движение полей водорослей с течением, особенно на снимке 2022 года: ниже плотины Чебоксарской ГЭС значение NDCI ниже, чем на остальной акватории, что связано с регулированием стока. Появились поля «цветения» севернее Новочебоксарска.

Полученные данные дистанционного зондирования могут быть использованы для планирования и корректировки рекреационной, рыбохозяйственной и иной деятельности, связанной с водными объектами, а в конечном итоге – для развития и сохранения национальных водных ресурсов.

Мониторинг распространения токсичных микроводорослей в Приморье

В середине июля 2022 года у побережья Владивостока, в Амурском заливе, была зафиксирована наибольшая за последние 30 лет концентрация микроводорослей – продуцентов токсинов. Пробы воды показали высокое содержание *Noctiluca scintillans*, *Dinophysis acuminata*, *Dinophysis forthii*, *Heterosigma akashiwo*, *Microcystis aeruginosa*.

Подобные явления периодически возникают по всему миру и называются «красными приливами». Не все из них вызывают изменение цвета воды: текущее «цветение» не окрашено. Разрастание водорослей происходит в солнечную маловетреную погоду.

Бактерии, живущие в водорослях, выделяют токсин микроцистин, влияющий на нервную систему. Токсин накапливается в моллюсках и рыбах, и в зависимости от количества вызывает гибель организмов экосистемы. Снижение содержания кислорода в воде из-за массового разрастания водорослей также способствует ухудшению местообитаний организмов.

Употребление зараженных морепродуктов может привести к кишечному расстройству, мышечной слабости, проблемам с дыханием, глазами и кожей.

«Красные приливы» губительны для морекультуры и вызывают необходимость строгого контроля всей вылавливаемой в зараженной

акватории рыбы. Предотвратить или ликвидировать «цветение» без вреда для экосистемы невозможно, а забор проб требует значительных финансовых вложений, поэтому важен постоянный мониторинг состояния прибрежных акваторий. В локальном масштабе такие исследования проводят отдельные хозяйства, однако для фиксации площадных явлений точечных измерений недостаточно.

Мониторинг «красных приливов» по всему миру проводится при помощи анализа снимков из космоса. Для мониторинга «цветения» воды специалисты «ТЕРРА ТЕХ» использовали снимки «Канопус-В» разрешением 10,5 м, Sentinel-2 разрешением 10 м, Landsat-8 разрешением 30 м. Для более точного дешифрирования водорослей и подсчета ареалов их распространения были применены мультиспектральные классификации и вычисление специализированных спектральных коэффициентов [7].

Концентрация водорослей была автоматически классифицирована по космическим снимкам на три группы: фоновые значения, низкая концентрация и высокая концентрация. Розовая рябь на некоторых снимках – это переотражение солнечного света из-за волнения.

По снимку «Канопус-В» в начале апреля зафиксированы минимальные площади «цветения»: высокая концентрация водорослей отмечена на 34,5 км², низкая – на 177,2 км² (рис. 4.15).

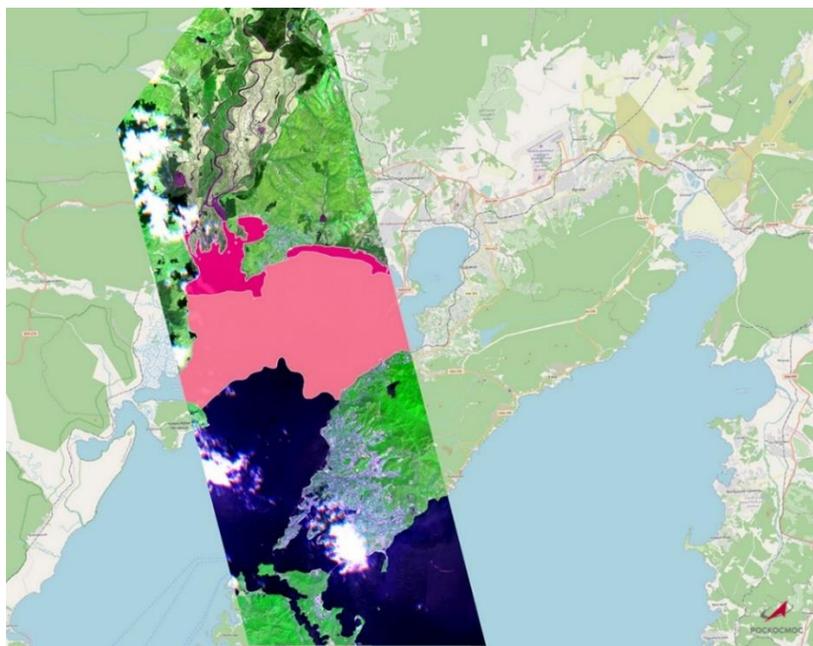


Рис. 4.15. «Красные приливы» в Амурском заливе (обстановка на 08.04.2022 г.) [7]

В мае (9 мая) высокие концентрации водорослей были определены только на хорошо прогреваемом мелководье у побережья. Они занимали площадь 70,4 км². «Цветение» начинает распространяться в Амурский залив: водоросли покрывают 86,1 км² акватории (рис. 4.16).

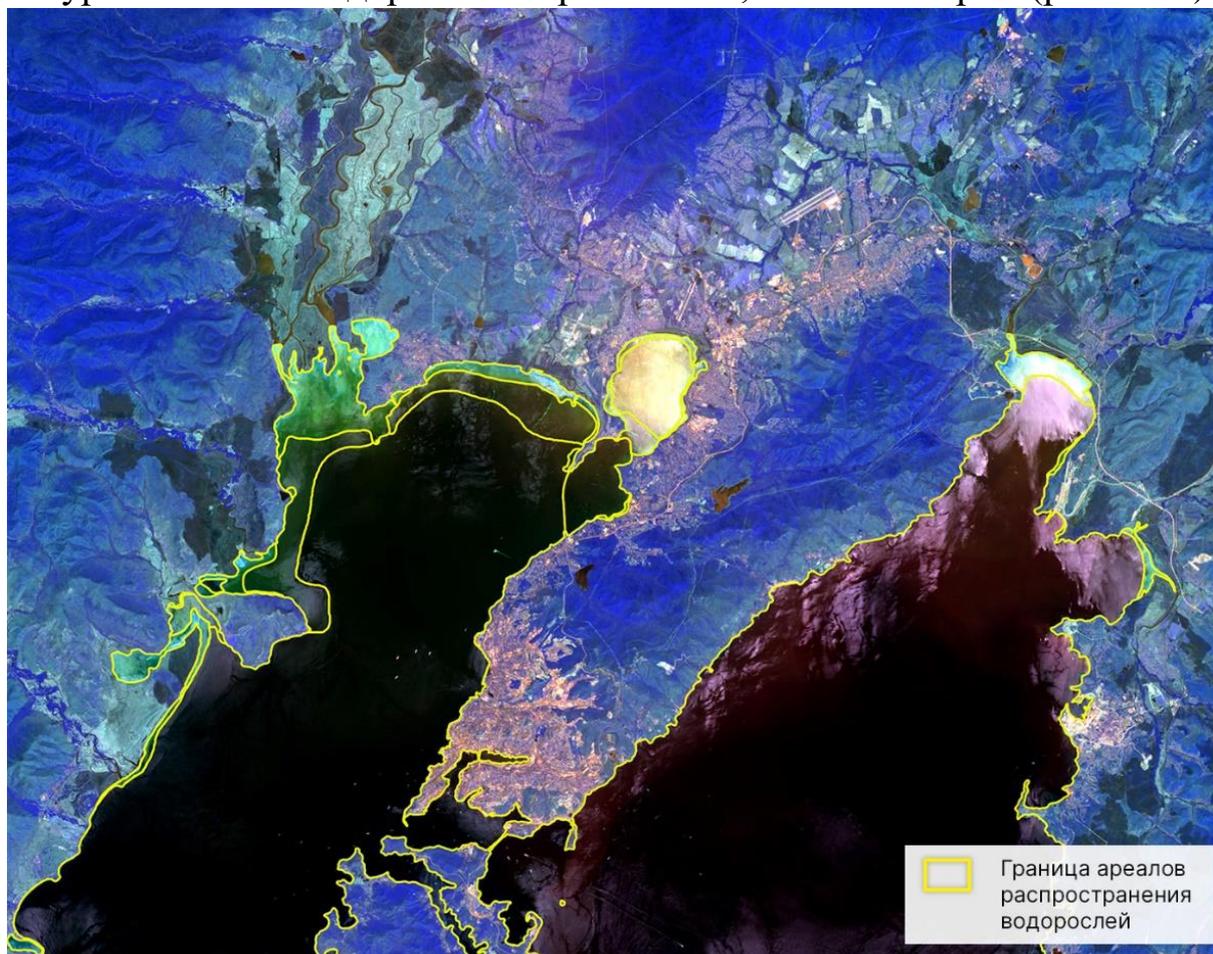


Рис. 4.16. Обстановка на 09.05.2022 г. [7]

19 мая наблюдается значительное увеличение ареалов распространения «цветения». Наибольшие концентрации водорослей по-прежнему находятся у побережий и занимают 69,3 км². Часть водорослей значительно распространилась по заливу в связи с прогревом воды: в низкой концентрации они наблюдаются на площади 180,5 км² (рис. 4.17).

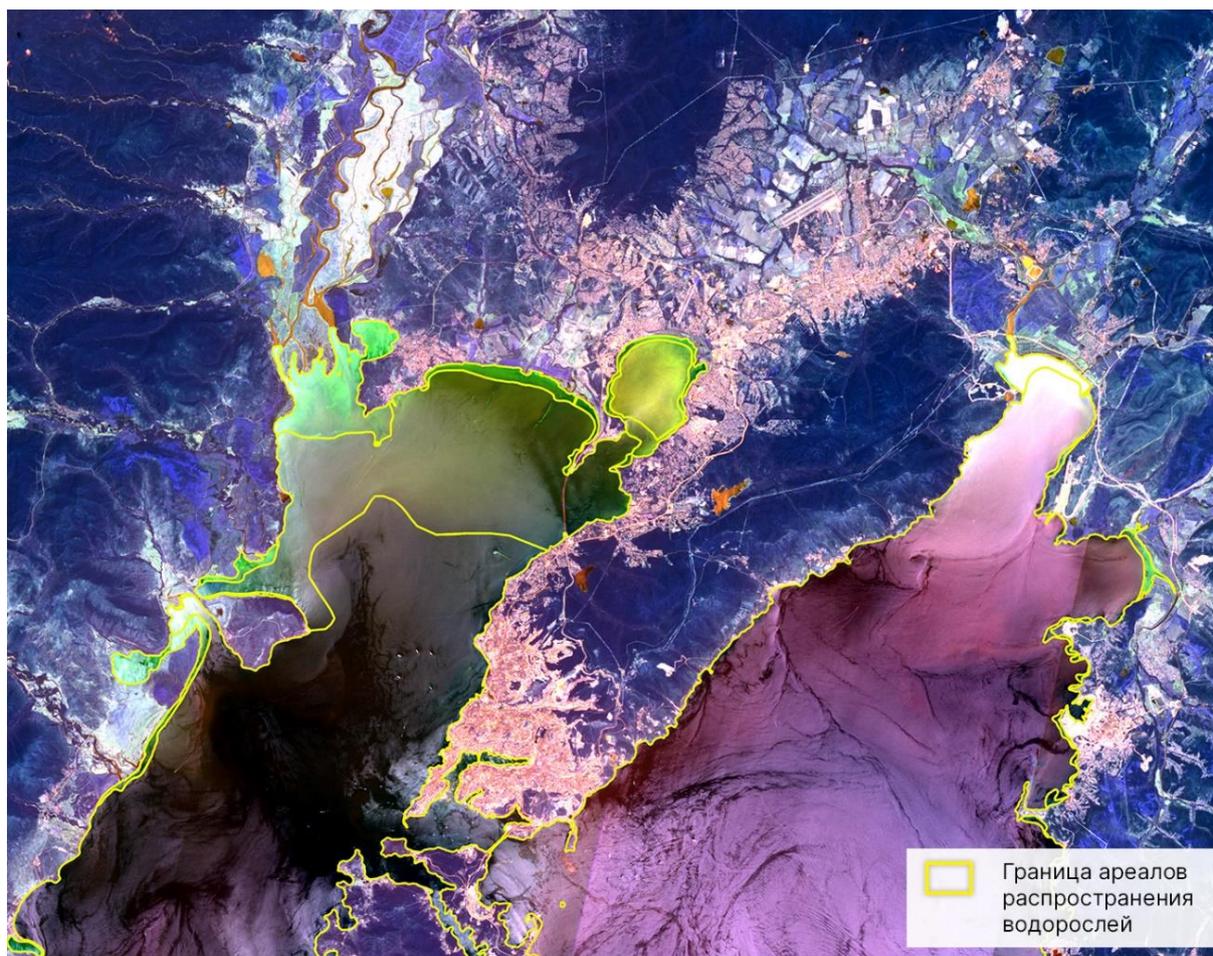


Рис. 4.17. Обстановка на 19.05.2022 г. [7]

К 7 июня заметны значительно большие площади распространения водорослей в высокой концентрации – 144,9 км², что обусловлено дальнейшим прогреванием водных масс. Интенсивное «цветение» и ветровой нагон к берегу привели к сокращению ареала распространения водорослей в низкой концентрации – 64 км² (рис. 4.18).

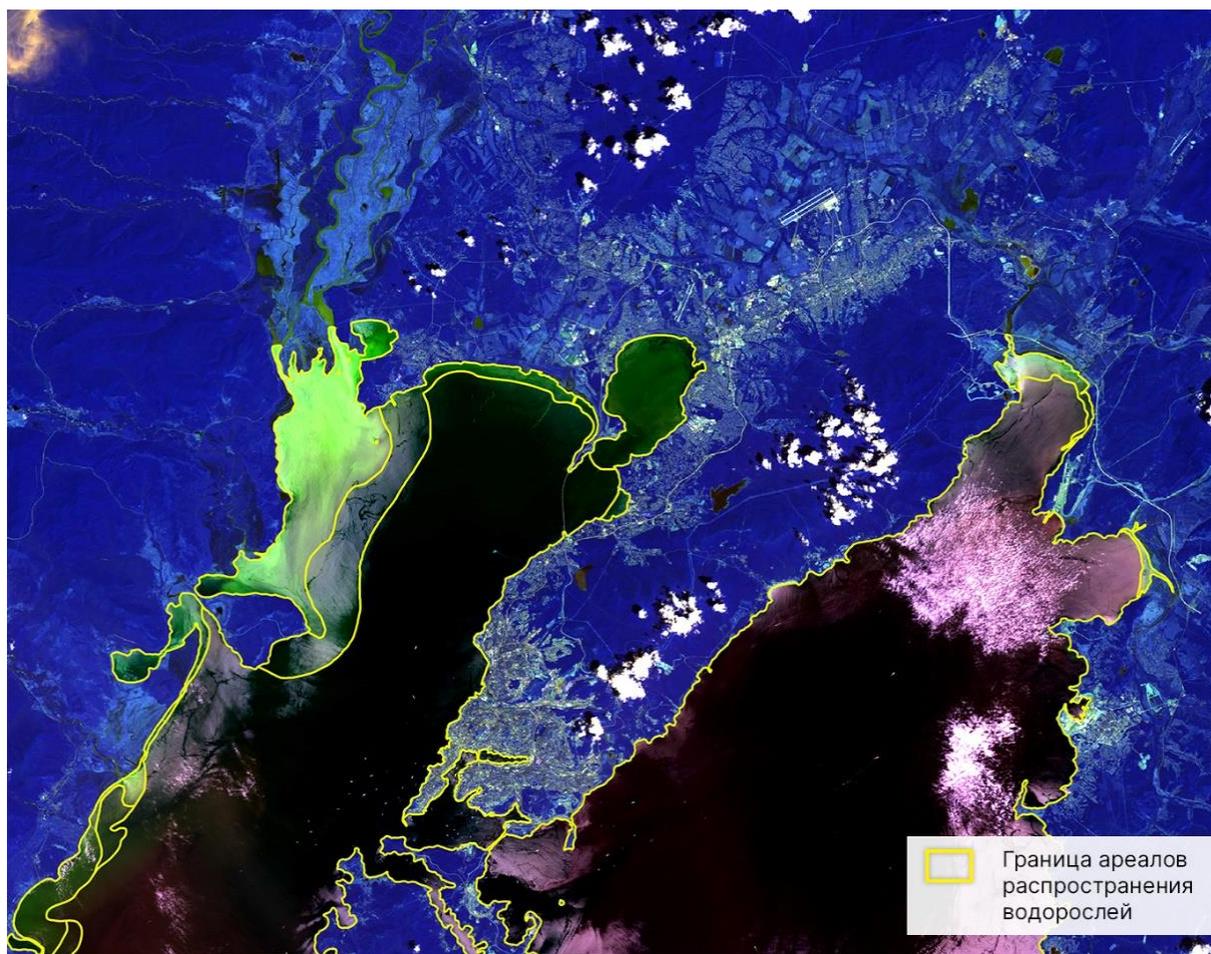


Рис. 4.18. Обстановка на 07.06.2022 г. [7]

В августе температура воды на различных глубинах достигает максимального значения. Так произошло и в 2022 году: продолжительный жаркий период привел к значительному разрастанию водорослей, хотя их видовой состав изменился – стало меньше продуцентов токсинов, поэтому обстановку больше нельзя считать напряженной. 141,68 км² хорошо прогретых мелководий по-прежнему заняты водорослями в высокой концентрации, при этом окружающий их ареал водорослей в низкой концентрации расширился с 64 км² (7 июня 2022 года) до 179,86 км² (рис. 4.19).

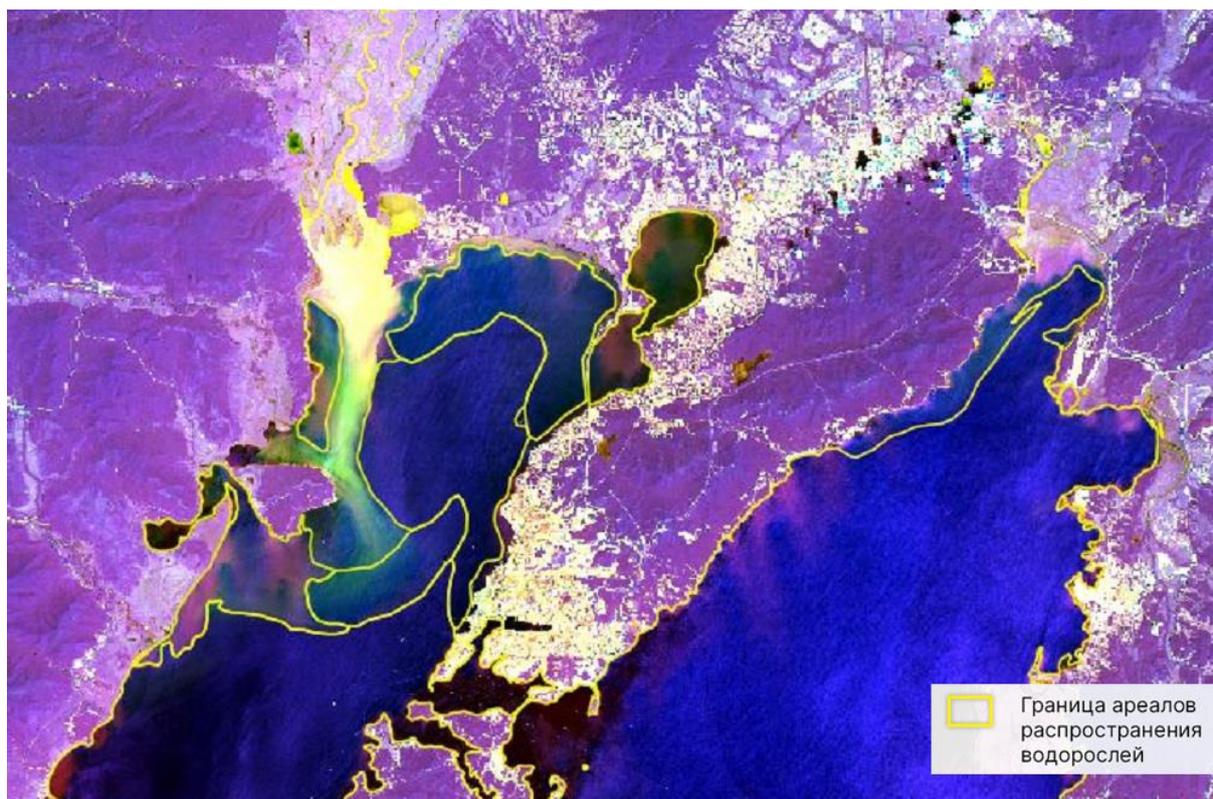


Рис. 4.19. Обстановка на 10.08.2022 г. [7]

Таким образом, спутниковая съемка позволяет оценить распространение и площадное распределение примесей, определить концентрацию водорослей и речного стока, что дополняет данные апробирования воды и помогает составлять прогнозы для рыболовства и туризма.

4.6. Использование ДДЗ в чрезвычайных ситуациях

Многие виды антропогенного воздействия на окружающую среду хорошо видны на космоснимках, поэтому они активно используются для контроля за экологическим состоянием территории. По снимкам можно, например, исследовать застроенность территории, густоту дорог, распаханность земель, эродированность почв, различные нарушения ландшафтов, загрязнения и т. п.

Загрязнение воздуха дешифрируется по прямым и косвенным признакам. На космических снимках хорошо видны дымовые шлейфы крупных промышленных предприятий, смоги. В некоторых случаях они могут полностью закрывать изображение территории, в других – частично нарушать это изображение, вызывая размытость. Хорошим

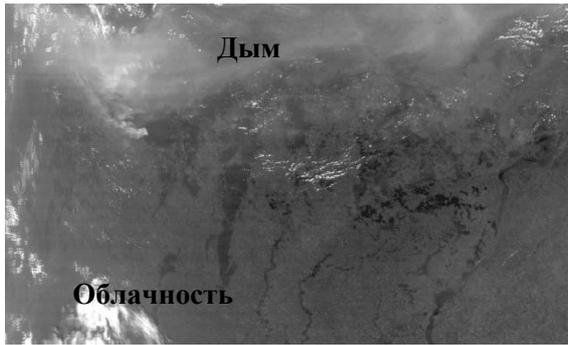
индикатором загрязнения атмосферы служит снежный покров вокруг населенных пунктов, на поверхности которого накапливаются загрязняющие вещества, которые изменяют его отражательную способность.

Часто причиной задымленности являются *торфяные и лесные пожары*, в результате которых создаются неблагоприятные условия для жизни населения. Контроль степени задымленности территорий на больших площадях удобнее и дешевле проводить с помощью космических съемок, а современные методы цифровой обработки изображений и представление результатов в ГИС позволяют точно и оперативно определить населенные пункты, попавшие в зону задымления.

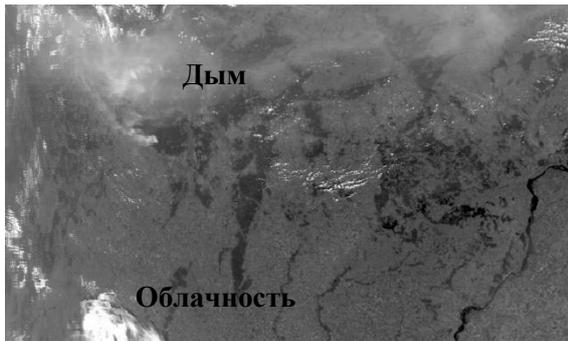
Во ВНИИ ГО ЧС МЧС разработана методика мониторинга задымленности территории по данным космических съемок. Она основана на использовании данных с искусственных спутников Земли NOAA и TERRA (рис. 4.20) [8].

Показано, что дымовые шлейфы лучше всего отображаются на космических изображениях в видимом диапазоне спектра. Чем меньше длина волны спектрального канала, тем более отчетливо выделяются дымовые шлейфы. От облачности они отличаются полупрозрачностью подстилающей территории (за исключением очень густых шлейфов и очагов пожаров). Анализ ближнего ИК и тепловых каналов позволяет уточнить разделение облачности и дыма, которые в данных каналах отражаются по-разному. В указанных каналах дым становится прозрачным и не распознается. Облачность в ближнем ИК-канале отображается белым тоном, а в тепловых каналах – черным (это обусловлено ее низкой температурой).

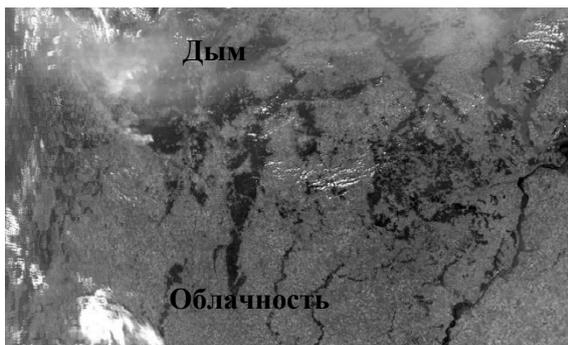
Визуальные методы дешифрирования удобнее использовать при выявлении зон задымления во время массовых пожаров. При локальных пожарах дымовые шлейфы хорошо выделяются на основе алгоритмов распознавания без обучения.



*Космическое изображение
с аппаратуры Terra MODIS
в диапазоне 0,459 – 0,479 мкм
(3-й спектральный канал)*



*Космическое изображение
с аппаратуры Terra MODIS
в диапазоне 0,545 – 0,565 мкм
(4-й спектральный канал)*



*Космическое изображение
с аппаратуры Terra MODIS
в диапазоне 0,620 – 0,670 мкм
(1-й спектральный канал)*



*Космическое изображение
с аппаратуры Terra MODIS
в диапазоне 0,841 – 0,876 мкм
(2-й спектральный канал)*

Рис. 4.20. Космическое изображение дымовых шлейфов с аппаратуры Terra MODIS [8]

В настоящее время с искусственных спутников Земли поступает большой объем информации, которую можно использовать для сле-

жения за лесными пожарами. В частности, можно получать данные о координатах очагов пожаров, название ближайшего населенного пункта, расстояние до него, азимут, а также информацию о площадях и объеме сгоревшего леса и т. д.

Основной дешифровочный признак свежих гарей после сильных низовых и повальных верховых пожаров – темно-серый и темный тон, неровные, чаще всего клиновидные границы (рис. 4.21).

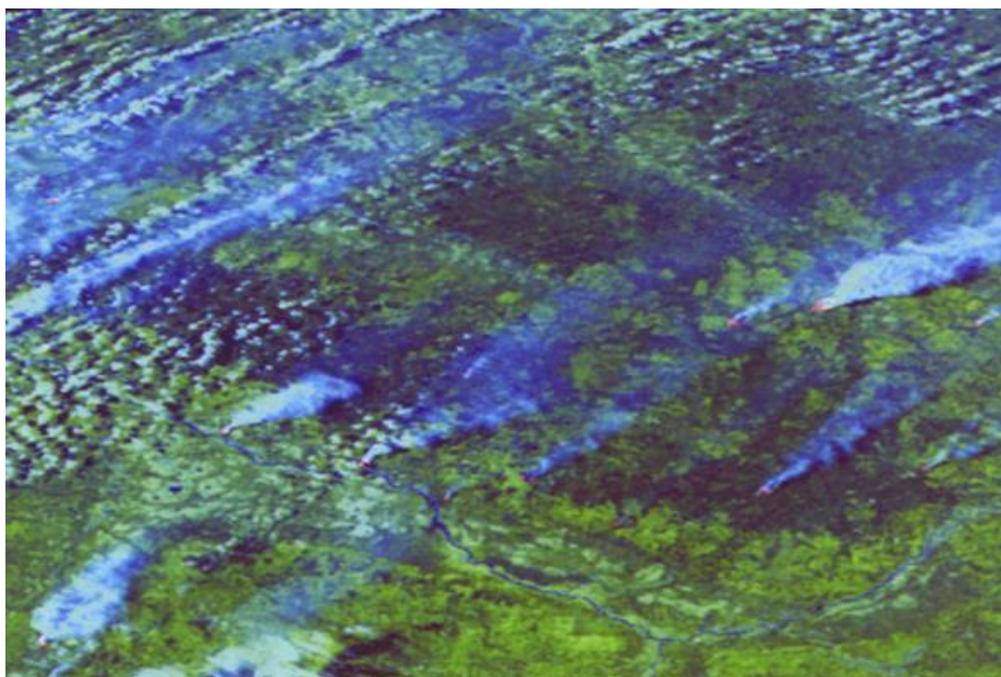


Рис. 4.21. Очаги лесных пожаров

Неровный характер кромки гарей связан с различными видами и интенсивностью пожаров в течение суток, неравномерным пожарным созреванием типов насаждений, различными категориями площадей, встречающихся на пути распространения пожара, и, наконец, направлением ветра. Дешифровочные признаки гарей не позволяют визуальным путем надежно выделять все существующие гари, т. е. велика вероятность их пропуска, возникают трудности с точным определением их географических координат и площадей. Методы цифровой обработки космических снимков позволяют успешно преодолеть указанные трудности.

В качестве примера опишем методологический подход к решению задачи оценки ущерба от лесных пожаров на основе использова-

ния космических изображений высокого разрешения (35×35 м), полученных со спутника «Метеор-ЗМ».

На первом этапе по координатам зарегистрированных лесных пожаров выбираются фрагменты космических изображений участков местности, на которых предположительно имеются гари от лесных пожаров. Затем производится радиометрическая коррекция выбранных изображений, их трансформирование в географическую проекцию и совмещение с картой масштабом 1:200 000 или 1:500 000.

На втором этапе к изображениям применяется метод классификации ISODATA (кластерный анализ без обучения) для выделения классов, соответствующих разным природным объектам (включая гари).

На третьем этапе проводится идентификация классов методом анализа их спектральных кривых (спектральные кривые, соответствующие гарям, имеют отражение выше, чем мокрые почвы, но ниже, чем самые темные еловые леса), каждому классу, содержащему гари от лесных пожаров, присваивается определенный цвет, по которому визуально достаточно просто определить принадлежность данного участка местности к тому или иному «выгоревшему» классу, т. е. создается «маска».

На четвертом этапе с использованием «маски» определяется площадь гари лесного пожара, для чего «маска» накладывается на топографическую карту в масштабе 1:200 000 или карту лесов (1:500 000) и определяются породы деревьев, подвергшиеся воздействию пожара. Затем, используя вычисленную площадь гари и характеристики лесного покрова по данным топографической карты на участке данной гари до пожара, определяется объем сгоревшей древесины.

Загрязнение вод также фиксируется на космических снимках. На них отражаются выбросы промышленных предприятий, видны пути распространения; инфракрасные снимки показывают температурные изменения в водных объектах около населенных пунктов и промышленных объектов. Однако определенные сложности вызывает анализ качественного и количественного состава загрязнителей. Исследования в этом направлении ведутся путем изучения оптических характеристик природной воды, а также физических процессов, происходящих в системе «вода – атмосфера».

Цвет природных вод зависит от их рассеивающих и поглощающих свойств.

Сине-голубой цвет океанских вод и некоторых олиготрофных озер обусловлен молекулярным рассеянием, на долю которого в чистых водах приходится только 7 – 8 % от общего рассеяния света. В мутных водах эта доля значительно снижается.

На цвет воды внутренних водоемов существенно влияет количество растворенного органического вещества, которое вызывает интенсивное поглощение света в интервале 0,39 – 0,54 мкм, в то время как поглощение излучения в диапазоне спектра $> 0,55$ мкм несущественно. Поэтому с увеличением содержания растворенных органических веществ цвет водной поверхности изменяется от синего через зеленый к коричневому.

В водах внутренних водоемов содержатся также взвешенные минеральные и органические частицы, которые влияют в основном на рассеяние света в водной среде. Влияние их на поглощение двоякое: во-первых, частицы взвеси сами незначительно поглощают свет; во-вторых, за счет рассеяния они увеличивают длину пробега квантов света, что приводит к дополнительному поглощению. Рассеяние света определяется количеством, размерами, формой и ориентацией взвешенных веществ.

Среди типов поверхностных вод можно выделить четыре типа вод, существенно различающихся по оптическим характеристикам.

К первому типу относятся сине-голубые воды олиготрофных водных объектов.

Ко второму типу следует отнести воды дистрофных озер, воды рек, формирующих свой сток в болотных массивах.

Третий тип – воды мезотрофных, эвтрофных и гиперэвтрофных водоемов, подверженные «цветению» и содержащие преимущественно взвешенные вещества органического происхождения.

Четвертый тип включает прибрежные, речные, сточные и другие воды, имеющие высокую мутность с преобладанием взвесей минерального происхождения.

На основе анализа физических процессов коэффициента формирования спектральной яркости и указанной типизации водоемов предложены следующие *правила применения космической информации для оценки состояния вод*:

1. Спектральный диапазон 0,46 – 0,60 мкм следует использовать для определения: высоких значений относительной прозрачности (> 5 м); низких значений концентрации хлорофилла *a* ($< 1,5$ мкг/л) и взвешенных веществ (< 1 мг/л); трофического состояния олиготрофных озер; дистрофных водоемов и речных вод высокой цветности.

2. Интервал 0,6 – 0,7 мкм рекомендуется использовать для оценки: значений относительной прозрачности в интервале 2 – 5 м; концентраций хлорофилла *a* в диапазоне 1,5 – 10 мкг/л и взвешенных веществ в интервале 1 – 10 мг/л; трофического состояния мезотрофных водоемов.

3. Ближнюю ИК-зону спектра в интервале 0,7 – 1,1 мкм следует использовать для определения: значений относительной прозрачности (< 2 м); содержания хлорофилла *a* (> 10 мкг/л); концентрации взвешенных веществ (> 10 мг/л); трофического состояния эвтрофных и гиперэвтрофных водоемов; морфометрических характеристик водных объектов. На регистрируемых снимками характеристиках водоемов в этом диапазоне не сказывается отражение от дна и наличие растворенной органики в любых концентрациях.

4. Космическую фотоинформацию, полученную в спектральном интервале 0,46 – 0,7 мкм, можно использовать для определения типа взвешенных веществ в водоемах (органических или неорганических).

Оценка ущерба от паводков (наводнений). Сбор необходимой информации о сельскохозяйственных культурах, погибших в результате паводков, традиционными наземными методами занимает несколько недель и не отвечает современным требованиям. Использование материалов дистанционного зондирования и методик его цифровой обработки обеспечивает не только оперативность и объективность информации, но и позволяет выделить площади с одинаковым состоянием сельхозкультур и дать количественную оценку состояния культур и затопления.

Методика основана на использовании снимков района затопления до и после паводка. После совместной цифровой обработки этих снимков методами кластерного анализа определяются затопленные и подтопленные территории, на которых погибла растительность. На основе полученных данных рассчитывают площадь затопленных территорий, на которой была растительность в том или ином состоянии, и вегетационный индекс растительности.

4.7. Комплексная оценка почвенно-растительного покрова в бассейне реки

Пример речного бассейна в исследовании – водосбор Клязьмы, расположенный в центре Восточно-Европейской равнины [10 – 12].

Оценка состояния растительности была выполнена по бассейну в целом, а также по восьми ключевым участкам, характеризующим природные районы различных провинций.

I. Клинско-Дмитровская провинция представлена двумя участками, соответствующими природным районам, существенно отличающимся особенностями почвенно-растительного покрова.

Участок 1. Клинско-Дмитровская гряда

Большая часть территории геоморфологически представляет слаборасчлененную моренную равнину и покрыта мелкохолмистыми и холмисто-котловинными конечно-моренными грядами. Преобладают дерново-слабоподзолистые и дерново-среднеподзолистые почвы. Лесистость территории составляет около 30 %. В древостое плакоров заметное участие принимает ель, местами – широколиственные породы. Распаханность – около 45 %.

Участок 2. Владимирское ополие

Основу рельефа создает чередование увалов с очень плавными пологими склонами и крупных ложбин с плоскими днищами. По днищам ложбин могут протекать ручьи и реки. Почвенный покров образован преимущественно сочетанием серых лесных почв по вершинам холмов и в верхней части склонов, темно-серых лесных почв в нижней части склонов. Вершины холмов и склоны преимущественно распаханы или заняты залежами (распаханность – более 60 %), по днищам котловин располагаются луга разной степени увлажнения, вплоть до заболоченных.

II. Мещерская провинция характеризуется однородностью ландшафта и представлена одним ключевым участком.

Участок 3. Мещера

Плоская заболоченная аллювиальная верхнеплейстоценово-голоценовая равнина Среднеклязьминского полесья. На междуречьях преобладают подзолистые и дерново-подзолистые глеевые почвы, на склонах возвышений – торфянисто-подзолистые глеевые, в понижениях – болотные торфяные. Вдоль клязьминских притоков распространены аллювиальные болотные иловато-перегноино-глеевые почвы.

Залесенность территории Среднеклязьминского полесья – около 85 %. Преобладают сосняки (75 – 90 % площади). Лесной покров неравномерно нарушен полевыми и луговыми открытыми пространствами, образованными вокруг селений, тяготеющих к берегам Клязьмы.

III. Волжско-Клязьминская провинция характеризуется двумя участками.

Участок 4. Нерлинско-Клязьминская низина

Это слаборасчлененная плоская и пологоволнистая, моренная водно-ледниковая равнина московского оледенения. Среди почвообразующих пород доминируют верхнеплейстоценовые аллювиальные грунты. Почвы на повышенных междуречьях дерново-подзолистые суглинистые и супесчаные, в низинах – торфяные, в пределах речных террас и пойм – аллювиальные песчано-глинистые.

Лесной покров сохранился неравномерно, занимает на разных участках от 35 до 95 % территории. Сельскохозяйственная освоенность низкая.

Участок 5. Нижне-Лухский участок

Представляет наиболее заболоченную территорию в нижнем течении реки Лух, где площадь болот увеличивается. В условиях аккумуляции и застойного режима поверхностных вод сформировались торфяно-глеевые почвы, с фрагментами песчаных дерново-подзолистых почв, маркирующие древние дельты стока ледниковых вод. Произрастают вечнозеленые хвойные леса с преобладанием елово-сосновых пород, злаково-разнотравные фитоценозы на заливных лугах.

IV. Окско-Цнинская провинция очень разнообразна в ландшафтном отношении и представлена тремя участками.

Участок 6. Окско-Цнинский вал

Это высокая днепровская моренно-водноледниковая пологоволнистая водораздельная лесная равнина. Отличается широким развитием карста, глубоким залеганием уровня грунтовых вод и крайней неразвитостью гидросети. Антропогенная освоенность ландшафтного округа невысокая. Почвенный покров представлен дерново-слабоподзолистыми и дерново-среднеподзолистыми почвами. Единый лесной покров (сосновые и березово-сосновые лишайниково-сухоразнотравные леса) обычно нарушен лишь редкими участками открытых сельскохозяйственных земель, окружающими селения.

Участок 7. Коврово-Касимовское плато

Это пологоувалистая хорошо дренированная днепровская моренно-водноледниковая равнина. Развита карстовые явления. В почвенном покрове представлены дерново-сильноподзолистые, дерново-подзолистые слабogleевые, дерново-подзолистые глеевые почвы. Поверхность покрыта лесами (около 70 %, местами менее 30 %). Преобладают леса бореального типа: сосняки, сосняки с елью, реже чистые ельники. Отличается значительным распространением открытых пространств, образованных сельскохозяйственными угодьями. В настоящее время значительная часть этих земель заброшена и превратилась в залежи.

Участок 8. Гороховецкий отрог

Это интенсивно эрозионно-расчлененная пологоволнистая днепровская моренно-водноледниковая равнина. В почвенном покрове ландшафтного района на высоких междуречьях развиты дерново-сильноподзолистые и дерново-подзолистые смытые почвы, на склонах – дерново-подзолистые смытые, в подножьях склонов, днищах балок и оврагов – смытые и намытые почвы. Леса занимают около 35 % площади и приурочены к крутым склонам и оврагам. Выположенные поверхности водоразделов, небольшие по площади, практически все распахананы.

На рис. 4.22 и 4.23 представлено расположение ключевых участков и их изображение на космических снимках.

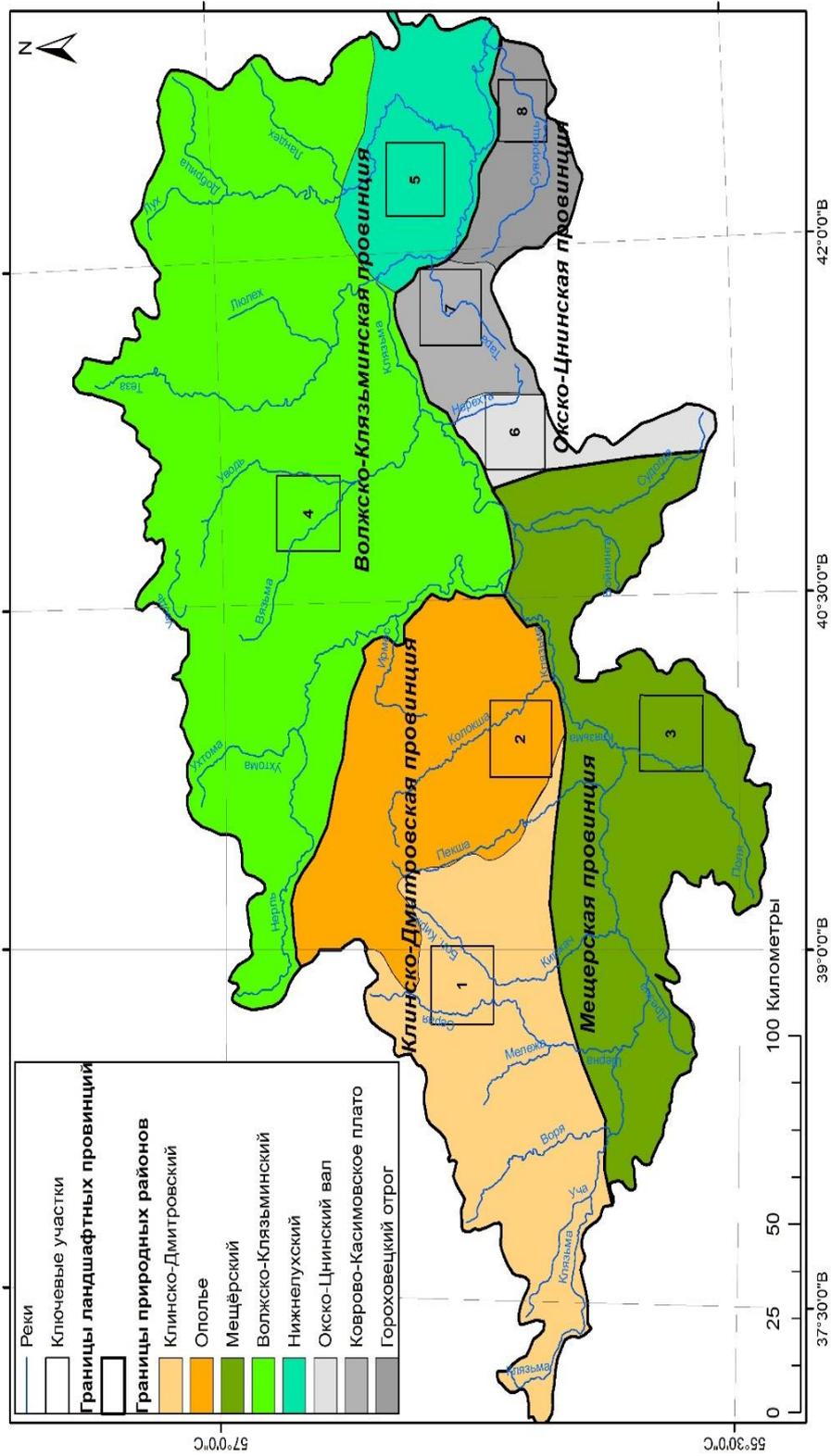


Рис. 4.22. Ландшафты бассейна реки Клязьма и ключевые участки



Клинско-Дмитровская гряда



Владимирское ополье



Мещера



Нерлинско-Клязьминская низина



Нижне-Лухский участок



Окско-Цнинский вал



Коврово-Касимовское плато



Гороховецкий отрог

Рис. 4.23. Космические изображения ключевых участков (Sentinel-II, август, 2018 г.)

Работа была выполнена с применением геоинформационного анализа данных дистанционного зондирования и картографической информации о почвенно-растительном покрове на основе бассейнового подхода.

Типы земельных угодий определены на основе HDF растров за четыре даты (2001, 2005, 2009, 2017 годы) по открытым данным аппаратуры MODIS. Для более детального анализа использовалась система деградации земель «Trend.Earth» (модуль «Наземный покров», European Space Agency 2015, пространственное разрешение данных 300 м), реализованная с помощью свободной ГИС с открытым кодом – Quantum GIS 2.18.

Расчет показателей продуктивности в углеродных единицах основан на данных MODIS GPP/NPP. Полученный набор растровых сцен формата HDF обрабатывался инструментами переклассификации и зональной статистики ГИС пакета ArcGis. В ходе расчета баланса углерода получали следующие показатели (с 2000 по 2015 год):

- валовая первичная продукция (gross primary production), г С/м² (GPP);
- чистая первичная продукция (net primary production), г С/м²(NPP);
- общие затраты на дыхание автотрофов, г С/м² (RE).

Динамика землепользования бассейна реки Клязьмы по данным дистанционного зондирования

Территория речного бассейна Клязьмы, согласно классификации Международной Геосферно-биосферной программы, включает *10 классов земного покрова*. По состоянию на 2017 год, большая часть бассейна (почти 60 %) покрыта смешанными лесами; травянисто-кустарниковой растительностью и редколесьем занято около 20 %, пахотными угодьями – 14 % территории.

При совместном количественном и графическом анализе данных о структуре землепользования за период с 2001 по 2017 год на территории бассейна установлены следующие *изменения площади групп земель* (рис. 4.24):

1. Выявлено увеличение площади смешанных лесов, формирующих основной растительный покров бассейна (прирост – около 9,0 %).

2. Зафиксировано снижение кустарничковой растительности (на 2,3 %) и редколесий (на 2,2 %), прежде всего, в результате сукцессии и последующего их перехода в класс «лес».

3. Подтверждено сокращение площади естественных лугов (на 2,1 %), пахотных и пастбищных угодий (более 1 %), а также широколиственных лесов (0,1 %).

4. Наблюдается рост площади антропогенных, в частности урбанизированных, территорий (1 %), а также водных поверхностей и болот.

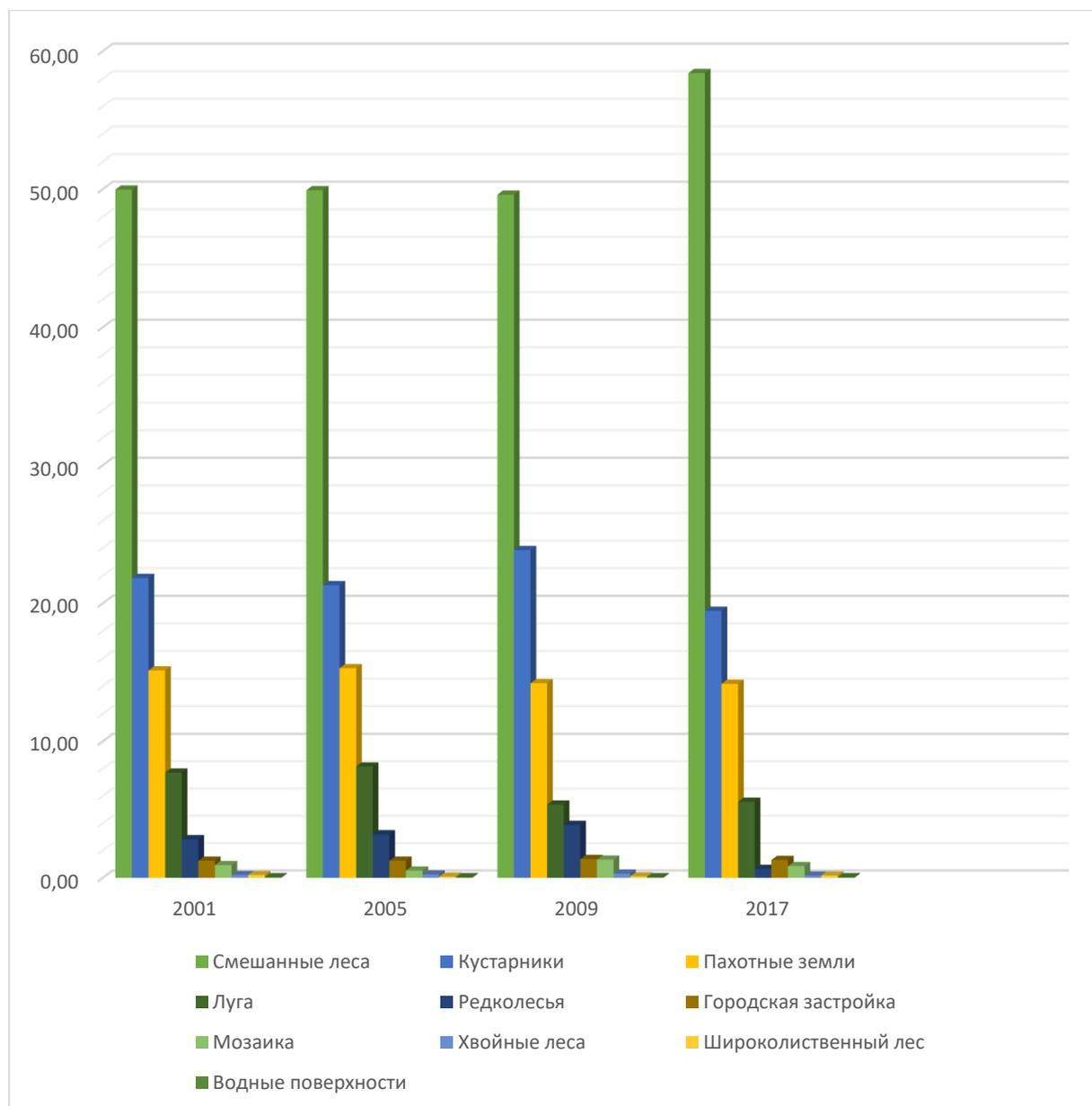


Рис. 4.24. Динамика землепользования в бассейне р. Клязьмы по материалам MODIS, %

Динамика землепользования в различных ландшафтах бассейна реки Клязьмы (по ключевым участкам)

Бассейн Клязьмы имеет сложную ландшафтную структуру и для детального анализа основных тенденций изменения площадей земельных угодий в различных его частях использовались дистанционные данные более высокого пространственного разрешения (система Trend. Earth, пространственное разрешение – 300 м, 6 типов земельных угодий).

Установлено, что тенденция к увеличению площади лесной растительности и сокращению пахотных угодий и пастбищ – общая для большей части бассейна. Исключение составляет междуречье р. Лух, где отмечается уменьшение лесных земель и переход их в заболоченные территории. Выбранные ключевые участки отражают особенности изменения структуры землепользования основных ландшафтных структур.

Наиболее устойчива структура земельных угодий в Мещерской провинции – здесь почти 90 % территории занято лесами и их площади изменились незначительно.

Динамика зарастания пахотных угодий, расположенных на серых лесных почвах и дерново-слабоподзолистых и дерново-среднеподзолистых почвах, различается. Например, в Клинско-Дмитровской провинции встречаются оба типа почв. Самое активное зарастание лесной растительностью пастбищ и пахотных угодий происходит в Клинско-Дмитровской провинции на территории распространения дерново-слабоподзолистых и среднеподзолистых почв, что отражает первый ключевой участок (Клинско-Дмитровская гряда). Показатель динамики зарастания пашни (–3,5%) здесь самый высокий в бассейне Клязьмы. Серые лесные почвы, представленные в Клинско-Дмитровской провинции на участке Владимирского ополья, наиболее плодородны и сельскохозяйственно освоены, зарастают существенно меньше. Во Владимирском ополье самая большая площадь распаханых земель в бассейне Клязьмы и они продолжают активно использоваться в сельскохозяйственном производстве.

Показатели продуктивности растительного покрова бассейна реки Клязьмы

Для характеристики продуктивности растительного покрова анализируемой территории определены значения валовой (GPP), чистой (NPP) фитопродукции, а также затраты на дыхание автотрофов (RE) в г С/м² по данным MODIS за 2000 – 2015 годы для *пика вегетационного сезона – середины июля*.

В среднем за исследуемый период для всей территории бассейна Клязьмы валовая первичная продукция в пик вегетационного сезона составила 59,1 г С/м², а чистая первичная продукция – 39,5 г С/м².

Валовая первичная продукция распределяется по территории бассейна неравномерно. Плодородные серые лесные почвы (Владимирское ополье) не дают высокой валовой продуктивности, которая в этой зоне даже немного ниже средних значений, что можно объяснить преобладанием здесь агроценозов. Наиболее продуктивными в бассейне являются природные районы Окско-Цнинской провинции. Территория расположенного здесь Гороховецкого отрога характеризуется самыми высокими значениями валовой продуктивности, она выше среднего по речному бассейну Клязьмы. На этом участке, по сравнению с другими, больше травянисто-кустарниковой растительности, которая более продуктивна, чем лесная. Остальные ландшафты по фитопродуктивности соответствуют средним значениям, характеризующим бассейн.

Показатели продуктивности значительно различаются по годам как в целом по бассейну, так и по ключевым участкам, характеризующим ландшафтное разнообразие; коэффициент вариации, характеризующий выборку, имеет высокое значение (рис. 4.25, таблица).

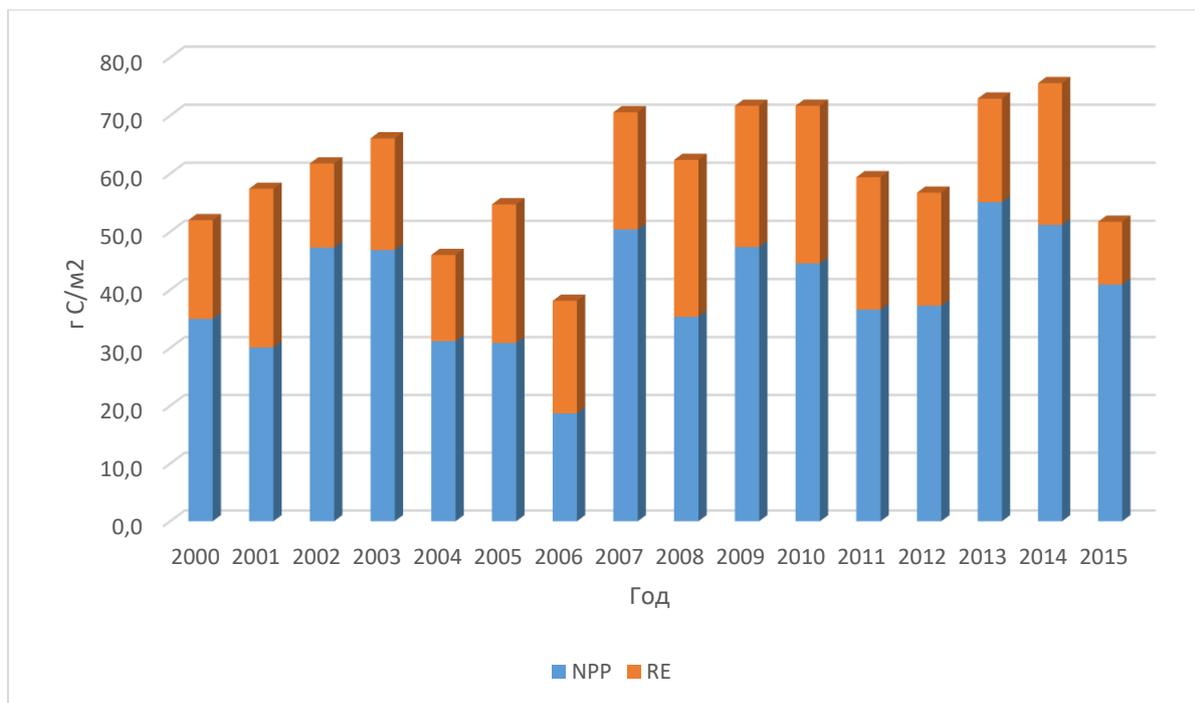


Рис. 4.25. Многолетняя динамика показателей продуктивности бассейна р. Клязьмы: синяя часть столбца – чистая первичная продуктивность (NPP); красная – затраты на дыхание (RE); целый столбец – валовая первичная продуктивность (GPP)

Статистические показатели распределения продуктивности

Ландшафтная провинция	Участок	Показатели	Продуктивность, г С/м ²		
			GPP	NPP	RE
Клинско-Дмитровская	Клинско-Дмитровская гряда	$\bar{x} \pm \sigma$	56,5 ± 13,2	38,4 ± 10,1	18,0 ± 6,0
		V, %	23,3	26,3	33,1
		r	0,92	0,93	0,94
	Владимирское ополье	$\bar{x} \pm \sigma$	58,4 ± 11,4	38,9 ± 10,5	20,0 ± 6,0
		V, %	19,5	24,3	28,5
		r	0,97	0,98	0,92
Мещерская	Мещёра	$\bar{x} \pm \sigma$	59,6 ± 11,0	40,2 ± 9,2	19,0 ± 5,0
		V, %	18,5	22,8	26,2
		r	0,94	0,97	0,91

Ландшафтная провинция	Участок	Показатели	Продуктивность, г С/м ²		
			GPP	NPP	RE
Волжско-Клязьминская	Нерлинско-Клязьминская низина	$\bar{x} \pm \sigma$	59,9 ± 13,3	40,5 ± 10,0	19,0 ± 6,0
		V, %	22,2	24,7	31,8
		r	0,93	0,96	0,91
	Нижне-Лухский	$\bar{x} \pm \sigma$	50,9 ± 11,0	37,5 ± 9,0	13,4 ± 4,2
		V, %	21,7	24,1	31,3
		r	0,86	0,86	0,81
Окско-Цнинская	Окско-Цнинский вал	$\bar{x} \pm \sigma$	61,7 ± 10,6	41,2 ± 9,1	20,0 ± 5,0
		V, %	17,2	22	26,2
		r	0,96	0,98	0,90
	Коврово-Касимовское плато	$\bar{x} \pm \sigma$	61,7 ± 12,3	41,4 ± 9,8	20,0 ± 6,0
		V, %	19,9	23,7	28,1
		r	0,92	0,94	0,91
	Гороховецкий отрог	$\bar{x} \pm \sigma$	63,1 ± 11,8	41,1 ± 10,2	22,0 ± 6,0
		V, %	18,7	24,7	25,6
		r	0,90	0,91	0,93
Бассейн р. Клязьмы	$\bar{x} \pm \sigma$	59,1 ± 10,9	39,5 ± 9,0	19,6 ± 5,5	
	V, %	18,5	22,7	27,9	
	r	1,00	1,00	1,00	

Примечание: \bar{x} – среднее арифметическое; σ – стандартное отклонение; V, % – коэффициент вариации; r – коэффициент корреляции.

Анализ динамики показателей продуктивности экосистемы речного бассейна реки Клязьмы

За период с 2000 по 2015 год в экосистеме бассейна реки Клязьмы наблюдаются колебания величин GPP, NPP и MP по годам как в большую, так и в меньшую сторону по сравнению со средними значениями. Устойчивых тенденций к росту или падению продуктивности не отмечено. Гистограммы распределения величин демонстрируют

периоды роста, уменьшения и стабильного состояния продуктивности, которые связаны в основном с погодной обстановкой.

Стабильное состояние GPP и NPP наблюдалось с 2007 по 2010 год, когда валовая продуктивность находилась в интервале 70 – 71 г С/м², а чистая в среднем составляла 44 г С/м². Несмотря на жаркое и засушливое лето 2010 года, когда средняя температура июля достигала +24,8 °С, сумма осадков за июнь – июль составила 54 мм, а количество дней с осадками – лишь 22, влажность воздуха не превышала 60 %. Рассматриваемые показатели оставались на относительно высоком уровне (GPP – 71 г С/м² и NPP – 51 г С/м²). Наблюдались высокие затраты на автотрофное дыхание (RE – 27 г С/м²), что, возможно, вызвано неблагоприятными погодными условиями и масштабными летними пожарами.

Максимумы валовой и чистой первичной биологической продуктивности характерны для влажного лета 2014 года и составляли 75 и 51 г С/м² соответственно. При этом средняя температура июля была +19,3 °С, сумма осадков за июнь – июль 156 мм, 30 дней с осадками, относительная влажность воздуха не превышала 66 %.

Наихудшим периодом, характеризующим состояние почвенно-растительного покрова, когда валовая продуктивность понизилась до 38 г С/м², а чистая составляла 18 г С/м², можно считать 2006 год, когда средняя температура в июле была ниже нормальной и составляла +16,6 °С, сумма осадков в июне – июле также была невысокой – 77 мм. Также негативное влияние на продуктивность могло оказать относительно небольшое количество осадков в мае – июне (62 мм), что, по-видимому, способствовало снижению уровня грунтовых вод к июлю и формированию условий частичного водного дефицита.

В ходе исследования были сопоставлены особенности динамики фитопродуктивности целого бассейна и отдельных ландшафтных структур, представленных ключевыми участками (рис. 4.26).

Периоды повышения и снижения продуктивности в различных ландшафтах в основном совпадают, однако «размах» этих изменений различен.

Самые большие изменения показателей продуктивности по годам наблюдаются в природном районе Клинско-Дмитровской гряды, что подтверждается максимальными коэффициентами вариации для GPP (23,3 %), NPP (26,3 %) и MP (33,1 %) (см. таблицу). Самые небольшие изменения параметров продуктивности зафиксированы на территории Окско-Цнинского вала, – здесь они ниже средних по бассейну.

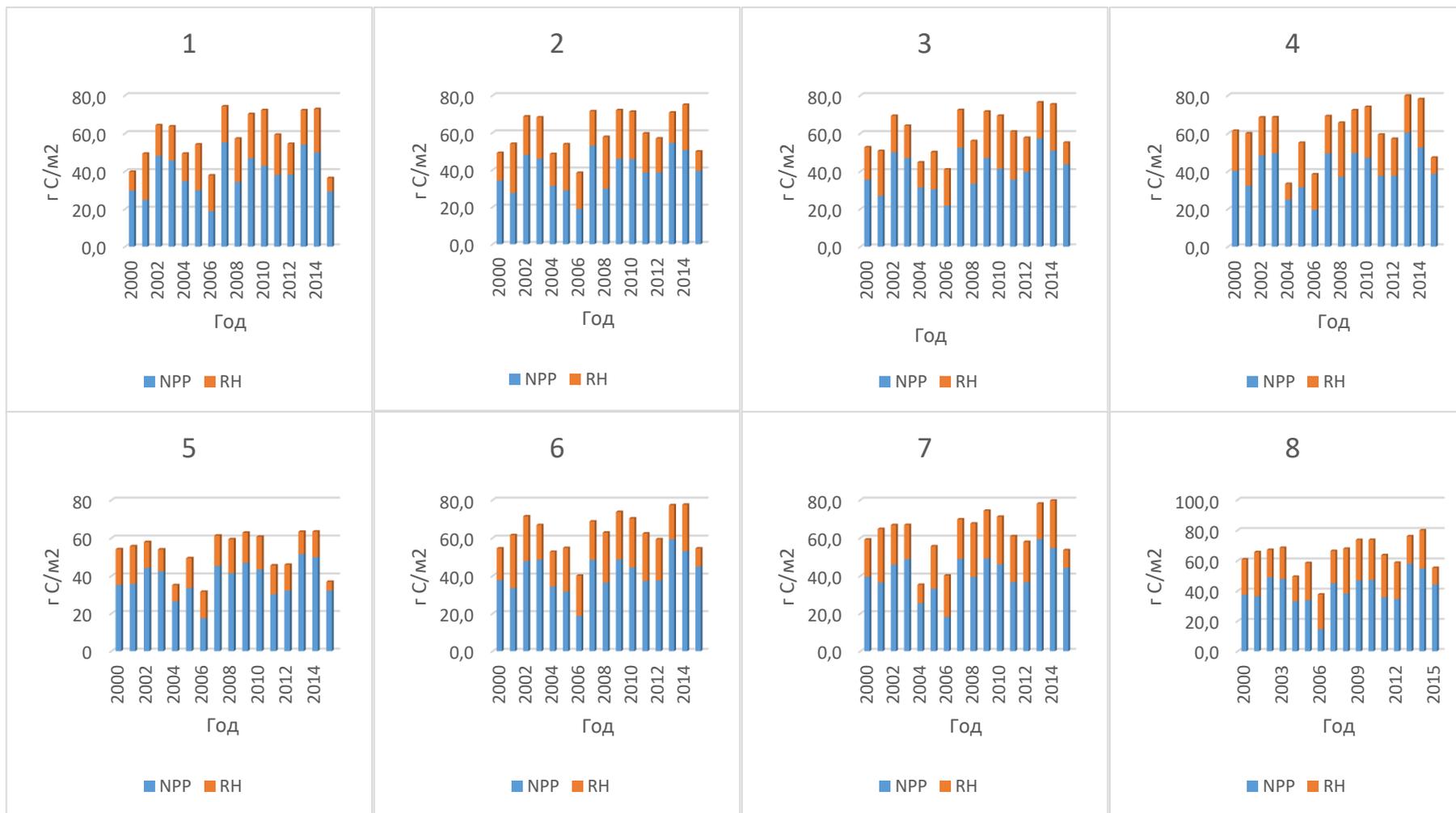


Рис. 4.26. Графическое распределение валовой, чистой продуктивности и затрат на дыхание в динамике за 15 лет в ландшафтах бассейна Клязьмы: Клиско-Дмитровская гряда (1), Владимирское ополье (2), Мещера (3), Нерлинско-Клязьминская низина (4), Нижне-Лухский участок (5), Окско-Цнинский вал (6), Коврово-Касимовское плато (7), Гороховецкий отрог (8)

Вопросы к главе 4

1. Какие космические эксперименты проводятся на борту Международной космической станции?
2. Какие свойства почв можно изучить, используя космические снимки?
3. Как оценить состояние лесной растительности с использованием спектральных профилей?
4. Как проводится мониторинг эвтрофикации водоемов по ДДЗ?
5. Какие возможности дают космические снимки в мониторинге пожароопасной ситуации?

Библиографические ссылки

1. Международная космическая станция [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/202/> (дата обращения: 13.04.2023).
2. Роскосмос [сайт]. URL: <https://www.roscosmos.ru> (дата обращения: 14.04.2023).
3. Программа запуска малых космических аппаратов «Универсат» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/23836> (дата обращения: 14.04.2023).
4. *Стурман В. И.* Экологическое картографирование. М. : Аспект Пресс, 2003. 251 с.
5. Роскосмос впервые провел космический мониторинг цветения водохранилищ на Волге [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/39000/> (дата обращения: 13.05.2023).
6. Эвтрофикация волжских водохранилищ [Электронный ресурс]. URL: <https://geonovosti.terratech.ru/nature/evtrofikatsiya-vodokhranilishch-volgi/> (дата обращения: 13.05.2023).
7. Код красный: распространение токсичных микроводорослей в Приморье [Электронный ресурс]. URL: <https://geonovosti.terratech.ru/nature/tsvetenie-vodoemov/> (дата обращения: 13.05.2023).
8. *Щербенко Е. В., Дорошенко С. Г.* Мониторинг задымленности территории по данным космических съемок // Экология речных бассейнов : материалы междунар. науч.-практ. конф. Владимир, 2002. С. 161 – 164.
9. *Friedl M., Sulla-Menashe D.* MCD12C1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05Deg CMG V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12C1.006>.

10. Trends. Earth. Conservation International. Available online at: <http://trends.earth>. 2018.

11. *Trifonova T., Mishchenko N., Shutov P.* Organic matter temporal dynamics in the river ecosystem basin using remote sensing. *One Ecosystem* 6: e61357. <https://doi.org/10.3897/oneeco.6.e61357>

12. *Трифонова Т. А., Мищенко Н. В., Шутов П. С., Быкова Е. П.* Оценка динамики продукционных процессов в ландшафтах подзоны южной тайги Восточно-Европейской равнины с использованием данных дистанционного зондирования // *Вестник Московского университета. Сер. 17: Почвоведение*. 2021. № 1. С. 14 – 22.

Глава 5. МЕТОДИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Обработка и анализ ДДЗ включают следующие этапы [1]:

1. Отображение – представление данных, полученных непосредственно из источника, в удобном для пользователя виде. Это неотъемлемая часть обработки пространственной информации с применением разнообразных ГИС. В зависимости от источника получения данные дистанционного зондирования поступают сразу в цифровом формате или переводятся в данный формат для дальнейшей автоматизированной обработки. Но независимо от источников все цифровые данные дистанционного зондирования представляют собой растровые изображения.

2. Улучшение – изменение параметров изображения с целью повышения четкости, уменьшения влияния помех. Улучшение изображения облегчает дальнейший визуальный анализ и автоматизированную обработку материала. Оно достигается различными путями, например, изменением яркости, контрастности, фильтрацией помех, улучшением цветового баланса. В процессе улучшения изображения происходят изменения в исходных данных, которые сводятся к коррекции спектральных характеристик пикселей, составляющих изображение.

3. Геометрическое трансформирование – приведение изображения к заданному масштабу и картографической проекции с устранением смещений из-за наклона оси съемки, рельефа местности, кривизны поверхности Земли и геометрических искажений.

4. Географическая привязка – идентификация участка земной поверхности, отображенного на изображении, и присвоение каждой точке изображения координат в соответствии с координатами данных точек на местности.

5. Классификация – распознавание на изображении участков, соответствующих различным категориям объектов, и построение на этой основе нового (тематического) изображения, на котором объек-

ты, принадлежащие к одной категории, отображаются одинаково (одним цветом).

Качество классификации зависит от исходных данных. Лучшие результаты получаются при использовании многозональных данных с высоким разрешением. Перед началом классификации программное обеспечение должно быть «обучено» распознавать различные категории объектов на изображении.

Классификация растровых объектов применяется при составлении ландшафтных карт, карт структуры землепользования, лесной таксации, а также в экологическом мониторинге и при корректировке топографических карт.

6. ГИС-анализ – анализ взаимного пространственного положения различных объектов на изображении и атрибутивной (описательной) информации о них, производимый с целью решения разнообразных прикладных задач, связанных с управлением природными ресурсами, экологическим мониторингом, планированием землепользования и др.

Основные этапы ГИС-анализа:

- поиски и идентификация объектов;
- измерение пространственных характеристик объектов;
- анализ пространственной и атрибутивной информации;
- выполнение различных действий над объектами (создание, выделение, перемещение, слияние).

В зависимости от сложности решаемых задач ГИС-анализ осуществляется на двух уровнях: простом и комплексном.

Простой ГИС-анализ предполагает проведение простых одношаговых преобразований данных (в основном из одного файла), в результате которых выполняется какое-либо одно действие из описанных выше.

Комплексный ГИС-анализ включает выполнение сложного многошагового анализа данных с использованием нескольких источников информации, сложных преобразований и алгоритмов. Такой анализ возможен на основе построения графических моделей (алгоритмов) с помощью специального инструмента, предоставляемого Erdas Imagine. При моделировании могут быть использованы растровые,

векторные данные, а также их комбинации. Созданные модели обычно используются многократно.

Прикладной ГИС-анализ – одно из наиболее динамично развивающихся направлений ГИС и дистанционного зондирования. Круг решаемых с его использованием задач постоянно расширяется, а методы и алгоритмы совершенствуются.

7. Подготовка отчета – создание качественных отчетных информационных материалов, содержащих результаты обработки и анализа данных и сопровождающихся необходимыми иллюстрациями, пояснениями и т. д. Подготовка отчета обычно завершает обработку и анализ данных.

При создании отчета обрабатываемые материалы дистанционного зондирования приобретают окончательный вид, в котором они выводятся на печать или используются в электронном виде. Данный процесс включает несколько этапов:

- предварительная компоновка композиции;
- подготовка всех необходимых изображений;
- задание размеров формата вывода;
- создание и размещение областей вывода изображения;
- добавление и размещение таких объектов, как легенды, координатные сетки, метки, масштабные линейки, заголовки, подписи, стрелки, указывающие направление на север.

Для решения задач, стоящих на каждом из перечисленных этапов обработки данных, в настоящее время разработано большое количество методов и алгоритмов, которые реализованы в Erdas Imagine. Таким образом, Erdas Imagine – это полнофункциональный пакет программ обработки растровой графики, завершенная геоинформационная система, использующая удобный графический интерфейс.

Практическая работа № 1

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

Задание

Изучите информативность изображений, полученных в различных диапазонах электромагнитного спектра (каналов), используя многозональный снимок. Выполните различные комбинации каналов многозональных космических снимков и опишите полученные результаты. Охарактеризуйте использование различных комбинаций каналов.

Ход работы

1. Откройте каналы космоснимка в ArcGIS. Каналы для спутников Landsat 7, 8 представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Каналы спутников Landsat

Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1 - Blue	0.45-0.52	30
	Band 2 - Green	0.52-0.60	30
	Band 3 - Red	0.63-0.69	30
	Band 4 - Near Infrared (NIR)	0.77-0.90	30
	Band 5 - Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.55-1.75	30
	Band 6 - Thermal	10.40-12.50	60 * (30)
	Band 7 - Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.09-2.35	30
	Band 8 - Panchromatic	.52-.90	15

* ETM+ Band 6 is acquired at 60-meter resolution, but products are resampled to 30-meter pixels.

	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Launched February 11, 2013	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

2. Опишите отображение объектов в отдельных каналах. Результаты представьте в виде таблицы.

*Отображение объектов в различных каналах и их композитах
(космоснимок Landsat __)*

Спутник	Длина волны	Описание отображения объектов
Каналы: №		
1		
2		
.....		
<i>Описание различных комбинаций каналов</i>		
Комбинация каналов	Описание отображения объектов и информации	

3. Создайте композит каналов в естественных цветах и опишите отображение объектов. **Объединение каналов можно выполнить по следующему алгоритму:** Composite Band (Объединение каналов) для решения подобных задач. Его можно найти в ArcToolbox в наборе Data Management Tools (Управление данными) > Raster (Растр) – Обработка раstra – (Объединить каналы). Сохранять можно в базу геоданных.

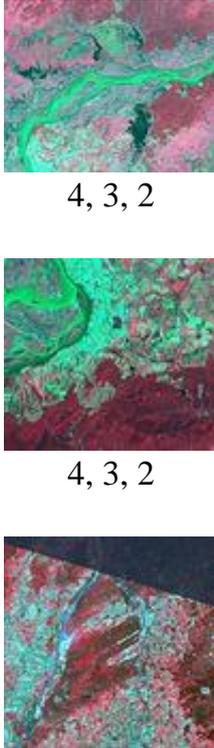
Полученные данные занесите в таблицу.

4. Создайте различные композиты каналов и опишите отображение объектов в них. Примеры комбинаций каналов приведены в табл. 5.2.

Продолжите заполнять таблицу результатов.

Таблица 5.2

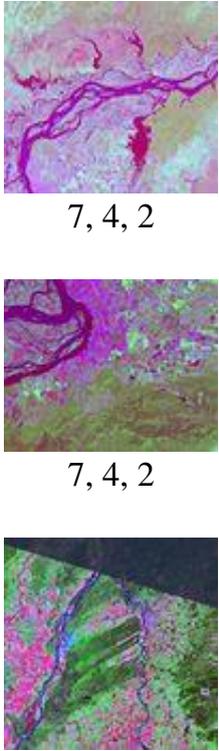
Примеры комбинаций каналов [2]

Комбинация Landsat-5, 7	Комбинация Landsat-8	Возможная информация	Примеры комбинаций каналов
4, 3, 2	5, 4, 3	<p>Стандартная комбинация «искусственные цвета». Растительность отображается в оттенках красного, городская застройка – зелено-голубых тонах, а цвет почвы варьируется от темно- до светло-коричневого. Лед, снег и облака выглядят белыми или светло-голубыми (лед и облака по краям). Хвойные леса будут выглядеть более темно-красными или даже коричневыми по сравнению с лиственными. Эта комбинация очень популярна и используется главным образом для изучения состояния растительного покрова, мониторинга дренажа и почвенной мозаики, а также для изучения агрокультур. В целом насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) широколиственной растительности, в то время как более светлые оттенки характеризуют травянистую или редколесья/кустарниковую растительность.</p>	 <p>4, 3, 2</p> <p>4, 3, 2</p> <p>4, 3, 2</p>

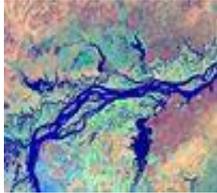
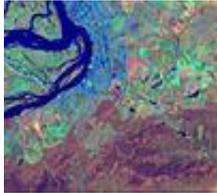
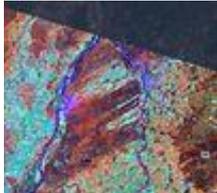
Продолжение табл. 5.2

Комбинация Landsat-5, 7	Комбинация Landsat-8	Возможная информация	Примеры комбинаций каналов
3, 2, 1	4, 3, 2	<p>Комбинация «естественные цвета». В этой комбинации используются каналы видимого диапазона, поэтому объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зеленой, убранные поля – светлыми, нездоровая растительность – коричневой и желтой, дороги – серыми, береговые линии – белесыми. Эта комбинация каналов дает возможность анализировать состояние водных объектов и процессы седиментации, оценивать глубины. Также используется для изучения антропогенных объектов. Вырубки и разреженная растительность детектируются плохо, в отличие от комбинации 4, 5, 1 или 4, 3, 2. Облака и снег выглядят одинаково белыми и трудноразличимы. Кроме того, трудно отделить один тип растительности от другого. Эта комбинация не позволяет отличить мелководье от почв (в отличие от комбинации 7, 5, 3).</p>	 <p>3, 2, 1</p> <p>3, 2, 1</p> <p>3, 2, 1</p>

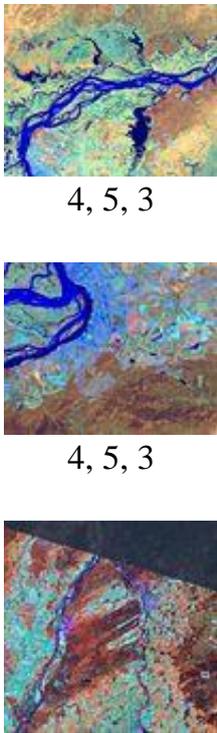
Продолжение табл. 5.2

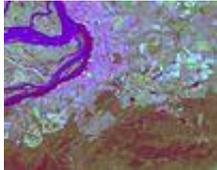
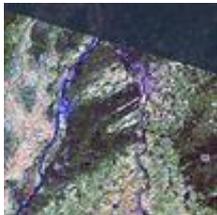
Комбинация Landsat-5, 7	Комбинация Landsat-8	Возможная информация	Примеры комбинаций каналов
7, 4, 2	7, 5, 3	<p>Эта комбинация дает изображение, близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать состояние атмосферы и дым. Здоровая растительность выглядит ярко-зеленой, травянистые сообщества – зелеными, ярко-розовые участки детектируют открытую почву, коричневые и оранжевые тона характерны для разреженной растительности. Сухостойная растительность выглядит оранжевой, вода – голубой. Песок, почва и минералы могут быть представлены очень большим числом цветов и оттенков. Эта комбинация дает великолепный результат при анализе пустынь и опустыненных территорий. Кроме того, может быть использована для изучения сельскохозяйственных земель и водно-болотных угодий. Сгоревшие территории будут выглядеть ярко-красными. Эта комбинация используется для изучения динамики пожаров и постпожарного анализа территории. Городская застройка отображается в оттенках розово-фиолетового, травянистые сообщества – зелеными и светло-зелеными. Светло-зеленые точки внутри городских территорий могут быть парками, садами. Оливково-зеленый цвет характерен для лесных массивов, более темный цвет является индикатором примеси хвойных пород.</p>	 <p>7, 4, 2</p> <p>7, 4, 2</p> <p>7, 4, 2</p>

Продолжение табл. 5.2

Комбинация Landsat-5, 7	Комбинация Landsat-8	Возможная информация	Примеры комбинаций каналов
4, 5, 1	5, 6, 2	<p>Здоровая растительность отображается в оттенках красного, коричневого, оранжевого и зеленого. Почвы могут выглядеть зелеными или коричневыми, урбанизированные территории – белесыми, серыми и зелено-голубыми, ярко-голубой цвет может детектировать недавно вырубленные территории, а красноватые оттенки – восстановление растительности или разреженную растительность. Чистая, глубокая вода будет выглядеть очень темно-синей (почти черной). Если же это мелководье или в воде содержится большое количество взвесей, то в цвете будут преобладать более светлые синие оттенки. Добавление среднего инфракрасного канала позволяет добиться хорошей различимости возраста растительности. Здоровая растительность дает очень сильное отражение в 4 и 5 каналах. Использование комбинации 3, 2, 1 параллельно с этой комбинацией позволяет различать затопляемые территории и растительность. Комбинация малопригодна для детектирования дорог и шоссе.</p>	 <p>4, 5, 1</p>  <p>4, 5, 1</p>  <p>4, 5, 1</p>

Продолжение табл. 5.2

Комбинация Landsat-5, 7	Комбинация Landsat-8	Возможная информация	Примеры комбинаций каналов
4, 5, 3	5, 6, 4	<p>Эта комбинация ближнего, среднего ИК-каналов и красного видимого канала позволяет четко различить границу между водой и сушей и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона. С большой точностью будут детектироваться водные объекты внутри суши. Эта комбинация отображает растительность в различных оттенках и тонах коричневого, зеленого и оранжевого. Она дает возможность анализа влажности почв и полезна при изучении растительного покрова. В целом, чем выше влажность почвы, тем темнее она будет выглядеть, что обусловлено поглощением водой излучения ИК-диапазона.</p>	 <p>4, 5, 3</p> <p>4, 5, 3</p> <p>4, 5, 3</p>

Комбинация Landsat-5, 7	Комбинация Landsat-8	Возможная информация	Примеры комбинаций каналов
7, 5, 3	7, 6, 4	<p>Эта комбинация дает изображение, близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать состояние атмосферы и дым. Растительность отображается в оттенках темно- и светло-зеленого, урбанизированные территории выглядят белыми, зелено-голубыми и малиновыми; почвы, песок и минералы могут быть очень разных цветов. Практически полное поглощение излучения в среднем ИК-диапазоне водой, снегом и льдом позволяет очень четко выделять береговую линию и подчеркнуть водные объекты на снимке. Одно из возможных применений этой комбинации каналов – мониторинг пожаров. Горячие точки (как, например, кальдеры вулканов и пожары) выглядят красноватыми или желтыми. Затопляемые территории выглядят темно-синими и почти черными, в отличие от комбинации 3, 2, 1, где они выглядят серыми и плохо различимы.</p>	<div style="text-align: center;">  <p>7, 5, 3</p>  <p>7, 5, 3</p>  <p>7, 5, 3</p> </div>

Практическая работа № 2

ВИЗУАЛЬНОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Задание

Выполните дешифрирование многозональных космических снимков в реальных цветах. Опишите прямые и косвенные признаки дешифрирования объектов, присутствующих на снимках.

Ход работы

1. Используя многозональные космические снимки заданной территории, создайте комбинацию каналов в реальных цветах.

2. Опишите признаки визуального дешифрирования объектов, которые можно обнаружить на снимке, пользуясь приведенными ниже характеристиками природно-антропогенных объектов. Представьте результаты в виде таблицы. Сделайте вывод об информативности снимка с точки зрения использования в экологическом мониторинге.

Визуальное дешифрирование космического снимка __ (указать источник, разрешение снимка, дату, территорию, комбинацию каналов)

Объект	Признаки дешифрирования	
	прямые	косвенные

Характеристики природно-антропогенных объектов

Дешифровочные признаки – это свойства объектов или их взаимосвязей, которые позволяют по фотоизображению распознавать сами объекты. Дешифровочные признаки подразделяются на прямые и косвенные.

Прямыми дешифровочными признаками называются те свойства объектов, которые передаются непосредственно и воспринимаются дешифровщиком на снимках. К ним относят форму, размеры, цвет, фототон, тени, структуру изображения.

Форма – устойчивый признак фотоизображения объекта на снимке, передающий его общие очертания в плане, объемность и характер границ. Устойчивость признака сохраняется с изменением масштаба съемки.

Различают геометрически определенную и неопределенную формы. Первая присуща, как правило, всякого рода сооружениям (постройкам, мостам и др.) и может служить надежным дешифровочным признаком. Вторая характерна для многих природных объектов (леса, луга) и часто не может служить определенным дешифровочным признаком.

Различают компактную и линейную (вытянутую) формы, плоскую и объемную. Для дешифрирования имеет значение то, что вытянутую форму можно распознавать на снимках более мелкого масштаба, чем компактную форму. Особенность рисунка вытянутой (изометрической) формы часто является важным дешифровочным признаком (например, по характеру извилистости можно отличить дорогу от реки). Пространственная форма объекта – хороший дешифровочный признак для опознавания как искусственных, так и природных объектов.

Размер – длина, ширина и стереоскопическая высота объекта на фотоизображении. Признак изменяется с изменением масштаба изображения. По этому признаку объект может быть выделен из ряда однородных объектов путем сопоставления их размеров.

Фототон изображения на черно-белых снимках – очень важный прямой дешифровочный признак, хотя он неустойчив. Фототон зависит от многих факторов, в первую очередь от характера поверхности и ее отражательной способности, от совокупности условий фототрафирования и условий обработки материалов.

По снимкам удается различить до 25 градаций фототона. На практике же применяют шкалу из семи ступеней:

- белый фототон;
- почти белый;
- светло-серый;
- серый;
- темно-серый;
- почти черный;
- черный.

Фототон сам по себе не очень надежный признак и обычно используется в сочетании с другими. Объекты местности редко имеют однородный тон. Только гладкие или очень однообразные поверхности (водная, снежная) дают однородный тон. Большой частью на общем фоне однородного тона встречаются более темные или более светлые разводы и другие нарушения однородности. При дешифрировании следует учитывать важную закономерность изменчивости тона. Объекты, изображающиеся крайними звеньями шкалы тоналностей, менее подвержены изменениям, чем изображающиеся средним звеном.

Тень бывает собственной и падающей. Собственной тенью называют тень, покрывающую не освещенную солнцем часть поверхности объекта. Она подчеркивает объемность и характер поверхности предмета (форма крыши здания, извилистость хребта).

Падающие тени отбрасываются объектами местности на подстилающие поверхности и передают их форму. Часто падающие тени служат единственным дешифровочным признаком и достаточно надежны для точного распознавания объектов (отдельно стоящие деревья, трубы).

Цвет объектов отличается большим постоянством, чем тона на черно-белых снимках. Для характеристики цветов нет объективных стандартных критериев.

Структура (рисунок) фотоизображения объектов на снимке представляет собой сложный комплексный признак. Это наиболее устойчивый дешифровочный признак, он в меньшей степени зависит от условий фотосъемки и отражает соотношение площадей и форм объектов, их количества, размеров, фототонов. Наиболее характерные структуры для фотоизображения выделяются по геометрическому принципу.

Примеры структур: зернистая, полосчатая, пятнистая, пятнисто-зернистая, сетчатая. Пятнистая структура представляет собой сочетание пятнышек различного диаметра, зернистый рисунок образуется сочетанием мелких выпуклых пятнышек и характерен для лесной и кустарниковой растительности. Полосчатый рисунок образуется из полос, расположение которых является важным дешифровочным признаком. Равномерное, параллельное расположение полос характерно для пахотных угодий. Извилистые полосы разного тона, не имеющие

четких границ, указывают на наличие склонов. Тонкая, извилистая полосчатость характерна для эоловых образований.

Структура также может быть однородной (бесструктурный рисунок), неопределенной, размытой. Бесструктурное изображение, при котором весь контур изображается одним тоном, характерно для водных и многих антропогенных объектов.

Прямых дешифровочных признаков часто недостаточно для распознавания, так как, во-первых, объекты или их характеристики могут не отобразиться на снимке (например, небольшие мосты, пристани); во-вторых, объекты могут не иметь строгих дешифровочных признаков (например, прямоугольную форму может иметь жилой дом, сарай, гумно). В этом случае наряду с прямыми дешифровочными признаками используются косвенные.

Косвенные признаки (индикаторы) учитывают закономерные взаимосвязи между объектами местности, проявляющиеся в приуроченности одних объектов к другим, а также в изменении свойств одних объектов в результате влияния на них других объектов.

По *приуроченности* одних объектов к другим на снимках распознаются:

- объекты, прямые признаки которых не позволяют распознать объекты, так как они выражены недостаточно четко или в неполной мере. Например, в селах жилые постройки расположены ближе к улице, чем нежилые. Дороги или тропы, подходящие к реке и начинающиеся на другом берегу, позволяют судить о наличии парома или лодочного перевоза, о наличии брода. Скопление судов у берегов говорит о наличии пристани, а по внешнему виду судов можно судить о типе пристани (товарная или пассажирская), глубине реки и т. п.;

- объекты, отобразившиеся на снимке одним и тем же тоном, например, снежники и песок в тундре;

- объекты, закрытые другими объектами. Например, если известно, что в мохово-пушицевых болотах пушица всегда сопровождается мхом, то, распознавая сплошной полог пушицы, закрывающий мох, можно уверенно дешифровать его;

- объекты, которые функционируют во время, не соответствующее моменту съемки (например, пересыхающие летом водоемы дешифрируются по наличию котловинообразных понижений).

По *изменениям в свойствах* одних объектов в результате влияния на них других, недешифрируемых объектов, распознаются:

- объекты, закрытые другими объектами. Например, угнетенные леса на болотах имеют меньшую высоту деревьев, более светлые и мелкие кроны и меньшую их сомкнутость, что позволяет по форме полога леса распознавать заболоченные участки в лесах;

- объекты, отсутствующие на поверхности земли. Они оказывают влияние на свойства закрывающих их объектов, в результате чего прямые признаки последних меняются. Поэтому часто такие объекты могут быть установлены по прямым признакам закрывающих их объектов. Например, подземная осушительная сеть (дрена) изменяет условия влажности почвы, которая изображается более светлым тоном, чем на промежуточных между этими дренами участках (светлый тон позволяет дешифровать дренажную сеть).

Кроме того, косвенным признаком служат следы деятельности или функционирования объекта – различные разработки, карьеры, гидроузлы и другие сооружения, оказывающие антропогенное воздействие.

В каждом конкретном случае косвенные признаки для дешифрирования объектов, когда отсутствуют прямые признаки, используются на основе географической изученности территории с учетом вероятности появления того или иного признака.

Комплексные дешифровочные признаки, отражающие структуру природно-территориальных комплексов, считаются более определенными и устойчивыми, чем прямые признаки их элементов, и составляют основу ландшафтного метода дешифрирования. Тональная структура изображения складывается из следующих компонентов: формы, площади и тона.

Дешифрирование различных природно-антропогенных объектов

Дешифрирование гидрографических объектов. Распознавание водоемов и водотоков, как правило, не вызывает затруднения. В большинстве случаев их береговые линии имеют достаточно четкие очертания, а изображения водной поверхности хорошо отличимы от окружающих участков суши. На тон фотоизображения водных объектов влияют условия съемки, глубина, цвет дна, чистота и прозрачность воды, ее окраска, волнение, наличие водной растительности.

Обычно с увеличением глубины, а также при илистом, или глинистом, или торфянистом грунте дна тон изображения более темный. Мелкие реки и озера с песчаным или каменистым дном имеют преимущественно светлый тон на снимке. Мутная и вспененная вода также придает более светлый тон изображению.

Трудно дешифрировать небольшие реки и ручьи, скрытые под пологом леса и кустарника. Обычно при этом необходим тщательный стереоскопический просмотр снимков. Некоторую помощь могут оказать изменения фототона рисунка крон деревьев.

Пересыхающие гидрографические объекты характеризуются несколькими полосами различного тона, соответствующими ряду уровней высыхания. Нижняя из них – нередко самая темная – отражает наиболее увлажненный участок ложа водоема.

Дешифрирование рельефа. Объектами топографического дешифрирования рельефа являются главным образом формы, имеющие резкие перегибы, обнаженные, незадернованные склоны, а также часть хотя и задернованных, но небольших форм: обрывы, оползни, осыпи, скалы, горные ледники, овраги.

Дешифрирование лесов и кустарников. Леса и кустарники имеют на снимках зернистый рисунок зеленого цвета. Размер зерен зависит от величины крон деревьев, следовательно, зернистость изображения древостоя крупнее, чем у кустарников.

В изображениях на снимках древостоев бросается в глаза неправильная зернистость, создаваемая чередованием округлых пятнышек – проекций крон деревьев и различных по очертаниям промежутков между ними, частично или полностью занятых темными по тону тенями, которые отбрасывают деревья. Цвет фотоизображения, размер крапа, распределение его внутри контура определяются составом, возрастом, бонитетом древостоя. На структуру поверхности влияет и породный состав: ельники имеют более темную окраску, смешанные леса выглядят светлее, сосняки и дубравы имеют пеструю окраску контуров из-за разреженности их древостоев.

Сплошные заросли кустарников характеризуются мелкозернистостью, иногда несколько смазанной структурой фоторисунка. Характерная особенность полукустарниковой растительности – ее разреженность, повсеместно между отдельными растениями видна земля, летом обычно покрытая сетью трещинок.

Пашни на снимках имеют четко очерченные границы в виде четырехугольников, для них характерен параллельный полосчатый рисунок, соответствующий бороздам пахоты. Разновидность пашен – огороды; они отличаются небольшими размерами и приуроченностью к постройкам.

Залежи имеют признаки дешифрирования пашен, но структура фотоизображения менее четкая. Часто они маскируются естественной растительностью.

Дешифрирование лугов. Заливные луга характеризуются бесструктурным или разреженнокрапчатым рисунком и определяются по контакту с линиями рек [3]. Сенокосные заливные луга, кроме вышеперечисленных признаков, имеют изображение следов сенокосения (стога сена в виде выпуклых черточек, рядки скошенных трав – светлые зигзагообразные линии). Суходольные луга дешифрируются по контурам неопределенной формы, бесструктурному рисунку и обычно окружены лесами или пашнями. Сенокосные суходольные луга определяются по признакам сенокосения.

Дешифрирование болот. Болота разных типов выглядят по-разному, но большинству из них присущи неправильная форма в плане и плавные округлые очертания. Зернистая структура указывает на облесенность болот. При отсутствии деревьев рисунок гладкий и плотный, различной тональности, которая зависит от характера растительности.

Дешифрирование населенных пунктов обычно не вызывает затруднений. Здания четко обособляются от других объектов более или менее правильным расположением и своей характерной формой (резкость очертаний, вертикальность стен, тени и др).

Дешифрирование дорог. Железные дороги отличаются прямолинейностью на значительных расстояниях, а повороты их плавны и округлы. Отсутствие крутых поворотов, а также наличие большого числа насыпей и выемок позволяют легко отличать на снимках железные дороги от шоссейных. Естественные грунтовые дороги выделяются в виде тонких, обычно светлых линий различной ширины. В отличие от дорог высших классов они более извилистые, имеют крутые повороты.

Практическая работа № 3

СОЗДАНИЕ КАРТ ЗЕМЕЛЬНЫХ УГОДИЙ ПО КОСМОСНИМКАМ

Задание

Выполните оценку структуры землепользования заданной территории в программной среде ArcGIS.

Ход работы

1. Выберите территорию для дешифрирования космических снимков.
2. Создайте подходящие для целей работы комбинации каналов.
3. Пользуясь результатами выполнения практических работ № 1 и 2, определите находящиеся на территории земельные угодья. Произведите оцифровку имеющихся земельных угодий по космоснимкам [4].
4. Оформите карты земельных угодий.
5. Рассчитайте процентное соотношение площадей угодий на выбранной территории.

Практическая работа № 4

ОЦЕНКА ЗЕМЕЛЬНЫХ УГОДИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Задание

Изучите возможности использования продуктов MODIS для оценки динамики земельных угодий.

Ход работы

1. Изучите продукты MODIS, содержащие данные о структуре землепользования [5], и выберите необходимые для вашей работы, например, MCD12Q1, описание которого представлено по ссылке [6]. Вам понадобится временной ряд снимков (например, 2010 – 2020 годы) на заданную преподавателем территорию.
2. Для скачивания материала воспользуйтесь сервисом Earth Explorer [7] (рис. 5.1), в котором хранятся снимки, полученные с разных спутников для всего мира.

В сервисе можно выбирать критерии для подбора нужного снимка, такие как процент облачности, диапазон времени, спутник, с которого получили снимок, и т. д. Для выбора требуемого снимка нужно выбрать область поиска.

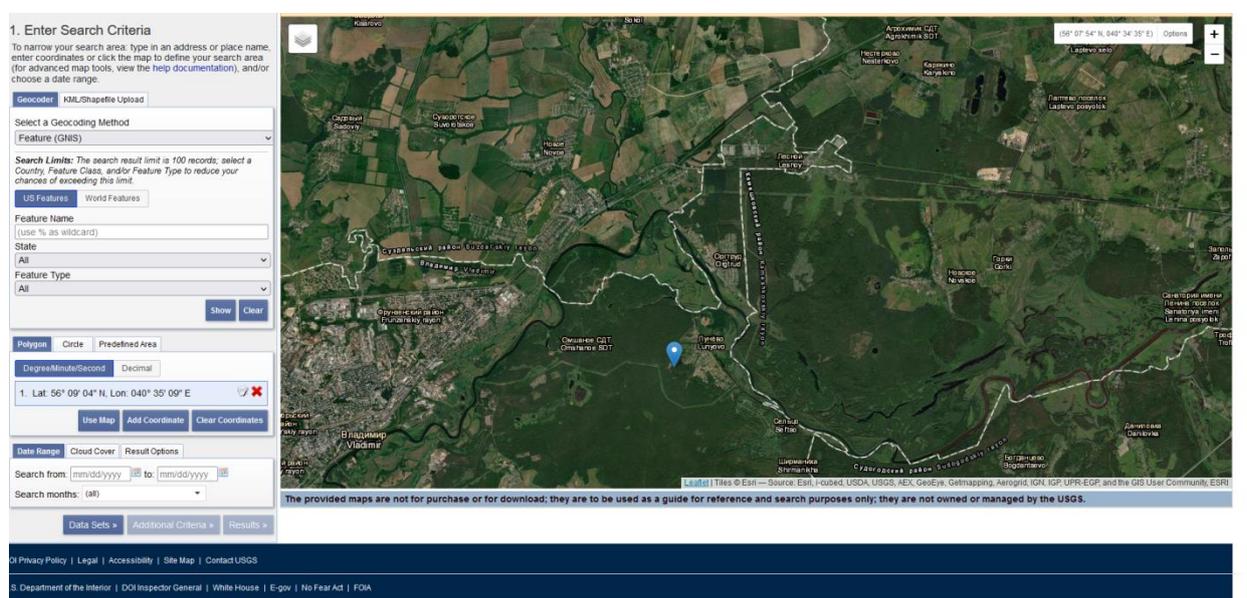


Рис. 5.1. Earth Explorer

3. Произведите расчет структуры землепользования, используя модуль Spatial Analyst ArcGIS, инструмент «Зональная статистика» [8].

4. Постройте графики динамики основных земельных угодий и сделайте выводы об изменении структуры земельных угодий за анализируемый период.

Практическая работа № 5

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОДУКТИВНОСТИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Задание

Изучите возможности использования продуктов MODIS для анализа динамики валовой первичной продукции, чистой первичной продукции и затрат на дыхание автотрофов.

Ход работы

1. Изучите продукты MODIS, содержащие данные о показателях продуктивности [5], и выберите необходимые для вашей работы. Можно использовать 8-дневный композит (MOD17A2H) или годовую продуктивность (MOD17A3HGF). Вам понадобится временной ряд снимков (например, 2010 – 2020 годы) на территорию, для которой проводился анализ динамики землепользования по данным продуктов MODIS.

2. Для скачивания материала воспользуйтесь сервисом Earth Explorer.

3. Используя Spatial Analyst ArcGIS, инструмент «Зональная статистика» [8], рассчитайте валовую первичную продукцию, чистую первичную продукцию, затраты на дыхание автотрофов.

4. Постройте графики показателей продуктивности. Сравните динамику продуктивности с динамикой структуры землепользования.

Практическая работа № 6 АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Задание

Изучите возможности классификации с обучением и без обучения для автоматизированного выделения природных и антропогенных объектов.

Ход работы

1. Для работы используйте снимок с выполненным визуальным дешифрированием объектов (см. практическую работу № 5, задания 2 и 3).

2. Реализуйте различные способы классификации с использованием дополнительного модуля ArcGIS Spatial Analyst, где в группе инструментов «Многомерность» содержатся инструменты как для классификации с обучением, так и для классификации без обучения. Панель инструментов «Классификация изображений» предоставляет среду для создания обучающих выборок и файлов сигнатур, используемых в классификации с обучением (рис. 5.2) [9].

3. Сравните данные, которые были получены в результате визуального анализа и различных способов автоматизированной классификации. Сделайте соответствующие выводы по проделанной работе.

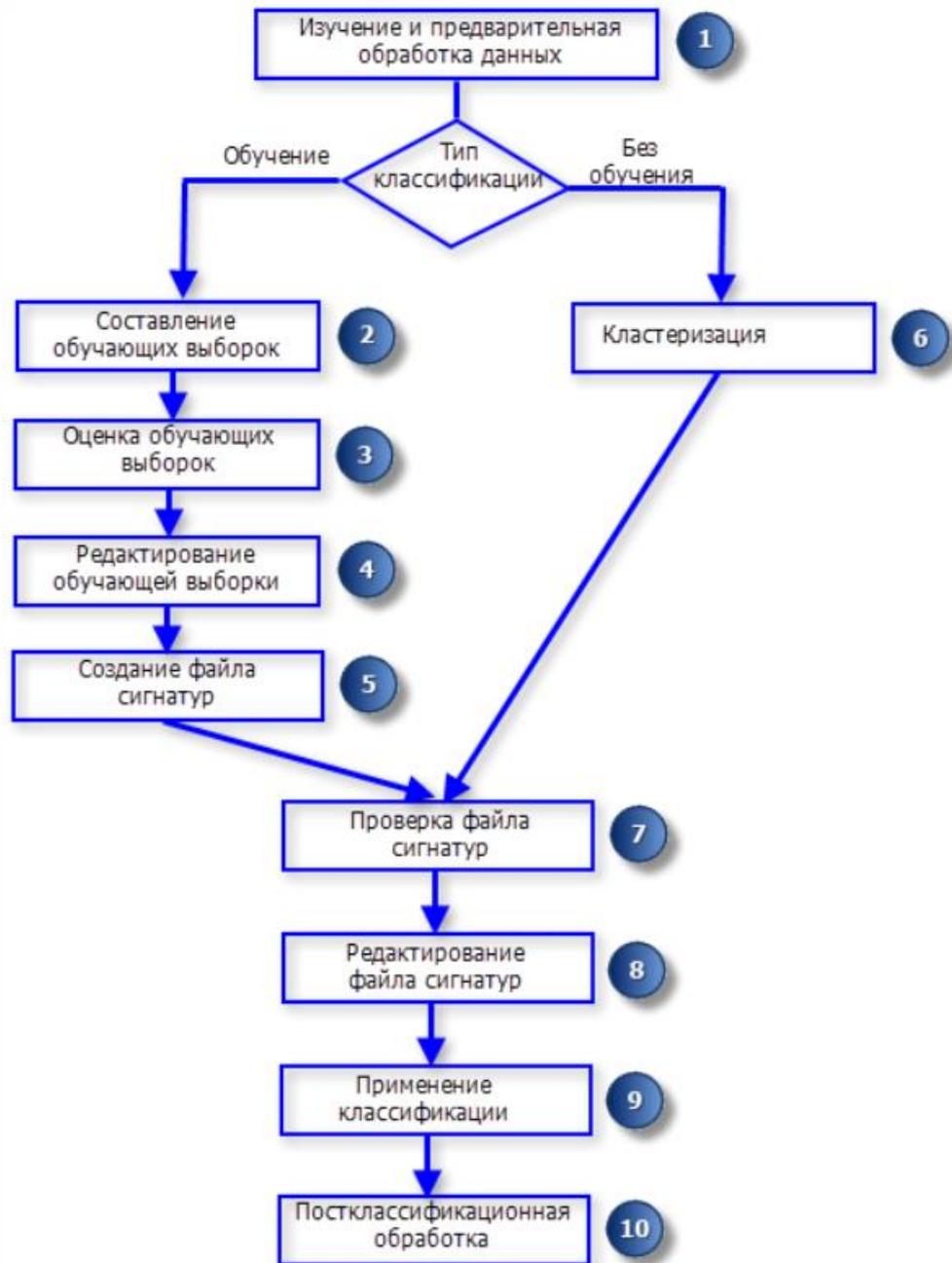


Рис. 5.2. Схема классификации изображения [9]

Практическая работа № 7

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫХ УГОДИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ NDVI

Для расчета и анализа NDVI можно использовать любые многозональные снимки с необходимым для решения задач разрешением, где имеются красный (0,55 – 0,75 мкм) и ближний инфракрасный каналы (0,75 – 1,0 мкм). Инструмент расчета NDVI имеется в большинстве геоинформационных систем, обеспечивающих обработку ДДЗ.

В табл. 5.3 приведены комбинации каналов для съемочной аппаратуры, расположенной на разных спутниках, которые можно использовать для расчета вегетационного индекса [10].

Таблица 5.3

Комбинации каналов для расчета NDVI [10]

Съемочная аппаратура	Комбинация каналов
MSS Landsat (4, 5)	5 (0,6 – 0,7 мкм), 6 (0,7 – 0,8 мкм) или 7 (0,8 – 1,1 мкм)
TM Landsat (4, 5)	3 (0,63 – 0,69 мкм), 4 (0,76 – 0,90 мкм)
ETM+ Landsat-7	3 (0,63 – 0,69 мкм), 4 (0,75 – 0,90 мкм)
AVHRR NOAA	1 (0,58 – 0,68 мкм), 2 (0,72 – 1,0 мкм)
MODIS Terra(Aqua)	1 (0,62 – 0,67 мкм), 2 (0,841 – 0,876 мкм)
ASTER Terra	2 (0,63 – 0,69 мкм), 3 (0,76 – 0,86 мкм)
LISS IRS(1C/1D)	2 (0,62 – 0,68 мкм), 3 (0,77 – 0,86 мкм)

Задание

Рассчитайте вегетационный индекс NDVI, используя многозональный космический снимок Landsat, и проанализируйте состояние растительности по вегетационному индексу.

Ход работы

1. Для расчета вегетационного индекса используйте космический снимок Landsat с дешифрованной структурой землепользования (см. практическую работу № 5, задание 3).

2. Рассчитайте вегетационный индекс NDVI для угодий выбранной территории в ArcGIS, используя функцию NDVI [11].

3. Результаты представьте в виде карты. Проведите сравнительную характеристику вегетационного индекса NDVI различных угодий, выполните анализ состояния растительности, объясните различия вегетационного индекса NDVI для различных угодий и экосистем. Оценку NDVI проводят по шкале его значений (рис. 5.3, табл. 5.4).

Для отображения индекса NDVI могут применяться различные шкалы. Чаще всего используется *стандартизованная непрерывная градиентная* или *дискретная шкала*, показывающая значения в диапазоне от -1 до 1 (рис. 5.3). Имеется также *масштабированная шкала* в диапазоне от 0 до 255 (используется для отображения в некоторых пакетах обработки ДЗЗ, соответствует количеству градаций серого) или в диапазоне $0...200$ ($-100...100$), что более удобно, так как каждая единица соответствует 1% изменения показателя. Для перевода из шкалы $-1...1$ в $0...200$ (масштабирование) используется следующая формула: *масштабированный NDVI* $= 100(\text{NDVI} + 1)$.

Природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение NDVI (что позволяет разделить их при дешифрировании).



Рис. 5.3. Шкала NDVI [10]

Таблица 5.4

Значения NDVI различных объектов [10]

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0,1	0,5	0,7
Разреженная растительность	0,1	0,3	0,5
Открытая почва	0,25	0,3	0,025
Облака	0,25	0,25	0
Снег и лед	0,375	0,35	-0,05
Вода	0,02	0,01	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

Библиографические ссылки

1. Трифонова Т. А., Мищенко Н. В., Краснощеков А. Н. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях : учеб. пособие для вузов. М. : Акад. Проект, 2005. 352 с.
2. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+ [Электронный ресурс]. URL: <https://gislab.info/qa/landsatbandcomb.html?ysclid=lgohacvyan751604210> (дата обращения: 30.06.2023).
3. Афанасьева Т. В., Трифонова Т. А. Микрофотометрическое дешифрирование аэрофотоснимков при типологических исследованиях пойменных земель // Почвоведение. 1983. № 11. С. 137 – 143.
4. Начало работы с ArcMap [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap> (дата обращения: 30.06.2023).
5. GIS-Lab: Продукты MODIS – Land [Электронный ресурс]. URL: <https://gis-lab.info/qa/modislandprod.html> (дата обращения: 30.06.2023).

6. LP DAAC - MCD12Q1 (usgs.gov) [Электронный ресурс]. URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/> (дата обращения: 30.04.2023).
7. EarthExplorer [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 30.06.2023).
8. Зональная статистика (Spatial Analyst) – ArcMap [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/zonal-statistics.htm> (дата обращения: 21.06.2023).
9. Классификация изображений с помощью дополнительного модуля ArcGIS Spatial Analyst – ArcMap [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/image-classification/image-classification-using-spatial-analyst.htm> (дата обращения: 21.06.2023).
10. NDVI - теория и практика [Электронный ресурс]. URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html?ysclid=lgoxl13j23572013350> (дата обращения: 22.06.2023).
11. Функция NDVI – ArcMap [Электронный ресурс]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm> (дата обращения: 22.06.2023).

ТЕМЫ ДЛЯ ДОКЛАДОВ

1. Использование космической фотоинформации для предупреждения чрезвычайных ситуаций.
2. Использование материалов дистанционного зондирования при изучении состояния атмосферы.
3. Использование материалов дистанционного зондирования при изучении состояния гидросферы.
4. Использование материалов дистанционного зондирования при изучении состояния литосферы.
5. Использование материалов дистанционного зондирования при изучении состояния биосферы.
6. Изучение состояния луговой растительности с использованием данных дистанционного зондирования.
7. Использование данных дистанционного зондирования для изучения состояния лесной растительности.
8. Оценка эрозионных процессов по дистанционным данным.
9. Геостационарная орбита и геостационарные искусственные спутники Земли.
10. Принципы многозональной космической съемки Земли.
11. Мониторинг пожароопасной обстановки по дистанционным данным.
12. Инфракрасная тепловая съемка Земли из космоса.
13. Метеорологические искусственные спутники Земли.
14. Ресурсные искусственные спутники Земли.
15. Применение данных дистанционного зондирования в сельском хозяйстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие позволяет студентам освоить теоретические основы получения и использования данных дистанционного зондирования: физические основы космической съемки, влияние параметров орбиты и атмосферы на съемку, типы космических снимков и др.

В издании приведены также сведения о современном состоянии исследований Земли из космоса и практические задания. Выполнение последних позволит обучающимся приобрести навыки обработки и дешифрирования космических снимков с использованием актуальных дистанционных материалов и современных геоинформационных систем.

Материалы учебного пособия могут быть использованы во время лекций и практических занятий, при планировании научного эксперимента, а также выполнении курсовых и дипломных проектов. Авторы считают, что издание может представлять интерес и для работников природоохранных организаций, а также для широкого круга лиц, интересующихся дистанционными исследованиями в области изучения почвенного покрова и экологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Трифонова, Т. А.* Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях : учеб. пособие для вузов / Т. А. Трифонова, Н. В. Мищенко, А. Н. Краснощеков. – М. : Акад. Проект, 2005. – 352 с. – ISBN 5-8291-0602-7.

2. *Савиных, В. П.* Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В. П. Савиных, В. Я. Цветков. – М. : Каргеоцентр-Геодезиздат, 2001. – 228 с.

3. *Трифонова, Т. А.* Почвенно-продукционный потенциал экосистем речных бассейнов на основе наземных и дистанционных данных / Т. А. Трифонова, Н. В. Мищенко. – М. : Геос, 2013. – 273 с.

4. Роскосмос [сайт]. URL: <https://www.roscosmos.ru>.

5. ArcGIS Desktop [сайт]. – URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap>.

Учебное электронное издание

ТРИФОНОВА Татьяна Анатольевна
МИЩЕНКО Наталья Владимировна

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ
В ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10;
Adobe Reader; дисковод DVD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Институт биологии и экологии
кафедра биологии и экологии
natmich3@mail.ru