

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И  
СПОРТА УКРАИНЫ**

**ХАРЬКОВСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ  
ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

**В. А. Толстохатько, В. А. Пеньков**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
по курсу**

**«ФОТОГРАММЕТРИЯ И  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ»**

**Модуль 2: «Дистанционное зондирование»**

*(для студентов 4 курса дневной и заочной форм обучения направления  
подготовки 6.080101 «Геодезия, картография и землеустройство»)*

**Харьков  
ХНАГХ  
2013**

**Толстохатко В. А.** Конспект лекций по курсу «Фотограмметрия и дистанционное зондирование». Модуль 2: «Дистанционное зондирование» (для студентов 4 курса дневной и заочной форм обучения по направлению 6.080101 «Геодезия, картография и землеустройство») / В. А. Толстохатко, В. А. Пеньков; Харьк. нац. акад. гор. хоз-ва. – Х.: ХНАГХ, 2013. – 113 с.

Авторы: проф. В. А. Толстохатко, доц. В. А. Пеньков

Рецензент: проф., к.т.н. В. Д. Шипулин

Рекомендовано кафедрой геоинформационных систем и геодезии  
протокол № 1 от 31 августа 2012 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ .....	7
1.1. Понятие дистанционного зондирования.....	7
1.1.1. Этапы дистанционного зондирования и анализа данных...	9
1.1.2. Технология "От снимка к карте". Программный пакет ERDAS IMAGINE 2010.....	11
1.1.3. Области применения данных дистанционного зондирования.....	19
1.2. Физические основы дистанционного зондирования.....	20
1.2.1. Электромагнитный спектр и его характеристики.....	20
1.2.2. Взаимодействие излучения с атмосферой.....	23
1.2.3. Особенности спектральных характеристик объектов.....	25
1.3. Активные и пассивные методы съемки.....	32
1.3.1. Общие сведения о спутниковых системах съемки.....	32
1.3.2. Пассивные системы съемки. Характеристики сканера и связь их с масштабом карты.....	34
1.3.3. Активные системы съемки.....	37
1.4. Характеристики сканеров и спутниковых платформ.....	40
1.4.1. Характеристики сканеров.....	40
1.4.2. Характеристика спутниковых платформ.....	44
1.5. Данные дистанционного зондирования.....	51
1.5.1. Космические снимки.....	51
1.5.2. Тематические и непрерывные растровые слои.....	53
1.5.3. Форматы записи цифровых данных.....	54
1.5.4. Структура img-файла.....	56
1.5.5. Внутренние типы данных. Хранение img-файлов.....	58
2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	61
2.1. Этапы предварительной обработки цифровых снимков.....	61
2.1.1. Основные понятия.....	61
2.1.2. Характеристика этапов обработки снимков.....	64
2.2. Геометрическое трансформирование снимков.....	66
2.2.1. Понятия геометрического трансформирования.....	66
2.2.2. Выбор математической модели трансформирования.....	68
2.2.3. Вычисление параметров модели трансформирования.....	70
2.3. Преобразование координат и повторная дискретизация.....	72
2.3.1. Преобразование координат.....	72
2.3.2. Методы повторной дискретизации.....	73
2.3.3. Оценка ошибок трансформирования.....	74
3 ДЕШИФРИРОВАНИЕ СНИМКОВ.....	77
3.1. Визуальные методы дешифрирования.....	77
3.1.1. Прямой способ дешифрирования .....	77
3.1.2. Индикационный способ дешифрирования.....	79
3.2. Автоматизированные методы дешифрирования.....	81

3.2.1. Методы машинной классификации снимков.....	81
3.2.2. Процесс выполнения машинной классификации.....	83
3.3. Алгоритмы неконтролируемой классификации.....	85
3.3.1. Основные понятия кластерного анализа.....	85
3.3.2. Алгоритм кластеризации ISODATA.....	87
3.4. Алгоритмы контролируемой классификации.....	90
3.4.1. Обучающие выборки и сигнатуры.....	90
3.4.2. Непараметрические решающие правила.....	93
3.4.3. Параметрические решающие правила.....	97
3.4.4. Оценка качества обучающих выборок.....	99
3.5. Применение вегетационных индексов.....	100
3.5.1. Операции над пикселями и вегетационные индексы.....	100
3.5.2. Линия почвы.....	102
3.5.3. Вычисление вегетационных индексов.....	104
3.6 Анализ методом главных компонент.....	107
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	112

## ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование – метод получения информации об объекте или явлении путем анализа данных, собранных без контакта с изучаемым объектом.

Новейшие достижения науки, техники, и технологии, которые в последние десятилетия пришли в науки о Земле, существенно повлияли на развитие дистанционного зондирования.

Наибольшее влияние имеют:

- развитие космической техники и технологий, используемых для потребностей геодезии спутниковых навигационных систем;
- развитие электронно-вычислительной техники, в том числе появление мощных персональных компьютеров;
- развитие микроэлектроники и разработка новых типов сенсоров, способных фиксировать электромагнитное излучение с высокими геометрическими и радиометрическими параметрами;
- развитие лазерной и оптико-электронной техники, радиотехнических способов дистанционного изучения разнообразных объектов, в том числе земной поверхности;

На современном этапе с помощью средств дистанционного зондирования решаются новые задачи: создание геоинформационных технологий, алгоритмов и программ, предназначенных для дешифрирования снимков и другие.

Современные технические и технологические возможности дистанционного зондирования в Украине позволяют полностью переориентироваться на геоинформационные технологии. Методы дистанционного зондирования играют значительную роль в создании рынка земли и недвижимости.

В градостроительстве и сфере управления городским хозяйством пространственное моделирование на базе аэрокосмических съемок позволит специалистам принимать в короткие сроки оптимальные управленческие решения. Использование дистанционного зондирования вместе с ГИС-технологиями и пространственным моделированием для архивации достопримечательностей архитектуры, в археологии создают новые возможности для поисковых, научных и проектных работ.

Важной областью применения дистанционного зондирования являются аэрокосмический дистанционный мониторинг экологической ситуации и безопасности жизнедеятельности в отдельных регионах. Дистанционное зондирование предоставляет большие возможности для мониторинга состояния трубопроводов, ЛЭП, железных и автомобильных дорог. Большое внимание уделяется развитию дистанционного зондирования Земли для изучения природных ресурсов, прогноза погоды, картографирования шельфовой зоны морей и океанов.

В данном конспекте лекций дистанционное зондирование Земли рассматривается как научная дисциплина, тесно связанная с другими

областями знаний.

Конспект лекций состоит из трех разделов, которые соответствуют содержательным модулям программы дисциплины «Фотограмметрия и дистанционное зондирование. Модуль 2: Дистанционное зондирование».

В разделе 1 «Системы дистанционного зондирования» рассматриваются темы: понятия дистанционного зондирования, физические основы дистанционного зондирования, активные и пассивные методы съемки, характеристики сканеров и спутниковых платформ и данные дистанционного зондирования.

В разделе 2 «Обработка данных дистанционного зондирования» рассматриваются темы: этапы предварительной обработки цифровых снимков, геометрическое трансформирование, радиометрическая коррекция и пространственная фильтрация снимков.

В разделе 3 «Дешифрирование снимков» рассматриваются темы: визуальные методы дешифрирования, автоматизированные методы дешифрирования, алгоритмы неконтролируемой и контролируемой классификации, вегетационные индексы и метод главных компонент.

# 1. СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

## 1.1. Понятие дистанционного зондирования

Дистанционное зондирование (ДЗ) – процесс или метод получения информации об объекте, участке поверхности или явлении путем анализа данных, собранных *без контакта* с изучаемым объектом.

Физическими основами дистанционного зондирования являются:

- отражение и рассеяние солнечной энергии поверхностью;
- излучение энергии нагретыми телами;
- влияние атмосферы.

Суть метода заключается в *интерпретации результатов измерения электромагнитного излучения*, которое отражается либо излучается объектом и регистрируется в некоторой удаленной от него точке пространства (рис. 1.1).

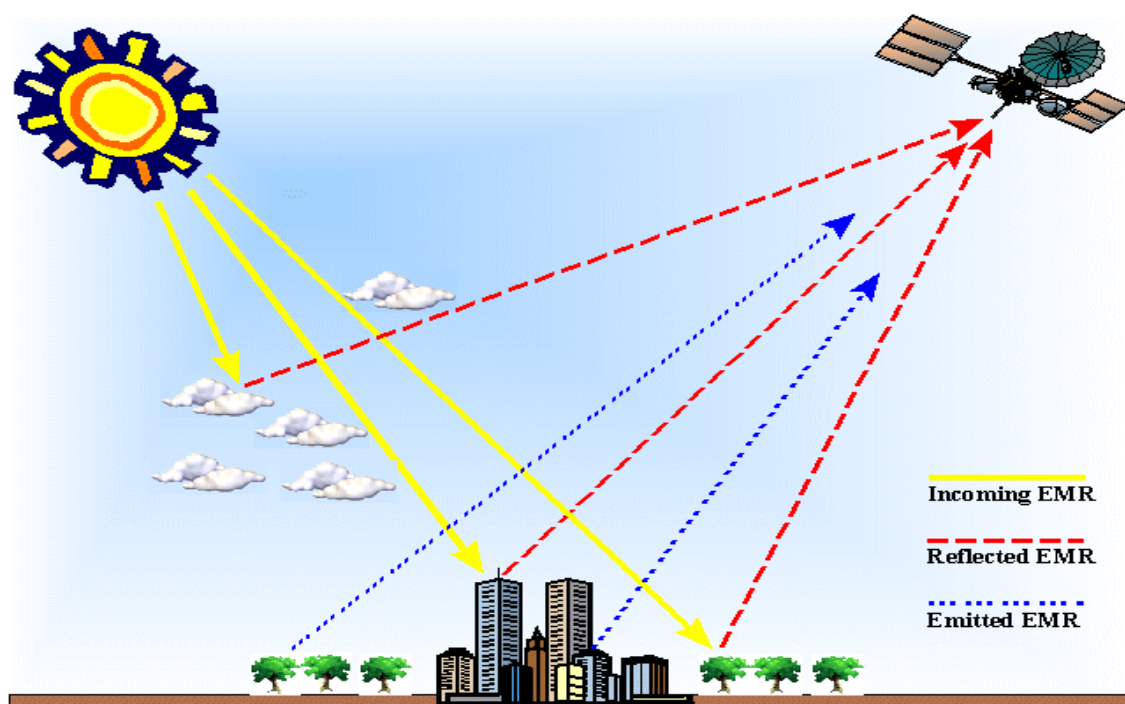


Рис. 1.1 – Суть метода дистанционного зондирования

Методы дистанционного зондирования основаны на использовании *сенсоров*, которые размещаются на летательных и космических аппаратах и регистрируют электромагнитное излучение в широком диапазоне электромагнитного спектра. В большинстве методов используют инфракрасный диапазон отраженного излучения, тепловой инфракрасный и радиодиапазон электромагнитного спектра. Идеальная схема дистанционного зондирования показана на рис. 1.2. На этой схеме *цель* – это объект или материал, который изучается.

Составляющими процесса сбора данных являются:

- источник электромагнитного излучения;

- процесс распространения излучения;
- взаимодействие излучения с веществом объекта;
- ответный сигнал;
- регистрация данных и предоставление их потребителям.

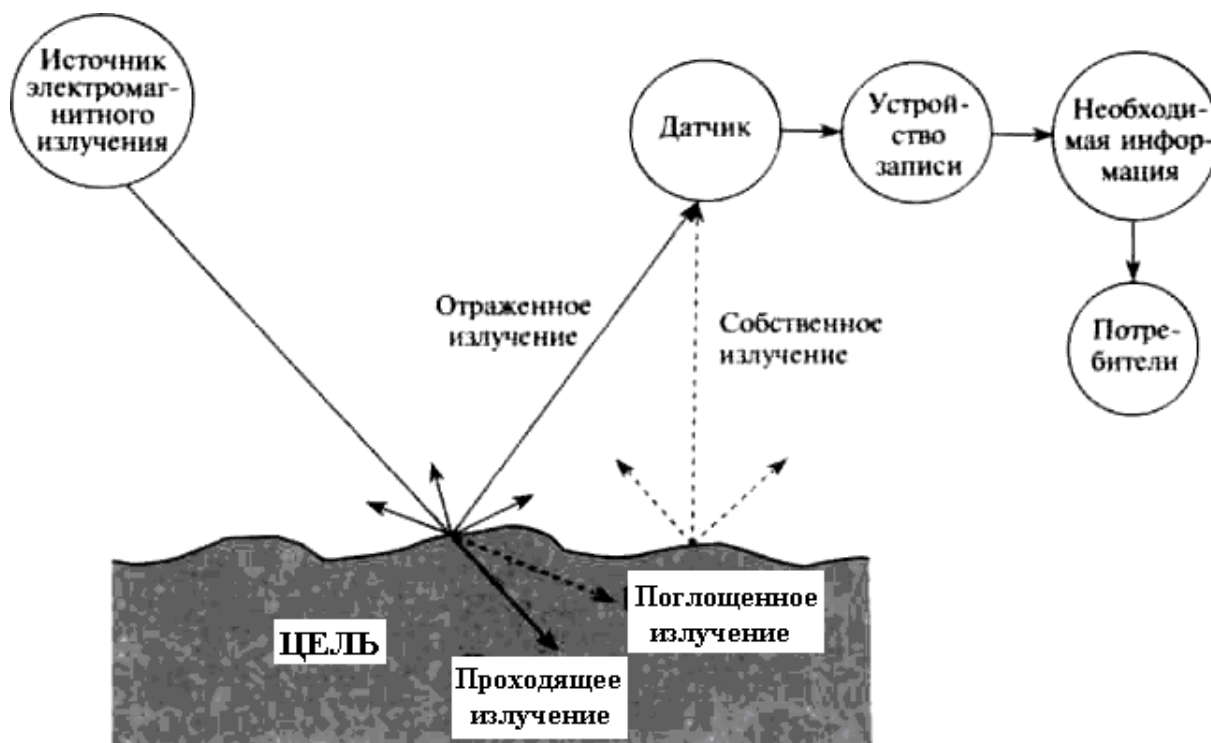


Рис. 1.2 – Идеальная схема дистанционного зондирования

Естественным источником электромагнитного излучения (ЭМИ) является солнце. В приведенной схеме приняты следующие допущения:

- ЭМИ имеет высокий уровень энергии во всем диапазоне длин волн, интенсивность излучения не зависит от длины волны.
- излучение не взаимодействует с атмосферой и распространяется через нее без потери энергии;
- падающее излучение взаимодействует с веществом объекта, в результате чего возникает отраженное либо собственное вторичное излучение, однородное во всем диапазоне длин волн.

Излучение от объекта попадает на сенсор, который регистрирует пространственную информацию. Сенсор имеет достаточно простую и компактную конструкцию, потребляет для своей работы минимум энергии и обладает высокой точностью.

Данные, зарегистрированные сенсором, передаются на компьютер для предварительной обработки и преобразования.

Преобразованные данные предоставляются потребителям для идентификации изучаемых объектов по их свойствам (физическим, химическим и биологическим).

Основными факторами, которые снижают надежность данных дистанционного зондирования, являются:



- неспособность реальных источников обеспечить однородность потока излучения, как в пространстве, так и во времени;
- изменение интенсивности излучения и его спектра из-за взаимодействия излучения с газами атмосферы, молекулами водяного пара и атмосферными частицами;
- изменение спектральной чувствительности одного и того же вещества при разных условиях;
- возможность совпадения спектральной чувствительности разных веществ;
- невозможность создания идеального сенсора, способного регистрировать все длины волн электромагнитного спектра;
- передача данных с задержкой по времени по техническим ограничениям;
- передача данных с задержкой по времени, если формат передаваемых данных отличается от формата, требуемого потребителю.
- отсутствие у потребителя необходимой информации о параметрах сбора данных дистанционное зондирование и недостаток опыта для их анализа и дешифрирования.

### **1.1.1. Этапы дистанционного зондирования и анализа данных**

Этапы ДЗ и анализа данных показаны на рис. 1.3. Во многих областях данные дистанционного зондирования являются ключевым компонентом в процессе принятия решений.

Дистанционное зондирование можно рассматривать как составную часть информационной системы. Потребитель и его нужды является главным звеном любой системы управления информацией. Информационные запросы логически связаны с требованиями, предъявляемыми заказчиками и потребителями продукции к материалам дистанционного зондирования.

Оптимальный способ использования данных ДЗ заключается в их анализе совместно с информацией из других источников. Тогда они становятся необходимой составляющей процесса принятия решений и моделирования в любой предметной области.

При дистанционном зондировании для получения информации применяются: аэрокосмическая стереосъемка, многозональная, многовременная, многоуровневая и многополяризационная съемки.

**Аэрокосмическая стереосъемка.** Получение изображений с перекрытием из нескольких последовательных точек воздушного или космического пространства позволяет получить представление о трехмерных объектах с необходимой точностью.

**Многозональная съемка.** Использование многозональных снимков основано на уникальности тоновых характеристик различных объектов. Объединение яркостных данных из снимков в различных спектральных

диапазонах позволяет безошибочно выделять определенные пространственные структуры.



Рис. 1.3 – Процесс получения и анализа данных ДЗ

**Многовременная съемка.** Плановая съемка в заранее определенные даты позволяет выполнять сравнительный анализ снимков тех объектов, характеристики которых изменяются во времени.

**Многоуровневая съемка.** Съемку с различными уровнями дискретизации используют для получения все более подробной информации об изучаемой территории. Как правило, весь процесс сбора данных подразделяют на три уровня: космическая съемка, аэросъемка и наземные исследования.

**Многополяризационная съемка.** Снимки, полученные этим методом, используют для проведения границ между объектами на основе различий в поляризационных свойствах отраженного излучения. Так, например, отраженное излучение от водной поверхности обычно более сильно поляризовано, чем отраженное излучение от растительного покрова.

Обработку, анализ и интерпретацию данных ДЗ выполняют несколько специалистов из разных предметных областей. Это позволяет получить более полную и достоверную информацию о состоянии

исследуемого объекта. Результаты такого анализа обычно представляют в виде набора тематических карт.

Данные дистанционного зондирования изучают во взаимосвязи друг с другом. Для каждодневной работы и принятия решений используют наиболее эффективное средство манипулирования данными, инструмент единого подхода к управлению и обработке пространственной информации – *географическую информационную систему (ГИС)*.

Основные преимущества данных дистанционного зондирования:

- данные содержат полезную информацию, полученную в различных спектральных диапазонах, и сохраняются в цифровом виде;
- космические снимки охватывают большие области, их можно использовать для тематических региональных исследований и идентификации крупных пространственных объектов;
- регулярная съемка территорий позволяет проводить мониторинг объектов и явлений и процессов, которые изменяются под воздействием природных и антропогенных факторов (водных ресурсов, состояния сельскохозяйственных культур, почв, инфраструктуры городов);
- возможность достаточно просто получить данные о труднодоступных областях и получения снимков разного разрешения для решения разнообразных задач в разных предметных областях;
- экономически эффективным является применение космических снимков для оперативного обновления средне- и мелкомасштабных карт.

Основные недостатки данных дистанционного зондирования:

- высокая стоимость программного обеспечения для обработки цифровых снимков;
- результаты дешифрирования материалов дистанционного зондирования, не подтвержденные полевыми исследованиями, не всегда обладают достаточной надежностью.

### **1.1.2. Технология "От снимка к карте". Программный пакет ERDAS IMAGINE 2010**

#### **Технология "От снимка к карте"**

Технология «От снимка к карте» является развитием технологии «Обработка изображений», которую разработала компания ERDAS, образованная в декабре 1978 года. Дистанционное зондирование – это технология, которая требует специфических возможностей обработки, таких как многоспектральная классификация, геометрическое трансформирование и географическая привязка изображений. Компания ERDAS разработала программное обеспечение для визуализации, просмотра и анализа географической информации, которое широко использовалось в правительственных, научно-исследовательских и коммерческих организациях для выработки и принятия решений, в таких областях, как выявление и оценка природных ресурсов, защита продукции и частной собственности.

В 2001 г. компания Leica Geosystems, учитывая растущие потребности рынка в пространственной информации и средствах ее обработки, приобрела права владения компаниями ERDAS и LH Systems. Они стали ядром нового Отделения ГИС и картографирования (GIS and Mapping Division) со штаб-квартирой в Атланте, Джорджия, США. В то же время, присоединенные компании сохранили свою индивидуальность и присутствие на рынке в качестве самостоятельных структур с прежними названиями. В это подразделение вошли также рабочие группы GPS/GIS (сбор и обработка данных Системы спутниковой привязки) и LIS (геодезическая съемка и земельный кадастр).

В основу программного обеспечения компании Leica Geosystems положена технология обработки данных «От снимка к карте» (Geospatial Imaging Chain™). Технология включает стадии получения, привязки, измерений, анализа и представления итогового результата в виде карты (рис. 1.3). Процесс обработки географических изображений, включающий перечисленные стадии, превращает пространственные данные в информацию, а информацию в знания.

Следует подчеркнуть, что в качестве исходных данных в любой технологии обработки изображений используется *географически привязанная информация*.

### Программный пакет ERDAS IMAGINE 2010

Для реализации технологии «От снимка к карте» используется программное обеспечение ERDAS IMAGINE® компании Leica Geosystems. Этапы истории развития программногo обеспечения (ПО) ERDAS IMAGINE показаны на рис. 1.4.

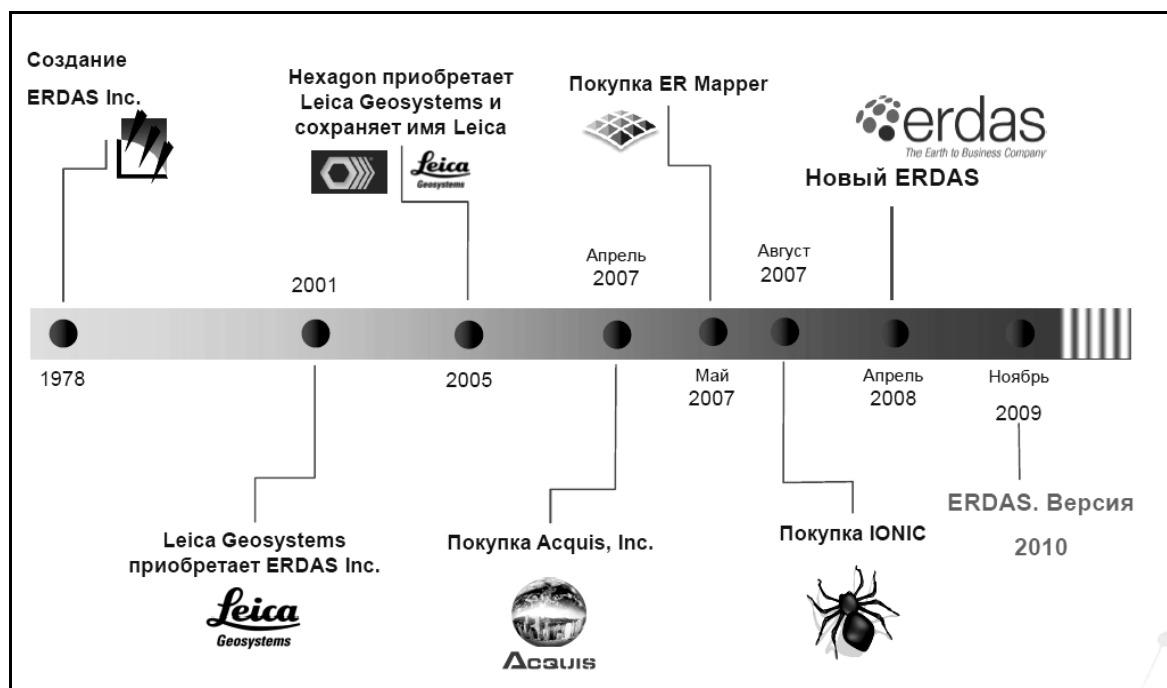


Рис. 1.4 – Этапы развития ПО ERDAS IMAGINE  
Программный пакет ERDAS Imagine сочетает в себе функции

растровой и векторной ГИС и системы для обработки изображений, ориентированной на данные космических съемок. Пакет органично соединяет цифровую фотограмметрию, дистанционное зондирование, пространственный анализ и картографирование в векторном формате. В пакет включен широкий набор инструментов, дающий возможность обрабатывать данные из любого источника и представлять результаты в любом виде, от профессионально оформленных печатных карт до трехмерных моделей местности.

Интерфейс пакета ERDAS IMAGINE 2010 показан на рис. 1.5.

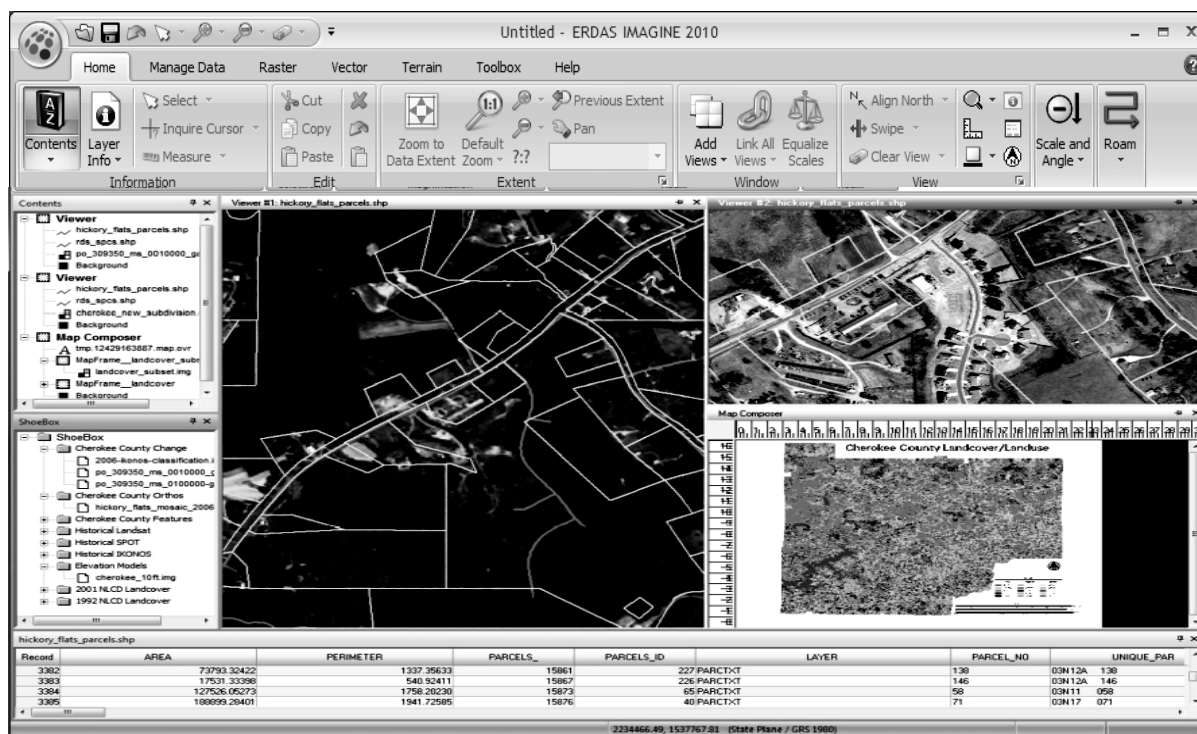


Рис. 1.5 – Интерфейс ERDAS IMAGINE 2010

Возможен вариант запуска программы с классическим вариантом интерфейса, который используется в предыдущих версиях. Порядок запуска программы с классическим вариантом интерфейса следующий:

Запуск – Программы – ERDAS 2010 – ERDAS IMAGINE 2010 – ERDAS IMAGINE CLASSIC INTERFACE.

Структура классического интерфейса показана на рис. 1.6.

В ERDAS IMAGINE используются форматы импорта или экспорта и форматы данных прямого доступа, не требующие конвертации.

Доступ к форматам импорта или экспорта (их в ERDAS IMAGINE насчитывается более 50) осуществляется через специальные модули (Raster DLL и Vector DLL). Внутренний формат графических данных img является открытым для растровых данных.

Ядром ERDAS Imagine является один из трех вариантов базовых пакетов: Imagine Essentials, Imagine Advantage и Imagine Professional. Каждый последующий пакет включает в себя функциональные возможности предыдущего и расширяет их.

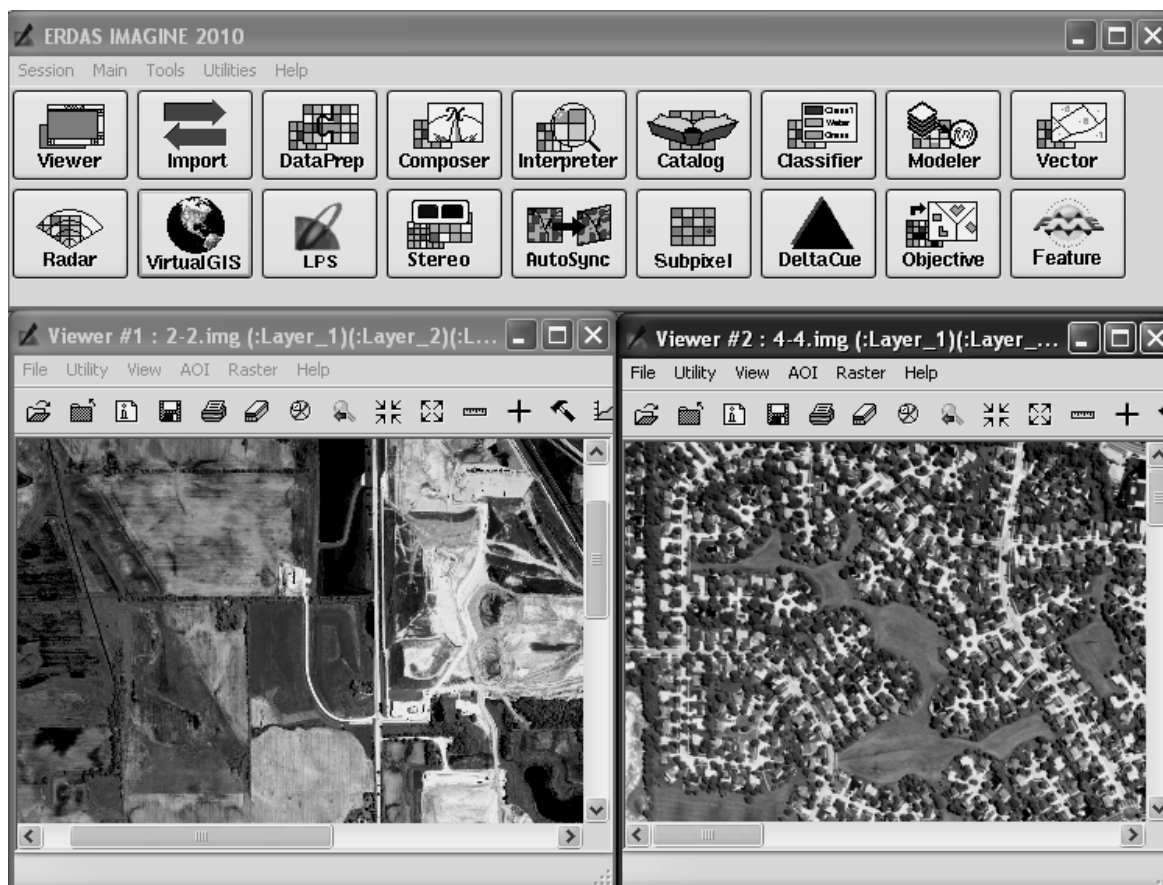


Рис. 1.6 – Классический интерфейс ERDAS IMAGINE 2010

Состав пакета ERDAS Imagine 2010 приведен на рис. 1.7.

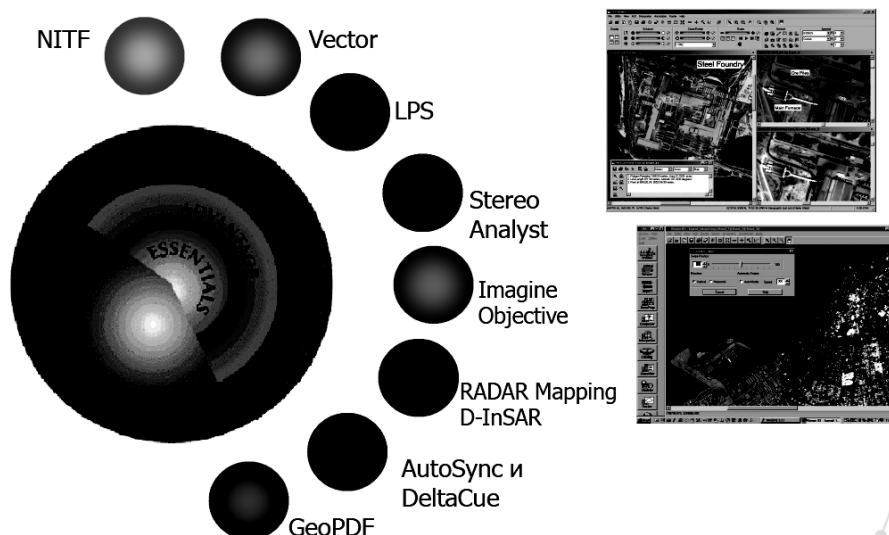


Рис. 1.7 – Состав пакета ERDAS Imagine 2010

- В состав пакета ERDAS Imagine включены средства, позволяющие:
- улучшить изображения, повысить его читаемость и информативности;
  - составлять карты землепользования;
  - выделять объекты с применением контролируемой (на основе

принципа максимального правдоподобия, минимального расстояния, расстояния Махаланобиса) и неконтролируемой классификации (иерархический кластерный анализ);

- выявлять изменения, происшедшие с течением времени на какой-либо территории;

- осуществлять точную привязку космических снимков к реальным координатам и преобразование их в картографические проекции с использованием различных параметров земного эллипсоида;

- интерактивно конструировать модели, используя специальный объектно-ориентированный графический редактор алгоритмов Model Maker, открывая доступ более чем к 200 операциям по обработке изображений и манипулирования данными ГИС. В частности, очень просто могут быть созданы модели для описания природной среды и происходящих в ней процессов.

Для создания профессионально оформленной картографической продукции и демонстрационной графики может быть использован специальный редактор Map Composer. Картографические композиции могут включать один или несколько слоев изображения, тематических векторных карт, аннотаций.

В качестве специализированных инструментов компания ERDAS разрабатывает дополнительные модули, которые можно приобрести отдельно от базового варианта и подключить к нему для получения новых функций (рис. 1.6 и рис. 1.7).

**Модуль NITF** (National Imagery Transmission Format – Национальный формат передачи данных) – основной формат для хранения и передачи цифровых изображений, связанной с ними пространственной информации и метаданных.

**Модуль IMAGINE Vector** работает с векторно-топологической моделью данных ГИС ARC/INFO, обеспечивая уникальную комбинацию возможностей растровой и векторной ГИС в одном и том же пакете. Можно создать полную географическую базу данных на исследуемую территорию, включая в нее векторные электронные карты. Имеются средства редактирования векторных карт, включая построение топологии.

**Модуль LPS** (Leica Photogrammetric Suite) включает полный набор инструментов для выполнения фотограмметрических работ, в том числе: аэрофототриангуляцию, создание моделей местности, создание ортомозаик и трехмерных объектов (рис. 1.8).

Данный программный модуль увеличивает производительность работ с помощью инструментов точного автоматического измерения связующих точек, редактирования рельефа и извлечения свойств объектов. Обладая большим количеством дополнительных модулей, он может быть легко адаптирован под конкретные запросы пользователя.

Современные фотограмметрические алгоритмы обработки изображений для автоматического измерения связующих точек, аэрофототриангуляции и автоматического извлечения моделей местности

обеспечивают LPS высокую точность, одновременно увеличивая производительность. Встроенные средства проверки качества данных, отчеты о точности и инструменты редактирования обеспечивают необходимый уровень качества. Интерфейс построен так, что процесс обработки данных происходит шаг за шагом, начиная от создания модели сенсора и заканчивая созданием ортофотопланов.



Рис. 1.8 – Модель местности

Модуль LPS поддерживает различные процессы обработки данных, полученных с различных сенсоров, а также возможность создавать фотограмметрические проекты для широкого круга приложений: начиная от ГИС и заканчивая высокоточными инженерными приложениями. Модуль Stereo Analyst для ERDAS IMAGINE – простой в использовании программный модуль, предназначенный для построения трёхмерных пространственных объектов на основе стереоскопических пар снимков.

**Модуль IMAGINE Objective** содержит набор инновационных инструментов, с помощью которых пользователь может создавать и редактировать пространственную информацию по данным ДЗ.

**Модуль IMAGINE Radar Mapping Suite** обладает набором специализированных инструментов для обработки радарных изображений.

**Модуль IMAGINE AutoSync** позволяет пользователям получать высокоточные геометрические модели преобразования двух и более изображений, полученных разными сенсорами, в разное время или с различным пространственным разрешением.

**Модуль IMAGINE DeltaCue** – дополнительный модуль для ERDAS IMAGINE, который позволяет выявлять различия между двумя снимками одной и той же территории, полученными в разное время.

**Модуль Imagine Subpixel Classifier** реализует особый метод классификации изображений, который решает проблемы классификации смешанных пикселей.

**Модуль IMAGINE Developers Toolkit** – это набор библиотек и документации, разработанных для расширения возможностей ERDAS.



Модуль **IMAGINE Feature Interoperability** расширяет возможности **ERDAS IMAGINE** по редактированию векторных данных, поддерживая различные форматы ГИС и САПР.

**Модуль IMAGINE VirtualGIS** – модуль для визуального представления и анализа трёхмерных объектов. Позволяет создавать трехмерные сцены из снимков и моделей рельефа местности, а также эффект движения в виртуальном мире в реальном времени.

**Клиент ERDAS TITAN** – это бесплатное программное приложение, позволяющее представлять данные в 3D.

**Модуль ERDAS APOLLO** – это система обработки, предназначенная для управления и многопользовательского доступа к геопространственным данным. Позволяет систематизировать гигантские объемы данных в виде файловых массивов или гипертекстовых данных, включая изображения, векторные данные, топографию и практически любые цифровые объекты, а также организовывать обеспечение ими пользователей. В модуле реализованы функции **Web Mapping Service (WMS)**, веб-службы покрытий (**WCS**), сервисы каталога (**CS-W**) и др.

Модуль может применяться для решения задач мониторинга окружающей среды и лесного хозяйства (рис. 1.9), оценки недвижимости, трансформирования изменений в режиме реального времени в полезную информацию и т.д.

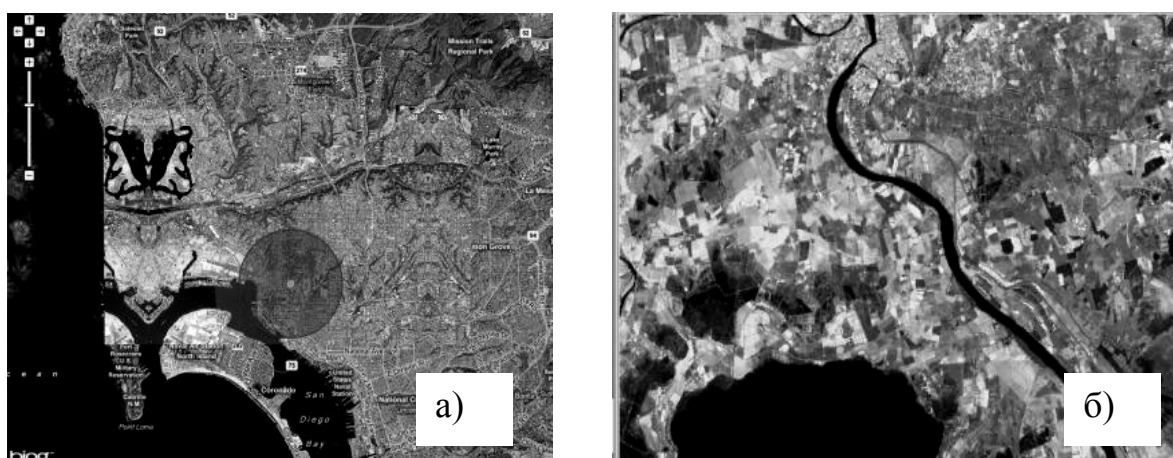


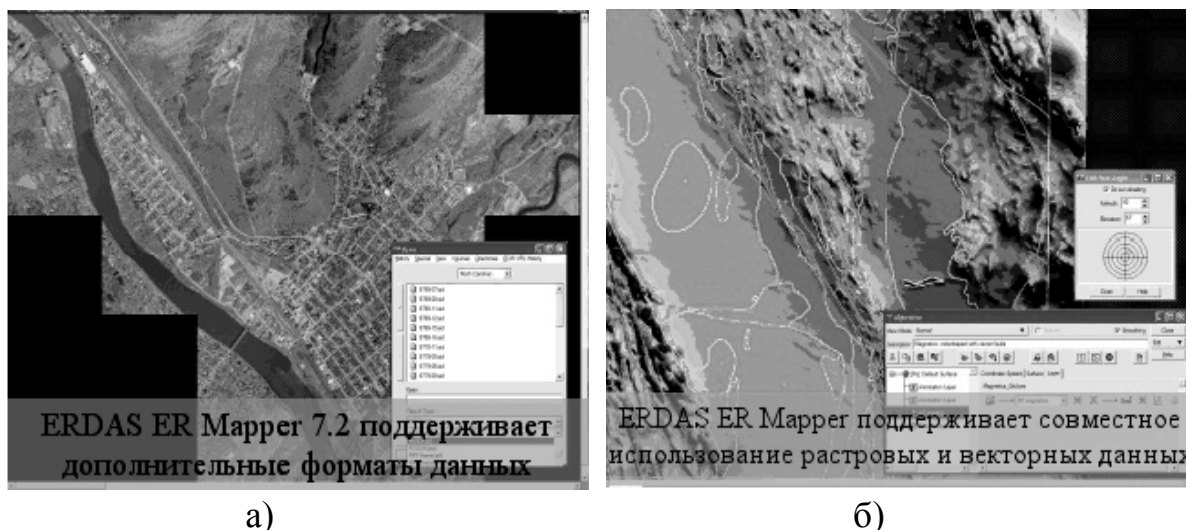
Рис. 1.9 – Результаты применения модуля **APOLLO**:  
а) мониторинг окружающей среды; б) лесное хозяйство

### **Система ERDAS ER Mapper**

Система **ERDAS ER Mapper** предоставляет пользователям дополнительные возможности для анализа и сжатия изображений, используемых в различных отраслях промышленности, например, поиске и разведке нефтегазоносных месторождений, месторождений других полезных ископаемых. **ERDAS ER Mapper** обладает полным набором инструментов для визуализации, улучшения качества и комбинирования изображений с целью последующего их использования в широком круге

программных приложений. Извлекая необходимую пользователю количественную информацию, ERDAS ER Mapper делает собранные данные более значимыми для решения бизнес задач.

Обрабатываемые данные могут быть объединены в рабочие наборы данных, в которые могут входить растровые, векторные и аннотационные слои. Рабочие наборы данных могут формироваться на основе данных растровых аэроснимков, цифровых рельефов местности, данных магнитной и сейсмической разведки. ERDAS ER Mapper 7.2 обеспечивает поддержку дополнительных форматов данных (рис. 1.10, а), например, ERDAS IMAGINE, MrSID или RPF. Все опции программы, включая создание мозаик и цветовое выравнивание, доступны для обработки данных, сохраненных в дополнительных форматах. Динамические алгоритмы обеспечивают выполнение обработки не только растровых данных, но и векторных, как показано на рис. 1.10, б.



а)

б)

Рис. 1.10 – В ERDAS ER Mapper 7.2 используются дополнительные форматы (а) и векторные и растровые данные (б)

Главная особенность системы – не требуется сохранять результаты обработки данных на диске. Вместо этого повторяющиеся последовательности операций объединяются и хранятся в виде алгоритмов обработки наборов данных. В алгоритмах могут записываться операции многоуровневой фильтрации, коррекции яркости, обработка посредством формул. Формулы задают правила обработки многозональных снимков. Аргументами формулы являются отдельные спектральные каналы обрабатываемого снимка. ER Mapper содержит широкий набор типовых алгоритмов, а также позволяет создавать собственные пользовательские алгоритмы обработки.

Разнообразный набор функций обработки данных ДЗ позволяет решать широкий спектр задач предварительной и тематической обработки. В системе имеются утилиты, позволяющие выполнять проекционное проектирование (в более чем 40 проекций), геометрическую коррекцию и географическую привязку снимков, составлять мозаики из

перекрывающихся снимков, осуществлять слияние разнородных данных, а также выполнять контролируемую и неконтролируемую классификацию снимков с целью извлечения тематической информации.

С помощью ERDAS ER Mapper можно быстро проанализировать, обработать и визуализировать множество слоев данных, не задействуя дополнительное пространство на диске (рис. 1. 11).

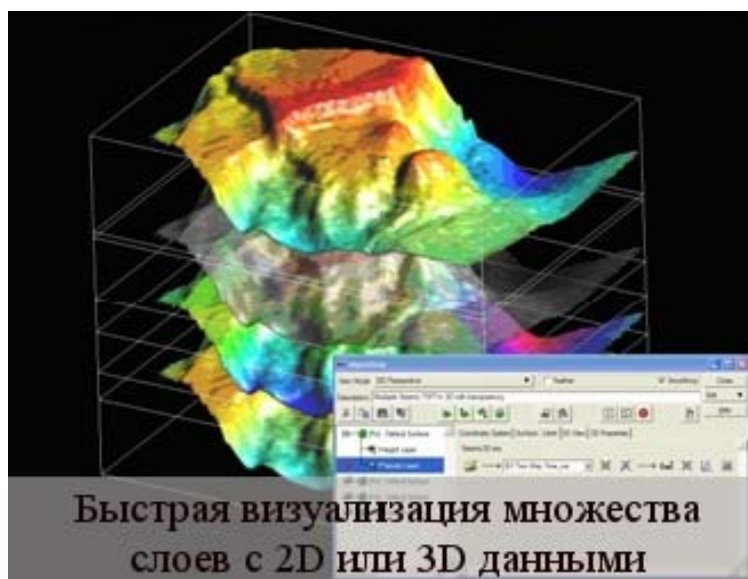


Рис. 1.11 – Визуализация множества слоев

Система ERDAS ER Mapper поставляется в виде единого комплекса и является *открытой* для использования.

### **1.1.3. Области применения данных дистанционного зондирования**

Области применения космических снимков можно разделить на пять общих категорий:

1. Использование снимка в качестве простейшей карты или основы, на которую можно наносить данные из других источников в отсутствие более точных карт, отображающих современную обстановку.

2. Определение пространственных границ и структуры объектов для определения их размеров и измерения соответствующих площадей.

3. Инвентаризация пространственных объектов и оценка состояния определенной территории.

4. Оценка состояния территории.

5. Количественная оценка некоторых свойств земной поверхности.

Дистанционное зондирование является перспективным методом формирования баз данных, пространственное, спектральное и временное разрешение которых будет достаточным для решения задач рационального использования природных ресурсов.

Ресурсы Земли не бесконечны, и поскольку их эксплуатация

увеличивается по мере роста количества и уровня жизни населения, все более насущной становится задача их разумного и бережливого использования. В этом отношении дистанционное зондирование является эффективным методом инвентаризации природных ресурсов и мониторинга их состояния.

Поскольку дистанционное зондирование позволяет получать информацию о любых областях Земли, включая поверхность морей и океанов, сферы применения этого метода действительно безграничны. Сельское и лесное хозяйство, география, геология, археология, метеорология и климатология, исследования морской среды, оценка состояния и использования водных ресурсов – вот неполный перечень сфер применения данных дистанционного зондирования.

Основой для эксплуатации природных ресурсов служит анализ информации о землепользовании и состоянии земных покровов. Помимо сбора такой информации дистанционное зондирование используют также для изучения таких природных катастроф, как землетрясения, наводнения, оползни и оседания почвы.

## **1.2. Физические основы дистанционного зондирования**

*Основу дистанционного зондирования* составляет измерение энергии электромагнитного излучения от различных источников, важнейшим из которых является Солнце. Спектр солнечного излучения содержит все длины волн, и некоторые его части чрезвычайно важны для человека. К ним относится диапазон видимого света и ультрафиолетовый диапазон, излучение в котором может быть опасно для человеческой кожи.

Множество сенсоров, которые используются в дистанционном зондировании, предназначены для измерения параметров отраженного солнечного света, регистрации собственного излучения Земли либо сами являются источниками излучения. Рассмотрим характеристики электромагнитного излучения (ЭМИ), источники ЭМИ, состав спектра ЭМИ, особенности взаимодействия ЭМИ с атмосферой и земной поверхностью.

### **1.2.1. Электромагнитный спектр и его характеристики**

#### **Общие сведения**

Электромагнитное излучение можно представить в виде волн или в виде потока фотонов – частиц, которые несут определенную долю энергии.

*В волновой модели* электромагнитное излучение распространяется в виде синусоидальных волн, которые характеризуются двумя взаимно перпендикулярными векторами (рис. 1.12): вектором электрического поля  $E$  и вектором магнитного поля  $M$ .

Направления колебаний обоих полей перпендикулярны направлению распространения волны. Скорость распространения ЭМИ равна скорости света  $c = 299\,790\,000$  м/с (округленное значение –  $3 \cdot 10^8$  м/с).

*Длина волны* – это расстояние между двумя последовательными волновыми гребнями. Единицы измерения: метр, микрометр ( $1 \text{ мкм} = 10^6 \text{ м}$ ), нанометр ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

Круговая частота  $\nu$  – количество циклов волновых колебаний в фиксированной точке пространства за определенный интервал времени. Частоту обычно измеряют в герцах (Гц). Один герц – это частота, равная одному циклу колебаний в секунду.

Поскольку скорость света – величина постоянная, длина волны и частота обратно пропорциональны друг другу:

$$\nu = c/\lambda \quad (1.1)$$

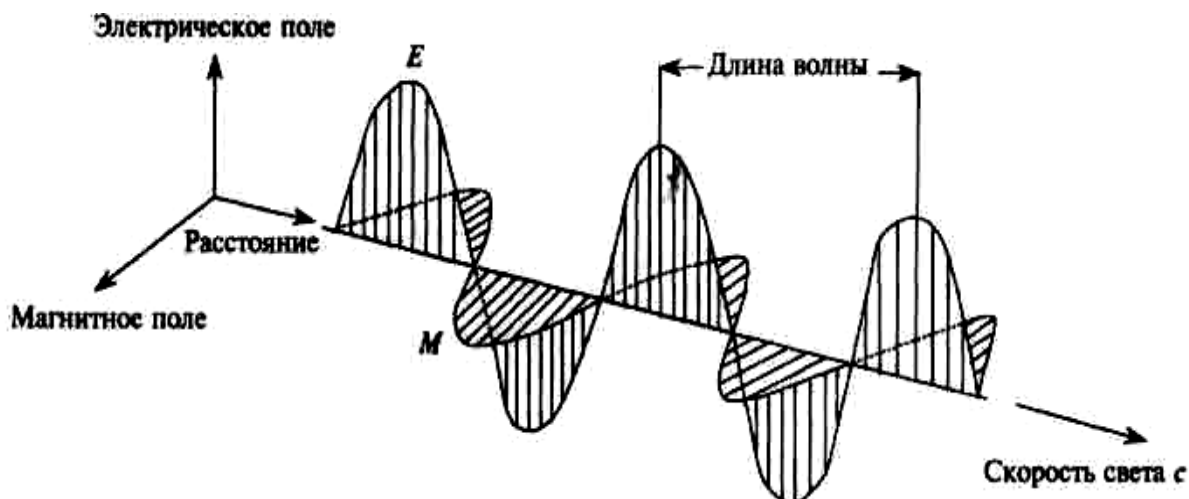


Рис. 1.12 – Волновая модель электромагнитного излучения

В корпускулярной теории излучение моделируется потоком фотонов. Этот подход полезен при определении количества энергии, измеряемой многозональным сенсором. При заданной длине волны энергия фотона  $Q$  определяется как

$$Q = h \nu = h c/\lambda, \quad (1.2)$$

где  $h$  – постоянная Планка ( $6,6262 \times 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ ).

Согласно (1.2), энергия фотона уменьшается с увеличением длины волны. Наибольшей энергией обладает гамма-излучение (длина волны около  $10^{-9} \text{ м}$ ), а наименьшей – радиоволны (длина волны более  $1 \text{ м}$ ).

### Характеристики электромагнитного спектра

Любое тело, температура которого выше абсолютного нуля ( $0 \text{ К}$ ), является источником электромагнитного излучения, поскольку его молекулы находятся в возбужденном состоянии, которое отличается от состояния полного покоя. Тело, которое способно полностью поглощать все падающее на него электромагнитное излучение, а затем заново его испускать, называют *абсолютно черным телом*. У абсолютно черного тела излучательная ( $e$ ) и поглощательная ( $a$ ) способности равны единице.

Количество излучаемой объектом энергии зависит от его абсолютной температуры и излучательной способности и является функцией длины волны. Излучательные свойства реальных тел по отношению к абсолютно черному телу характеризуют излучательной

способностью. Поскольку абсолютно черных тел в природе не существует, излучательная способность природных объектов меньше единицы. Только часть полученной энергии (обычно около 80–98%) возвращается такими объектами в виде излучения, а остальная ее часть полностью ими поглощается. Все тела при температуре выше абсолютного нуля излучают электромагнитные волны, которые могут иметь разную длину волны. Диапазон длин волн от гамма-излучения до радиоволн называют электромагнитным спектром (рис. 1.13).

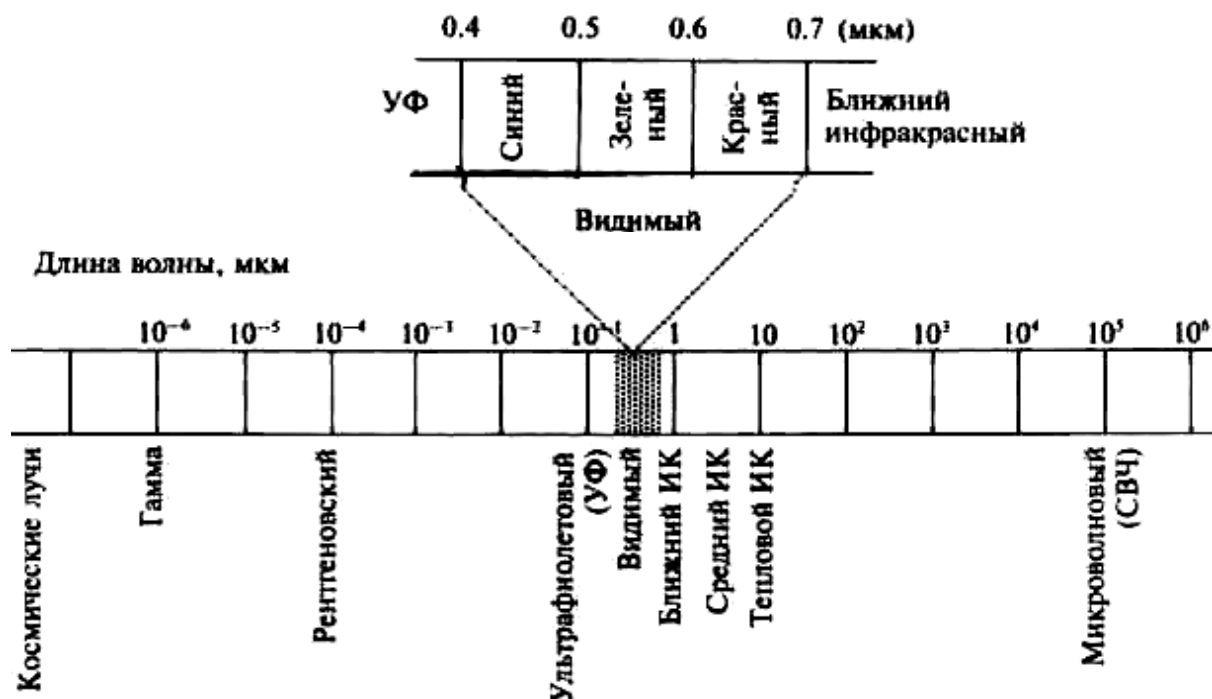


Рис. 1.13 – Диапазоны электромагнитного спектра

В дистанционном зондировании используют несколько диапазонов электромагнитного спектра. Часть спектра, в которой применимы законы оптики, называют оптическим диапазоном.

К оптическому диапазону относится рентгеновское излучение (0,002 мкм), видимый свет и инфракрасное излучение вплоть до дальней зоны (1000 мкм). Наименьшие длины волн, которые используют при дистанционном зондировании, относятся к ультрафиолетовой части спектра, расположенной непосредственно за фиолетовой зоной видимого диапазона. Некоторые породы земной поверхности, в частности основные породы и минералы, испускают под действием ультрафиолетового излучения видимый свет. Диапазон длин волн от 1 мм до 1 м называют микроволновым или СВЧ-диапазоном.

Видимый (световой) диапазон занимает относительно небольшую часть электромагнитного спектра. Это единственный диапазон, в котором применимо понятие цвета. Основными цветами принято считать синий, зеленый и красный (рис. 1.13).

Наибольшие длины волн, которые используют при дистанционном зондировании, принадлежат тепловому инфракрасному и микроволновому

диапазнам. Тепловое инфракрасное излучение содержит информацию о температуре поверхности, которая может быть связана, например, с минеральным составом пород или с определенной растительностью. Микроволновый диапазон используют для получения информации о шероховатости и других свойствах поверхности, например о содержании влаги.

## 1.2.2. Взаимодействие излучения с атмосферой

### Типы взаимодействия излучения с атмосферой

Основным источником электромагнитного излучения является Солнце. Прежде чем солнечное излучение достигнет Земли, оно должно пройти через атмосферу. Выделяют три основных типа взаимодействия излучения с атмосферой: поглощение, перенос и рассеивание (рис. 1.14).



Рис. 1.14 – Взаимодействие излучения с атмосферой

Излучение, прошедшее через атмосферу, отражается или поглощается земной поверхностью.

### Поглощение и перенос излучения в атмосфере

При распространении электромагнитного излучения через атмосферу оно частично поглощается молекулами различных газов. Наибольшей способностью к поглощению солнечного излучения обладают озон ( $O_3$ ), пары воды ( $H_2O$ ) и углекислый газ ( $CO_2$ ). На рис. 1.15 показана кривая прозрачности атмосферы в диапазоне длин волн от 0 до 20 мкм.

Примерно половина спектрального диапазона является бесполезной с точки зрения дистанционного зондирования земной поверхности, поскольку соответствующее излучение не может пройти через атмосферу.

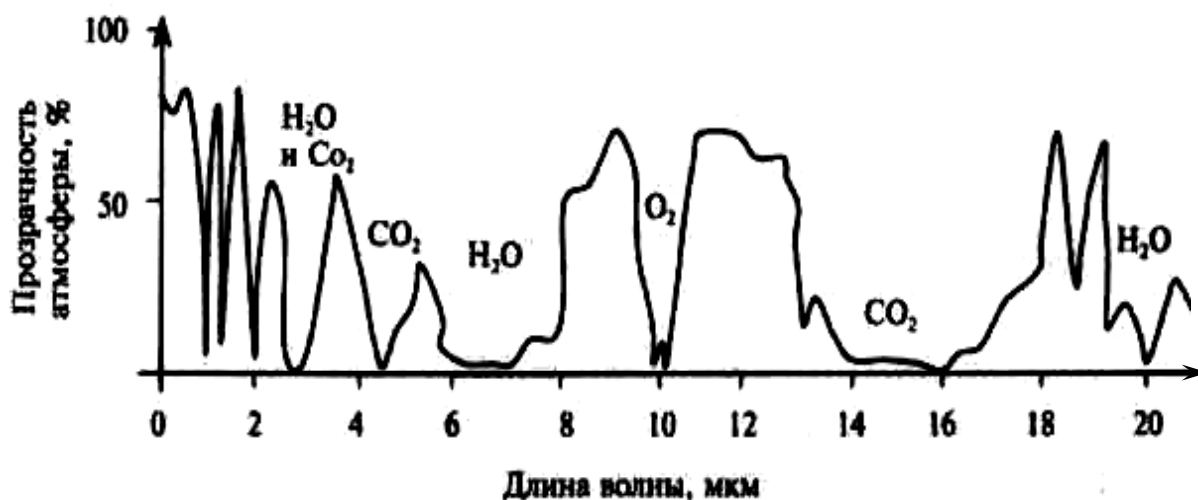


Рис. 1.15 – Окна прозрачности атмосферы

Для дистанционного зондирования используют только те диапазоны длин волн, которые лежат вне основных интервалов поглощения. Такие диапазоны называются окнами прозрачности атмосферы. К ним относятся окно прозрачности в видимом и инфракрасном диапазоне от 0,4 до 2,0 мкм. В этом диапазоне «работают» оптические сенсоры и человеческое зрение, а также три окна прозрачности в тепловом инфракрасном диапазоне: два узких окна вблизи 3 и 5 мкм и одно относительно широкое в интервале приблизительно от 8 до 14 мкм.

Из-за молекул воды в атмосфере наиболее сильное поглощение наблюдается при длинах волн в диапазоне от 33 мкм до 1 мм. Атмосфера почти не пропускает излучения. Еще одним более или менее прозрачным диапазоном является микроволновый диапазон, соответствующий длинам волн больше 1 мм.

#### **Рассеивание излучения**

Причиной рассеивания является изменение направления распространения электромагнитных волн из-за их взаимодействия с молекулами газов и присутствующих в атмосфере частиц. Величина рассеивания зависит от длины волны электромагнитного излучения, количества частиц и концентрации атмосферных газов, а также от пути распространения через атмосферу. В диапазоне видимого света доля рассеянного излучения при регистрации сенсором составляет от 100% при сплошной облачности до 5% при абсолютно ясном небе.

Выделяют три типа рассеивания в атмосфере: рассеивание Релея, рассеивание Ми и неселективное рассеивание.

**Рассеивание Релея.** Преобладает при взаимодействии электромагнитного излучения с частицами, размер которых меньше длины волны падающего света. Примеры таких объектов: частицы пыли, молекулы азота ( $N_2$ ) и кислорода ( $O_2$ ). Величина рассеивания Релея обратно пропорциональна длине волны (чем меньше длина волны, тем сильнее рассеивание). При дистанционном зондировании с помощью спутников



основным видом рассеивания является рассеивания Релея.

В отсутствие рассеивания небо было бы черным. В дневное время солнечные лучи проходят через атмосферу по кратчайшему пути. Благодаря рассеиванию Релея человек видит синее небо, поскольку синий свет обладает наименьшей длиной волны, которую может наблюдать человеческий глаз. На закате и восходе солнечные лучи проходят более длинный путь через атмосферу. Коротковолновая часть излучения успевает рассеяться, и поверхности Земли достигают только волны с относительно большой длиной волны. В результате небо окрашивается в оранжевый или красный цвет. Вызванное им искажение спектральных характеристик отраженного света по сравнению с измерениями вблизи земной поверхности приводит к тому, что интенсивность коротковолнового излучения оказывается завышенной.

Рассеивания Релея является причиной снижения контрастности снимков. Оно отрицательно влияет на возможность дешифрирования цифровых снимков, полученных с помощью сканирующих систем спутников, а также ограничивает возможности классификации объектов.

**Рассеивание Ми.** Возникает, если длина волны падающего излучения сравнима с размерами частиц. Наиболее важной причиной рассеивания *Ми* являются аэрозоли, представляющие собой смесь газов, паров воды и частиц пыли. Как правило, рассеивание *Ми* возникает в нижних слоях атмосферы, где крупные частицы встречаются чаще, и доминирует в условиях сплошной облачности. Рассеивание проявляется в нескольких спектральных диапазонах: от ближнего ультрафиолетового диапазона до ближнего инфракрасного диапазона.

**Неселективное рассеивание.** Возникает при условии, что размер частиц существенно больше длины волны излучения. К таким частицам относятся капли воды и крупные частицы пыли. Неселективное рассеивание не зависит от длины волны и наиболее отчетливо проявляется при наличии облаков, содержащих водные капли. Поскольку излучение с разной длиной волны рассеивается одинаково, облака выглядят белыми. В условиях сплошной облачности излучение в оптическом диапазоне не проникает через атмосферу.

### 1.2.3. Особенности спектральных характеристик объектов

Различают три основных типа взаимодействия падающего электромагнитного излучения с объектами на поверхности Земли: отражение, поглощение и пропускание (рис. 2.4).

Соотношение, связывающее между собой три компонента излучения после его взаимодействия с поверхностью, можно получить из закона сохранения энергии. Учитывая, что все компоненты являются функциями длины волны, запишем это соотношение в следующем виде:

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (1.3)$$

где  $E_I(\lambda)$  — энергия падающего излучения,

$E_R(\lambda)$  — энергия отраженного излучения,

$E_A(\lambda)$  — поглощенная энергия,

$E_T(\lambda)$  — энергия излучения, прошедшего через вещество.

Свойства отраженного, поглощенного и пропущенного излучения различаются для разных объектов на поверхности Земли и зависят от вещества объекта и физических условий, в которых он находится. Эти различия и позволяют идентифицировать объекты на снимке. Даже у объектов одного типа соотношение между поглощенным, отраженным и пропущенным излучением зависит от длины волны. В результате, два объекта могут оказаться неразличимыми в одном спектральном диапазоне, но хорошо различимыми в другом. В видимой части спектра эти различия воспринимаются как изменения *цвета*. Объекты кажутся синими, когда отражают большую часть излучения в синей части спектра, и зелеными, когда максимум отражательной способности расположен в зеленом спектральном диапазоне. То же самое относится и к любому другому цвету. Амплитудные вариации спектра отраженного излучения используют для дешифрирования различных объектов на снимке.

Поскольку множество систем дистанционного зондирования работает в тех спектральных диапазонах, где доминирует отраженное излучение, отражательные свойства различных объектов играют очень важную роль при их идентификации. В этой связи равенство (2.3) полезно записать в виде соотношения (2.4), в котором энергия отраженного излучения полагается равной энергии падающего излучения за вычетом либо поглощенной энергии, либо энергии пропущенного излучения:

$$E_R(\lambda) = E_I(\lambda) - [E_A(\lambda) + E_T(\lambda)] \quad (1.4)$$

Важно учитывать *геометрические характеристики отражения*, которые в основном зависят от неровности поверхности. На плоской поверхности наблюдается зеркальное отражение, при котором угол отражения равен углу падения. На неровной поверхности возникает диффузное отражение, при котором падающее излучение отражается равномерно во всех направлениях. В реальной ситуации отражение носит смешанный характер. Различные виды отражения показаны на рис. 1.16.

Категория поверхности зависит от отношения размеров ее неровностей к длине волны падающего излучения.

Например, песчаный пляж в видимом диапазоне является неровной поверхностью, но в длинноволновой части электромагнитного спектра он ведет себя как плоская поверхность.

Таким образом, если длина волны падающего излучения много меньше вариаций высоты поверхности или размеров слагающих ее частиц, то отражение будет диффузным.

В отличие от зеркального отражения, спектр излучения, образованного при диффузном отражении, содержит информацию о *цвете* поверхности. Поэтому измерение диффузных отражательных характеристик различных территорий является важной составляющей дистанционного зондирования.



Рис. 1.16 – Зеркальное и диффузное отражение

Отражательные свойства земной поверхности можно охарактеризовать, измерив относительную долю энергии отраженного излучения, как функцию  $\rho_\lambda$  длины волны. Эта функция называется *спектральной отражательной способностью*. Значение  $\rho_\lambda$  определяется по формуле:

$$\rho_\lambda = E_R(\lambda) / E_I(\lambda) \cdot 100. \quad (1.5)$$

где  $E_R(\lambda)$  – энергия отраженного излучения с длиной волны  $\lambda$ .

$E_I(\lambda)$  – энергия падающего излучения с длиной волны  $\lambda$ .

График зависимости спектральной отражательной способности объекта от длины волны называется *кривой спектральной отражательной способности*. На рис. 1.17 показаны усредненные кривые спектральной отражательной способности лиственных и хвойных деревьев.

Каждая из этих кривых представляет собой огибающую линию некоторого набора значений, поскольку значения спектральной отражательной способности у разных видов лиственных и хвойных деревьев, так же как и у отдельных деревьев одного и того же вида, никогда полностью не совпадают.

Таким образом, график зависимости спектральной отражательной способности объекта от длины волны позволяет изучить спектральные характеристики объекта и имеет большое значение при выборе спектрального диапазона, в котором будет проводиться сбор данных дистанционного зондирования для прикладной задачи.

Кривые спектрального излучения характеризует *освещенность* объекта, а энергия отраженного излучения — его *яркость*. Каждый объект обладает собственной кривой спектральной отражательной способности. Она определяется как отношение энергий отраженного и падающего излучения и является функцией длины волны. С помощью такой кривой можно получить общую оценку спектральной отражательной способности объекта в некотором относительно широком диапазоне (например, от 400 до 480 нм), повышая надежность измерений. Кривые спектральной отражательной способности строят для оптической части электромагнитного спектра (до 2,5 мкм).

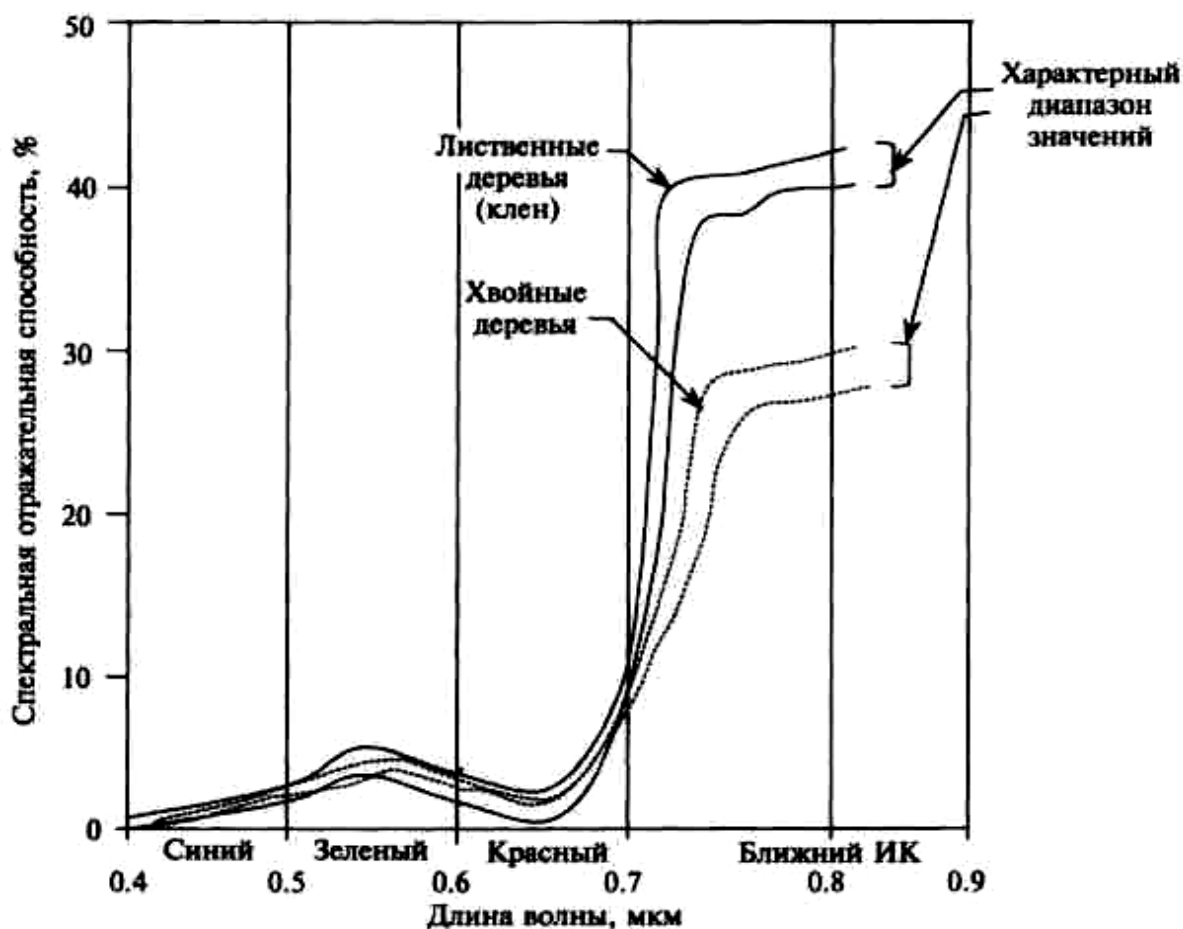


Рис. 1.17 – Кривые спектральной отражательной способности древесной растительности

Отражательную способность можно измерить с помощью спектрометра в лабораторных или полевых условиях.

#### **Растительный покров**

Кривая спектральной отражательной способности зеленой растительности имеет весьма характерный вид, ее поведение сильно изменяется в зависимости от длины волны (рис. 1.18).

Некоторые виды деревьев вырабатывают в больших количествах антоциан и из-за этого имеют красный цвет. При внимательном изучении влияния различных пигментов на отражательную способность растительного покрова оказывается, что в отличие от видимого диапазона, в котором наблюдаются значительные различия, в ближнем и среднем инфракрасном диапазонах этих различий почти не существует.

В ближней инфракрасной части спектра отражательная способность увеличивается при переходе через пороговое значение 0,7 мкм. В этом диапазоне зеленый растительный покров характеризуется высокой отражательной способностью, высокой прозрачностью и низким поглощением. Значения коэффициентов отражения и прозрачности достигают величины порядка 45—50%, а доля поглощенного излучения составляет всего около 5%. Важную роль играет также структура листьев.

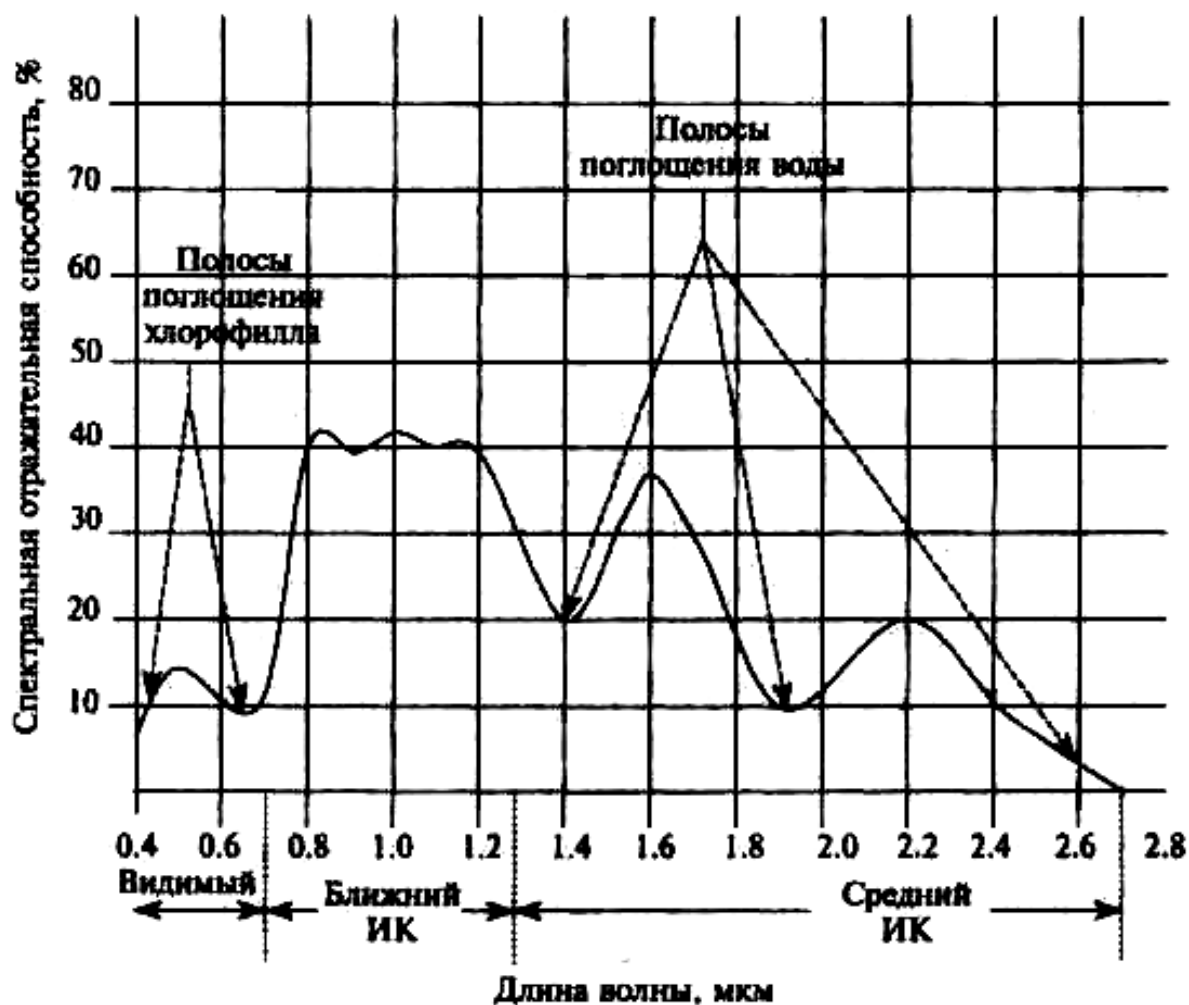


Рис. 1.18 – Кривая спектральной отражательной способности зеленого растительного покрова

Разница в отражательной способности одноярусной и многоярусной древесной растительности может достигать 85%. Причина этого проста: дополнительное излучение, прошедшее через первый ярус отражается от второго, а затем, частично, еще раз проходит через первый ярус. Этот эффект особенно заметен при сравнении отражательной способности в центре исследуемого массива и на его краю, где нет многоярусности.

В среднем инфракрасном диапазоне отчетливо заметен эффект, связанный с окнами поглощения воды, центры которых соответствуют длинам волн 1,4; 1,9 и 2,7 мкм. Существует еще два окна поглощения воды вблизи 0,9 и 1,1 мкм, но эти окна очень узкие и практически не влияют на кривую спектральной отражательной способности.

Пики спектральной отражательной способности в среднем инфракрасном диапазоне приходятся на 1,6 и 2,2 мкм. Чем меньше влажность листьев, тем выше ее отражательная способность.

Отчетливые различия отражательной способности в видимом, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах. В видимой части спектра на отражательную способность наибольшее влияние оказывает пигментация листьев, в ближнем инфракрасном диапазоне – структура

растительности, а в среднем инфракрасном диапазоне – *влажность*.

### Почвы

Кривые спектральной отражательной способности большинства почв представлены на рис. 1.19.

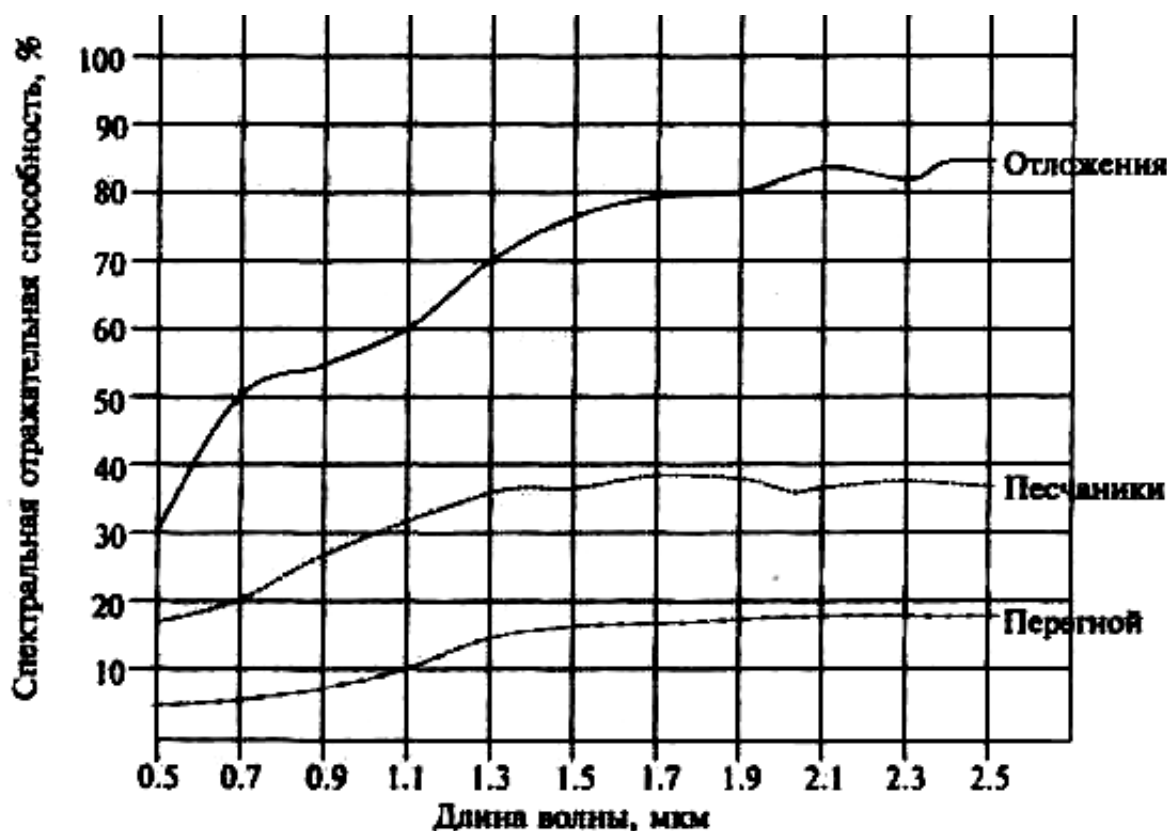


Рис. 1.19 – Кривые спектральной отражательной способности некоторых почв

Наиболее заметным свойством излучения, отраженного от сухих почв, является, как правило, возрастание значений коэффициента отражения с увеличением длины волны, особенно в видимом и близком инфракрасном диапазонах. Взаимодействие излучения с почвой сводится к тому, что падающее излучение либо отражается, либо поглощается.

Формы кривых спектральной отражательной способности почв схожи между собой, но амплитудные характеристики этих кривых могут заметно различаться в зависимости от свойств почвы. На спектральную отражательную способность почвенного покрова могут оказать заметное влияние такие факторы, как влажность, количество органических веществ, окиси железа, относительная доля песчаников и отложений, а также неровность поверхности.

Первая характеристика почвы, требующая изучения, – это ее гранулометрический состав, который определяется относительным содержанием песка, отложений и глины. Характерный диаметр частиц глины – 0,002 мм, отложений – от 0,002 до 0,005 мм, песка – от 0,05 до 2,0 мм. Глина содержит больше частиц, чем песок. При наличии влаги каждая

частица почвы покрыта тонким слоем воды, который занимает некоторое пространство между отдельными частицами. Типичные кривые спектральной отражательной способности песчаников при различных уровнях содержания влаги показаны на рис. 1.20.

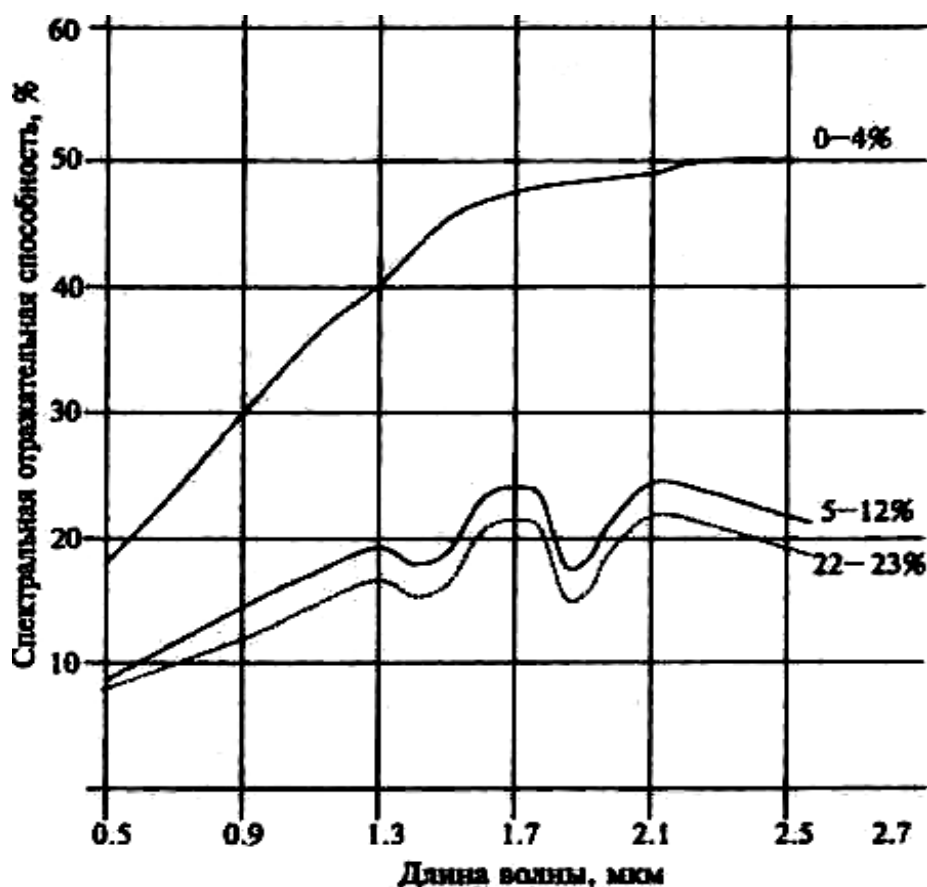


Рис. 1.20 – Зависимость спектральной отражательной способности песчаников при различных уровнях содержания влаги

Отражательная способность сухих песчаников остается почти постоянной, в то время как кривые спектральной отражательной способности влажных песчаников имеют заметные провалы при длинах волн 1,4; 1,9 и 2,3 мкм. В видимой части спектра песчаников наблюдается заметное снижение отражательной способности влажных почв по сравнению с сухими.

Спектральная яркость почв во многом зависит от размера частиц почвы. С уменьшением размера частиц поверхность почвы становится более гладкой и доля отраженного излучения возрастает.

На отражательную способность почв большое влияние оказывает содержание органических веществ, которое характеризует количество азота в почве. Для большинства климатических зон относительное содержание органических веществ в почве колеблется от 0,5 до 5%. При содержании органических веществ более 5% почва обычно имеет темно-коричневый или черный цвет, а при меньшем содержании – светло-коричневый или светло-серый. При этом в видимом диапазоне спектра

зависимость отражательной способности почвы от содержания органических веществ является нелинейной.

Спектральная отражательная способность почвы в значительной степени зависит от присутствия в ней оксида железа, который может вызвать существенное снижение отражательной способности, по крайней мере, в видимом диапазоне. Удаление из почвы этого элемента приводит к заметному увеличению отражательной способности в диапазоне от 0,5 до 1,1 мкм, но мало влияет на отражательную способность при длине волны более 1,1 мкм. Такой же эффект в тех же спектральных диапазонах наблюдается и при удалении из почвы органических веществ.

Основные выводы о спектральных характеристиках почв:

- увеличение влажности почвы ведет к снижению отражательной способности ее во всем спектральном диапазоне отраженного излучения.
- отражательная способность грунта увеличивается с уменьшением размера слагающих его частиц.
- при уменьшении неровности поверхности увеличивается ее отражательная способность.
- отражательная способность почвы уменьшается с увеличением содержания в ней органических веществ.
- увеличение содержания оксида железа ведет к снижению отражательной способности.

### **Водные поверхности**

По сравнению с растительными покровами и почвами, отражательная способность водных поверхностей относительно низка. Если растительный покров может отражать до 50% падающего излучения, а почвы до 30—40%, то доля излучения, отраженного водной поверхностью, не превышает 10%. Вода отражает электромагнитное излучение в видимом и близком инфракрасном диапазонах. При длинах волн больше 1200 мкм все падающее излучение поглощается.

Наибольшей отражательной способностью обладает мутная водная поверхность, а пик отражения водоемов с большим количеством растительности приходится на зеленую часть спектра.

## **1.3. Активные и пассивные методы съемки**

### **1.3.1. Общие сведения о спутниковых системах съемки**

Спутниковая система съемки состоит из сканера с сенсорами (датчиками) и спутниковой платформы. *Сканер* – это система сбора данных в целом. Система сканера включает набор сенсоров и детекторы.

*Сенсор* – это устройство, выполняющее сбор информации и преобразование ее в сигнал, удобный для представления. Сенсор состоит из детекторов. *Детектор* – это устройство, которое фиксирует электромагнитное излучение. Например, система сенсоров сканера Landsat TM содержит по 16 детекторов для каждого диапазона длин волн (за



исключением диапазона 6 имеющего 4 детектора).

*Спектральное разрешение датчика* – это диапазон длин волн сигнала, который способен фиксировать сенсор съемочной системы.

В зависимости от набора сенсоров, имеющихся на борту спутника, данные могут быть представлены в различных диапазонах. По отношению к источнику энергии сенсоры делятся на пассивные и активные системы.

Космические платформы (искусственные спутники Земли) предназначены для периодической съемки изучаемой территории. Съемка производится в широком спектральном диапазоне и с различным пространственным разрешением от долей метра до нескольких километров. Орбиты спутников должны соответствовать возможностям сенсоров и целям запуска. Тип орбиты зависит от ее высоты и ориентации относительно поверхности Земли, а также от направления движения спутника по орбите.

Если орбита спутника расположена в экваториальной плоскости на высоте около 36000 км, а направление его движения совпадает с направлением вращения Земли, то положение такого спутника относительно земной поверхности будет постоянным. Такие спутники называют *геостационарными*. Они идеально подходят для метеорологических наблюдений и обеспечения связи.

*Субполярные орбиты*, у которых остается постоянным угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце (около  $90^\circ$ ), называют *солнечно-синхронными* (рис. 1.21).

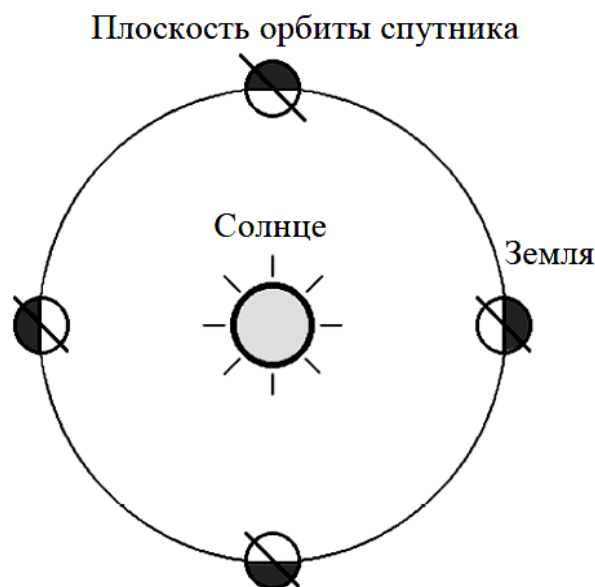


Рис. 1.21 – Движение спутника на солнечно-синхронной орбите

Спутники на солнечно-синхронных орбитах используют для периодической сезонной съемки объектов при одинаковых условиях освещения и одном и том же местном времени. Благодаря постоянству условий съемки отпадает необходимость в коррекции снимков по освещенности и упрощается анализ изменений наблюдаемых свойств объектов во времени. Спутники используют для картографирования

территорий и решения многих задач мониторинга окружающей среды.

В дистанционном зондировании применяются активные и пассивные методы съемки (рис. 1.22).

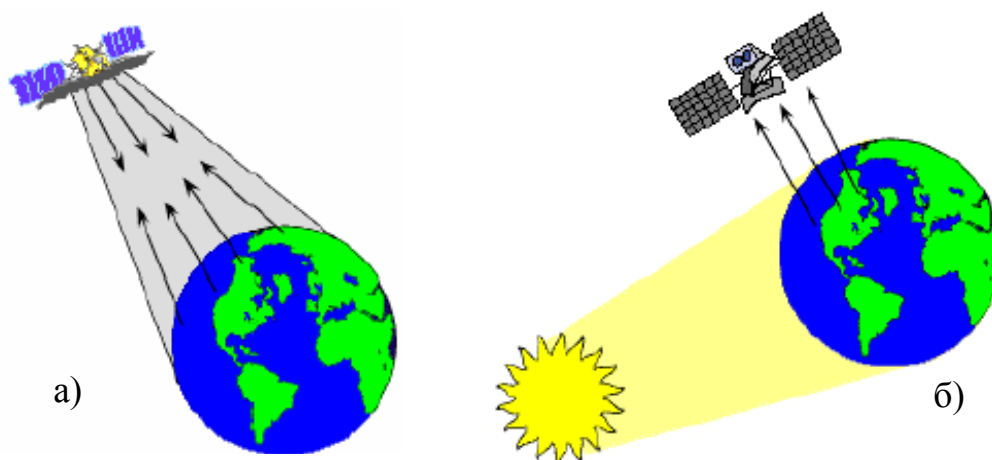


Рис. 1.22 – Активный (а) и пассивный (б) методы съемки

При использовании активных методов съемки спутник посылает на Землю сигнал собственного источника энергии (лазера, радиолокационного передатчика) и регистрирует его отражение (рис. 1.22, а). Пассивные методы съемки осуществляют регистрацию отраженной от поверхности объектов солнечной энергии либо теплового излучения Земли (рис. 1.22, б).

### **1.3.2. Пассивные системы съемки. Характеристики сканера и связь их с масштабом карты**

#### **Пассивные системы съемки**

Пассивные системы съемки служат для измерения характеристик излучения внешнего источника – обычно Солнца. Регистрироваться может собственное и отраженное излучение объектов. Например, нагретые на солнце скальные породы излучают инфракрасном (тепловом) диапазоне. Водный объект на земной поверхности отражает солнечные лучи в видимом диапазоне и это отраженное излучение фиксируется аэрофотокамерой. Для этих систем не требуются внешние источники энергии.

Пассивные системы – это сканирующие оптикоэлектронные устройства. Они регистрируют отраженное солнечное или тепловое излучение от объектов, температура которых не равна абсолютному нулю.

Сканирующие оптикоэлектронные устройства появились в середине 70-х годов и являются основными поставщиками данных дистанционного зондирования при решении задач природно-ресурсного и экологического мониторинга. В оптикоэлектронных системах излучение попадает на соответствующие датчики, которые генерируют электрический сигнал, зависящий от интенсивности излучения.

Датчик реализуется на основе фотодиодов и называется *прибором с*

зарядовой связью (ПЗС). Конструктивно ПЗС представляет собой матрицу из идентичных фотодиодных элементов. Значения пикселей цифрового снимка регистрируются в результате сканирования поперек маршрута съемки (т. е. перпендикулярно направлению движения платформы) и движения самой платформы вдоль маршрута. При этом для разделения непрерывного потока данных на отдельные пиксели используется электронная система датчика. ПЗС могут быть линейными, поперечными или продольными (рис. 1.23).

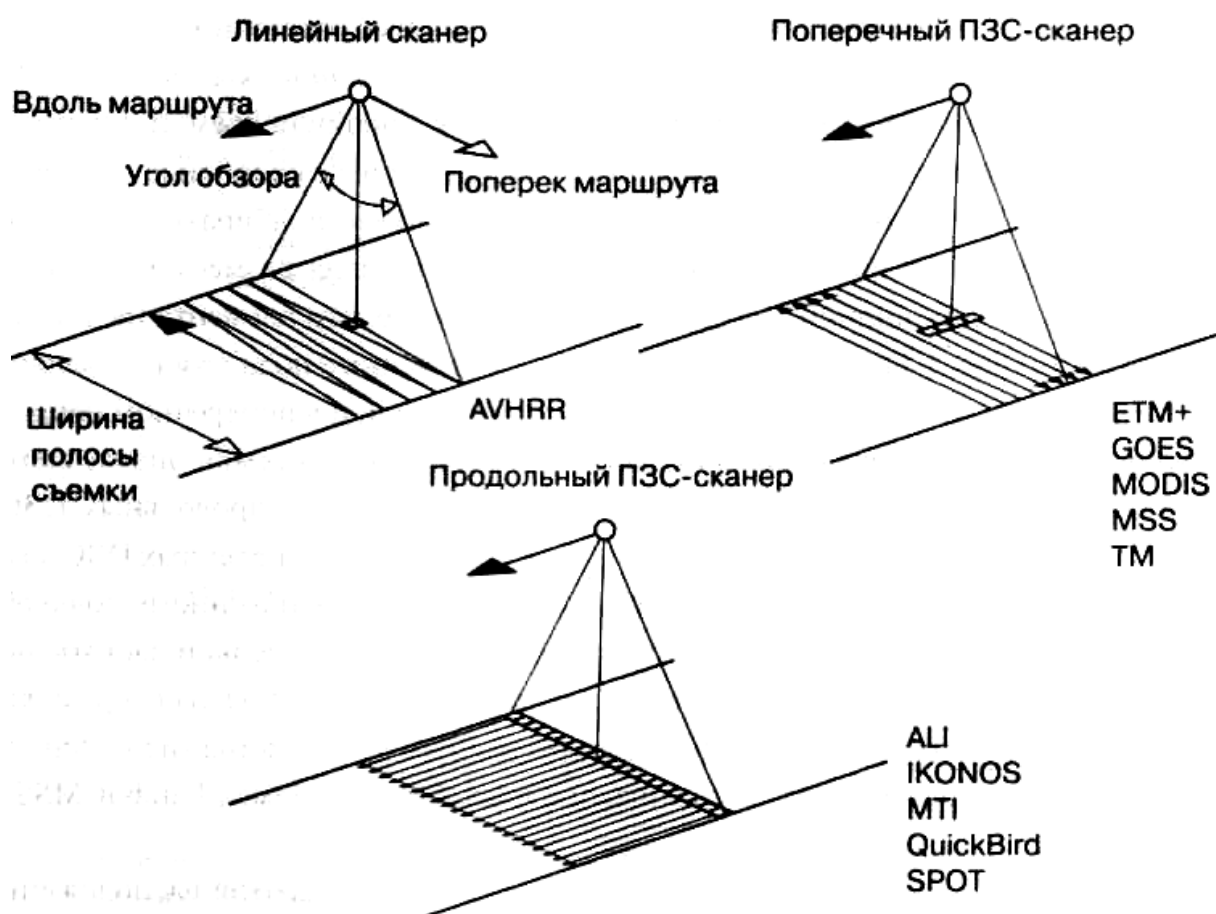


Рис. 1. 23 – Схемы формирования изображения сканерами

В линейных сканерах для съемки всей сцены используется один детекторный элемент, который как маятник, закрепленный в одной точке, движется поперек направления движения (рис.1.23,а). В фокальной плоскости системы съемки установлен объектив с точечным фотоприемным устройством. При движении спутника над Землей с выхода фотоприемного устройства снимается сигнал, пропорциональный освещенности в видимом или ближнем ИК-диапазоне того участка земной поверхности, на который в данный момент направлена ось объектива. На практике сканер неподвижен, а вращается зеркало, отражение от которого через объектив попадает в фотоприемное устройство. Сканерная информация в цифровой форме передается со спутника в реальном времени или в записи на бортовой магнитофон. На Земле полученная

информация обрабатывается на ЭВМ.

В поперечных ПЗС-сканерах, таких как Landsat ТМ, используется линейка детекторов, расположенных вдоль маршрута съемки (рис. 1.24). В результате при каждом цикле движения зеркала все детекторные элементы осуществляют параллельное сканирование земной поверхности.

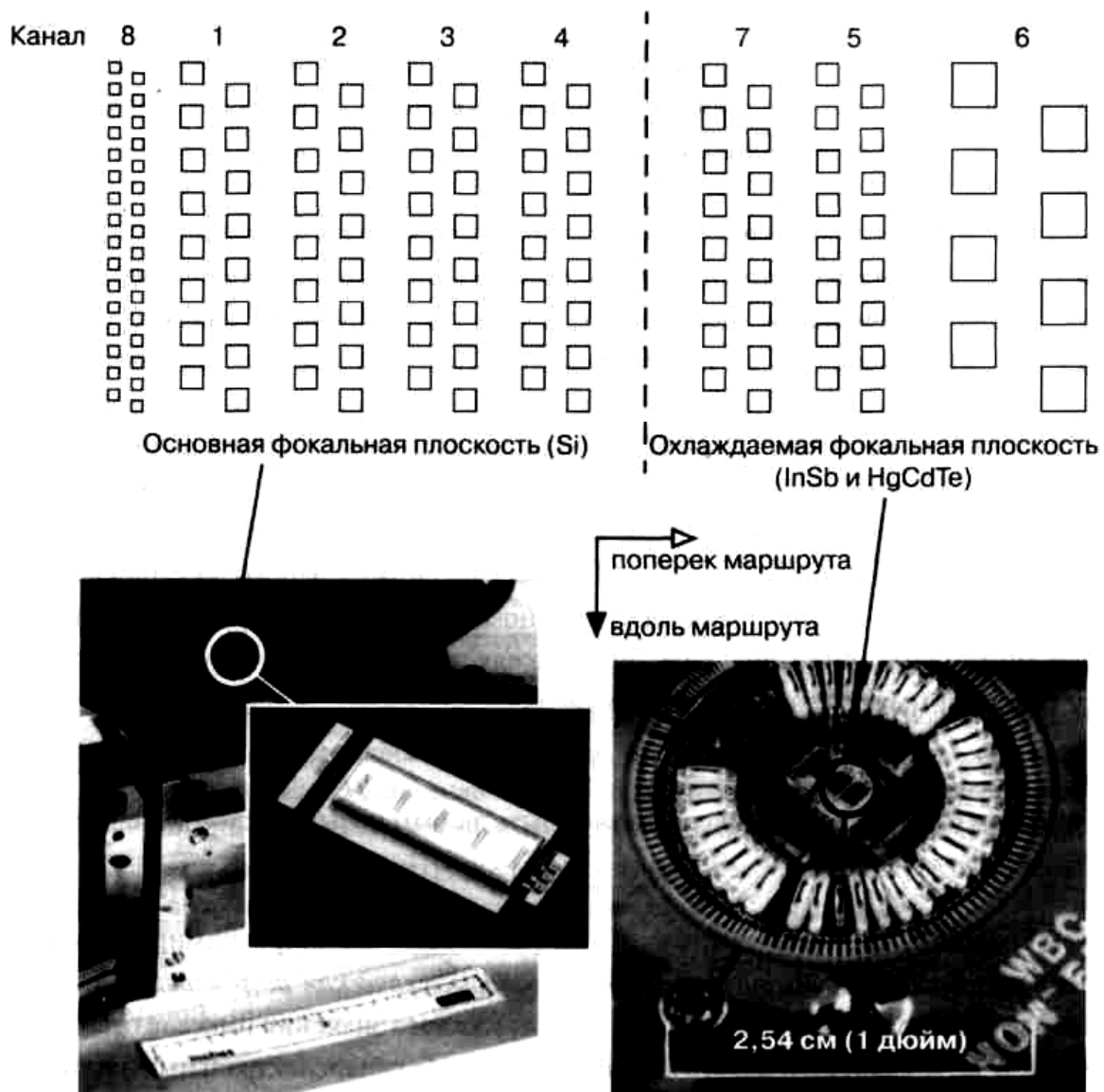


Рис. 1.24 – Расположение детекторных элементов аппаратуры ETM+ в фокальной плоскости

При расположении детекторных элементов учитываются скорость движения платформы, частота вращения зеркала, различия во временных характеристиках регистрации данных в разных спектральных диапазонах и для разных пикселей, а также необходимость физически разделять детекторные элементы разных спектральных каналов.

Установленный на спутнике Landsat – 7 радиометр ETM+ (рис. 1.24) является усовершенствованным вариантом сканеров ТМ. В основной фокальной плоскости расположены кремниевые детекторы. Они

используются для панхроматической съемки (разрешение 10 м), а также для съемки в зонах видимого и ближнего инфракрасного спектра (разрешение 30 м). В охлаждаемой фокальной плоскости размещены детекторы на основе антимонида индия (InSb) для съемки в коротковолновом ИК-диапазоне (разрешение 30 м) и детекторы на основе теллурида ртути и кадмия (HgCdTe) для съемки в тепловом ИК-диапазоне (разрешение 60 м).

Сканирующее зеркало детектора вращается в поперечном направлении. Сбор данных ведется во всех каналах одновременно. Для коррекции временных характеристик сигнала и внесения поправок на разность фаз между пикселями используется специальная электронная схема. Размер матрицы детекторов составляет несколько миллиметров.

*Продольные ПЗС-сканеры* оснащены ПЗС-линейкой, в состав которой включают до сотен тысячи детекторов, расположенных поперек маршрута. В результате параллельное сканирование всего набора данных происходит за счет движения платформы по орбите.

### **1.3.3. Активные системы съемки**

Активные сенсоры сами являются источником излучения. К активным системам регистрации ЭМИ относятся лазерные и радиолокационные системы.

#### **Лазерные системы**

Лазерные системы (лидары) предназначены для сбора геопространственных данных по рельефу, а также по наземным объектам естественного и антропогенного происхождения.

Принцип работы лидара и основные блоки системы дистанционного лазерного зондирования земной поверхности ALTM-3100, выпускаемой канадской компанией Optech, показаны на рис. 1.25.

В качестве излучателя съемочного блока (рис. 1.25, в) используется полупроводниковый лазер, как правило, ближнего инфракрасного диапазона, работающий в импульсном режиме. Для архивации данных съемки используется блок управления (рис. 1.25, б).

Для каждого излученного импульса регистрируется время распространения от источника к объекту и обратно к приемнику, а также текущее значение угла  $\varphi$  отклонения сканирующего элемента (зеркала, призмы, оптического клина). По измеренному интервалу времени определяется наклонная дальность  $D$  от источника излучения до объекта. Значение угла  $\varphi$  используется для определения направления распространения зондирующего луча («линии визирования») в системе координат лидара, которая «жестко» связана с осями сканерного блока.

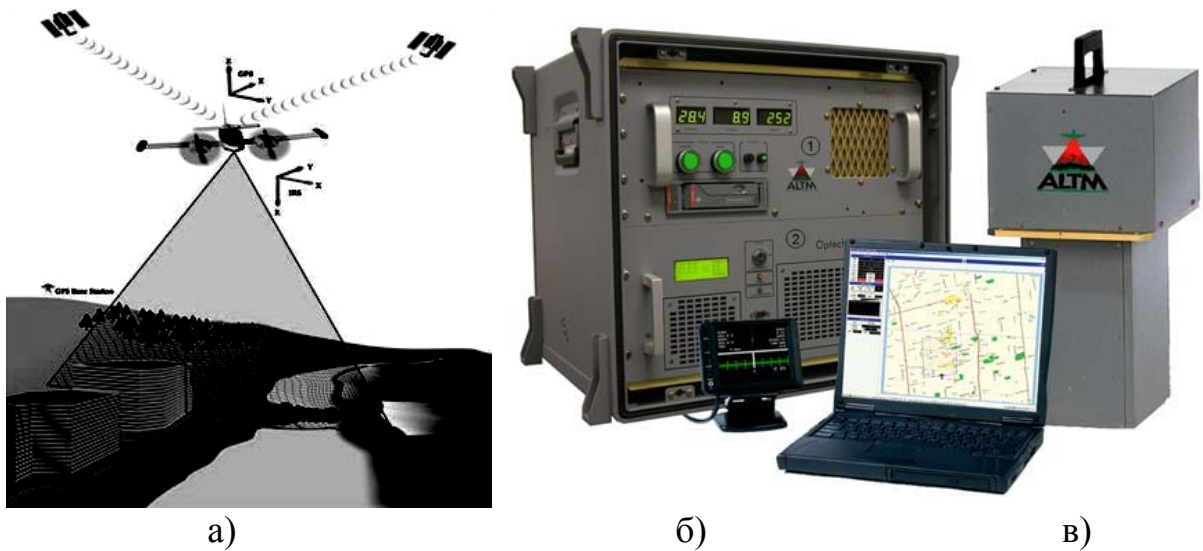


Рис. 1.25 – Принцип работы (а) и блоки (б, в) лидара

Лазерная локация применяется для создания или обновления топографических карт, планов, цифровых моделей рельефа, а также для таксации леса, мониторинга состояния береговой линии и земель. В качестве примера, на рис. 1.26 показаны основные этапы обработки аэросъемочных данных при создании топографических материалов.

Первичные лазерно-локационные данные (рис. 1.26, а), получаемые в ходе аэросъемочной фазы, классифицируются по морфологическому признаку. В результате классификации все множество лазерных точек («облако лазерных точек») разбивается на категории, например: поверхность земли, растительность, здания, линии электропередачи и др.

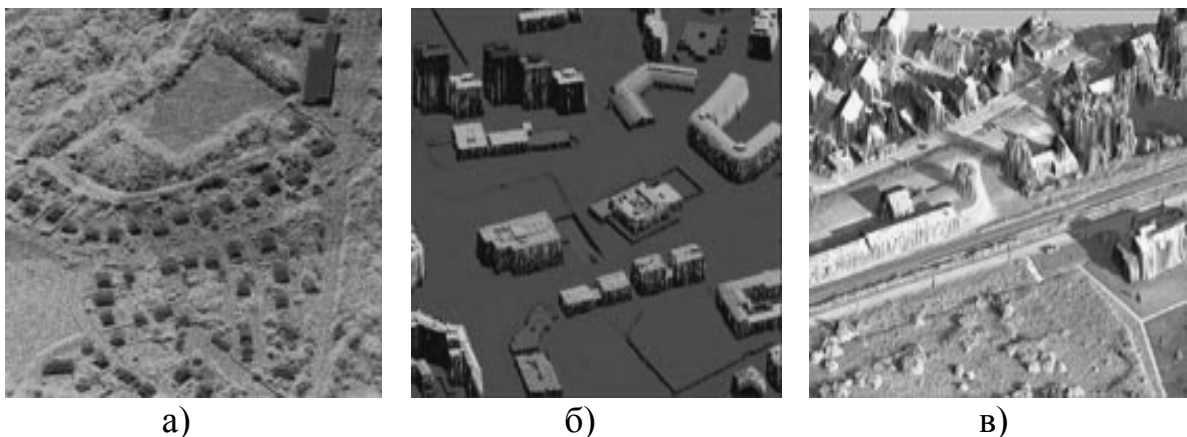


Рис. 1.26 – Этапы обработки данных лазерно-локационной съемки при создании топографических материалов

На следующем этапе (рис. 1.26, б) осуществляется переход от облака лазерных точек, представляющих сцену наблюдения, к цифровым моделям рельефа (ЦМР) или цифровым моделям местности (ЦММ) с выделением важнейших поверхностей и контуров. При этом могут использоваться как векторные, так и растровые компоненты. На третьем этапе (рис. 1.26, в) ЦМР и ЦММ используются для геопозиционирования и

ортотрансформирования цифровых снимков.

Любая лазерная система должна функционировать в одном из спектральных окон прозрачности атмосферы. Работа лидаров не зависит от времени суток – съемка одинаково эффективно может быть выполнена и днем и ночью. Однако качество лазерной съемки сильно зависит от состояния атмосферы.

### Радиолокационные системы (радиолокаторы)

Принцип активной радиолокации состоит в следующем (рис. 1.27).

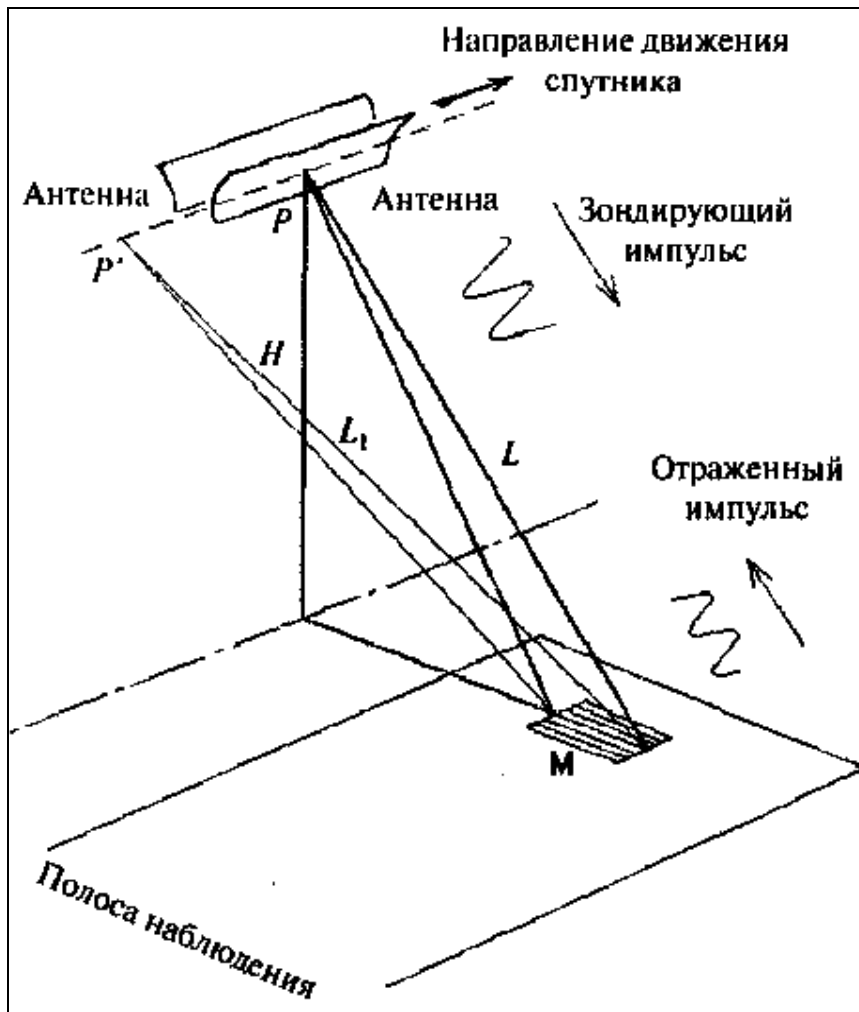


Рис. 1.27 – Принцип работы радиолокатора

На спутнике устанавливается передатчик, посылающий с помощью антенны в направлении Земли импульсы с высокочастотным заполнением. После этого наступает пауза, в течение которой производится прием отраженных сигналов.

Если некоторый объект  $M$ , расположен на расстоянии  $L$  от спутника, то отраженный от объекта сигнал вернется назад через интервал времени  $\Delta t = 2L/c$ , где  $c$  – скорость света. Множитель 2 учитывает, что сигнал проходит путь  $L$  дважды: от радиолокатора до объекта и от объекта до радиолокатора. Чем дальше объект от радиолокатора, тем больше  $\Delta t$ .

Интенсивность отраженных сигналов зависит от дальности и

различна для разных объектов, так как они отличаются размерами и электрофизическими характеристиками. Измеряя  $\Delta t$ , можно найти расстояние до объекта. Таким образом, средствами радиолокационной техники автоматически осуществляется сканирование по дальности, так как сигналы от разных объектов приходят в разное время.

Интенсивность и характер радиоэха зависят от структуры поверхности и вещественного состава природных объектов. Они передаются на снимках градациями тонов и текстурой изображения.

В зависимости от поставленной задачи сенсоры могут размещаться на наземных, воздушных или космических платформах. Наиболее точные данные об объектах получают с помощью наземных станций. В дальнейшем эту информацию можно использовать в качестве опорных данных при анализе космических снимков.

## **1.4. Характеристики сканеров и спутниковых платформ**

### **1.4.1. Характеристики сканеров**

#### **Разрешающая способность систем дистанционного зондирования**

*Пространственная разрешающая способность* является одной из важнейших характеристик систем дистанционного зондирования, которая характеризует способность сенсора различать детали в пространственных данных. *Пространственное разрешение* определяется размером наименьшего объекта, который поддается идентификации.

Разрешающая способность как аналоговых, так и цифровых систем дистанционного зондирования определяется следующими параметрами:

- пространственное разрешение,
- спектральное разрешение,
- радиометрическое разрешение и
- временное разрешение.

Понимание этих характеристик чрезвычайно важно для правильного использования данных дистанционного зондирования.

**Пространственное разрешение.** Пространственное разрешение является аналогом резкости обычного фотоснимка. Пространственное разрешение цифровых снимков, получаемых с помощью электронно-оптических сканирующих систем, определяется размером мгновенного поля обзора — линейной меры угловых величин, измеряемой в миллирадианах.

Факторами, которые влияют на пространственное разрешение, являются: высота расположения платформы, размер элементов сенсора и фокусное расстояние оптической системы.

Таким образом, разрешающая способность сенсора определяется площадкой на поверхности Земли, соответствующей одной элементарной ячейке сенсора. Снимок имеет *низкое разрешение*, если на нем видны только крупные объекты. На снимках *высокого разрешения* можно



различить мелкие детали объектов.

**Спектральное разрешение.** Спектральное разрешение характеризует способность системы дистанционного зондирования различать определенные интервалы длин волн. Чем выше спектральное разрешение, тем более узкий диапазон длин волн регистрируется определенным каналом. При оценке спектрального разрешения рассматривают две характеристики: количество каналов (диапазонов) и ширину каждого канала. Более высокого спектрального разрешения добиваются за счет увеличения количества каналов и уменьшения ширины каждого из них. На практике важно правильно подобрать характеристики спектрального разрешения так, чтобы они соответствовали типу собираемой информации.

Спектральное разрешение панхроматического снимка является крайне низким, поскольку на нем невозможно выделить сигналы с различной длиной волны, и полученное изображение характеризует отражательную способность объекта во всем видимом диапазоне. Более высокое спектральное разрешение цветных снимков объясняется тем, что цветная пленка обладает независимой чувствительностью к излучению в синем, зеленом и красном диапазонах спектра.

Системы дистанционного зондирования, регистрирующие излучение в нескольких независимых спектральных диапазонах, также могут отличаться своей спектральной разрешающей способностью.

**Радиометрическое разрешение.** Радиометрическое разрешение определяется чувствительностью сенсора к вариациям интенсивности электромагнитного излучения, т. е. наименьшей разницей в уровнях энергии излучения, которую можно зарегистрировать с помощью данной аппаратуры. Эта характеристика указывает на действительное количество полезной информации, содержащейся в изображении. Радиометрическое разрешение определяется динамическим диапазоном датчика и числом уровней дискретизации (числом бит), соответствующих переходу от яркости абсолютно «черного» к абсолютно «белому». Например, 11-ти битное радиометрическое разрешение позволяет хранить 2048 градаций яркости в каждом канале.

**Временное разрешение.** Временное разрешение определяется периодичностью сбора данных. Например, для изучения какого-то природного явления данные могут собираться ежедневно, раз в месяц, раз в три месяца или раз в год. Получение снимков одних и тех участков земной поверхности с определенной периодичностью является одной из основных областей применения дистанционного зондирования. При этом от частоты съемки зависит возможность обнаружения тех или иных изменений, которые происходят на изучаемой территории.

*Абсолютная временная разрешающая способность* системы дистанционного зондирования определяется периодом обращения спутника вокруг Земли, при котором возможна повторная съемка участка земной поверхности под тем же углом обзора. Этот период может

составлять несколько суток. Сравнивая снимки объекта, полученные в разное время, можно наблюдать изменения его характеристик.

### **Понятие пикселя**

Снимки, получаемые методами дистанционного зондирования, являются растровыми. Они представляют собой матрицу элементов, которые называются *пикселями*. Каждый пиксель на снимке соответствует наименьшему элементу земной поверхности, который может быть разрешен. В отличие от пространственного разрешения, характеризующего сенсор съемочной системы, понятие «пиксель» относится к изображению, которое формируется этим сенсором. Например, если пространственное разрешение сенсора равно 10 м, то каждому пикселю будет соответствовать участок поверхности размером 10 x 10 м. Но если изображение уменьшить в четыре раза, то каждому пикселю будет соответствовать участок размером 40 x 40 м, хотя пространственное разрешение при этом не изменится.

Пиксели можно подразделить на «чистые» и «смешанные». Чистый пиксель содержит только однородную информацию. Если в пикселе содержится разнородная информация, 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.

### **Характеристики сканера и связь их с масштабом карты**

Важными характеристиками сканера являются (рис. 1.28):

- ширина полосы съемки  $G$  (мгновенное поле обзора);
- радиометрическое разрешение  $\Delta I$ ;
- мгновенный угол обзора  $\Delta\varphi$ ;
- пространственное разрешение  $\Delta L$ .

*Радиометрическое разрешение  $\Delta I$*  (яркостное, температурное) определяется динамическим диапазоном датчика и числом уровней дискретизации (числом бит), соответствующих переходу от яркости абсолютно «черного» к абсолютно «белому».

Мгновенный угол обзора зависит от характеристик объектива и размеров фотоприемника. Это интервал углов  $\Delta\varphi$ , в пределах которых в каждый момент времени на фотоприемник попадает изображение земной поверхности или облаков. Если спутник находится на расстоянии  $L$  от некоторой области на поверхности Земли, то фотоприемник одновременно регистрирует излучение от участка поверхности с линейным размером  $\Delta L = \Delta\varphi L$  в пределах мгновенного угла обзора ( $\Delta\varphi$  выражено в радианах).

Величина  $\Delta L$  – это пространственное разрешение сканера на местности. Если два объекта на поверхности Земли находятся на

расстоянии менее  $\Delta L$ , то их изображения сливаются. Сканерные изображения, как и все цифровые изображения, состоят из отдельных элементов – *пикселей* квадратной или прямоугольной формы с линейным размером  $\Delta L$ , которые хорошо видны, если увеличить изображение.

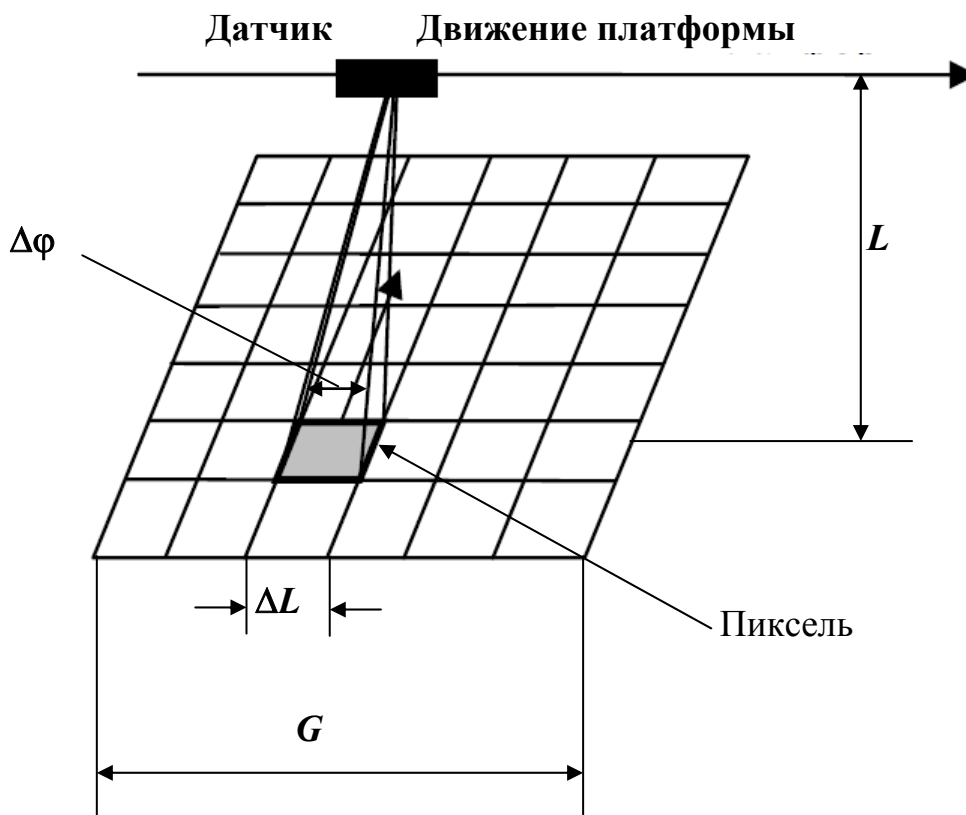


Рис. 1.28 – Схема работы сканера

Рассмотрим, как можно сравнить спутниковое изображение и карту некоторого масштаба. При работе с картой важно знать её масштаб. Если 1 см карты соответствует 1 км на местности, то масштаб равен 1:100000 (так как 1 км равен 100000 см). На одном см карты и изображении, содержащем приблизительно 10 пикселей, можно рассмотреть некоторые детали. Поэтому условно можно считать, что при разрешении сканера в 1 км масштаб карты равен 1:1000000, при разрешении сканера в 100 м – масштабу 1:100000, при разрешении сканера в 30 м – масштабу 1:30 000.

Пространственное разрешение  $\Delta L$  зависит от параметров оптической системы и от расстояния  $L$  от спутника до объекта:  $\Delta L$  наилучшее (минимальное) в точке надира, когда расстояние  $L$  минимально и равно высоте спутника над Землей. При отклонении от надира увеличивается значение  $L$ , из-за чего разрешение становится хуже. Например, разрешение сканера AVHRR спутника NOAA в надире  $\Delta L = 1,1$  км. При максимальном отклонении сканера от направления в надир разрешение становится равным приблизительно 4 км. Сканер HRVIR спутника SPOT-5 имеет разрешение в надире  $\Delta L = 10$  и 20 м.

В объективах сканеров используется, как правило, зеркальная оптика. Зеркальные объективы имеют вогнутое зеркало параболической

формы, на внутреннюю поверхность которого нанесена тонкая отражающая металлическая пленка. Свет, отраженный основным зеркалом, попадает на площадку, где в фокальной плоскости объектива размещены фотоприемники.

Мгновенный угол обзора  $\Delta\varphi$  определяется размером *апертуры объектива* и размерами фотоприемника. Апертура (действующее отверстие оптической системы) для параболического зеркала – это круг диаметра  $D$ , замыкающий зеркало. При малых значениях мгновенного угла обзора его величина приближенно обзора  $\Delta\varphi = \lambda/D$ , а пространственное разрешение составляет  $\Delta L \approx \lambda \cdot L/D$ , где  $\lambda$  –длина волны.

Таким образом, чем меньше отношение длины волны к диаметру апертуры, тем лучше разрешение оптической системы. Пусть, например,  $\lambda = 1$  мкм,  $D = 10$  см,  $\Delta\varphi = \lambda/D = 10^{-5}$  рад. Если расстояние  $L$  от спутника до поверхности Земли равно 1000 км, то пространственное разрешение составляет  $\Delta L = L\Delta\varphi = 10$  м.

Из-за дифракции электромагнитных волн изображение точки несколько расплывается. Поэтому идеальный фотоприемник должен иметь размер  $\Delta$  порядка длины волны.

#### **1.4.2. Характеристика спутниковых платформ**

##### **Классификация снимков по разрешающей способности**

Перспективным направлением коммерциализации космоса является рынок информации, получаемой с помощью средств дистанционного зондирования. Области использования этой информации зависят от точности и разрешающей способности. Разрешающая способность – величина, которая определяет выбор масштаба съемки при заданном показателе разрешающей способности снимков.

По разрешающей способности снимки разделяются на:

- снимки низкой разрешающей способности (километры);
- снимки средней разрешающей способности (сотни метров);
- снимки высокой разрешающей способности.

Снимки высокой разрешающей способности, в свою очередь, разделяются на:

- снимки очень высокой разрешающей способности (10-20 м);
- снимки сверхвысокой разрешающей способности (1 м и меньше).

Снимки низкой и средней разрешающей способности являются полезными при анализе больших территорий, для контроля температуры морской поверхности, изучения состояния растительности, для анализа стихийных бедствий.

Снимки высокой разрешающей способности от 10 до 30 м пригодны для использования в картографии, мониторинге, для картографирования в масштабах 1:50 000 и 1:25 000. Наивысшие требования к точности и разрешающей способности снимков имеет градостроительный кадастр.

Для его ведения с использованием данных ДЗ необходимы цифровые данные о рельефе земной поверхности и высоте зданий, сооружений и промышленных объектов. Космические снимки высокой разрешающей способности являются наилучшими для анализа городской застройки, инженерных исследований, для уточнения деталей на поверхности земли. Для обнаружения дополнительных сведений об исследуемых объектах и явлениях снимки высокой разрешающей способности интегрируют с данными низшей разрешающей способности.

На спектрональных снимках легко дешифруются лесные массивы и другие растительные компоненты. Однако на таких изображениях плохо выделяются зоны загрязнения по прямым признакам. Содержательная детализация этого уровня (1-10 м) отвечает масштабам карт 1:10000 – 1: 50000. По данным космической съемки с разрешающей способностью 1-10 м строятся цифровые модели рельефа и создаются тематические и топографические карты, например, карты зонирования для более точного учета особенностей местности и ландшафтных закономерностей.

### **Космические системы высокой разрешающей способности**

Снимки высокой и сверхвысокой разрешающей способности все больше проникают на рынок информационного обеспечения. Для их получения используются спутники, орбиты которых являются солнечно-синхронными с высотой не более 1000 км. Установленные на них сенсоры предназначены для получения снимков с высоким пространственным разрешением. Во время полета спутника происходит регистрация его положения на орбите с высокой точностью. Это значит, что фотограмметрическое преобразование изображений можно выполнять без опорных точек.

В подавляющем большинстве современных съемочных систем использован принцип действия электрооптического сканера. При этом задействовано несколько ПЗС-линеек, которые регистрируют изображение в панхроматическом (PAN) и многоспектральном (MS) диапазонах, включая инфракрасный диапазон лучей. Сканеры с линейками на ПЗС имеют высокое пространственное разрешение – до десятков см. Разрешающая способность панхроматических изображений, как правило, в 3-4 раза выше многоспектральных снимков. Отклонение оптической системы от надира (в разных съемочных системах от 30° до 60°) существенно расширяет возможность съемки той или иной области с одного орбитального витка. Благодаря этому появилась возможность производить съемку одной и той же территории "вперед" или "назад" и получать стереопары.

В качестве примера рассмотрим основные характеристики спутников Landsat, SPOT и GeoEye-1.

### **Спутники серии LANDSAT**

Классическими спутниками для дистанционного зондирования считаются космические спутники LANDSAT, разработанные в США.

Всего было запущено 6 спутников. Благодаря высокому качеству изображений, точной калибровке, обширному архиву данных спутники приобрели большую популярность в мире. Вид спутников LANDSAT 5 и LANDSAT 7 показан на рис. 1.29.

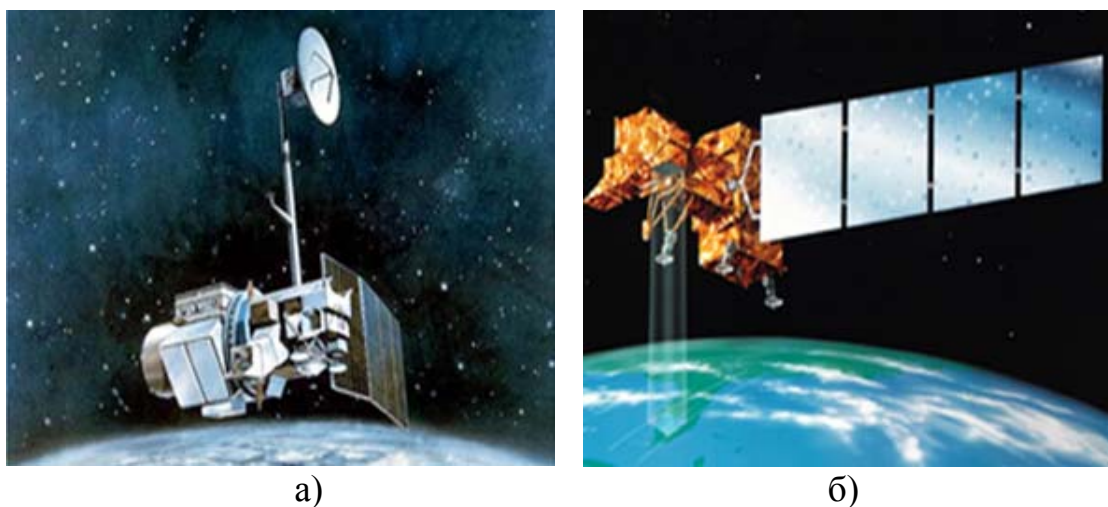


Рис. 1.29 – Космические спутники Landsat 5 (а) и Landsat 7 (б)

Все спутники LANDSAT выводились на субполярные солнечно-синхронные орбиты (наклонение  $98,2^\circ$ ). Высота орбит первых трех спутников составляла 900 км, период повторяемости съемки равнялся 18 дням. Следующие спутники этой серии выводились на орбиты высотой 700 км с периодом повторной съемки 16 дней. Для достижения оптимальных условий освещенности запуски проводили так, чтобы время пересечения экваториальной плоскости у всех спутников было примерно одинаковым.

В разное время на борту спутников LANDSAT устанавливали различные съемочные системы: MSS (Multi-Spectral Scanner), TM (Thematic Mapper), ETM (Enhanced Thematic Mapper) и ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Эти съемочные системы обеспечивали широкий охват съемки с размерами сцены 185 x 185 км и позволяли получать снимки среднего разрешения в нескольких спектральных диапазонах.

Основным существенным отличием прибора является наличие панхроматического канала высокого разрешения (15 м).

В табл. 1.1 приведены основные характеристики сканера TM спутников LANDSAT 5 и LANDSAT 7.

Основным существенным отличием сканера ETM+ является наличие панхроматического канала (канал 8) высокого разрешения (15 м). Спектральный диапазон канала: 0,52 – 0,90 мкм.

Таблица 1.1 – Основные характеристики сканеров ТМ и ЕТМ+

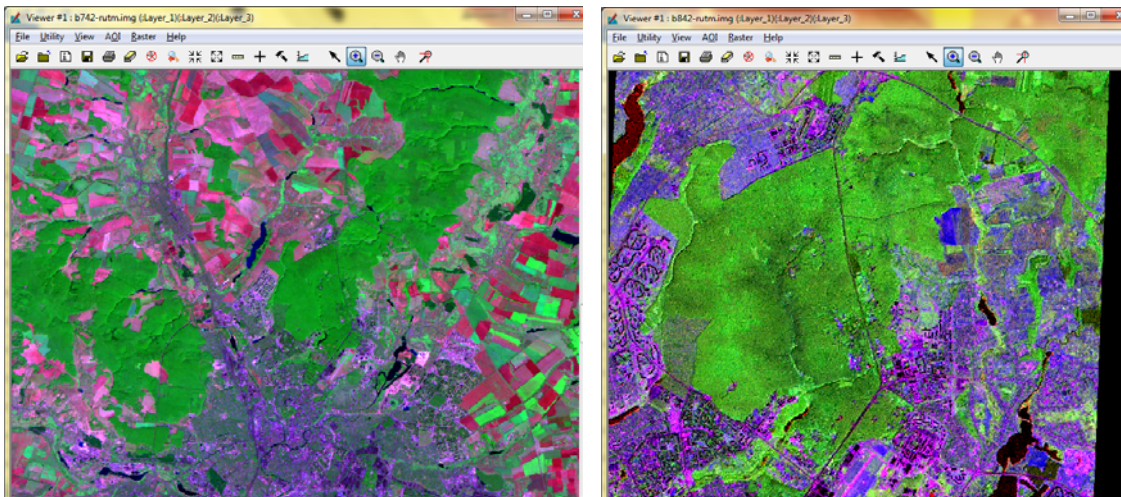
Диапазон	Длина волны (микроны)	Комментарий
1. Синий	0.45-0.52	Диапазон, применяемый при изучении прибрежных вод, выделение почв с растительностью и без, выделение лесов различных типов, объектов соцкультбыта.
2. Зеленый	0.52-0.60	Диапазон, применяемый при выделении искусственных зеленых насаждений и агрокультур, объектов соцкультбыта.
3. Красный	0.63-0.69	Для выделения границ почв, и геологических границ, объектов соцкультбыта, выделения различий между растительностью разного типа.
4. Ближний инфракрасный	0.76-0.9	Выделение мест выхода породы и контраст областей порода-почва, суша-вода, выделение общих площадей растительной биомассы.
5. Средний инфракрасный	1.55-1.75	Один из нескольких диапазонов, используемый для выделения на снимках облаков, снега и льда.
6. Тепловой	10.40-12.50	Выявление геотермальной активности, интенсивности нагрева площадей.
7. Средний инфракрасный	2,09 – 2,35	Выделения на снимках облаков, снега и льда.

Растровые данные могут быть организованы в виде нескольких каналов цветовой информации. Каждый канал это подмножество файла данных представляющее отдельную часть электромагнитного спектра отраженного света или теплового излучения (красный, зеленый, синий инфракрасный, тепловой и прочие).

Комбинации каналов используются для получения снимков в «естественных» и «искусственных» цветах.

*Комбинация каналов 321* – «естественные цвета». В комбинации используются каналы видимого диапазона. На снимках объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зеленой, убранные поля отображаются светлыми цветами, нездоровая растительность – коричневыми и желтыми, дороги – серыми, береговые линии – белесыми. Эта комбинация каналов дает возможность анализировать состояние водных объектов и оценивать глубины, а также используется для изучения антропогенных объектов. Вырубки и разреженная растительность детектируются плохо.

*Комбинация каналов 742* – «естественные цвета». Дает изображение близкое к естественным цветам (рис. 1.30), но в тоже время позволяет анализировать состояние атмосферы и дым.



а) LANDSAT 5 TM

б) LANDSAT 7 ETM+ (742)

Рис. 1.30 – Космические снимки спутников LANDSAT

На снимках здоровая растительность выглядит ярко зеленой, травянистые покрытия – зелеными, ярко розовые участки детектируют открытую почву, коричневые и оранжевые тона характерны для разреженной растительности. Растительность сухостоя выглядит оранжевой, вода – голубой. Песок, почва и минералы, могут быть представлены большим числом цветов и оттенков. Застройка отображается в оттенках розово фиолетового цвета. Светлозеленые точки внутри городских территорий могут быть парками, садами или полями стадионов. Маслиново-зеленые цвета характерны для лесных массивов, а более темные цвета являются индикатором примесей хвойных пород.

*Комбинация каналов «искусственные цвета».* Здесь используются каналы видимого и инфракрасного диапазонов. В качестве примера рассмотрим популярную комбинацию каналов 432. На снимках растительность отображается в оттенках красного, городская застройка – в оттенках зелено-голубых, а цвет почвы – в оттенках коричневого. Лед, снег и облака выглядят белыми или светло голубыми (лед и облака по краям). Хвойные леса выглядят темно-красными или даже коричневыми по сравнению с лиственными лесами. Эта комбинация 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 кустарниковую растительность.

Всего спутники LANDSAT передали на Землю около 600 тыс. снимков. Среди них имеются изображения районов катастрофы на Чернобыльской АЭС, последствия разрушительных цунами и тайфунов, а также снимки, позволяющие оценить негативные последствия хозяйственной деятельности человека на Земле за последний период.

### **Спутники серии SPOT**

Спутники SPOT (System Pour L Observation de la Terre) создаются и



выводятся на орбиту Национальным центром космических исследований Франции (CNES) в сотрудничестве с Бельгией и Швецией.

Установленные на спутниках SPOT сенсоры позволяют осуществлять прицельную съемку. Это дает возможность выполнять стереосъемку земной поверхности с соседних витков, что позволяет создавать модели рельефа и имеет огромное значение для дешифрирования и картографирования. Оптическая система сенсора позволяет отклонять оси съемки на 27 град от направления в надир, что позволяет проводить съемку одного и того же участка с наибольшей частотой. Это важно при мониторинге динамических явлений. Все спутники SPOT выводились на солнечно-синхронные орбиты (наклонение 98,7°) высотой 822 км с периодом съемки 26 дней.

Спутники системы SPOT производят съемку Земли с 1986 года. В настоящее время работоспособны спутники SPOT 1, 2, 4 и 5.

Для достижения оптимальных условий освещенности запуски спутников проводили так, чтобы время пересечения экваториальной плоскости у всех спутников было примерно одинаковым (местное время пересечения экваториальной плоскости 10 ч 30 мин).

Первые три спутника этой серии были полностью идентичны. Они оснащались съемочной оптической системой HRV (Visible High Resolution), устройствами записи данных на магнитную ленту и системой передачи данных на наземные станции. Пространственное разрешение панхроматических снимков составляет 10 м, многоспектральных – 20 м.

На спутнике второго поколения, SPOT-4, была установлена усовершенствованная съемочная система: два оптических сенсора HRVIR и сенсор VEGETATION.

В сенсор HRVIR включен дополнительный канал регистрации излучения в среднем инфракрасном диапазоне (1,980 – 1,730 мкм). Этот канал используют для мониторинга растительного покрова, оценки содержания различных минералов и картографирования влажности почв. Вместо панхроматического канала (0,51–0,73 мкм) включен моноканал B2 (0,61–0,68 мкм) для получения черно-белых снимков с разрешением 10 м и многозональных снимков с разрешением 20 м.

Сенсор VEGETATION в основном предназначен для измерения характеристик растительного покрова. С помощью этого сенсора ежедневно получают снимки всей поверхности Земли с разрешением 1 км, что позволяет вести наблюдение за глобальными и региональными изменениями окружающей среды.

Спутник SPOT 5 оснащен высокоточным стереоскопическим детектором, позволяющим получать стереоснимки для топографических целей и построения моделей рельефа. На спутнике вместо сенсоров HRVIR были установлены два сенсора HRG (High Resolution Geometric), которые регистрируют данные в тех же спектральных диапазонах, что и сенсоры HRVIR. Сенсор HRS позволяет получать стереопары снимков благодаря возможности отклонять ось съемки вперед-назад на 20 град. с

разрешением 10 м при ширине полосы охвата 120 км и полосе съемки 600 км. Эти снимки используются для построения цифровых моделей.

Отличие новых сенсоров состоит в увеличении разрешения снимков с 20 до 10 м в диапазонах В1, В2 и В3. Кроме того, спектральный диапазон панхроматического канала стал снова таким же, как и у первых трех спутников серии SPOT, но разрешение черно-белых снимков увеличилось при этом до 5 и даже 2,5 м.

В зависимости от разрешения все снимки сенсоров HRG можно разделить на четыре категории:

1. Снимки в коротковолновом инфракрасном диапазоне (канал SWIR) с разрешением 20 м.
2. Многозональные снимки в зеленом, красном и ближнем инфракрасном диапазонах с разрешением 10 м.
3. Панхроматические снимки с разрешением 5 м.
4. Искусственно синтезированные панхроматические снимки с разрешением 2,5 м.

### **Спутник GeoEye-1**

Спутник субметрового разрешения GeoEye-1 запущен 6 сентября 2008 года с авиабазы Ванденберг (штат Калифорния) и предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности (рис. 1.31).

Технические характеристики спутника GeoEye-1: орбита – солнечно-синхронная, высота – 684 км, максимальное отклонение от надира – 60°, возможность получения стереопары – с одного витка, точность привязки снимков – 3 м при съемке в надир. Поставщиком снимков является частная компания GeoEye (США), образовавшаяся в январе 2006 года.

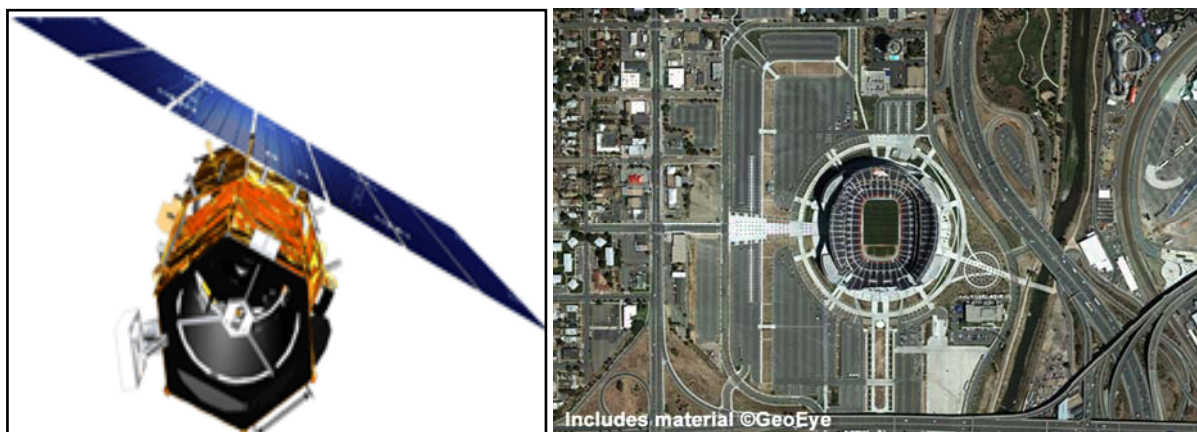


Рис. 1.31 – Вид спутника GeoEye-1 и пример снимка

Спутник GeoEye-1 совершенствует линейку современных оптических спутниковых систем по ряду параметров (табл. 1.2): сверхвысокая детальность изображений (рис. 1.31) и высокая производительность.

Таблица 1.2 – Оптические параметры спутника GeoEye-1

Режим		Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м
панхроматический		0,45-0,90	0,41
мультиспектральный	голубой	0,45-0,52	
	зеленый	0,52-0,60	
	красный	0,62-0,69	
	ближний ИК	0,76-0,90	
Размер кадра		225 км <sup>2</sup> (15x15 км)	
Наибольшая полоса непрерывной съемки		15000 км <sup>2</sup> (300x50км)	
Съемка ячейки 1°x1° с одного витка		10000 км <sup>2</sup>	
Наибольшая площадь непрерывной стереосъемки		6270 км <sup>2</sup> (224x28км)	
Периодичность съемки		1-3 дней	
Радиометрическое разрешение		11 бит/пиксель	
Ширина полосы съемки		15,2 км	

Помимо рассмотренных спутников, в настоящее время широко используются снимки спутников серии IRS, QuickBird, Ikonos, EROS, Ресурс-ДК и др.

## 1.5. Данные дистанционного зондирования

### 1.5.1. Космические снимки

#### Панхроматические и многоспектральные снимки

По фиксируемым спектральным диапазонам различают панхроматические и многозональные съемки. Панхроматические съемки производятся в одном спектральном диапазоне (чаще всего в видимом участке спектра), а многозональные съемки – в нескольких спектральных диапазонах. В результате съемок получают панхроматические и многоспектральные снимки.

*Панхроматический снимок* содержит только один канал цветовой информации. Съемки проводятся в реальных или условных цветах, одновременно совместно фиксируются 2 или 3 зоны спектра на одном и том же снимке. Изображения в этих зонах реально неразделимы.

*Многоспектральный снимок* содержит несколько каналов цветовой информации. Каждый пиксель изображения описывается при помощи матрицы (вектора) значений. Обычно размер  $N = 3$ . Это самый информативный и перспективный вид съемок, когда одновременно, но

раздельно фиксируются несколько изображений в различных зонах спектра. Их может быть – 3, 4, 5, 7 и больше. Если зон больше 16, то такие снимки уже называют гиперспектральными.

*Гиперспектральные снимки* имеют высокое спектральное разрешение и дают больше информации об объекте, чем наше зрение. Такие съемки позволяют изучать спектры отражения объектов местности столь детально, что можно определить типы и даже конкретные виды растительности, горные породы и почвы, определить состав пленки загрязнений на поверхности воды, материал, из которого выполнено дорожное покрытие. Если мы имеем материалы многозональной съемки, то, в отличие от цветной съемки в естественных цветах или в искусственных цветах (спектральнозональной), мы можем синтезировать из нескольких спектральных зон не один, а множество вариантов цветного изображения, причем с помощью компьютера это выполняется моментально. Каждый вариант такого цветного изображения содержит несколько отличную информацию о снятых объектах. На одном лучше выделяются дороги и сооружения, на другом – водные объекты, на третьем – лучше видны подробности распределения растительности. Современные компьютерные технологии позволяют производить такой синтез многократно в процессе просмотра изображения, без необходимости размножения файлов изображения. Это далеко превосходит возможности работы только с твердой копией изображения на бумаге.

#### **Снимки сантиметрового и инфракрасного диапазонов**

Для радарной съемки используется сантиметровый диапазон радиоволн. Важнейшее преимущество снимков этого класса состоит в их всепогодности. Поскольку радар регистрирует собственное, отраженное земной поверхностью излучение, для его работы не требуется солнечный свет. Кроме этого, радиоволны сантиметрового диапазона свободно проходят через сплошную облачность и, даже, способны проникать на некоторую глубину в почву. Отражение сантиметровых волн от поверхности определяется ее текстурой («шероховатостью») и наличием всевозможных пленок на поверхности Земли. Поэтому, например, радары способны фиксировать наличие нефтяной пленки толщиной 50 мкм и более на поверхности водоемов даже при значительном волнении воды. Еще одна особенность радарной съемки состоит в высокой чувствительности к влажности почвы, что важно для сельскохозяйственных и экологических приложений.

Оптикоэлектронные съемочные системы обеспечивают получение изображения объектов по их собственному тепловому излучению в инфракрасной (ИК) области электромагнитного спектра. Невидимые глазом человека излучения называют инфракрасным или тепловым. Такие излучения преобразуются в видимое изображение объектов. ИК-излучение объекта и частично отраженное от него ИК-излучение других источников преобразуются в электрический сигнал. Сигнал подвергается усилению, а затем преобразуется в видимое излучение – изображение объекта. В

дальнейшем изображение регистрируется на аэрофотоматериале.

Инфракрасные (тепловые) изображения создаются главным образом за счет собственного излучения объектов и различий в их излучательной способности. Главная особенность ИК-систем заключается в возможности регистрации ЭМИ слабо нагретых объектов и наблюдение малых перепадов температур на их поверхности, что не позволяют делать фотографические, телевизионные системы.

Таким образом, ИК-системы предназначены для получения в ночных и дневных условиях ИК снимков, на которых могут быть распознаны различные объекты, обладающие тепловым контрастом по отношению к окружающему их фону. Особенность ИК-изображения состоит в том, что в отличие от фотографического изображения в видимом диапазоне длин волн ИК-изображение практически не имеет теней. В результате пространственное восприятие объектов на ИК аэроснимках хуже, чем на аэрофотоснимках.

Большинство тепловых систем дистанционного зондирования работают в диапазонах 3-5 мкм и 8-14 мкм. Этим двум диапазонам соответствуют окна прозрачности атмосферы, в пределах которых она прозрачна для прохождения теплового излучения Земли. Пропускание в первом диапазоне составляет 90%, во втором 60-70%.

### 1.5.2. Тематические и непрерывные растровые слои

Полученная различными методами информация о земной поверхности, представляет собой весьма разнообразные по составу данные ДЗ – фотоснимки, изображения, зарегистрированные в инфракрасном диапазоне, радарные изображения. Различают непрерывные и тематические данные (рис. 1. 32).

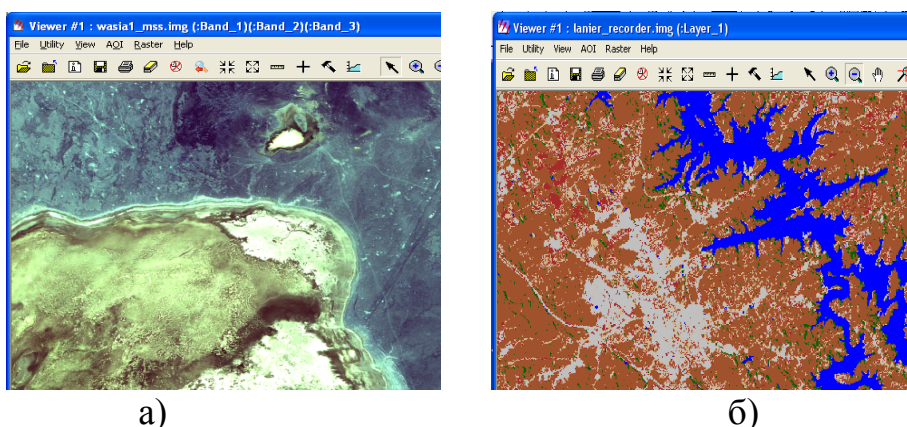


Рис. 1. 32 – Непрерывный (а) и тематический (б) слои

Непрерывные данные представляют собой растровые слои, содержащие количественную информацию (рис. 1.32, а). Непрерывные слои это растры в прямом понимании этого слова, например, фотоснимки в цифровом формате.

Тематические слои, это растровые слои, содержащие качественную информацию об интересующей нас области земной поверхности, данные о категориях (рис. 1. 32, б).

Тематические слои используются в задачах классификации и принятия решений, там, где фигурируют такие понятия как категории или темы. Фактически, они представляют собой наборы классов, выделенных тем или иным образом, на основе определенной входной информации. Одним из атрибутов класса является цвет, при помощи которого данный класс представлен на карте. При помощи тематических слоев обычно представляют данные, упорядоченные по какому либо признаку – дороги, почвы и т.д. Пиксели тематических слоев представлены в виде некоего конечного набора значений, являющихся результатом некоторой классификации. Такое цветовое представление носит название псевдоцветовая схема.

### **1.5.3. Форматы записи цифровых данных**

В процессе сканирования сенсором генерируется электрический сигнал, интенсивность которого изменяется в зависимости от яркости участка земной поверхности. При многозональной съемке различным спектральным диапазонам соответствуют отдельные независимые сигналы. Каждый сигнал непрерывно изменяется во времени. Для последующего анализа его необходимо преобразовать в набор числовых значений. Для преобразования непрерывного аналогового сигнала в цифровую форму его разделяют на части, соответствующие равным интервалам дискретизации. Сигнал в пределах каждого интервала описывается средним значением его интенсивности. Поэтому вся информация о вариациях сигнала на этом интервале теряется.

Таким образом, величина интервала дискретизации является одним из параметров, от которого напрямую зависит разрешающая способность сенсора.

Для цифровых данных обычно выбирают не абсолютную, а относительную шкалу яркости. Поэтому данные не отражают истинных радиометрических значений, полученных для данной сцены.

Другим параметром, от которого зависит разрешение снимка, является способ записи числовых значений. Для записи каждого числа используется двоичная форма записи. Она удобна для хранения данных на дисках и магнитных лентах, а также для последующего компьютерного анализа. Набор таких данных обычно называют *значениями пикселей* или *значениями яркости*.

Диапазон яркости на цифровом изображении зависит от количества бит, отведенного для записи чисел. Например, при шестибитовой форме записи максимальное количество значений яркости равно 64, семибитовой – 128, восьмибитовой – 256. При этом яркость каждого пикселя может принимать значения 0 – 63, 0 – 127 и 0 – 255 соответственно.

Отсюда видно, что радиометрическое разрешение цифрового снимка определяется количеством бит, используемых для записи.

### Форматы записи данных

Для многоканальных изображений на битовом уровне различают четыре формата хранения информации:

- зоны, чередующиеся по пикселям (Band Interleaved by Pixel, BIP);
- зоны, чередующиеся по строкам (Band Interleaved by Line, BIL);
- последовательность зон (Band Sequential, BSQ);

При рассмотрении форматов записи данных будем использовать следующие обозначения:  $L_n$  – строка,  $P_n$  – пиксель и  $B_n$  – канал (зона),  $n$  – номер строки, пикселя и канала. В приводимых примерах  $n = 1, 2$ .

В **BIP-формате** производится попиксельный способ записи информации (рис. 1.33).

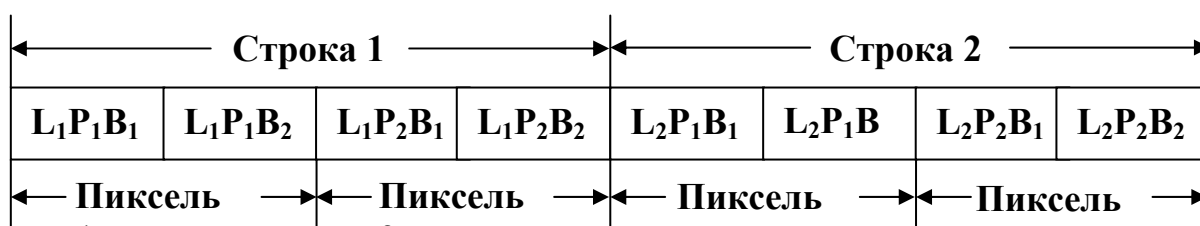


Рис. 1.33 – Схема записи данных в формате BIP

Значения спектральной яркости каждого пикселя с одинаковым номером, но разных каналов съемки, располагаются в записи подряд. Формат удобен при выполнении попиксельной обработки многозональных снимков, например, в алгоритмах классификации.

В **BIL-формате** за единицу хранения данных принята строка (рис. 1.34). Данные записываются в один файл строка за строкой. Подряд располагаются строки, соответствующие разным каналам съемки.

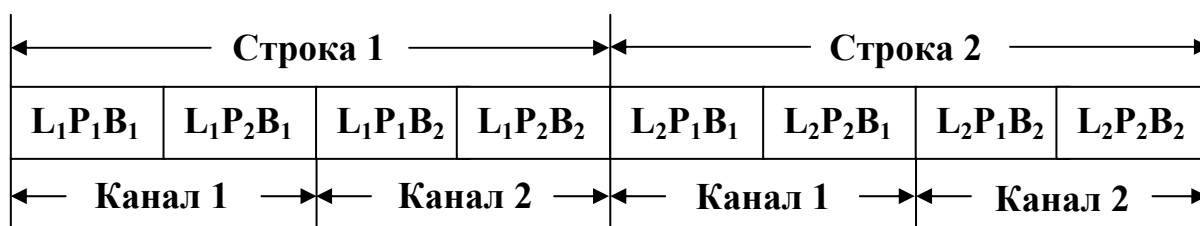


Рис. 1.34 – Схема записи данных в формате BIL

Формат удобен при одновременном анализе всех каналов (зон).

В **BSQ-формате** за независимую единицу хранения данных принят канал (рис. 1.35). Каждый канал сохраняется в отдельном файле.

Этот формат широко применяется на практике, поскольку способ размещения данных ближе всего отвечает задачам их просмотра и анализа. Данные одного канала легко прочитать и визуализировать. Например, данные спутниковой съемки системы Landsat TM сохраняются и передаются потребителю в формате BSQ.

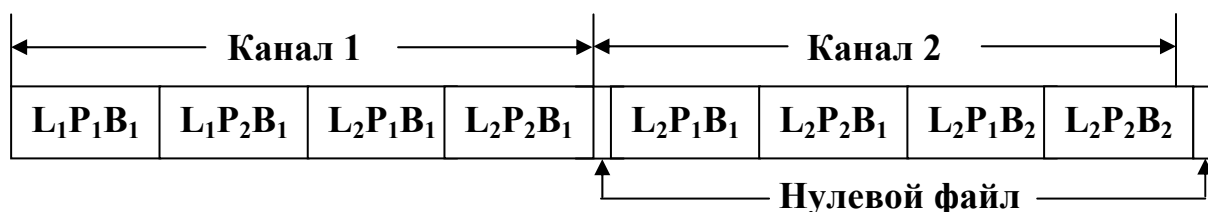


Рис. 1.35 – Схема записи данных в формате BSQ

Выбор оптимального формата зависит от условий и поставленных задач. Если изучается вся сцена во всех спектральных диапазонах съемки, удобнее использовать форматы BSQ и BIL. Если анализируется небольшой участок с известным местоположением, то в этой ситуации лучше использовать формат VIP, поскольку значения из всех спектральных диапазонов для этого участка будут находиться в одном месте записи. Безусловно, самая хорошая ситуация – когда есть возможность считать данные, записанные в любом исходном формате, и преобразовать их в тот формат, который наиболее удобен для работы.

#### 1.5.4. Структура img-файла

Для работы с растрами в ERDAS IMAGINE используется специальный формат данных – файлы с расширением «.img». Файл имеет иерархическую структуру (рис. 1.36). Эта структура не является фиксированной. В реальных данных многие опции могут отсутствовать.

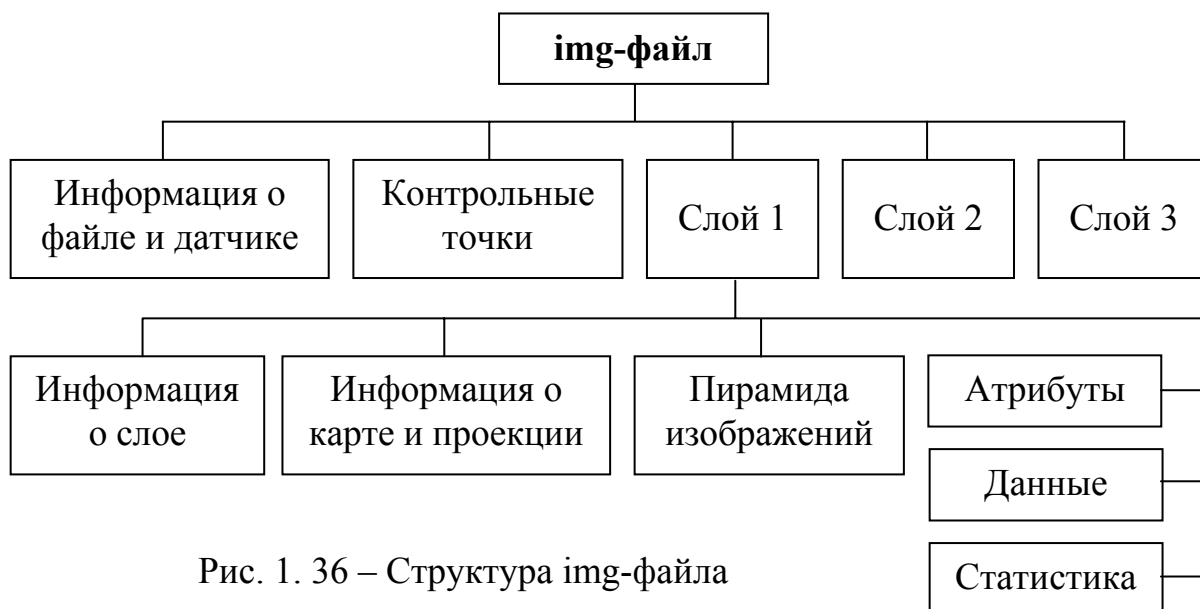


Рис. 1.36 – Структура img-файла

#### **Информация о файле, датчике и контрольных точках**

*Общая информация о файле* может включать имя файла, число слоев, дату и время модификации файла.

*Информация о датчике* содержит данные спутникового снимка и может включать:

- дату и время сканирования изображения;



- калибровочную информацию датчика;
- ориентацию датчика;
- формат записи слоев данных (BIP, BIL, BSQ);
- пространственный охват (протяженность) данных;
- число каналов (bands) или иначе – диапазонов или полос.

*Контрольные точки.* Если для растрового слоя выполнена геопривязка, то в img-файле имеется информация о карте, включающая:

- координаты верхнего левого угла;
- размер пикселя;
- единицы измерения (метры, дюймы и др.).

### **Информация о слое**

*Общая информация о слое* включает:

- ширину и высоту (число столбцов и рядков);
- тип слоя (тематический или непрерывный);
- тип данных (беззнаковый 8-бит, с плавающей точкой и др.);
- размер блока данных при тайловой (tile) организации;
- сжатие.

*Информация о карте и проекции* включает:

- тип картографической проекции;
- сфероид;
- номер зоны.

*Атрибутивная информация* зависит от типа слоя. Для тематических слоев атрибутивная информация может содержать:

- гистограммы;
- имена классов;
- значения признаков классов;
- палитры (RGB-значения);
- показатели прозрачности;
- дополнительные атрибуты классов.

Для непрерывных слоев атрибутивная информация включает: гистограммы и таблицы контрастности.

*Статистика* может включать следующую информацию:

- минимальные, максимальные, средние и медианные значения, рассчитанные по пикселям img-файла;
- среднеквадратичные отклонения показателей, рассчитанные по пикселям img-файла.

### **Пирамиды изображений**

В ERDAS IMAGINE для ускорения вывода на экран больших по объему растров используются пирамиды изображений (рис. 1.37).

Пирамида изображений состоит из набора дополнительных растровых слоев, которые создаются на базе основного слоя. Эти растровые слои состоят из уменьшенных наборов пикселей. Например, из растрового слоя размерностью 4Кх4К пикселей, последовательно создаются слои с

размерностями  $2K \times 2K$ ,  $1K \times 1K$  (рис. 1.37). Число пикселей может быть уменьшено вплоть до  $64 \times 64$ . Созданные растры используются для вывода изображения на экран при определенных масштабах.

Пирамидные слои могут быть внешними и внутренними.

*Внешние пирамидные слои* добавляются как дополнительные слои *img*-файла. Они сохраняются в той же директории и под тем же именем что и *img*-файл, но имеют расширение *grd*. файл с расширением *grd* можно удалить. При первой же необходимости ERDAS IMAGINE выдает запрос на повторное создание внешних пирамидных слоев.

*Внутренние пирамидные слои* сохраняются непосредственно внутри *img*-файла и не могут быть удалены так просто как внешние. Непосредственно на дисплее доступ к пирамидным слоям получить нельзя. Следует иметь в виду, что пирамидные слои непосредственно не могут быть обработаны, они создаются только для визуализации.

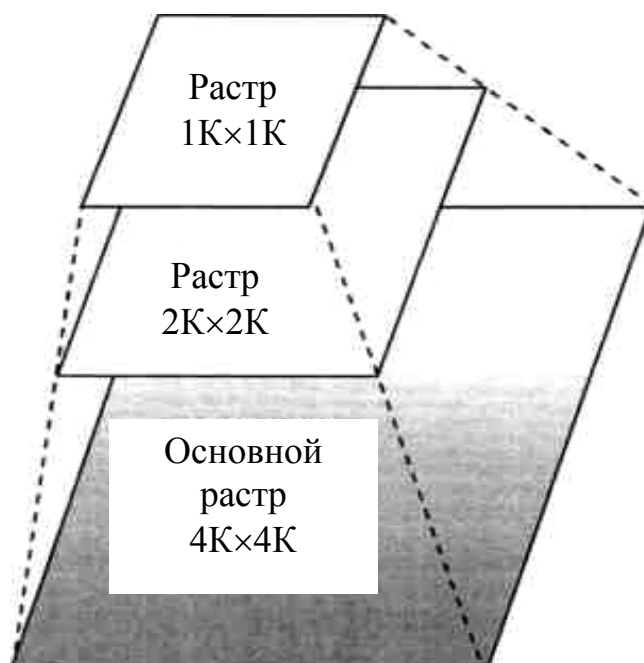


Рис. 1.37 – Пирамида слоев

Приращение размера файла изображения при построении  $n$ -го пирамидного файла, вычисляется по формуле:

$$\Delta = \sum_{i=0}^n \frac{1}{4^i}. \quad (1.6)$$

Из формулы видно, что число  $n$  пирамидных слоев зависит от размера исходного изображения. Чем больше размер *img*-файла, тем больше для него будет сгенерировано пирамидных слоев.

### 1.5.5. Внутренние типы данных. Хранение *img*-файлов

#### Внутренние типы данных *img*-файлов

Физически, хранимые на носителях *img*-файлы представлены как наборы битов (значения 1 или 0). Оперировать битами неудобно.

Внутренние форматы хранения это укрупненная логическая структура, т.е. минимальная логическая порция информации. В табл. 1.3 приведены форматы информации в img-файлах.

Таблица 1.3 – Внутренние форматы хранения информации

Тип (обозначение)	Диапазон	Применение
Беззнаковое 1 бит (U1)	0 - 1	"Да/нет" – условия, задаваемые растром.
Беззнаковое 2 бита (U2)	0 - 3	Тематические данные с четырьмя или менее классами
Беззнаковое 8 бит (U8)	0 - 255	Тематические данные с 256 или менее классами. Сплошные слои с 256 градациями серого цвета.
Знаковое 8 бит (S8)	$-2^7$ до $(2^7-1)$ (-128 до 127)	Данные, требующие отрицательные значения
Беззнаковое 16 бит (U16)	$0 - (2^{16}-1)$ (0 до 65535)	Тематические данные с 65536 или менее классами
Беззнаковое 32 бита (U32)	$0 - (2^{32}-1)$	Данные непрерывных слоев.
С плавающей запятой одинарной точности 32- бит (F32)	от $\pm 1.2 \cdot 10^{-38}$ до $3.4 \cdot 10^{38}$	Данные непрерывных слоев, требующие высокой точности.
С плавающей запятой двойной точности 64 бит (F64)	от $\pm 2.23 \cdot 10^{-308}$ до $1.79 \cdot 10^{308}$	Данные непрерывных слоев, требующие сверхвысокой точности.

Тип растровых данных определяет логическую организацию файлов хранения информации. Чем большее число бит отводится под логическую единицу информации, тем большее дисковое пространство потребуется для хранения данных.

#### Хранение img-файлов

Хранение img-файлов выполняется в формате HFA (hierarchical file architecture – иерархическая файловая архитектура). Этот формат позволяет организовывать файл изображения в виде древовидной структуры, допуская добавление любого количества элементов данных различных типов. Элементы, являющиеся узлами древовидной структуры, могут быть просмотрены при помощи специального Визуализатора HfaView, (Hierarchical File Viewer) доступного из главного меню ERDAS IMAGINE при выборе опции меню Tools | View, IMAGINE HFA File Structure. Утилита может быть использована для просмотра иерархической структуры и некоторых других типов, например, файлы сигнатур с расширением **.sig**, файлы областей интересов с расширением **.aoi** и др.

Кроме img-формата, ERDAS IMAGINE поддерживает работу с большим набором стандартных растровых форматов, например, ArcSDE

Raster, Windows Bitmap, ENVI, GeoTIFF (.tif), HDF Raster, JFIF (jpeg), JPEG 2000, SPOT-5 DIMAP, TIFF (.tif) и др. Часть из этих форматов имеют ограниченные описательные возможности по сравнению с img-форматом. Для полноценного анализа таких растров следует предварительно переконвертировать их в img-формат.

Для тех форматов, которые напрямую не поддерживаются в ERDAS IMAGINE, предусмотрена возможность работы с необработанным (raw) форматом. При этом обрабатываемый растр сопровождается ASCII-файлом (расширение \*.raw), содержащий стандартный набор ключей и значений, задающих порядок обработки растра.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Поясните суть метода ДЗ.
2. Дайте характеристику основных этапов ДЗ и видов съемки.
3. Поясните суть технологии «От снимка к карте».
4. Чем характеризуется разрешающая способность систем ДЗ?
5. Поясните понятие пикселя.
6. Охарактеризуйте основные модули пакета ERDAS Imagine 2010.
7. Перечислите области применения космических снимков.
8. Перечислите и поясните основные характеристики ЭМИ.
9. Дайте характеристику состава спектра ЭМИ.
10. Поясните особенности взаимодействия ЭМИ с атмосферой и земной поверхностью.
11. В каких диапазонах ЭМИ имеют место отчетливые различия отражательной способности растительности?
12. От каких факторов зависит спектральная отражательная способность почвы и воды?
13. Из каких элементов состоит спутниковая система съемки?
14. Дайте определение спектрального разрешения датчика.
15. Что такое солнечно-синхронная орбита?
16. Дайте характеристику пассивных и активных систем съемки.
17. Перечислите характеристики спутников LANDSAT, SPOT и GeoEye.
18. Дайте характеристику форматов записи данных: BIP, BIL и BSQ.
19. Какая информация хранится в img-файле?
20. Для чего создаются пирамиды изображений?
21. Перечислите внутренние типы данных img-файлов.

## 2. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Обработка данных ДЗ включает предварительную обработку и улучшение изображений. В процессе предварительной обработки из данных удаляются систематические радиометрические и геометрические ошибки. Улучшение изображения позволяет преобразовать его в форму, наиболее удобную для визуального или машинного анализа и используется для того, чтобы подчеркнуть важнейшие признаки изображения и в дальнейшем облегчить задачу интерпретации данных.

### 2.1. Этапы предварительной обработки цифровых снимков

#### 2.1.1. Основные понятия

В процессе обработки используют численные методы, основанные на анализе яркостных и спектральных характеристик пикселей. Для улучшения изображения обычно используют изменение яркости и контрастности, а также пространственную фильтрацию.

Рассмотрим некоторые основные понятия, связанные с обработкой цифровых снимков.

#### Математическое представление цифрового снимка

Двумерное изображение в одном спектральном диапазоне можно представить в виде матрицы  $I$  размером  $n \times m$  (рис. 2.1), где  $n$  – число строк,  $m$  – число столбцов. Каждый элемент  $I(i, j)$  матрицы характеризует интенсивность излучения элемента поверхности Земли, который соответствует одному пикселю изображения.

$I(1,1)$	$I(1,2)$	...	$I(1,m)$
$I(2,1)$	$I(2,2)$	...	$I(2,m)$
...	...	...	...
$I(n,1)$	$I(n,2)$	...	$I(n,m)$

Рис. 2.1 – Представление изображения в виде матрицы чисел

Изображение состоит из  $n \times m$  пикселей. Каждый пиксель имеет координаты  $(i, j)$ , где  $i$  – номер строки,  $j$  – номер столбца. Число  $I(i, j)$  – целое и называется спектральной яркостью (или уровнем серого) пикселя  $(i, j)$ . Изображение, полученное в нескольких спектральных диапазонах, можно представить трехмерной матрицей чисел  $I(i, j, k)$ , где  $k$  – номер

спектрального канала. Матрица  $I$  является математической моделью цифрового снимка, которую можно использовать для обработки снимка.

### Пространственная частота изображения

Под пространственной частотой некоторой области снимка будем понимать вычисленное количество изменений значений яркости на единицу длины. Пространственная частота позволяет оценить различие между наивысшими и наименьшими значениями яркости соседних пикселей. На рис. 2.2 показаны три изображения с различной пространственной частотой.

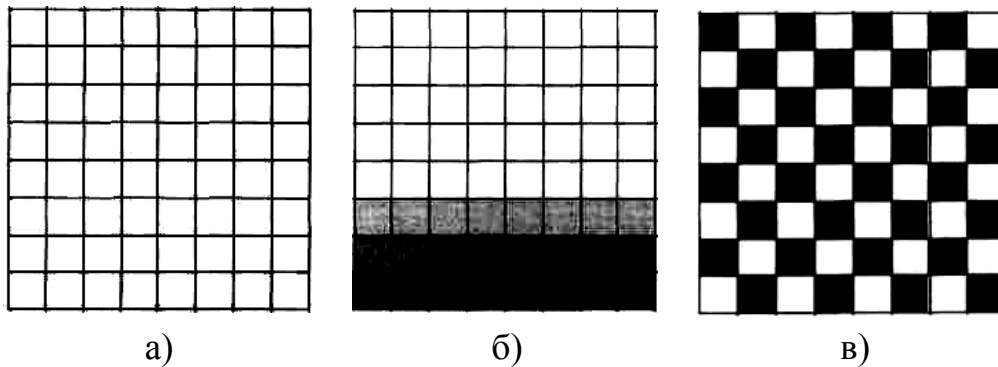


Рис. 2.2 – Изображения с нулевой (а), низкой (б) и наивысшей (в) пространственной частотой

При нулевой пространственной частоте изображение состоит из пикселей, имеющих одно и тоже значение яркости, при низкой – из пикселей с плавно меняющимися значениями яркости, а при наивысшей – из пикселей с резко меняющимися значениями яркости.

Рассмотрим графическую интерпретацию пространственной частоты снимка, который состоит из матрицы пикселей размерностью  $n \times m$  (рис. 2.3, а). Для наглядности, будем анализировать только один канал изображения.

Выполним построчную развертку канала и рассмотрим верхнюю строку пикселей изображения (эта строка выделена на рисунке).

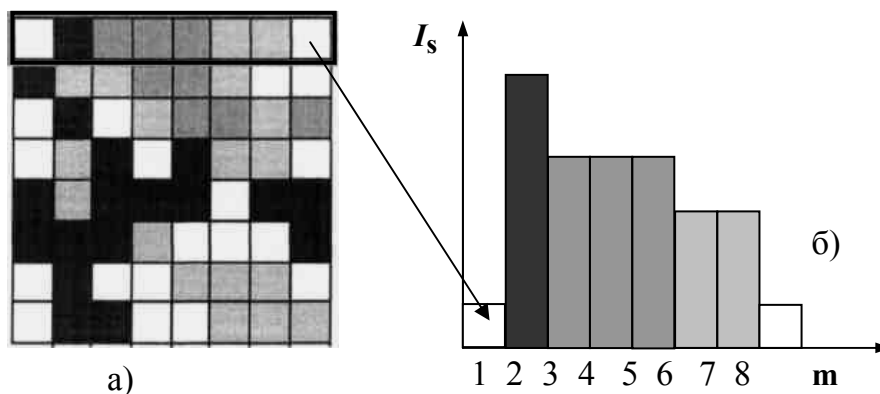


Рис. 2.3 – Графическая интерпретация пространственной частоты

Построим график, по оси  $Y$  которого отложим значения яркости пикселей по данному каналу ( $I_s$ ), а по оси  $X$ , номер  $m$  соответствующего

пикселя в строке развертки.

Согласно теории информации, любое различимое и непредсказуемое изменение принимаемого сигнала несет в себе информацию. Исходя из этого, проведем анализ пространственной частоты изменения яркости пикселей вдоль строки развертки. Например, в пределах линейной области, покрываемой пикселями 3, 4 и 5 пространственная частота неизменна, а при переходе от пикселя 1 к пикселю 2 происходит резкое изменение яркости и, следовательно, существенно меняется значение пространственной частоты. Это одномерный случай, но можно рассматривать не единственную строку, а всю матрицу пикселей изображения, переходя к двумерной задаче.

### **Гистограмма снимка**

*Гистограмма снимка* – это график (рис. 2.4), по оси  $x$  которого отложены значения яркости (числа от 0 до 255), а по оси  $y$  – частота, с которой разные значения встречаются на снимке.

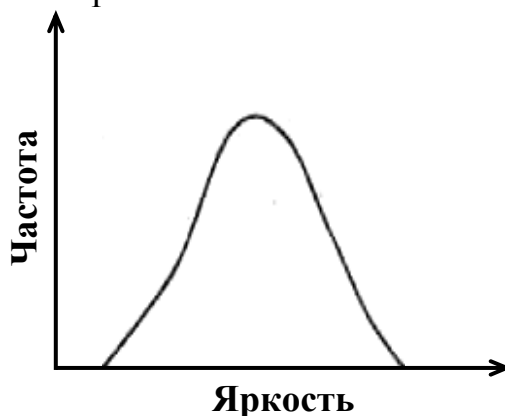


Рис. 2.4 – Гистограмма

Гистограмма характеризует статистическое распределение пикселей изображения в зависимости от их значений.

### **Игнорирование нулевых значений**

При помощи спутниковой съемки производится фотографирование некоторой территории. Площадь, охватываемая единичным фотоснимком, называется сценой. Например, у спутников серии SPOT размер сцены обычно составляет  $60 \times 60$  км. Клиент заказывает и оплачивает снимок территории, которая может занимать только часть сцены. Перед передачей заказчику выполняется предварительная обработка снимка. На снимке удаляется избыточная информация, не попадающая в область интересов клиента и не оплаченная им.

Пикселям, находящимся вне клиентской области, присваивают нулевые значения. Причем, это не обязательно цифра ноль, поскольку реальное нулевое значение может нести информационную нагрузку. Например, для внутреннего типа хранения «беззнаковое 16-бит», это может быть значение 65535. На практике присвоенное значение означает, что данный пиксель изображения не несет в себе никакой информации.

На снимке «нулевые» значения пикселей должны быть

проигнорированы, иначе при расчете статистики изображения будут получены неверные результаты. Для этого во многих диалоговых окнах ERDAS IMAGINE предусмотрены переключатели Ignore Zero Values. При задании стратегии обработки снимка пользователь должен включать эти переключатели.

### 2.1.2. Характеристика этапов обработки снимков

Этапы обработки цифровых снимков приведены на рис. 2.5.

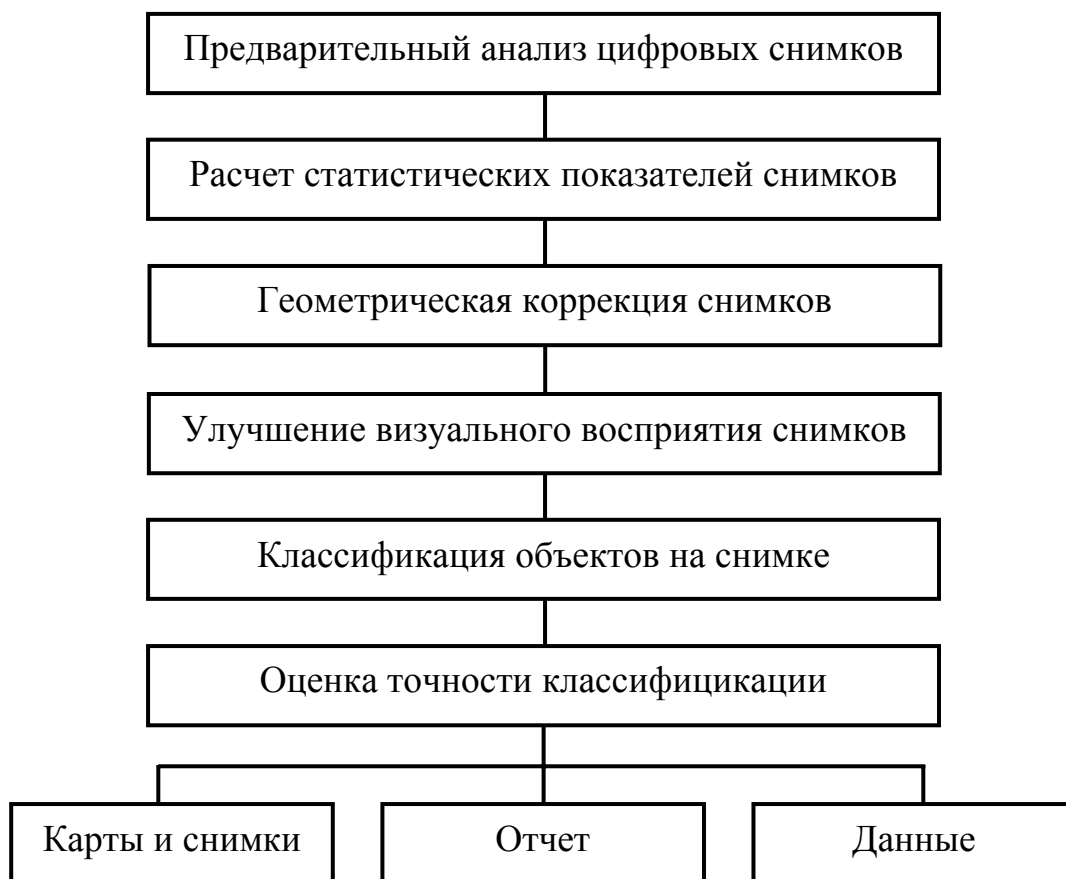


Рис. 2.5 – Этапы обработки цифровых снимков

Вначале производится предварительный просмотр и анализ цифровых снимков, определяются погрешности на снимках.

#### **Расчет статистических показателей исходных данных**

Статистические показатели используются для быстрой оценки поступивших со спутника исходных данных. Для каждой спектральной зоны рассчитывают минимальное, максимальное и среднее значения, стандартное отклонение и дисперсию. Зависимость между данными в различных спектральных диапазонах определяют с помощью ковариационной и корреляционной матриц. Для наглядного представления данных служат гистограммы и диаграммы рассеяния. Вся полученную таким образом статистическую информацию используют на следующих этапах предварительной обработки.



## **Геометрическая коррекция изображений**

Для того чтобы извлекать из цифровых снимков максимальное количество полезной информации, необходимо устранить присутствующие в них пространственные искажения. Подобные искажения возникают из-за особенностей съемочных систем и геометрических эффектов, связанных с формой Земли и параметрами движения спутника. Операция, которая применяется к исходным данным для устранения искажений, называется *геометрической коррекцией*.

Принцип геометрической коррекции заключается в следующем. Пиксели снимка перемещаются из исходного положения в новое положение в заданной системе координат. Как правило, процесс геометрической коррекции состоит из следующих этапов:

- выбор математической модели искажений;
- преобразование координат;
- повторная дискретизация (интерполяция).

Применяются следующие виды геометрической коррекции: геометрическое трансформирование, геокодирование и совмещение.

*Геометрическое трансформирование* – это процесс выравнивания изображения относительно карты, включающий геопривязку данных к системе координат проекции (см. п.п. 2.2). Геометрическое трансформирование применяют при выполнении по снимкам точных измерений линейных размеров или площадей объектов, а также при создании точных карт на основе снимков.

*Геокодирование* – частный случай геометрического трансформирования. В процессе геокодирования все пиксели изображения приводятся к стандартному значению наземного интервала дискретизации. Подобная стандартизация позволяет использовать карты и космические снимки, полученные с помощью разных съемочных систем, в качестве слоев географической информационной системы.

*Совмещение* – выравнивание двух снимков в одной и той же области. В результате совмещения соответствующие пиксели снимков относятся к одной и той же точке земной поверхности. Совмещение применяют для сравнения изображений с различающимися масштабами съемки и создания мозаики изображений (склейка областей из разных снимков).

### **Улучшение визуального восприятия снимков**

Для улучшения снимков используют методы, которые увеличивают видимые различия между объектами. Например, для подчеркивания тоновых различий используют методы увеличения контрастности, а для подавления определенных пространственных структур – пространственную фильтрацию. Для контроля качества результирующих изображений, которые могут быть как монохромными, так и цветными, их просматривают на экране монитора либо печатают на пленке или бумаге.

### **Преобразование снимков**

В отличие от операций улучшения снимков, для их преобразования

используют данные не из одного, а из нескольких спектральных диапазонов. Новые изображения получают путем попиксельного сложения, вычитания, умножения или деления данных из разных диапазонов так, чтобы выделить или подчеркнуть определенные характеристики изображения. Еще одной задачей преобразования снимков является устранение избыточности данных, которая возникает при близком расположении спектральных диапазонов многоспектральных снимков. Эта задача решается методом главных компонент.

### **Классификация данных**

Цель классификации состоит в замене визуального анализа снимка автоматизированной процедурой идентификации объектов. В процессе классификации каждый пиксель цифрового снимка относят к одному из классов пространственных объектов на основании некоторых статистических критериев. Если классифицирующим признаком служит спектральная яркость, процесс классификации называют распознаванием спектральных образов. Если же статистический критерий основывается на геометрической форме, размерах и структуре объектов, то выполняется распознавание пространственных образов. Результаты классификации можно использовать для создания тематических карт и статистических отчетов для территорий различного типа.

## **2.2. Геометрическое трансформирование снимков**

### **2.2.1. Понятия геометрического трансформирования**

При рассмотрении процесса геометрического трансформирования снимков будем использовать следующие понятия (рис. 2.6): исходный, опорный и трансформированный снимки, опорные и контрольные точки.

#### **Исходный, опорный и трансформированный снимки**

*Исходный снимок* – это космический снимок, который подвергается трансформированию. Исходный снимок, как правило, не привязан к какой-либо картографической проекции и представлен в файловой системе координат (начало координат в левом верхнем углу окна, единицы измерения – пиксели).

*Опорный снимок* (или референц-изображение) – вспомогательное изображение (карта) с известной картографической проекцией и датумом. Система координат опорного снимка называется референц-системой.

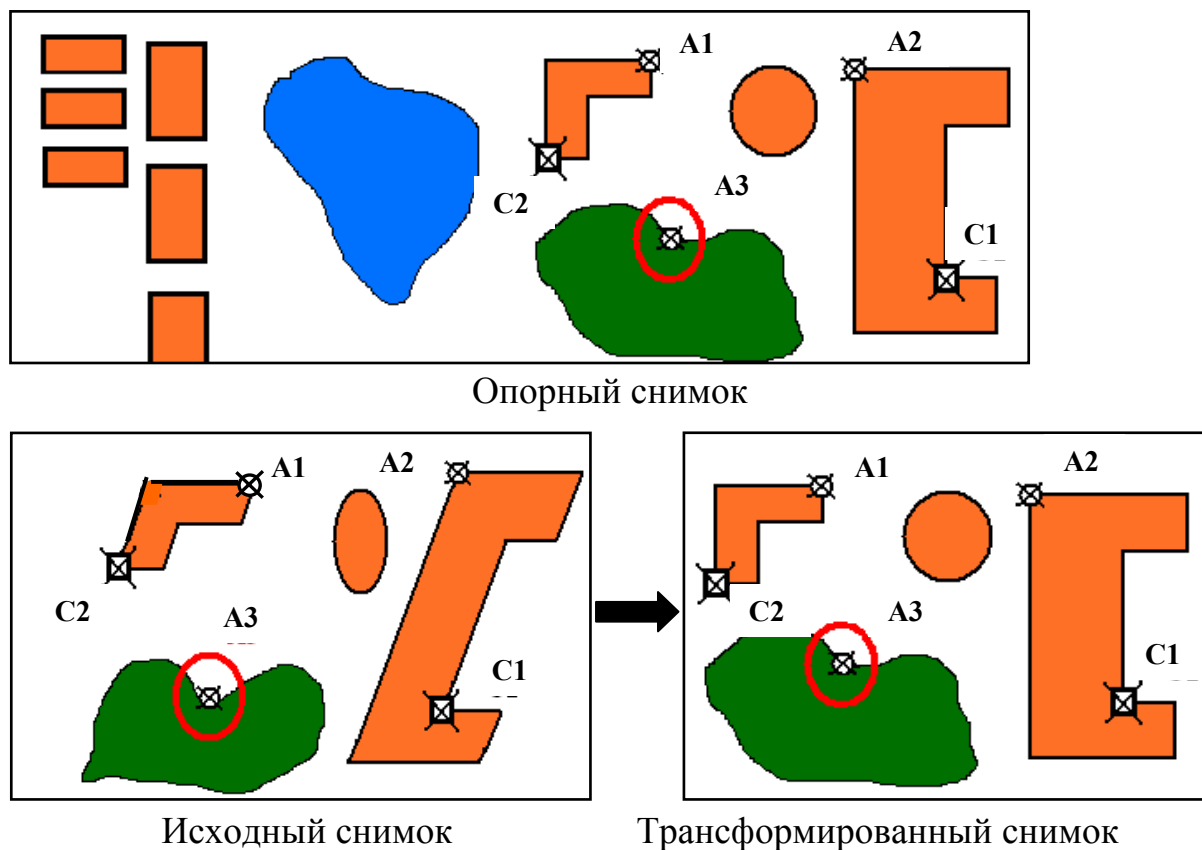
*Трансформированный снимок* – это результирующее изображение, которое получено в системе координат опорного снимка путем геометрического трансформирования исходного снимка.

#### **Опорные и контрольные точки**

*Опорные точки* (Ground Control Points – GCP) – это пары точек, которые выбираются на исходном и опорном снимках для построения математической модели трансформирования.

На рис. 2.6 приведены примеры размещения пар опорных точек A1,

A2 и A3 на исходном и опорном снимках. В качестве опорных точек целесообразно выбирать перекрестки дорог, углы зданий, взлетных полос и стадионов (точки A1 и A2). Не следует задавать опорные точки на кромках озера, краях зон растительности и объектах, подверженных изменениям с течением времени (точки A3).





Здесь:  – пары опорных точек A1, A2, A3;  
 – пары контрольных точек C1, C2.

Рис. 2.6 – Принцип геометрического трансформирования изображения

Любой снимок в формате ERDAS IMAGINE может иметь один набор GCP, который хранится в img-файле. Для просмотра набора опорных точек в Визуализаторе можно использовать инструмент GCP Tool.

Опорные точки исходного снимка могут быть выбраны на экране с помощью мыши, а эталонные считаны с карты или выбраны из файла.

*Контрольные точки (Check Points)* – это часть опорных точек, которые не используются для построения модели трансформирования (точки C1 и C2 на рис. 2.6). Они используются для независимой оценки точности трансформирования.

#### **Этапы геометрического трансформирования**

Процесс геометрического трансформирования можно разделить на следующие этапы (рис. 2.6):

1. Нанесение опорных точек на исходный и опорный снимки. Опорные точки следует равномерно распределять по всему снимку и

наносить точно, поскольку по ним будет выполняться интерполирование координат остальных точек изображения.

2. Выбор математической модели трансформирования.
3. Вычисление параметров модели трансформирования.
4. Преобразование координат и повторная дискретизация.
5. Оценка точности геометрического трансформирования.

### 2.2.2. Выбор математической модели трансформирования

В качестве математической модели геометрического трансформирования снимков используют полиномиальные уравнения. На практике для устранения искажений снимка используют обобщенную полиномиальную модель степени  $n$ :

$$x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x_{ref}^i y_{ref}^j, \quad y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} x_{ref}^i y_{ref}^j. \quad (2.1)$$

Модель связывает глобальные координаты  $x$  и  $y$  точек исходного снимка с эталонными координатами  $x_{ref}$  и  $y_{ref}$  точек опорного снимка (карты). Координаты  $x$ ,  $y$  задаются в файловой системе координат, а эталонные координаты  $x_{ref}$ ,  $y_{ref}$  – в единицах проекции карты, в которой зарегистрирован снимок.

Координаты опорных точек используются для вычисления коэффициентов полиномиального преобразования  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ . Число  $N$  коэффициентов преобразования  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$  связано со степенью полиномов соотношением:

$$N = (n + 1)(n + 2). \quad (2.2)$$

Выражения (2.1) используются для аппроксимации самых разнообразных данных. Уровень детализации такого приближения напрямую зависит от степени полинома  $n$ . В процессе полиномиальных преобразований исходного снимка могут быть выполнены операции следующего типа: тождественное преобразование, смещение, масштабирование, зеркальное отображение, поворот, сдвиг и любые комбинации перечисленных операций. В зависимости от искажений снимка, числа опорных точек и их взаимного расположения могут применяться полиномы различной степени (1-й, 2-й и выше).

#### Линейное трансформирование

Линейное трансформирование является простейшим методом полиномиальных преобразований и применяется при перенесении исходного снимка в плоскую картографическую проекцию, при преобразовании из одной плоской картографической проекции в другую проекцию или при трансформировании относительно малых площадей снимка. Для вычисления координат  $x$ ,  $y$  пикселей трансформированного

снимка применяются полиномы 1-й степени ( $n = 1$ ):

$$\begin{aligned} x &= a_{00} + a_{10}x_{ref} + a_{01}y_{ref}, \\ y &= b_{00} + b_{10}x_{ref} + b_{01}y_{ref}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Преобразование (2.3) называется аффинным преобразованием и учитывает такие деформации, как сдвиг, растяжение, поворот или их комбинации. Согласно (2.2) общее число коэффициентов полиномов

$$N = (1 + 1) (1 + 2) = 6.$$

Коэффициенты  $a_{00}$ ,  $b_{00}$  учитывают сдвиг изображения по  $x$  и  $y$ , а члены с коэффициентами  $a_{10}$ ,  $a_{01}$ ,  $b_{10}$ ,  $b_{01}$  – линейное изменение масштаба по  $x$ ,  $y$  и поворот.

Формулу (2.2) можно переписать в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} & a_{01} \\ b_{10} & b_{01} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ref} \\ y_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{00} \\ b_{00} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

В матричной форме выражение (2.3) имеет вид:

$$\mathbf{U} = \mathbf{T} \mathbf{U}_{ref} + \mathbf{T}_0, \quad (2.5)$$

где  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{U}_{ref}$ ,  $\mathbf{T}_0$  – векторы координат,  $\mathbf{T}$  – матрица трансформирования.

Матрица  $\mathbf{T}$  линейного трансформирования содержит шесть коэффициентов полиномов, которые рассчитывается по набору опорных точек. На рис. 2.7 показаны результаты операций линейного трансформирования над исходным изображением:

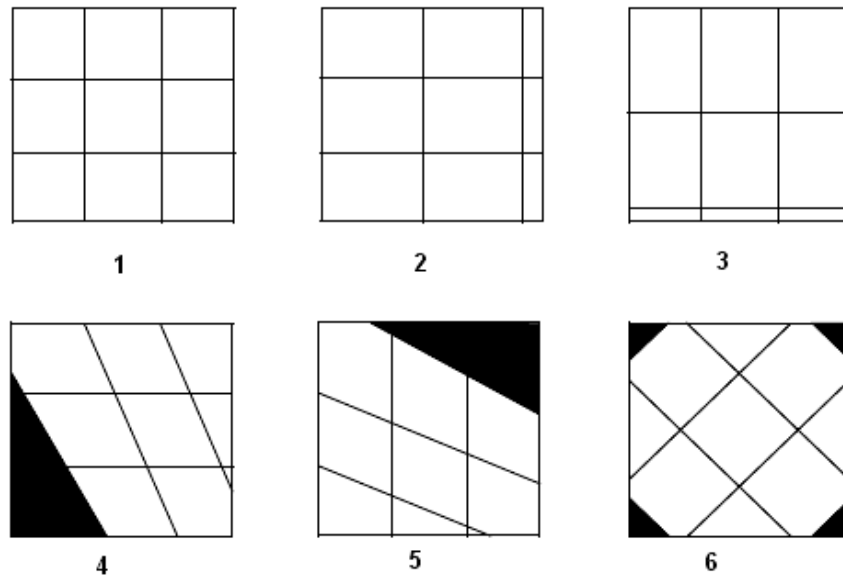


Рис. 2.7 – Операции линейного трансформирования: 1– исходное изображение; 2 и 3 – масштабирование по  $X$  и  $Y$ ; 4 и 5 – сдвиг по  $X$  и  $Y$ ; 6 – поворот

### Нелинейное трансформирование

При нелинейном трансформировании, кроме линейных искажений, устраняются нелинейные искажения. Нелинейное трансформирование

выполняется с использованием полиномов второй степени и выше. Полиномы 2-й степени имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= a_{00} + a_{10}x_{ref} + a_{01}y_{ref} + a_{11}x_{ref}y_{ref} + a_{20}x_{ref}^2 + a_{02}y_{ref}^2, \\ y &= a_{00} + b_{10}x_{ref} + b_{01}y_{ref} + b_{11}x_{ref}y_{ref} + b_{20}x_{ref}^2 + b_{02}y_{ref}^2. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Члены с коэффициентами  $a_{11}$ ,  $a_{20}$ ,  $a_{02}$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{20}$ ,  $b_{02}$  учитывают нелинейные преобразования:

$a_{11}$  – растяжение по  $x$  в зависимости от  $y$ ;

$b_{11}$  – растяжение по  $y$  в зависимости от  $x$ ;

$a_{20}$ ,  $b_{20}$  – нелинейное растяжение по  $x$  и  $y$  соответственно;

$a_{02}$  – нелинейное растяжение по  $x$  в зависимости от  $y$ ;

$b_{02}$  – нелинейное растяжение по  $y$  в зависимости от  $x$ .

На рис. 2.8 показаны результаты операций нелинейного трансформирования над исходным изображением.

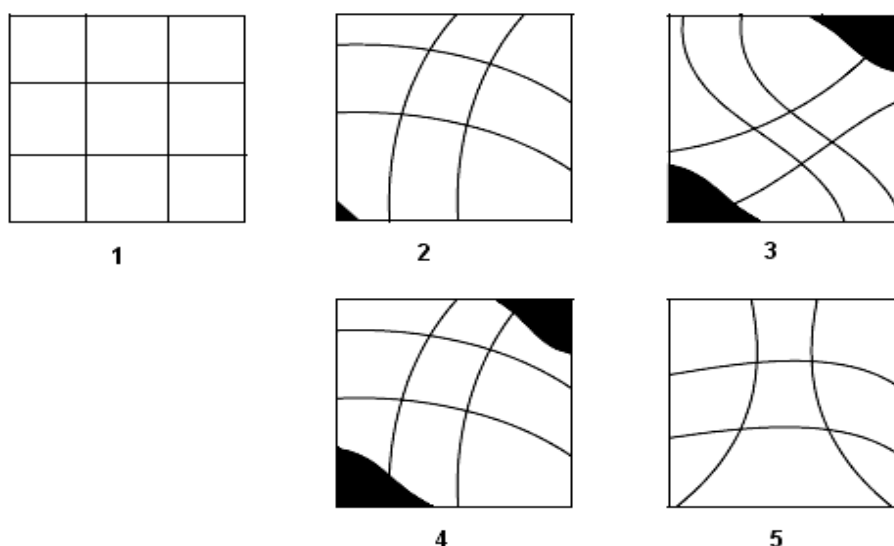


Рис. 2.8 – Нелинейное трансформирование:

1 – исходное изображение; 2,3,4,5 – выходные изображения

Трансформирование на основе полиномов 2-й степени используются для преобразования данных в координатной системе широта/долгота в плоскую картографическую проекцию, для преобразования данных покрывающих большие площади (учет кривизны Земли) и др.

Полиномы 3-й степени и выше используются для трансформирования сильно искаженных снимков.

Модель трансформирования и степень полинома выбираются в ERDAS IMAGINE перед началом трансформирования снимка.

### 2.2.3. Вычисление параметров модели трансформирования

При полиномиальном трансформировании матрица трансформирования содержит  $N$  коэффициентов для каждой пары координат  $x$  и  $y$ . Чем выше степень полиномов трансформирования, тем более сложные искажения могут быть исправлены. Однако с повышением

порядка полиномов требуется большее число опорных точек. Например, при линейном трансформировании, полиномы для  $x$  и  $y$  описывают уравнение плоскости. А плоскость однозначно определяется тремя точками. Значит, необходимы, по крайней мере, три опорных точки.

Аналогично, при нелинейном трансформировании полиномы второй степени для  $x$  и  $y$  описывают уравнение параболоида. А его однозначно определяют шесть точек. Следовательно, требуются не менее шести опорных точек.

Минимальное количество  $K$  опорных точек, необходимое для выполнения трансформирования полиномами степени  $n$ , определяется по формуле:

$$K = \frac{(n+1)*(n+2)}{2}. \quad (2.7)$$

Рассмотрим задачу определения полиномиальных коэффициентов в предположении, что задано  $M$  пар опорных точек в системах координат анализируемого и эталонного изображения (или карты). При использовании полиномиальной модели (2.6) систему  $M$  уравнений для координат  $x$  можно записать в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{ref1} & y_{ref1} & x_{ref1}y_{ref1} & x_{ref1}^2 & y_{ref1}^2 \\ 1 & x_{ref2} & y_{ref2} & x_{ref2}y_{ref2} & x_{ref2}^2 & y_{ref2}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{refM} & y_{refM} & x_{refM}y_{refM} & x_{refM}^2 & y_{refM}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ a_{11} \\ a_{20} \\ a_{02} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Аналогично, можно записать систему  $M$  уравнений для координат  $y$ .

В матричной форме системы уравнений для координат  $x$  и  $y$  записываются в виде:

$$\begin{aligned} X &= WA, \\ Y &= WB. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Если  $M$  равно минимально необходимому числу опорных точек  $K$ , то уравнения (2.9) имеют точные решения, которые записываются с помощью обратной матрицы  $W^{-1}$  размером  $M \times M$ :

$$\begin{aligned} A &= W^{-1}X, \\ B &= W^{-1}Y. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Поскольку положение опорных точек может быть определено неточно, желательно, чтобы их количество было больше числа неизвестных коэффициентов полинома. Если  $M$  больше  $K$ , то выражения (2.9) можно записать:

$$\begin{aligned} X &= WA + \varepsilon, \\ Y &= WB + \varepsilon. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Здесь добавленные члены  $\varepsilon$  представляют собой векторы ошибок,

полученные при определении положения опорных точек. В этом случае для матрицы  $W$  нельзя найти обратную матрицу. Поэтому коэффициенты полиномов вычисляются методом наименьших квадратов с минимизацией общей среднеквадратичной ошибки полиномиальной аппроксимации по опорным точкам.

## 2.3. Преобразование координат и повторная дискретизация

### 2.3.1. Преобразование координат

Исходный снимок, как правило, не привязан к какой-либо картографической проекции. Работа со снимком выполняется в файловой системе. Поэтому выходную систему координат удобно задавать при помощи опорного снимка и его системы координат (рис. 2.9).

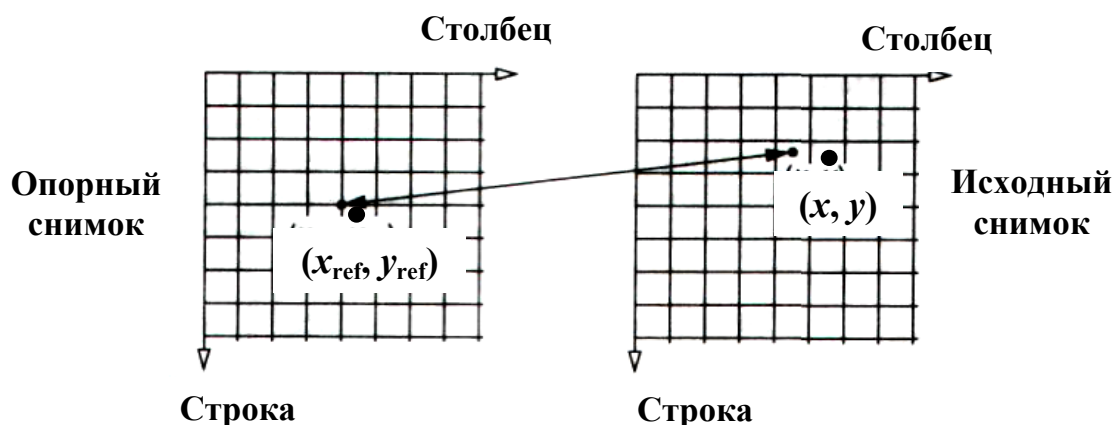


Рис. 2.9 – Двухстороннее соотношение между системами координат эталонного и исходного снимков

На рис. 2.9 приняты следующие обозначения преобразований:

- стрелка к точке  $(x, y)$  показывает преобразование целочисленных координат  $(x_{ref}, y_{ref})$  опорного снимка к нецелочисленным (в общем случае) координатам  $(x, y)$  исходного снимка (передискретизация сетки);
- стрелка к точке  $(x_{ref}, y_{ref})$  обозначает перенос рассчитанного в точке  $(x, y)$  значения пикселя в положение  $(x_{ref}, y_{ref})$  результирующего снимка.

Функцию  $f$  преобразования координат

$$(x, y) = f(x_{ref}, y_{ref}). \quad (2.12)$$

определяют вычисленные ранее коэффициенты полиномов. Преобразование (2.12) применяется поочередно ко всем целочисленным координатам  $(x_{ref}, y_{ref})$  пикселей эталонного изображения.

Таким образом, в процессе преобразования координат создается сетка для исходного снимка, в которой будут определяться новые значения пикселей снимка. Для получения выходного скорректированного снимка формируется пустая матрица с координатами ячеек  $(x_{ref}, y_{ref})$  в системе опорного снимка. Само выходное изображение еще не существует.



### 2.3.2. Методы повторной дискретизации

В процессе повторной дискретизации создается выходной файл, пиксели которого подвергаются передискретизации, чтобы вписаться в сетку новой координатной системы.

#### Принцип повторной дискретизации

Для реализации геометрического преобразования необходима интерполяция значений пикселей. Принцип повторной дискретизации показан на рис. 2.10, где новый пиксель находится в точке  $R$ .

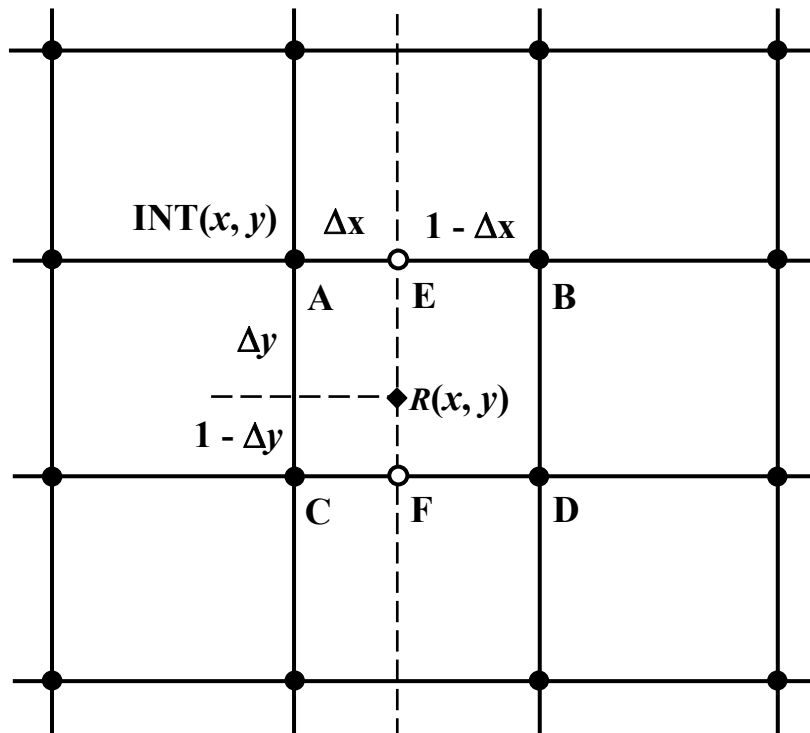


Рис. 2.10 – Геометрическая интерпретация процесса повторной дискретизации пикселя в точке  $R(x, y)$

Пиксели обрабатываемого снимка (сплошные кружки) помещаются в строки и столбцы опорного снимка с целочисленными координатами. Координаты пикселя  $A$  – целые, а смещения  $\Delta x$  и  $\Delta y$  дробные части координат  $(x, y)$ , рассчитанных по формуле (2. 12).

При повторной дискретизации применяются следующие методы назначения яркости пикселям изображения: интерполяция по ближайшему соседу, билинейная интерполяция, кубическая свертка и др.

#### Интерполяция по ближайшему соседу

В качестве значения пикселя в точке  $(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}})$  выходного изображения выбирается значение исходного пикселя, ближайшего к точке  $(x, y)$ , например, пиксель  $C$  на рис. 2.10. Данное значение яркости присваивается текущей ячейке сетки трансформированного изображения.

Достоинствами метода является простота и высокое быстродействие, поскольку не требуется вычислять значение выходного пикселя после того, как выполнен расчет координат  $(x, y)$ .

Недостатком метода является то, что из-за округления в трансформированном изображении возникают разрывы величиной в половину пикселя. При отображении снимков этот эффект обычно не заметен, но он может быть важен для количественного анализа.

### **Билинейная интерполяция**

В этом методе используются четыре ближайших соседа в окрестности точки  $(x, y)$ . Значение яркости текущего пикселя выходного файла назначают на основе анализа расстояний между текущим ретрансформированным пикселем и четырьмя ближайшими к нему пикселями исходного снимка. На рис. 2.10 исходные пиксели обозначены как  $A, B, C$  и  $D$ , промежуточные пиксели –  $E$  и  $F$ , текущий пиксель выходного файла –  $R$ .

Яркость промежуточных пикселей  $E, F$  и пикселя  $R$  интерполируется при помощи линейной функции:

1) Расчет значений яркости  $I_E$  и  $I_F$  промежуточных пикселей  $E$  и  $F$  путем интерполяции значений пикселей  $A$  и  $B, C$  и  $D$  соответственно:

$$\begin{aligned} I_E &= \Delta x I_B + (1 - \Delta x) I_A, \\ I_F &= \Delta x I_D + (1 - \Delta x) I_C. \end{aligned} \quad (2.13)$$

2) Расчет значения  $I_R$  яркости пикселя  $R$  в точке  $(x, y)$  путем интерполяции значений  $I_E$  и  $I_F$  пикселей  $E$  и  $F$  по формуле:  $\Delta y$

$$I_R = \Delta y I_F + (1 - \Delta y) I_E. \quad (2.14)$$

Метод носит название билинейной интерполяции потому, что два раза (по направлению  $X$ , а затем по направлению  $Y$ ) применяем интерполяцию яркости при помощи линейной функции.

Применение метода билинейной интерполяции позволяет получить более «сглаженное» выходное изображение, с менее выраженной ступенчатостью, чем при передискретизации по методу ближайшего соседа. При этом сглаживаются грани и теряются мелкие детали изображения.

### **2.3.3. Оценка ошибок трансформирования**

Точность вычисления коэффициентов полиномов не является показателем адекватности полинома, как модели физических искажений. Аппроксимация может быть достаточно хорошей рядом с опорными точками. Например, при  $M = K$  ошибка будет нулевая. В других точках могут наблюдаться большие невязки. Поэтому при коррекции искажений по опорным точкам необходимо использовать два подмножества точек: опорные точки для определения коэффициентов полинома и контрольные точки – для оценки остаточных ошибок в других точках.

Для оценки точности трансформирования будем рассчитывать среднеквадратическую ошибку (СКО) между заданным местоположением

опорной точки на исходном снимке и действительным местоположением той же точки после геометрического трансформирования. СКО для данной точки рассчитывается по формуле:

$$RMSError = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2} \quad (2.15)$$

где  $RMSError$  – СКО точки;

$x_i, y_i$  – исходные координаты;

$x_t, y_t$  – трансформированные координаты.

СКО выражается в единицах исходной координатной системы. Если опорный снимок записан в файловой системе координат (данные о картографической проекции отсутствуют), то СКО будет выражаться в пикселях. Например, СКО = 2 означает, что точка на опорном снимке отстоит на расстоянии 2 пикселя от точки на трансформированном снимке.

СКО по определенному направлению (по оси  $X$  или  $Y$ ) называется невязкой (residual). Невязки вычисляются для каждой точки. Например, невязка по  $X$  данной точки это расстояние по оси  $X$  между исходной и трансформированной  $X$ -координатами точки (рис. 2.11).

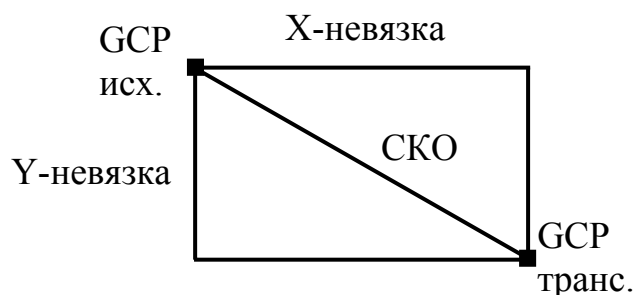


Рис. 2.11 – Невязки при повторной дискретизации

СКО каждой точки может быть вычислено по формуле:

$$R_i = \sqrt{XR_i^2 + YR_i^2}, \quad (2.16)$$

где  $R_i$  – СКО текущей точки с индексом  $i$ ;

$XR_i, YR_i$  –  $X$ -невязка и  $Y$ -невязка точки с индексом  $i$ .

Общее СКО для всех точек можно выразить через невязки отдельных точек:

$$R_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n XR_i^2}, \quad (2.16)$$

$$R_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n YR_i^2}, \quad (2.17)$$

где  $R_x, R_y$  – общее СКО по  $X$  и  $Y$ ;

$n$  – общее количество опорных точек.

Общее СКО рассчитывается по формуле:

$$T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}. \quad (2.18)$$

Вклад(Contribution) точки с индексом  $i$  в СКО:

$$E_i = \frac{R_i}{T}, \quad (2.19)$$

где  $E_i$  – вклад точки с индексом  $i$  в СКО;

$T$  – общее СКО;

$R_i$  – общее СКО точки с индексом  $i$ .

Как правило, совмещение изображений или коррекция искажений является итерационным процессом. После того, как получены в первом приближении СКО, есть четыре возможных варианта выполнения геометрического трансформирования снимка.

1. Отбросить все точки, где значение СКО самое большое и провести новое геометрическое трансформирование с оставшимися точками. Однако если удаляемые точки единственные в некотором регионе, то после их удаления трансформирование региона может привести к еще большим ошибкам.

2. Назначить более высокий допуск на СКО.

3. Усложнить модель трансформирования, подвергая изображение более сложным преобразованиям.

4. Выбрать и оставить только те точки, которые вы считаете полностью «надежными».

### **Выводы**

При анализе данных дистанционного зондирования требуются различные типы систематических поправок на геометрические искажения.

Геометрическое трансформирование аппаратно скорректированного снимка и его геопривязку к карте можно реализовать с помощью глобальных полиномиальных функций в том случае, если снимок получен для ограниченной области с умеренным рельефом.

Повторная дискретизация при геометрической коррекции изменяет локальные пространственные и глобальные радиометрические свойства изображения. При дискретизации по ближайшим пикселям не создаются новые спектральные вектора, а при билинейной повторной дискретизации в исходном диапазоне значений пикселей появляются новые вектора.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Чем отличаются исходный и опорный снимки?
2. Для чего используются опорные и контрольные точки?
3. Поясните этапы геометрического трансформирования.
4. Дайте характеристику полиномиальных преобразований.
5. Поясните методы повторной дискретизации, применяемые в процессе геометрического трансформирования снимков.

### 3. ДЕШИФРИРОВАНИЕ СНИМКОВ

Космический снимок содержит подробную информацию о состоянии объектов земной поверхности в момент съемки. *Дешифрирование* – это процесс изучения снимков с целью идентификации объектов и оценки их значимости. Целью дешифрирования является установление связи географических структур на земной поверхности с их изображением на снимке, а конечным результатом – тематическая карта территории, представленной на снимке.

Для дешифрирования снимков используют специальные методы и дополнительные данные, полученные из различных источников – карт, отчетов о полевых исследованиях и ранее полученных результатов анализа снимков той же территории. На основании анализа перечисленных источников заранее устанавливаются классы объектов, которые должны быть выделены на исходном снимке.

Дешифрирование может производиться визуальными методами или автоматизированными методами классификации снимков.

#### 3.1. Визуальные методы дешифрирования

Визуальные методы применяются при ручном анализе снимков. Они основываются на опыте и интуиции у проводящего дешифрирование специалиста, конечной задачей которого является точное выявление дешифровочных признаков анализируемых объектов с целью их достоверного обнаружения.

Дешифровочные признаки – это свойства объектов, которые прямо или косвенно отображаются на снимках и обеспечивают распознавание объектов. В зависимости от характера признаков различают прямые или индикационные способы дешифрирования.

##### 3.1.1. Прямой способ дешифрирования

Этот способ основан на том, что многие объекты могут быть выявлены и опознаны на снимках по прямым дешифровочным признакам, которые присущи самому изображению объектов.

Прямыми признаками называют признаки, присущие самим объектам дешифрирования – рельефу, растительности, водным объектам и другим компонентам природного комплекса. К ним относятся три группы признаков:

- яркостные (цвет, тон);
- геометрические (форма, размер, тень);
- структурные (текстура, структура, рисунок изображения).

Примеры использования прямых дешифровочных признаков приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Основные дешифровочные признаки

	<p><i>Цвет и тон</i> объекта характеризуют его относительную яркость или цвет. Например, изменение цвета (или тона) изображения разделяет участки газонов с густой и редкой травянистой растительностью.</p>
	<p><i>Форма</i> объекта или его контуров является четким критерием дешифрирования. Объекты, созданные человеком имеют четкие границы и правильную форму. Форма природных объектов (лесных массивов, водоемов и др.) является нерегулярной.</p>
	<p><i>Размер</i> объекта зависит от масштаба. При дешифрировании анализируются относительные размеры объектов на одном и том же снимке. Например, размер частного дома должен быть меньше размера крупного торгового центра.</p>
	<p><i>Тень</i> дает представление об относительной высоте и профиле объекта. В горных районах тень подчеркивает топографические особенности рельефа и является полезным критерием при дешифрировании геологических структур.</p>
	<p><i>Текстура</i> является качественным параметром и характеризуется как резкая или плавная. Например, сухие песчаники обладают плавной текстурой без выраженных вариаций тона, а текстура смешанного леса является очень резкой из-за пространственных изменений тона.</p>

*Структура* изображения определяется взаимным расположением объектов на снимке. Как правило, отчетливая и хорошо распознаваемая структура возникает в местах периодически повторяемых тонов и текстур. Так, например, разную структуру образуют упорядоченные дома в городе и деревья в саду.

Прямой способ дешифрирования может применяться к объектам, непосредственно изображенным на космическом снимке: растительность, формы рельефа, водотоки, антропогенные объекты.

### **3.1.2. Индикационный способ дешифрирования**

Дешифрирование снимка выполняется на основе информации о наличии или отсутствии связанных с объектом косвенных признаков.

#### **Косвенные признаки (индикаторы)**

Косвенные признаки характеризуют объект дешифрирования опосредствованно через какой-либо компонент природного комплекса или определенные сочетания. Основными из них являются тип местности и взаимосвязи объектов.

*Тип местности* является описательной характеристикой территории, в том числе ее топографии, почвенного или растительного покрова и т. д. Тип местности и растительность характеризуют геоморфологические и ландшафтные индикаторы.

Геоморфологические индикаторы позволяют судить о строении и составе отложений, свойствах пород, глубине залегания грунтовых вод, проявлениях современных геологических процессов и имеют большое значение для дешифрирования проявлений различных геологических процессов: карста, оползней, заболачивания и др.

Ландшафтные индикаторы характеризуют растительность. Растительность является компонентом ландшафта, тесно связанным с климатом и с почвами, породами и подземными водами. Например, неглубокое залегание грунтовых вод обычно приводит к формированию влаголюбивых растительных сообществ, что позволяет не только установить их наличие, но и достаточно точно оконтурить площадь распространения. В данном случае влаголюбивые растительные сообщества являются индикатором неглубоко залегающих грунтовых вод.

*Взаимосвязи* – важный критерий дешифрирования, определяющий закономерности взаимного расположения близлежащих объектов. Например, небольшие участки земли белого цвета, расположенные нерегулярно вдоль реки, свидетельствуют о наличии у нее сухого песчаного берега. Сетка линий и регулярно расположенные прямоугольные объекты между ними указывают на территорию городского типа.

Определенное значение для инженерно-геологических изысканий имеют почвенные индикаторы. Дешифрирование почв может дать определенную информацию о подстилающих породах, поскольку состав

почв, их структура, мощность, химический состав и влажность в большой степени зависят от состава материнских пород.

Существенную информацию о геологическом строении дают гидрографические индикаторы. Связь между водными объектами и геологическим строением наиболее отчетливо проявляется в закономерностях строения гидрографической сети.

Отдельные частные индикаторы (рельеф, растительность, водные объекты) образуют в совокупности сложные пространственные структуры, называемые физиономическими комплексами. Такие комплексные индикаторы являются наиболее надежным дешифровочным признаком инженерно-геологических условий, отражающим одновременно состав отложений, гидрологические условия и развитие различных геологических процессов. Комплексные признаки учитывают различные сочетания компонентов, образующих физиономические комплексы, т. е. внешние, доступные для наблюдения части природно-территориальных комплексов разных рангов.

### **Принцип индикационного дешифрирования**

Принцип дешифрирования основан на том, что часть объектов и явлений, не изображенных на снимке и недоступная для прямого дешифрирования, связана причинными зависимостями с теми или иными внешними компонентами ландшафта или элементами его структуры и отвечает им территориально. Индикационное дешифрирование опирается на ландшафтно-индикационный метод исследования. В данном случае дешифрирование осуществляется в две стадии:

- выявление индикаторов;
- использование индикаторов для дешифрирования объектов или явлений.

Например, изменение растительного покрова может служить указанием на развитие процессов подтопления и заболачивания, снижение уровня грунтовых вод, изменение температурного режима грунтов и т. д. В основном это касается естественного развития ландшафтов. В антропогенно преобразованных местах естественные связи могут быть нарушены и их индикационное значение утеряно.

*Выделение зональностей.* Еще одним методом дешифрирования сложных структур является выделение на снимке зональностей – участков однородного тона и текстуры изображения. При использовании этого метода оператор обращает внимание на общую структуру изображения, не стараясь распознать отдельные ландшафтные единицы.

Сначала на снимке выделяют области, однородные по тону, текстуре и другим признакам, затем эти зоны стараются отнести к одному из возможных классов объектов. Очевидно, что на этом шаге необходимо использовать данные полевых исследований и другую вспомогательную информацию. Если результаты дешифрирования оказываются неудовлетворительными, можно попытаться объединить или разделить выделенные области. Выделение зон – мощный инструмент



дешифрирования, который, однако, следует применять с осторожностью. Выделенные зоны могут не точно соответствовать изучаемым классам объектов. Например, тон и структура одной области могут определяться геологическим строением и топографией, а схожие характеристики другой области – растительным покровом.

### **3.2. Автоматизированные методы дешифрирования**

Представление снимков в цифровом формате дало широкие возможности для развития методов автоматизированного дешифрирования. Проблема автоматизации дешифрирования в условиях возросшего количества данных и повышения требований к скорости анализа и интерпретации остается актуальной. Относясь к более общей проблеме распознавания образов, большинство методов сводится к машинной классификации объектов на основе формализованных дешифровочных признаков.

#### **3.2.1. Методы машинной классификации снимков**

*Распознавание образов* – раздел информатики, разрабатывающий принципы и методы классификации и идентификации предметов, явлений, процессов, сигналов, ситуаций, т. е. всех тех объектов, которые могут быть описаны конечным набором некоторых признаков или свойств, характеризующих объект. Распознавание образов наиболее применимо, когда целью является отнесение каждого элементарного наблюдения к одному из ограниченного числа дискретных классов.

При обработке многозональных снимков многие методы используют признаки спектральной яркости, поэтому в ходе реализации методов автоматизированного дешифрирования решается задача определения количественных связей между спектральной яркостью и характеристиками объектов. Распределение пикселей по классам происходит в спектральном пространстве.

Задача дешифрации земных ландшафтов и акваторий заключается в разбиении некоторой группы объектов на классы на основе определенных требований. К одному классу при этом относятся объекты, обладающие объективно общими свойствами (отражательными характеристиками): лес, сельхозугодия, водные поверхности, антропогенные объекты и др.

Для решения этой задачи используются различные алгоритмы теории распознавания образов, математической статистики, кластерный анализ. Следует отметить, что для получения предметно-качественной информации требуется интеграция методов машинной классификации и визуальных методов.

Итак, машинная классификация основывается на том, что любой исследуемый объект характеризуется совокупностью количественных признаков его изображения, составляющих образ или сигнатуру.

Изображение разбивается на элементы, для каждого из которых определяются численные значения признаков, образующих многомерный (по количеству признаков) вектор.

*Задача классификации* состоит в разделении пространства признаков на локальные области, соответствующие одному классу объектов. Такой процесс называют также сегментацией изображения. Машина выполняет достоверную классификацию при однозначном соответствии признаков объекту.

В действительности соответствие зачастую носит вероятностный характер, образы объектов перекрываются, поэтому выполняемая классификация не может быть строго определенной. Для повышения ее достоверности идут по пути увеличения числа признаков, например, используются разновременные снимки или большее количество каналов при многозональной съемке. В дополнение к спектральным признакам используют текстурные, учитывают форму и расположение объектов, информацию об окружающих объектах. Эти признаки, дополняя спектральные, повышают надежность классификации.

Для машинной классификации существуют алгоритмы, реализующие различные правила классификации:

- с обучением (контролируемая классификация);
- без обучения (неконтролируемая классификация).

*Контролируемая классификация* требует больше машинных ресурсов и значительного быстродействия, является более трудоемкой, но выполняется с большей точностью. Обучение проводится с использованием наземных данных, применение которых требует учета влияния атмосферы и смещения информации о различных объектах в пределах элемента разрешения. Обучение может проводиться непосредственно по обрабатываемому изображению, на котором необходимо иметь эталонные участки с известными объектами.

*Неконтролируемая классификация* позволяет формально расчлнить изображение, выполняя его кластеризацию, т. е. объединение элементов изображения в группы – кластеры по формальному признаку без учета их содержательного значения.

Для проверки правильности интерпретации информации, полученной на основе показаний приборов, необходимы наземные данные, так как для оценки точности полученных результатов необходимо знать фактическое состояние наблюдаемых участков. Априорная информация обязательна для проведения как контролируемой, так и неконтролируемой классификации. Чем выше требуемая точность классификации, тем значительнее должен быть ее объем. Априорную информацию получают путем полевого дешифрирования или при полевой проверке камерального дешифрирования.

### 3.2.2. Процесс выполнения машинной классификации

Конечным результатом классификации многоспектральных снимков является преобразование данных цифрового снимка в тематическую карту, на которой описательные метки распределяют по категориям различные объекты земной поверхности или определенные условия (рис. 3.1).

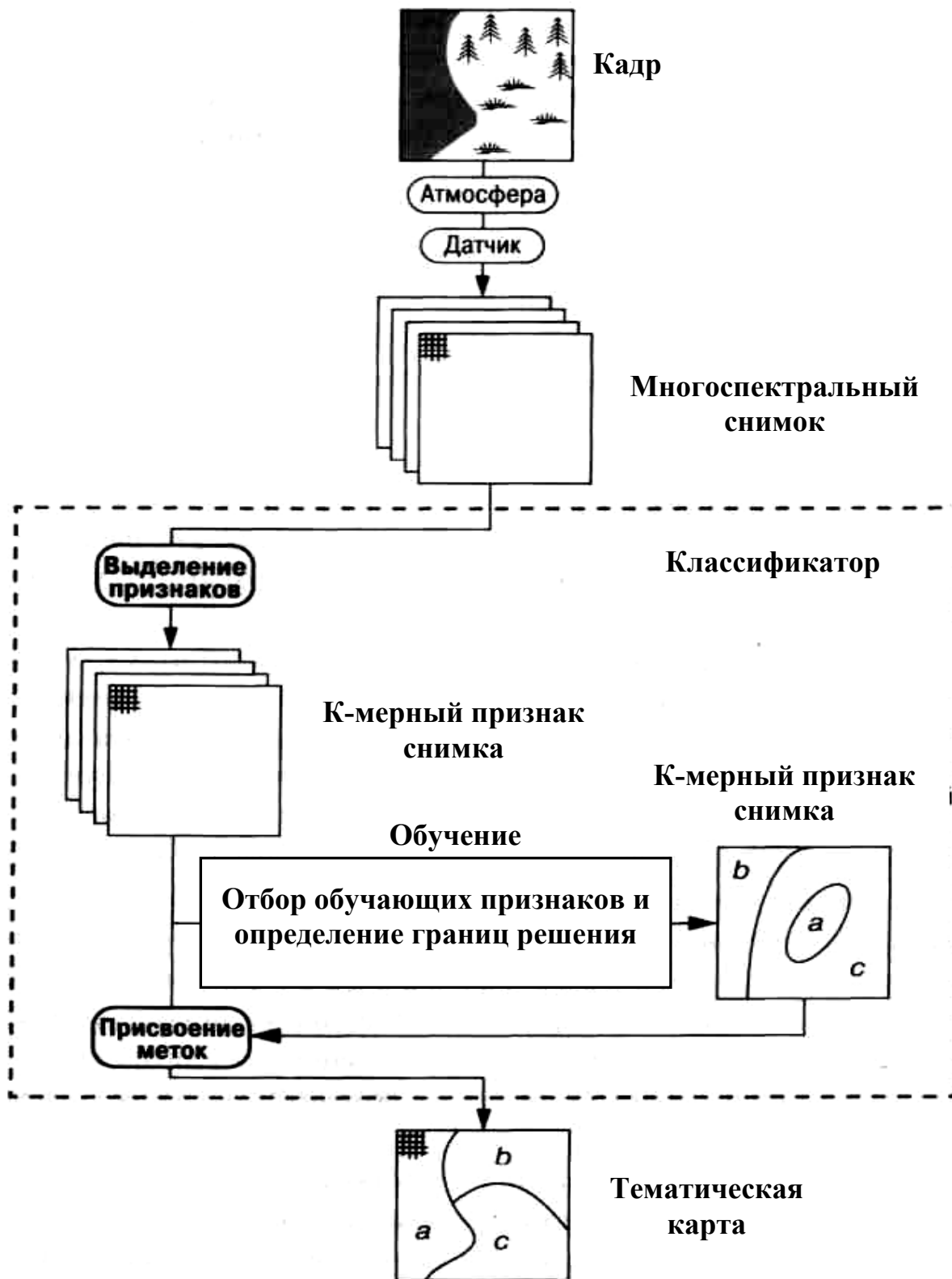


Рис. 3.1 – Поток данных в процессе классификации

Тематическая карта содержит пространственное распределение распознаваемых признаков земной поверхности определенного района. Классификация является процессом получения тематических карт из снимков. Темы могут изменяться от таких категорий, как почва, растительность и поверхностные воды (в общем описании сельского района), до различных типов почв, растительности и глубин водоемов или их прозрачности при более детальном описании. При составлении тематической карты подразумевается, что категории, выбранные для карты, различимы в данных, содержащихся на исходных снимках.

В процессе классификации различают информационные и спектральные классы. *Информационные классы* – это объекты, которые необходимо распознать на снимке. В отличие от этого, *спектральный класс* – это группа пикселей, обладающих приблизительно одинаковой яркостью в некотором спектральном диапазоне. В процессе классификации производится совмещение спектральных классов с информационными классами. Полное и взаимно однозначное соответствие между двумя типами классов наблюдается редко. Как правило, одному информационному классу соответствуют два или три спектральных класса. Некоторые выделенные спектральные классы вообще не соответствуют никаким объектам.

Процесс классификации снимка включает в себя несколько этапов: выделение признаков, обучение и маркировка (рис. 3.1).

*Выделение признаков* – пространственное или спектральное преобразование многоспектрального снимка в характерные признаки изображения. Этап не является обязательным, так как многоспектральный снимок может быть использован напрямую.

*Обучение* – выбор пикселей для обучения классификатора распознаванию требуемых тем или классов, а также для определения границ решения, которые сегментируют пространство признаков в соответствии со свойствами обучающих пикселей. При контролируемой классификации сначала определяются информационные классы, а затем соответствующие им спектральные классы. При неконтролируемой классификации спектральные классы выделяются с помощью программ кластерного анализа, а затем оператор сопоставляет классы с реальными пространственными объектами. Таким образом, несмотря на свое название, неконтролируемая классификация не является полностью автоматической.

*Маркировка* – применение границ решения пространства признаков к снимку в целом для маркировки всех пикселей. Если обучение было контролируемым, то метки уже привязаны к областям пространства признаков; если же оно было неконтролируемым, тогда аналитик должен будет на этом этапе присвоить метки этим областям. Окончательная карта содержит по одной метке для каждого пикселя.

В заключение отметим, что для получения предметно-качественной информации требуется интеграция методов машинной классификации и визуальных методов.

### 3.3. Алгоритмы неконтролируемой классификации

#### 3.3.1. Основные понятия кластерного анализа

Алгоритмы неконтролируемой (автономной) классификации реализуют методы кластеризации, которые применяются в различных многомерных исследованиях. В основе алгоритмов кластеризации лежит объединение пикселей в группы, называемые *кластерами*, в зависимости от установленного дешифровщиком порога близости их характеристик. Тот факт, что функция плотности вероятностей имеет моду (значение во множестве наблюдений, которое встречается наиболее часто) в некоторой области пространства измерений, означает, что большая часть векторов измерений стремится расположиться в этой области, а не в прилегающих областях. Векторы измерений имеют тенденцию группироваться вблизи моды. Анализ набора векторов измерений, имеющий целью выявить эту тенденцию, называется *кластерным анализом* или *кластеризацией*.

*Кластерами* называют элементы изображения (совокупности пикселей), схожие между собой по яркости, текстуре и другим признакам. Выбор меры сходства лежит в основе правила отнесения элементов к области, характеризуемой центром некоторого кластера.

Методы кластеризации разрабатывались с целью выявления естественной структуры данных. Чтобы проиллюстрировать понятие «естественная структура», предположим, что имеется набор многоспектральных обучающих образов (рис. 3.2). Из наземных наблюдений известно, что они относятся к пшеничным полям. Применяя наши знания о пшеничных полях, времени года и физиологии пшеницы, можно предположить, что естественная структура этого множества данных отображает разные стадии зрелости сельскохозяйственных культур и, возможно, еще различия сортов.

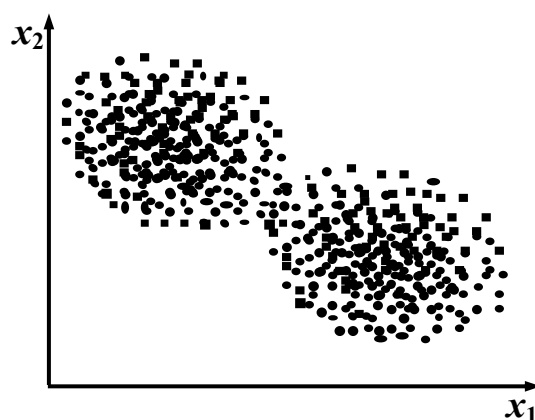


Рис. 3.2 – Данные, имеющие тенденцию к образованию кластеров: многомодальное распределение данных с пшеничных полей

Класс «пшеница» имеет многомодальную функцию плотности вероятностей. Этот многомодальный класс должен быть разбит на

одномерные подклассы.

В рассмотренном примере структура данных определена визуально с помощью наглядного представления данных. Кластерный анализ позволяет делать то же самое на ЭВМ. Более того, машинная реализация позволяет выйти за пределы двух- или трехмерного пространства, которыми ограничивается визуальный анализ.

Чтобы реализовать процесс кластеризации на ЭВМ, необходимо определить понятие кластера в математической форме.

Конкретизируем понятие кластера с помощью трех вспомогательных определений:

- расстояние между точками в пространстве признаков;
- расстояние между наборами точек (предполагаемыми кластерами);
- критерий кластеризации.

*Расстояние между точками.* Наиболее известной мерой расстояния между точками является Евклидова метрика. Расстояние вычисляется по формуле:

$$d_e(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ki} - x_{kj})^2}. \quad (3.1)$$

Имеются и другие меры межточечного расстояния. Некоторые из них придают различные веса разным компонентам (например, расстояние Махаланобиса). Евклидово расстояние вычисляется наиболее просто и широко используется в алгоритмах кластеризации, которые применяются для анализа данных дистанционных измерений.

*Расстояние между группами точек.* Может быть определено различными способами. Допустим, необходимо найти расстояние между группами, имеющими метки  $A$  и  $B$  (группы  $A$  и  $B$  могут быть кандидатами в кластеры). Простейший путь определения расстояния между  $A$  и  $B$  – вычислить среднее расстояние между всеми парами точек, для которых один элемент каждой пары принадлежит группе  $A$ , а другой – группе  $B$ .

*Критерий кластеризации* отражает назначение точек в кластеры таким образом, чтобы расстояния между точками внутри кластера были минимальны, а расстояния между кластерами – максимальны.

Одним из критериев кластеризации, которому эквивалентны многие другие критерии, является критерий суммы квадратов ошибок –  $\Sigma_{ko}$ . Пусть имеется  $m$  кластеров,  $M_i$  – вектор математического ожидания для  $i$ -го кластера, а  $X_i$  – набор точек данных, принадлежащих  $i$ -му кластеру. Тогда сумма квадратов ошибок вычисляется по формуле:

$$\Sigma_{ko} = \sum_{i=1}^m \sum_{X \in C_i} \|X - M_i\|^2, \quad (3.2)$$

где  $\|X - M_i\|$  – евклидово расстояние между  $X$  и  $M_i$ .

Таким образом, сумма квадратов ошибок – это совокупное расстояние между каждой точкой набора данных и математическим

ожиданием кластера, к которому точка приписана. Следовательно, при минимизации  $\Sigma_{k_0}$  в качестве критерия кластеризации стремятся отнести точки к кластерам так, чтобы кластеры имели наибольшую возможную плотность.

Другой метод для определения критерия кластеризации связывается с определением рассеяния точек внутри кластера  $S_w$  и определением рассеяния кластеров  $S_b$  (межкластерное рассеяние). Цель – минимизировать  $S_w$  при одновременной максимизации  $S_b$ . Этот критерий идентичен минимизации критерия суммы квадратов ошибок.

### 3.3.2 Алгоритм кластеризации ISODATA

Алгоритм ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques) реализует итеративный самоорганизующийся метод анализа данных. Это наиболее известный алгоритм неконтролируемой классификации, предназначенных для обработки растровых изображений. Алгоритм положен в основу кластеризации во многих программных пакетах, в том числе и в пакете ERDAS IMAGINE 2010.

В алгоритме обрабатывается набор данных  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ , включающий  $N$  элементов (пикселей). Результат работы алгоритма во многом зависит от заданных начальных параметров процесса кластеризации. К числу таких параметров относятся:

$m$  – необходимое число классов (кластеров);

$Q_N$  – порог сходимости (относительное количество пикселей, которые не изменяют своей принадлежности к классу при переходе к следующей итерации).

$Q_s$  – параметр, характеризующий среднеквадратическое отклонение;

$Q_c$  – параметр компактности кластеров;

$L$  – количество пар центров кластеров, которые можно объединить;

$I$  – допустимое число циклов итерации – 15.

В алгоритме критерием кластеризации является минимизация рассеяния точек внутри кластера при одновременной максимизации межкластерных расстояний. Для реализации критерия в алгоритм ISODATA включены эвристические процедуры, которые осуществляют удаление кластеров, попарное объединение кластеров в один кластер и разделение одного кластера на два кластера.

Укрупненная схема алгоритма ISODATA приведена на рис. 3.3. Классификация снимка выполняется в таком порядке.

Ввод начальных параметров (символ 1) осуществляется вручную. Перед началом первой итерации кластеризации пространство признаков разбивается на области в виде вектора  $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ , центром каждой из которых есть средние значения яркости кластеров (символ 2). Средние значения кластеров равномерно распределяются в пространстве признаков в виде вектора. Вектор задается крайними точками со спектральными

координатами по каналам  $A$  и  $B$ , после чего определяются центры кластеров  $c_1, c_2, \dots, c_m$ .

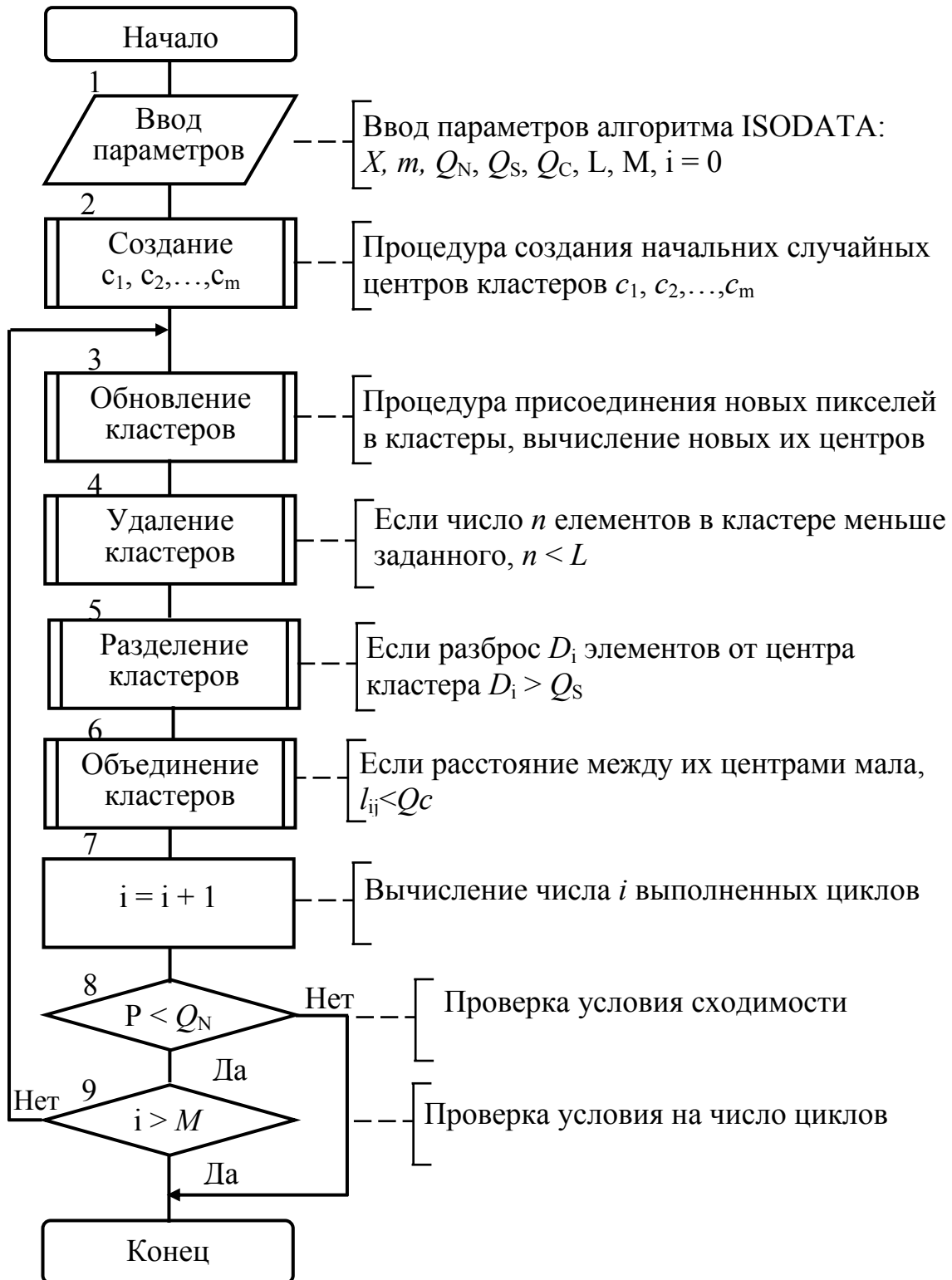


Рис. 3.3 – Укрупнена схема алгоритма ISODATA

Распределение центров кластеров  $c_1, c_2, \dots, c_m$  двухмерного вектора спектральных признаков показано на рис. 3.4, а.



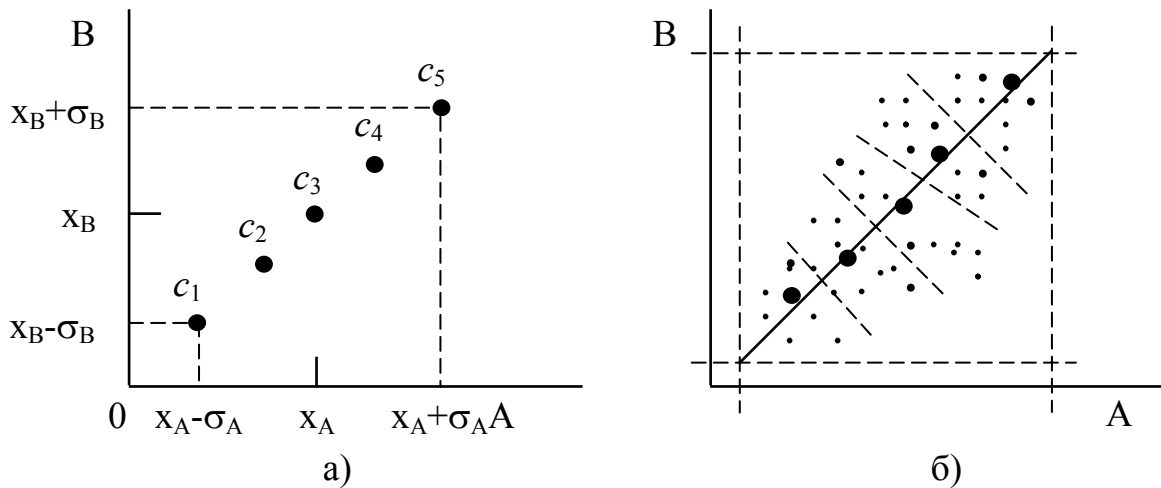


Рис. 3.4 – Двухмерный вектор распределения центров кластеров

На второй и следующих итерациях (рис. 3.3, символы 3 – 7) выполняется классификация всех пикселей (формирование кластеров) и пересчет средних значений кластеров. Анализ пикселей выполняется последовательно от левого верхнего угла снимка к нижнему правому.

При обновлении кластеров (символ 3) вычисляются спектральные расстояния между пикселями и средними значениями кластеров. В результате происходит некоторое смещение положения кластеров в пространстве признаков (рис. 3.4, ). В последующих шагах новые средние значения используются в качестве эталонов. Каждый пиксель-кандидат сравнивается с новым средним значением кластеров и приписывается к кластеру с самым близким средним значением. Статистики кластеров (например, средние значения яркости каждого кластера) рассчитываются с учетом нового спектрального положения пикселей. Эти средние значения используются для переопределения кластеров на очередном шаге.

Процедура *удаления кластеров* (символ 4) выполняется, если число  $n$  элементов  $x_i$  в  $i$ -м кластере меньше заданного, т.е. при  $n < L$ . Элементы этого кластера распределяются по другим кластерам, а его центр  $c_i$  удаляется из списка центров кластеров.

Процедура *разделения кластеров* (символ 5) выполняется, если разброс элементов от центра кластера достаточно большой, то есть дисперсия  $i$ -го кластера  $D_i$  больше  $Q_S$ . В этом случае  $i$ -й кластер разделяется на два кластера. Для разделения кластера вычисляются покомпонентные дисперсии:

$$D_{ik} = \frac{1}{|X_i|} \sum_{x_{jk} \in X_i} \|x_{jk} - c_{jk}\|^2, \quad k = 1, \dots, n. \quad (3.3)$$

Выбирается та  $l$ -я компонента, для которой  $D_{il} > D_{is}$  для всех  $s \neq l$  и осуществляется разделение  $i$ -го кластера по  $l$ -й компоненте. При этом пересчитываются новые центры кластеров  $c'$  и  $c''$ .

Процедура *объединения кластеров* (символ 6) выполняется, если расстояние между двумя какими-либо центрами кластеров достаточно мало. Эти кластеры объединяются в один кластер. Для этого вычисляется

расстояние между двумя центрами кластеров:

$$l_{ij} = \|c_i - c_j\|, \text{ для всех } i \neq j. \quad (3.4)$$

Если  $l_{ij} < Q_c$ , то кластеры  $X_i$  и  $X_j$  следует объединить. Новый центр кластера вычисляется по формуле

$$c = \frac{c_i |X_i| + c_j |X_j|}{|X_i| + |X_j|}. \quad (3.5)$$

По завершению каждой итерации вычисляется процент пикселей, приписывание которых к определенному кластеру не изменилось по сравнению с предыдущим шагом. Когда этот показатель достигнет величины  $Q_N$  (барьер сходимости), выполнение прерывается (символ 8).

Возможна ситуация, когда этот показатель не достигнет порога  $Q_N$ . В таком случае выполняется максимальное количество итераций  $M$  и вычисления также прекращаются (символ 9).

Таким образом, благодаря самоорганизации алгоритма ISODATA обеспечивается автоматическое распределение кластеров.

### **3.4. Алгоритмы контролируемой классификации**

#### **3.4.1. Обучающие выборки и сигнатуры**

Контролируемая классификация применяется при идентификации сравнительно небольшого числа классов, когда выбраны такие тестовые участки, которые могут быть проверены по достоверным наземным данным или когда можно выделить однородные области, представляющие каждый класс.

##### **Обучающие выборки**

Методы контролируемой классификации учитывают уже известную информацию:

- о типах объектов и вероятности их представления данными снимка;
- об эталонных значениях спектральных характеристик этих объектов, от качества которых зависит точность и достоверность классификации.

Для дешифрирования с обучением используются обучающие выборки, называемые также эталонами объектов или сигнатурами.

Обучающие выборки – наборы пикселей, которые представляют распознаваемый образ (класс) и служат его идентификации. Обычно это участок на снимке, идентифицированный на основе истинных данных о земной поверхности. Выбор эталонов зависит от знания пользователем информации об исследуемой области и классов, которые он хочет выбрать. При выборе эталонных пикселей используются не только космические снимки, но и априорная информация, среди основных источников которой

можно выделить данные полевых исследований, аэрофотосъемки, топографические карты, результаты визуального дешифрования изображения, а также результаты кластерного анализа изображения.

Наиболее точными данными об области исследования являются наземные данные, собранные синхронно со съемкой из космоса. Однако из-за погрешностей измерений и атмосферных факторов сложно получить точные спектральные характеристики объектов. Обеспечение синхронности не всегда возможно и дорого. Поэтому наиболее важно знать, что и где расположено, так как сами спектральные характеристики изменяются в зависимости от времени года, наличия дымки в атмосфере и т. д.

Основные требования, предъявляемые к обучающим выборкам:

- репрезентативность;
- пиксели выборки должны отвечать одному классу на местности;
- класс должен занимать территорию, которая достаточно хорошо представлена пикселями на снимке заданного пространственного разрешения.

Основной характеристикой любой обучающей выборки является ее репрезентативность, которая показывает, насколько полно выборка описывает основные свойства класса  $\omega_i$ , насколько точно по ее элементам можно оценить параметры этого класса в целом. В спектральном пространстве репрезентативность обучающей выборки определяет:

- одномодальность гистограммы распределения яркости, характеризующая близость распределения к нормальному закону;
- минимальность дисперсии, характеризующая однородность данных;
- делимость в спектральном пространстве.

Качество построения репрезентативных обучающих выборок зависит как от имеющейся априорной информации, так и от квалификации специалиста-интерпретатора. Репрезентативные обучающие выборки позволяют наиболее эффективным образом провести классификацию снимков и построить более точную тематическую карту исследуемой территории.

На практике обучающие выборки представляет собой группу пикселей снимка, ограниченную одним или несколькими полигонами.

Используют следующие способы выбора эталонов (создания ОВ):

- идентификация набора пикселей с близкими спектральными характеристиками;
- определение полигона на местности, необязательно с близкими спектральными характеристиками;
- использование векторной тематической карты, которая накладывается на снимок;
- использование класса из тематического растрового слоя, например, полученного в результате неконтролируемой классификации;
- выращивание полигона из затравки.

При выращивании полигона из затравки указывают один пиксель, называемый модельным, из которого затем разрастается выборка. Этот пиксель должен быть уверенно отнесен к области выделяемого класса. Метод выращивания полигона из затравки основан на том, что значения модельного пикселя сначала сопоставляются с окрестными пикселями (4-мя или 8-ю) в окрестности 3x3 с использованием введенных параметров пороговых значений близости, например, статистических показателей: среднего и стандартного отклонения яркости каждой зоны. Процесс построения такой выборки повторяется до тех пор, пока не останется пикселей, удовлетворяющих заданным параметрам.

Обучающие выборки делятся на параметрические и непараметрические.

*Параметрические обучающие выборки* основаны на статистических параметрах, например, векторе средних значений яркости и коэффициентах ковариационной матрицы  $K$ , вычисленных по зональным значениям пикселей в полигоне обучающей выборки. Априорно предполагается, что распределение данных нормальное.

*Непараметрические обучающие выборки* основаны на дискретных объектах: полигонах или прямоугольниках, образуемых пользователем на изображении спектрального пространства признаков. Изображение спектрального пространства признаков представляет собой двумерную спектральную гистограмму, т. е. график зависимости спектральной яркости одной зоны от яркостей другой зоны снимка.

Классификация типов земной поверхности на космическом снимке может проводиться с использованием как параметрических, так и непараметрических классификаторов. Как правило, для определения закона распределения признаков используют обучающую выборку, построенную для каждого класса  $\omega_i$ , земной поверхности изучаемой территории ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).

### **Оценка разделимости обучающих выборок**

Разделимость обучающих выборок основана на оценке статистического расстояния между двумя выборками. Чаще всего его задают как евклидово расстояние – спектральное расстояние между векторами средних значений каждой пары выборок в пространстве признаков:

$$R(M_{\omega_1}, M_{\omega_2}) = \sqrt{\sum_{i=1}^L (X_{ij1}^L + X_{ij2}^L)^2}, \quad (3.6)$$

где  $R(M_{\omega_1}, M_{\omega_2})$  – расстояние между классами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ ;

$M_{\omega_1}, M_{\omega_2}$  – средние значения выборок классов (центры классов в спектральном пространстве);

$X_{ij1}^L, X_{ij2}^L$  – зональные координаты векторов средних значений классов;

$L$  – число зон.

## Сигнатуры

На основе обучающей выборки строится сигнатура. Сигнатура – объект, кратко и однозначно описывающий обучающую выборку. Сигнатуру можно рассматривать как цифровую подпись данной обучающей выборки. В ERDAS IMAGINE имеется специальный редактор Signature Editor, позволяющий косвенно, через сигнатуры редактировать, объединять и удалять образцы, получая в итоге окончательный набор обучающих выборок.

Сигнатуры обучающих выборок хранятся в файлах сигнатур (расширение .sig) и содержат набор атрибутов. Атрибуты являются общими для параметрических и непараметрических обучающих выборок. Основными атрибутами являются:

- **name** – имя, идентифицирующее сигнатуру и соответствующий класс в выходном тематическом слое. По умолчанию классу присваивается имя «Class\_№\_X»;

- **color** – цвет, при помощи которого сигнатура отображается в редакторе;

- **value** – значение присваиваемое выходному классу и представляющее собой целое число, которое можно использовать для различных целей;

- **order** – порядок, целое число, применяемое там, где требуется упорядочивание сигнатур;

- **parallelepiped limits** – пределы областей.

Параметрические сигнатуры могут содержать ряд дополнительных атрибутов.

### 3.4.2. Непараметрические решающие правила

Непараметрические решающие правила используют непараметрические обучающие выборки. Рассмотрим два метода, реализующие непараметрические решающие правила:

- метод параллелепипедов;
- метод пространства признаков.

#### Метод параллелепипедов

**Суть метода.** Метод параллелепипедов является наиболее простым. В методе используются сведения о классах, полученные в процессе обучения в виде векторов средних значений яркости и векторов дисперсии. Известно, что для нормально распределенной величины 95,4 % ее значений лежат в пределах отклонений от среднего значения, меньших 2.

Рассмотрим случай двух спектральных каналов (рис. 3.5).

На рис. 3.5 по оси абсцисс отложены значения яркости в канале *A*, а по оси ординат – в канале *B*. Здесь же указаны средние значения яркости ( $M_{A3}$ ,  $M_{B3}$ ) для третьего класса в каналах *A* и *B*. От значения средней яркости в обе стороны отложены удвоенные значения

среднеквадратичного отклонения ( $2\sigma$ ) для каждого из трех классов в каждом канале. В двумерном случае получились прямоугольники, в трехмерном – параллелепипеды и т.д.

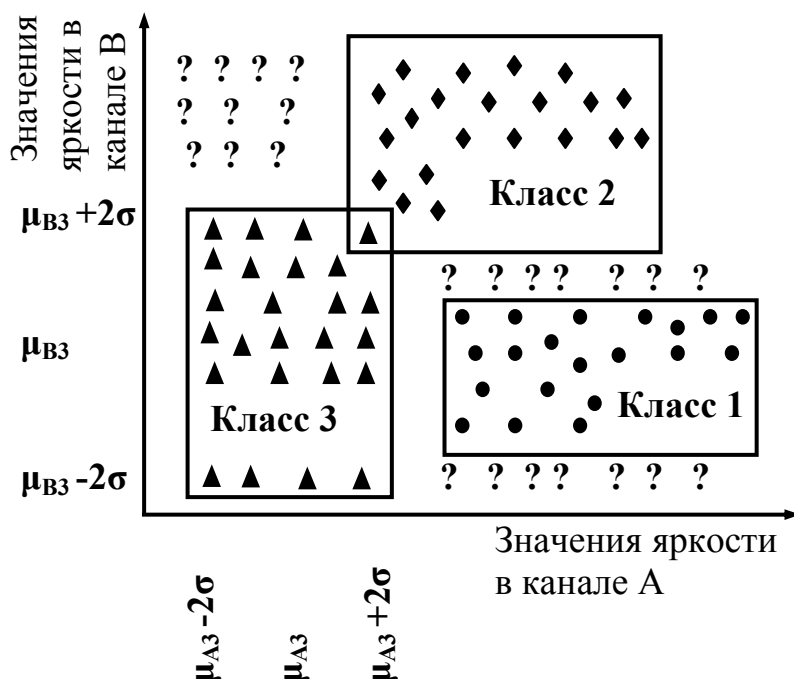


Рис. 3.5 – Классификация методом параллелепипеда

Решение о принадлежности пикселя к одному из трех классов принимается на основании того, в какой прямоугольник попадают компоненты яркости пикселя. Прямоугольники могут частично перекрываться, что особенно характерно для угловых областей. В этом случае необходимо применять специальные правила для разрешения неопределенности.

**Алгоритм параллелепипедов.** Этот алгоритм классификации основан на обычной булевой логике и статистических показателях обучающей выборки в  $n$  спектральных диапазонах. Сначала для каждого класса  $c$  и диапазона  $k$  вычисляется среднее значение яркости в обучающей выборке  $x_{ck}$  и  $s_{ck}$ .

После этого для классификации пикселей снимка применяют следующее правило. Пиксель принадлежит классу  $c$  тогда и только тогда, когда его яркость  $BV_{ijk}$  удовлетворяет следующему условию:

$$\mu_{ck} - 2\sigma_{ck} \leq BV_{ijk} \leq \mu_{ck} + 2\sigma_{ck} \quad (3.7)$$

где  $c = 1, 2, 3, \dots, m$  обозначает класс;

$k = 1, 2, 3, \dots, n$  – спектральный диапазон.

Если обозначить нижнюю и верхнюю границу этого неравенства как

$$L_{ck} = \mu_{ck} - 2\sigma_{ck} \quad (3.8)$$

и

$$H_{ck} = \mu_{ck} + 2\sigma_{ck}, \quad (3.9)$$

то условие (3.7) запишется в виде:

$$L_{ck} \leq BV_{ijk} \leq H_{ck} \quad (3.10)$$

Множество точек, подчиняющихся этому условию, образует параллелепипед в  $n$ -мерном пространстве спектральных признаков. Если значения яркости пикселя лежат внутри этого параллелепипеда, пиксел приписывается данному классу. В противном случае пиксел относят к категории неклассифицируемых пикселей.

Рассмотрим нестандартные варианты принятия решений при использовании алгоритма параллелепипедов.

**Перекрывающиеся регионы.** Если пиксель, попадающий в регион перекрытия двух или более прямоугольников, необходимо принять решение, как классифицировать пиксель.

1. Пиксель может быть классифицирован с использованием атрибутивного поля "Order" (Порядок) обучающих выборок. Если, в смысле упорядочения, одна сигнатура является, например, четвертой, а другая седьмой, то пиксель приписывается классу сигнатуры, имеющей более высокий порядок (то есть первой). Атрибутивное значение "Order" можно задавать в редакторе сигнатур.

2. Пиксель может быть классифицирован с использованием дополнительного параметрического решающего правила. Пиксель тестируется с использованием лишь тех обучающих выборок, в область пересечения которых он попадает. Если ни одна из этих обучающих выборок не является параметрической, пиксель остается неклассифицированным. Если же одна (и только одна) из этих сигнатур – параметрическая, пиксель автоматически приписывается к классу данной сигнатуры.

3. Пиксель остается неклассифицированным.

**Пиксель вне границ всех прямоугольников.** Если пиксель не попадает внутрь ни одной из областей, задаваемых прямоугольниками, Вам следует определиться, как следует классифицировать такой пиксель.

1. Пиксель может быть классифицирован с использованием дополнительного параметрического решающего правила. Пиксель тестируется с использованием всех параметрических обучающих выборок.

2. Если параметрические сигнатуры отсутствуют, пиксель остается неклассифицированным.

*Достоинство метода параллелепипедов.* Этот метод реализован на базе простого и очень быстрого алгоритма. Большая скорость выполнения обусловлена тем, что значения яркости пикселей сравниваются с пределами, задаваемыми для каждого канала всех сигнатур в виде постоянной величины. Кроме того, снимается требование о нормальном распределении значений яркости пикселей внутри обучающих выборок.

*Недостаток метода параллелепипедов.* Пиксели, которые находятся по спектру далеко от среднего значения текущей сигнатуры, приписываются к классу, соответствующему данной обучающей выборке вследствие прямоугольной формы границ (рис. 3.6).

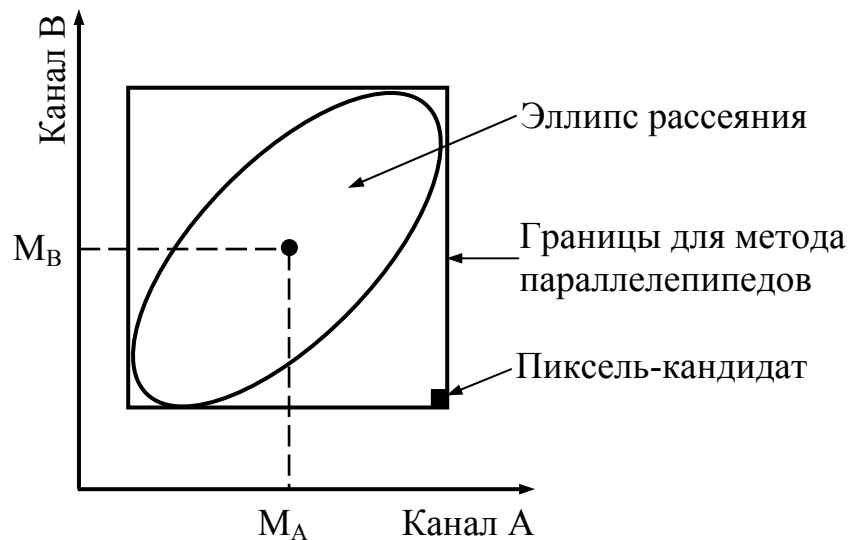


Рис. 3.6 – Ошибочная классификация пикселя-кандидата

### Метод пространства признаков

Метод пространства признаков определяет попадание (или непопадание) классифицируемого пикселя-кандидата внутрь области непараметрической обучающей выборки, определяемой на слое пространства признаков (рис. 3.7).

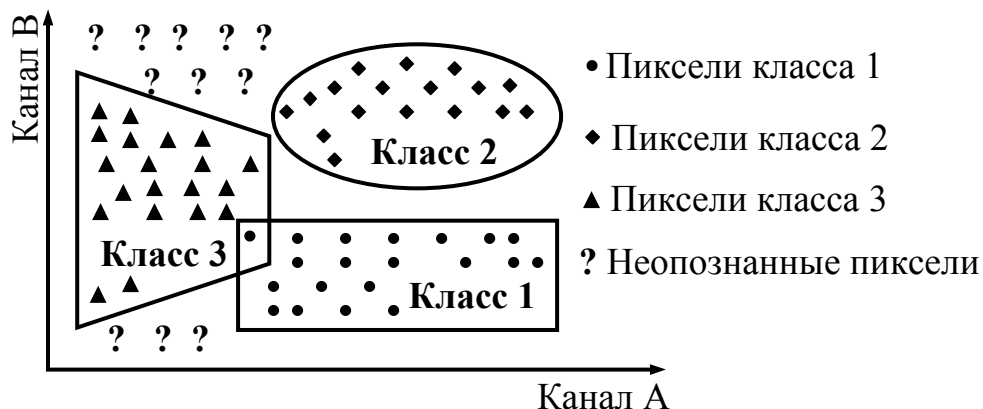


Рис. 3.7 – Правило пространства признаков

Полигональные объекты, приведенные на рис. 3.7, являются областями интересов, которые используются для определения обучающих выборок. Если исходные значения яркости пикселя-кандидата попадают внутрь области, задаваемой сигнатурой, пиксель приписывается соответствующему классу. Нестандартные варианты принятия решений в случае перекрывающихся регионов такие же, как и в методе параллелепипедов.

Если пиксель не попадает внутрь ни одной из областей интересов, задающих непараметрические обучающие выборки, то следует использовать дополнительные параметрические решающие правила, как и в методе параллелепипедов.



Алгоритм, реализующий метод пространства признаков, может оставлять некоторые пиксели неклассифицированными. Тем не менее, его полезно применять на этапе предварительной классификации. Метод позволяет с достаточной точностью выделить классы, закон распределения яркости пикселей которых, отличается от нормального закона. Примером может быть область городских застроек.

### 3.4.3. Параметрические решающие правила

В ERDAS IMAGINE к таковым относятся решающие правила, использующие параметрические обучающие выборки:

- правило минимального расстояния;
- правило максимального правдоподобия (по Байесу).

#### Правило минимального расстояния

Правило минимального расстояния (называемое еще правилом спектрального расстояния) подсчитывает спектральное расстояние между вектором значений пикселя-кандидата и вектором средних значений каждой обучающей выборки. На рис. 3.8 спектральное расстояние обозначено линиями, проведенными от пикселя-кандидата к точкам, задающим на диаграмме разброса средние значения обучающих выборок.

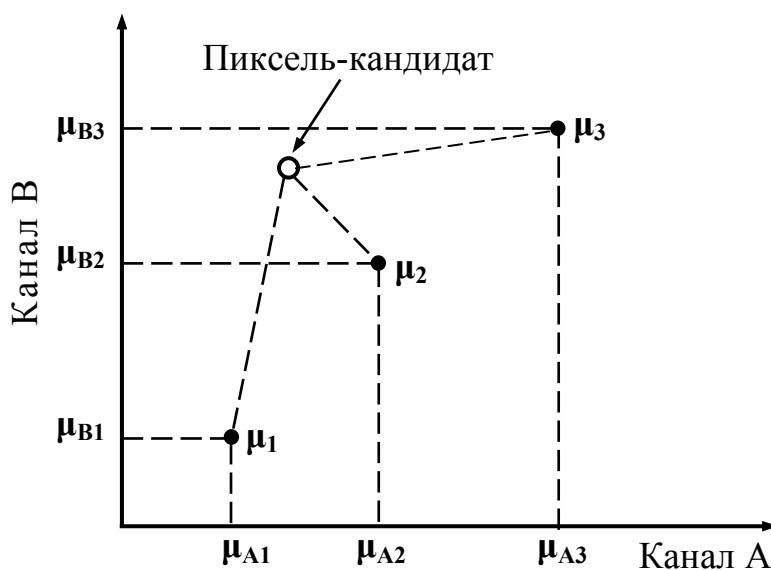


Рис. 3.8 – Правило минимального расстояния

Спектральные расстояния вычисляются по формуле:

$$SD_{xyc} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_{ck} - X_{xyk})^2}, \quad (3.11)$$

где  $n$  – число каналов (размерность);

$k$  – текущий канал;

$c$  – текущий класс;

$X_{хуk}$  – исходное значение яркости пикселя с координатами  $X, Y$  в канале  $k$ ;

$\mu_{ck}$  – среднее значение яркости пикселя в канале  $k$  для образца соответствующего классу  $c$ ;

$SD_{xyc}$  – спектральное расстояние от пикселя с координатами  $X, Y$  до точки, задающей пиксель-кандидат на диаграмме разброса (среднее значение обучающей выборки для класса  $c$ ).

В соответствии с правилом минимального расстояния вначале рассчитываются спектральное расстояние для всех возможных значений  $c$  (все возможные классы). Затем кандидат-пиксель назначается в класс, для которого расстояние  $SD$  минимально. Алгоритм, реализующий решающее правило минимального расстояния самый быстрый после алгоритма параллелепипедов. При этом неклассифицированных пикселей не остается, так как любой пиксель спектрально близок к тому или иному среднему значению (в некоторых случаях это хорошо, но в некоторых – нежелательно). Кроме того, для группы пикселей с небольшой вариацией яркости (например, объект водной поверхности, на котором отсутствуют значительные градации яркости) выполняется много лишних операций классификации, поскольку пикселя такого объекта достаточно близки к своему среднему значению.

#### **Метод максимального правдоподобия**

В методе максимального правдоподобия пиксель приписывается к тому классу, который максимизирует функцию правдоподобия классификации. Данные из обучающей выборки используются для вычисления среднего вектора измерений  $M_c$  и ковариационной матрицы  $V_c$  для каждого класса  $c$  и спектрального диапазона  $k$ .

Критерий принадлежности пикселя к определенному классу формулируется следующим образом. Пиксель  $x$  принадлежит классу  $c$  в том и только в том случае, если

$$p_c > p_i, i = 1 \dots m, \quad (3.12)$$

где  $m$  – число классов;

$p_i$  – вероятность того, что данный класс существует.

Вероятность  $p_c$  определяется по формуле:

$$p_c = [-0,5 \log \{\det(V_c)\}] - 0,5[(X - M_c)^T (V_c)^{-1} (X - M_c)], \quad (3.13)$$

Если нет дополнительных сведений о пространственных объектах, вероятность  $p$  для всех классов будет одинаковой. Если же известно, что вероятность существования одних классов больше, чем других, оператор может задать набор априорных значений вероятности для соответствующих спектральных признаков. Критерий принадлежности пикселя к определенному классу, при этом, будет формулироваться следующим образом.

Пиксель  $x$  принадлежит классу  $c$  в том и только в том случае, если

$$p_c(a_c) > p_i(a_c), i = 1 \dots m, \quad (3.14)$$

где

$$p_c(a_c) = \log(a_c) - [-0,5 \log \{\det(V_c)\}] - 0,5[(X - M_c)^T (V_c)^{-1} (X - M_c)]. \quad (3.15)$$

Использование априорных вероятностей позволяет учитывать особенности рельефа и других характеристик территории. В то же время, к недостаткам алгоритма максимального правдоподобия следует отнести то, что для расчетов этим методом требуются большой объем памяти и значительное время, при этом результаты классификации часто оказываются не самыми лучшими.

### 3.4.4. Оценка качества обучающих выборок

В ERDAS IMAGINE существуют тесты и инструменты, позволяющие оценить, насколько реально данные обучающих выборок представляют классифицируемые данные.

**1. Эллипс-тест.** В соответствии с этим тестом рассчитывается эллипс рассеивания (а также стандартное отклонение и среднее значение яркости) по каждой сигнатуре. Рассчитанные величины сохраняются в файле сигнатур. Эллипс рассеивания строится в координатах пространства признаков для каких-либо двух каналов многозонального изображения (рис. 3.7).

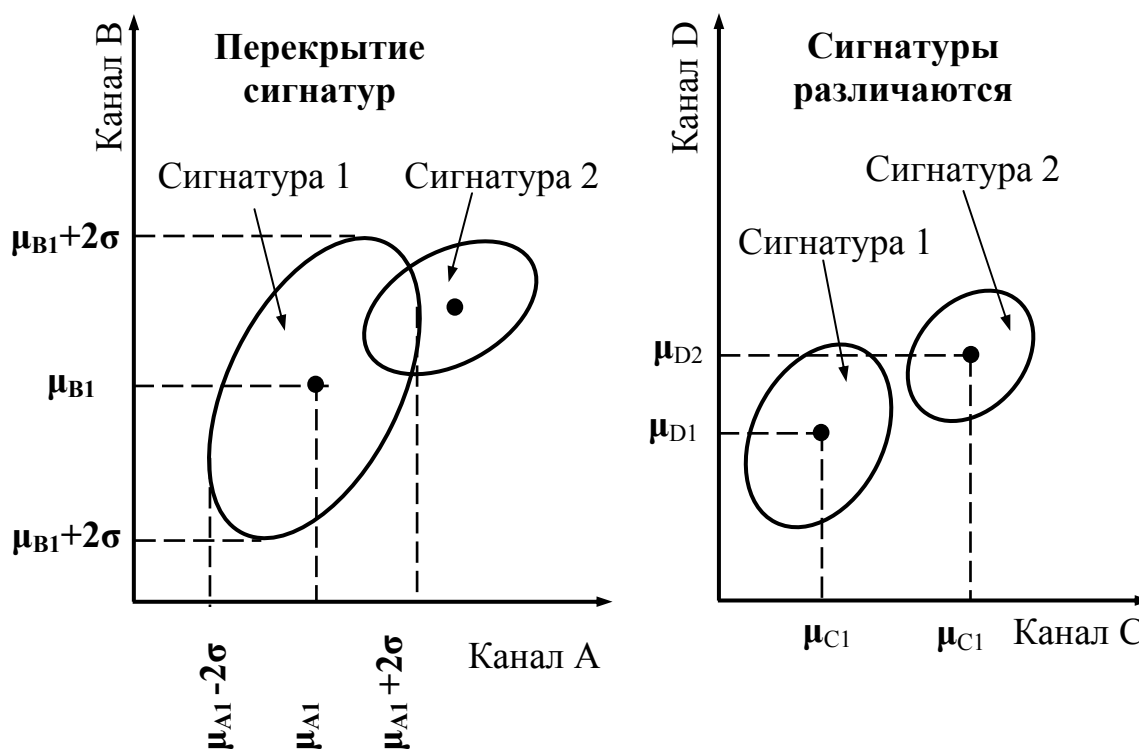


Рис. 3.9 – Эллипс-тест

Если эллипсы, построенные для двух сигнатур, имеют значительную область перекрытия, значит спектральные характеристики пикселей, представляющих данные сигнатуры практически не отличаются. В самом лучшем случае перекрытия отсутствует вообще. Однако некоторое перекрытие присутствует почти всегда.

**2. Утилита "Alarm"** (Signature Editor | View | Image Alarm). Позволяет оценивать результаты обучения по одной или нескольким,

выбранным в редакторе сигнатур. Пиксели, отвечающие критериям классификации для выбранных сигнатур, объединяются во вспомогательный слой-маску и подсвечиваются в Визуализаторе поверх исходного изображения. Можно просмотреть области перекрытия классов, выделяя их особым цветом.

**3. Оценка точности при помощи матрицы сопряженности.** Этот тест позволяет оценить качество обучающих образцов, созданных в границах областей интересов, задаваемых на снимке. Тест применим только к параметрическим обучающим выборкам. Может показаться, что любой пиксель, лежащий внутри области интересов, обязательно будет отнесен к классу, задаваемому данной обучающей выборкой. Но это не так. Для параметрических обучающих выборок создается обобщенное описание в виде сигнатуры. Это описание содержит статистические характеристики пикселей, принадлежащих образцу. Некоторые значения яркости пикселей могут не попасть в границы сигнатуры, задаваемые средним значением яркости и разбросом.

### **3.5. Применение вегетационных индексов в дистанционном зондировании**

Для преобразования многоспектральных снимков используются данные из нескольких спектральных диапазонов, причем эти данные могут соответствовать даже различным датам проведения съемки (многовременные данные). Преобразования выполняются над каждым пикселем изображения. Новое значение пикселя определяется с помощью математических операций с значениями спектральных яркостей этого пикселя в различных каналах. В результате преобразования формируются новые снимки, на которых гораздо четче выделяются определенные объекты и области интереса.

Операции над пикселями позволяют построить производные признаки, которые широко применяются для дешифрации снимков. Методы дешифрирования, основанные на построении и анализе производных признаков, относятся к интерактивной контролируемой пороговой классификации. Разделение множества объектов на классы осуществляется на основе признаков, которые получены путем различных комбинаций спектральных яркостей. Пороговые значения новых признаков вводятся пользователем на основе априорных знаний об объектах. Самый простой пример использования спектральных преобразований – расчет различных спектральных индексов. Наиболее часто используются вегетационные индексы.

#### **3.5.1. Операции над пикселями и вегетационные индексы**

##### **Операции над пикселями**

К простейшим операциям, которые применяются для попиксельного преобразования изображений, относятся операции сложения, вычитания, и

деления. Операция умножения применяется крайне редко и в дальнейшем не рассматривается.

*Операция вычитания* состоит в том, что из значения яркости каждого пиксела одного снимка вычитается значение яркости соответствующего пиксела другого снимка, который совмещен с первым. Результирующий снимок называется разностным. Объекты, отражательная способность которых изменилась незначительно за время между двумя съемками, будут окрашены на разностном снимке в светло-серые тона, а темные и яркие области снимка будут соответствовать значительным изменениям отражательной способности. Этот тип преобразования полезен для картографирования городской инфраструктуры, наблюдения за лесозаготовками, оценки посевных площадей и других подобных задач.

*Операция сложения* изображений является усредняющей операцией, позволяющей снизить уровень шума на снимке. Эту операцию широко используют при пространственной фильтрации для выделения объектов определенного масштаба.

*Операция деления* применяется для вычисления многих спектральных индексов. В общем случае спектральный индекс  $R_{mn}$  в двух спектральных диапазонах  $m$  и  $n$  рассчитывается по формуле:

$$R_{mn} = \frac{\rho_m}{\rho_n}, \quad (3.16)$$

где  $\rho_m, \rho_n$  – отражательная способность объектов земной поверхности в спектральных диапазонах  $m$  и  $n$  соответственно.

Спектральный индекс позволяет подчеркивать малейшие изменения в спектральной отражательной способности различных земных покровов. Отношение величин из разных спектральных диапазонов дает важную информацию об объектах. В частности, зеленая растительность обладает большой отражательной способностью в ближней инфракрасной области спектра и хорошо поглощает излучение в красном диапазоне. В то же время, отражательная способность почв и водоемов в этих диапазонах остается практически одинаковой. Таким образом, если разделить данные в ближней инфракрасной области (0,8– 1,1 мкм) на данные в красном диапазоне (0,6–0,7), то на результирующем снимке растительному покрову будет соответствовать область со значением отношения существенно больше 1,0, а почвам и водоемам – область со значением отношения существенно меньшим 1,0. Преимущество операции деления состоит также в том, что результирующий набор данных содержит только относительные, а не абсолютные значения яркости. Благодаря этому анализ данных в гораздо меньшей степени зависит от тех вариаций в освещенности сцены, которые возникают из-за особенностей рельефа. Так, например, абсолютная отражательная способность лесного покрова на склоне горы будет зависеть от положения Солнца, однако относительная отражательная способность, рассчитанная по двум спектральным диапазонам, будет, при этом, почти постоянной.

### Вегетационные индексы

Вегетационные индексы применяются для выделения растительности на снимке с использованием отражательной способности земных покровов ближнего инфракрасного (ИК) и красного диапазонов.

Основное предположение по использованию вегетационных индексов состоит в том, что некоторые математические операции с данными разных каналов могут дать полезную информацию о растительности. В общем случае вегетационный индекс ( $VI$ ) является функцией от двух аргументов:

$$VI = f(\rho_{\text{БИК}}, \rho_{\text{КР}}), \quad (3.17)$$

где  $\rho_{\text{БИК}}$ ,  $\rho_{\text{КР}}$  – отражательная способность земных покровов ближнего ИК и красного диапазонов соответственно.

Второе предположение заключается в том, что открытая почва на снимке будет формировать в спектральном пространстве так называемую *линию почвы*, которая является прямой. Предполагается, что в ближней ИК области лежит линия открытой почвы с нулевым количеством растительности.

#### 3.5.2. Линия почвы

*Линия почвы* – это гипотетическая линия в спектральном пространстве, которая описывает вариацию спектра открытой почвы на снимке. Для определения линии почвы используются эталоны голой почвы на снимке, которые имеют разное отражение и создается график распределения красного и ИК каналов изображения (рис. 3.10).

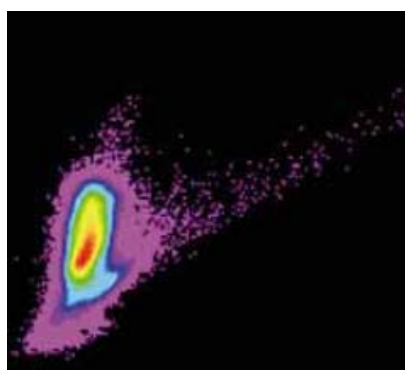


Рис. 3.10 – График распределения значений пикселей в красном и ближнем ИК каналах космического снимка LANDSAT

Назначим красному каналу ось  $X$  и ИК каналу – ось  $Y$ . В нижней правой части графика должна быть относительно линейная часть. Прямая линия, которая наилучшим образом описывает эту часть графика, и есть линия почвы. Можно выбрать несколько точек, описывающих эту границу, и определить линию методом наименьших квадратов.

Рассмотрим треугольный регион в форме «шапочки с кисточкой» в красном и ближнем инфракрасном спектральном пространстве данных LANDSAT MSS (рис. 3.11).

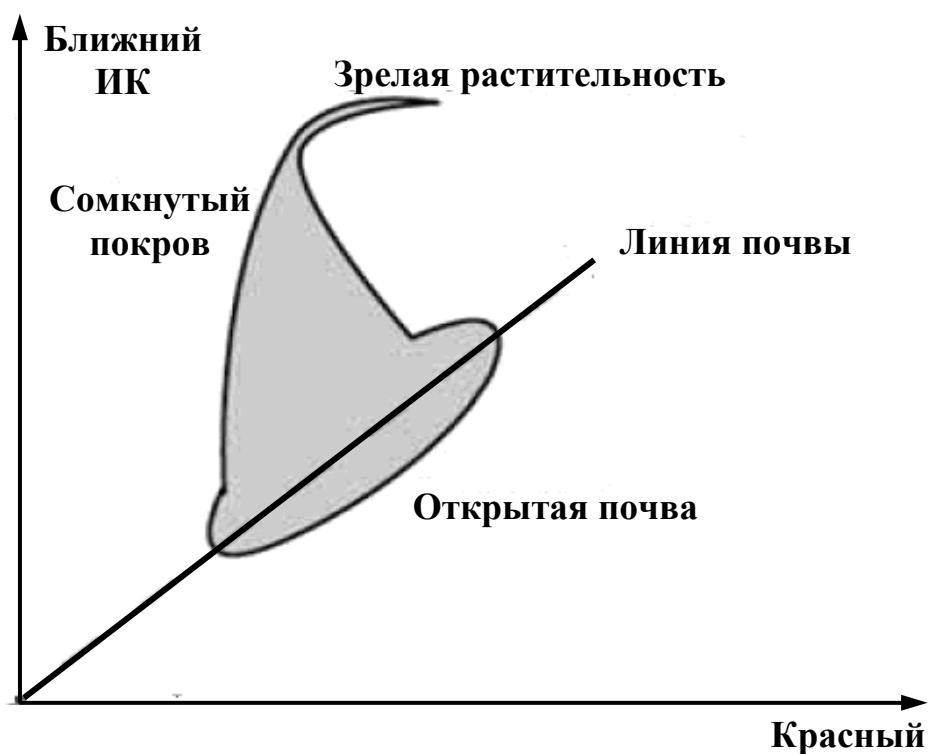


Рис. 3.11 – Типичное распределение значений отражения для сельскохозяйственных культур

Наивысшая точка треугольника, которая лежит в области низкого отражения в красной области спектра и высокого отражения в ближнем ИК диапазоне, соответствует районам с обильной растительностью, а плоская часть треугольника, лежащая напротив конца треугольника, соответствует открытой (голой) почве (рис. 3.11).

Линии одинаковой растительности, которые рассчитываются с помощью вегетационных индексов, называются изоветегационными линиями (изолиниями). Различают следующие виды изолиний:

1) Изолинии, которые сходятся в одной точке (рис. 3.12, а). Эти изолинии строятся с помощью относительных индексов, которые определяют наклон линий. Примерами являются индексы: NDVI, SAVI, EVI и др.

2) Изолинии, которые идут параллельно линии почвы (рис. 3.12, б). Эти изолинии строятся с помощью перпендикулярных индексов, (PVI, WdVI, DVI), которые применяются для измерения перпендикулярного расстояния от линии почвы до точки земной поверхности.

Относительные индексы работают на территориях с богатой растительностью лучше, чем перпендикулярные индексы.

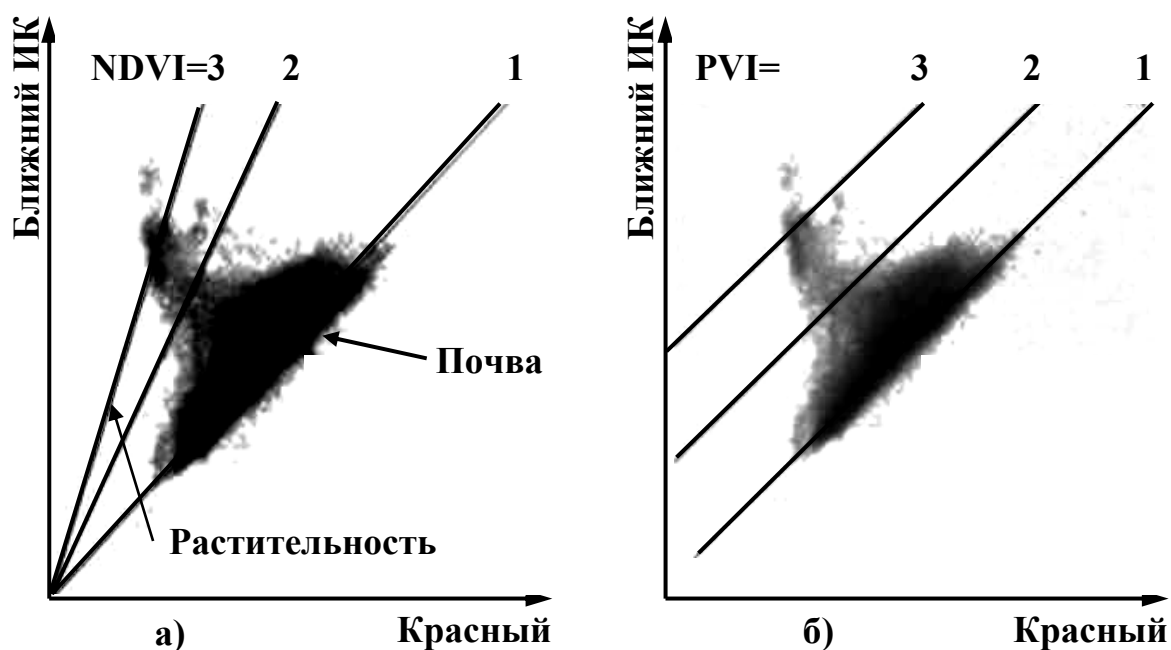


Рис. 3.12 – Изолинии значений индексов: NDVI (а) и PVI (б)

Вегетационные индексы работают плохо в областях с разреженной растительностью. При скудном растительном покрове спектр снимка в основном зависит от почвы и поэтому почвенный фон сильно влияет на индексы. Если фон яркий, то значение индекса будет меньше, а если темный, то индекс будет больше. Спектры многих фоновых материалов (почва, камни, растительная подстилка) сильно варьируются в красном и ближнем ИК-диапазонах.

Для определенных вегетационных индексов существуют свои пороги чувствительности к степени разреженности растительности. Например, индекс NDVI не следует применять, если растительный покров меньше 30 %, а индекс PVI, если растительный покров меньше 15 %.

### 3.5.3. Вычисление вегетационных индексов

#### Вычисление вегетационных индексов NDVI, SAVI, ARVI, EVI

Нормализованный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) применяется для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова. Физиологическое состояние растительного покрова в значительной степени определяется содержанием хлорофилла и уровнем влагообеспеченности. В этой связи целесообразно использовать относительные показатели состояния растительности, в том числе лесов, получаемые на основе спектральных индексов, тесно коррелирующих с уровнем обеспеченности растений хлорофиллом и влагой.

Относительный вегетационный индекс NDVI является показателем количества фотосинтетически активной биомассы и вычисляется по формуле:



$$NDVI = \frac{\rho_{БИК} - \rho_{КР}}{\rho_{БИК} + \rho_{КР}}. \quad (3.18)$$

Расчет NDVI базируется на двух наиболее стабильных участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, в ИК-области (0,7-1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа.

Высокая фотосинтетическая активность, связанная, как правило, с густой растительностью, ведет к меньшему отражению в красной области спектра и к большему в ИК. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять и анализировать растительные объекты от прочих объектов окружающей среды. Использование нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений позволяет уменьшить влияние различий в освещении снимка и поглощения радиации атмосферой. Природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение NDVI, что позволяет использовать этот параметр для их идентификации. В зависимости от объектов земной поверхности индекс NDVI принимает следующие значения:

- *отрицательные значения* (при расчете в интервале от -1 до 1) – для водных объектов;
- *положительные и близкие к нулю значения* – для почв, грунтов и сухой растительности;
- *максимальные значения* – для вегетирующей растительности;
- *промежуточные значения* – для различных состояний растительного покрова.

Значения NDVI возрастают с развитием зеленой биомассы и уменьшаются с ее усыханием. Расчет NDVI производится на основе серии разновременных снимков с заданным временным разрешением. Это позволяет получать динамическую картину процессов изменения границ и характеристик различных типов растительности (месячные, сезонные, годовые вариации).

Индекс NDVI широко применяется в сельском хозяйстве для выполнения:

- наблюдений за развитием сельскохозяйственных посевов в течение одного вегетационного периода;
- картографирования растительного покрова;
- мониторинга засухи, оценки продуктивности экосистем и сельскохозяйственных территорий;
- расчета влагосодержания почв, контроля фаз вегетации и др.

Главным преимуществом NDVI является легкость вычисления, т. к. не требуется никаких дополнительных данных, кроме собственно данных ДЗ и знания параметров съемки. Индекс NDVI может быть рассчитан на основе любых снимков, имеющих спектральные каналы в красном и ближнем ИК-

диапазонах. Алгоритм расчета NDVI встроен в распространенные пакеты программного обеспечения, связанные с обработкой данных ДЗ.

Индекс NDVI имеет много модификаций: SAVI, ARVI, EVI и др. Они предназначены для уменьшения влияния помехообразующих факторов.

При низкой плотности растительного покрова оптимальным индексом для выделения растительности является почвенный вегетационный индекс SAVI, который вычисляется по формуле:

$$SAVI = \left( \frac{\rho_{БИК} - \rho_{КР}}{\rho_{БИК} + \rho_{КР} + L} \right) (1 + L). \quad (3.19)$$

В этой формуле:  $L$  – величина, значение которой подбирается эмпирическим путем так, чтобы минимизировать чувствительность вегетационного индекса к вариациям отражательной способности почвы. При  $L = 0$  индекс SAVI совпадает с индексом NDVI. Для областей со смешанным покровом оптимальное значение  $L$  равно приблизительно 0,5. Множитель  $(1 + L)$  в формуле (3.14) введен для того, чтобы диапазон значений индекса SAVI совпадал с диапазоном значений индекса NDVI. По существу, в индекс SAVI введена поправка на подстилающую почву.

Усовершенствованный вегетационный индекс EVI основан на индексе NDVI. Индекс учитывает влияние атмосферы и вычисляется по формуле:

$$EVI = G \left( \frac{\rho_{БИК} - \rho_{КР}}{L + \rho_{БИК} + C_1 \rho_{КР} - C_2 \rho_{син}} \right), \quad (3.20)$$

где значения  $G$ ,  $L$ ,  $C_1$  и  $C_2$  – эмпирически определяемые параметры,  $\rho_{син}$  – отражательная способность земной поверхности в синем диапазоне.

Для данных MODIS параметры принимают следующие значения:

$$G=2,5; L=1; C_1 = 6 \text{ и } C_2 = 7,5.$$

При плотном растительном покрове значения индекса EVI не насыщаются так, как насыщаются значения индекса NDVI. Поэтому индекс EVI можно использовать для определений структурных характеристик растительности.

### **Вычисление вегетационного индекса PVI**

Перпендикулярный вегетационный индекс PVI (Perpendicular Vegetation Index) применяется для измерения отдельных вкладов растительности и подстилающей почвы.

На рис. 3.13 изображена координатная плоскость, на осях которой откладываются значения отражательной способности земного покрова в красном и ближнем инфракрасном (БИК) диапазонах.

Точки, соответствующие почвам, лежат вдоль почвенной линии, которая расположена под углом 45 градусов к обеим осям. Положение точки на почвенной линии характеризует влажность почвы. Чем ниже находится точка, тем выше влажность.

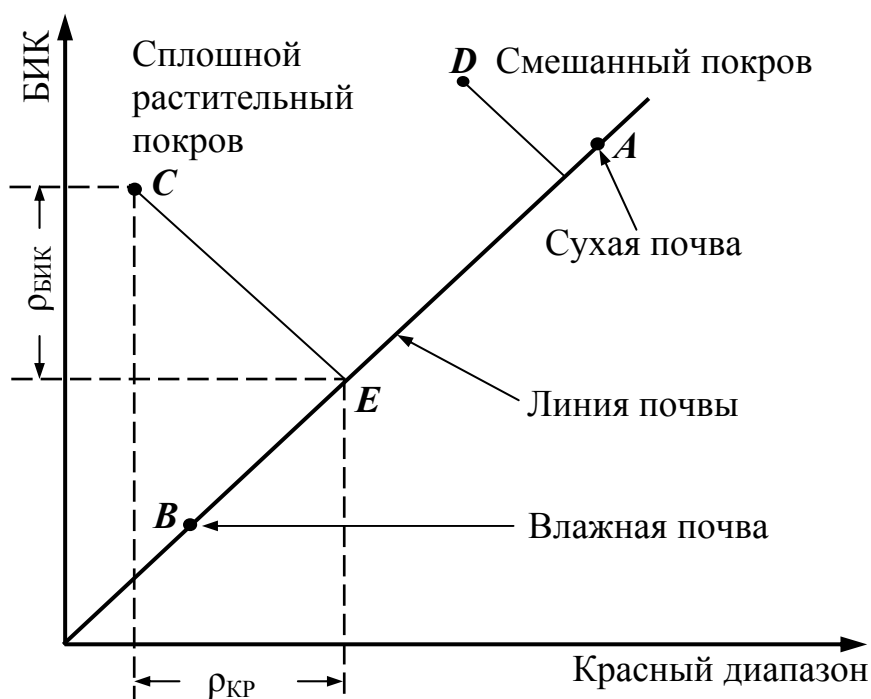


Рис. 3.13 – Перпендикулярный вегетационный индекс

Точки, относящиеся к растительности, располагаются вдоль перпендикуляра к линии почвы слева от нее. Чем больше расстояние от линии почв, тем больше растительности присутствует на данной территории. Индекс PVI задает длину перпендикуляра (например,  $CE$ , рис. 3.10), опущенного из определенной точки на «линию почв»:

$$PVI = \sqrt{\left(\rho_{KR}^{почвы} - \rho_{KR}^{раст}\right)^2 + \left(\rho_{БИК}^{почвы} - \rho_{БИК}^{раст}\right)^2}. \quad (3.21)$$

Поскольку индекс PVI определяется по отношению к такой характеристике сцены съемки, как «линия почв», он имеет физический смысл только в пространстве значений отражательной способности. Нулевое значение PVI соответствует «линии почв».

Выше были рассмотрены несколько вегетационных индексов, которые наиболее часто используются на практике. Они учитывают характеристики растительности и содержащегося в ней хлорофилла, которые можно измерить непосредственно по данным ДЗ.

### 3.6. Анализ методом главных компонент

Совокупность признаков, используемых при распознавании образов, должна в наибольшей степени отражать те свойства объектов, которые важны для распознавания. От размерности признакового пространства в значительной степени зависят вычислительная сложность процедур обучения и принятия решения, достоверность распознавания и затраты времени. Кроме того, возникает проблема при отображении результатов ДЗ на экране монитора. Пользователю доступны три цвета (RGB), которые

можно присвоить как условные цвета трем спектральным каналам, в то время как число каналов может превышать эту цифру (7 каналов сканера ТМ спутника LANDSAT, 5 каналов сканера AVHRR спутника NOAA). И в этом случае важно так преобразовать спутниковую информацию, чтобы ее можно было адекватно представить на экране монитора. Кроме того, сокращение числа признаков иногда способно увеличить расстояние между признаками и упростить процедуру распознавания.

Метод главных компонент – это сложное преобразование многозональных снимков, основанное на методах многомерного статистического анализа. Метод позволяет построить более информативные комбинации исходных изображений, полученных в разных зонах спектра, и сократить количество анализируемых данных.

Метод основан на том, что многоспектральные изображения обладают значительной степенью корреляции между каналами. Причинами ее возникновения может быть следующие.

Корреляция возникает из-за реальной физической зависимости между измеряемыми свойствами объектов и частичного перекрытия зональных диапазонов съемки, а также из-за влияния пространственных вариаций атмосферы. Диапазон длин волн, соответствующий высокой корреляции, определяется спектральной отражательной способностью объектов. Например, относительно низкая отражательная способность растительного покрова в видимой части спектра приводит к схожести спектральных образов объектов во всех диапазонах регистрации видимого излучения. Так, снимки LANDSAT MSS, полученные в зеленом и красном диапазонах, выглядят почти одинаково, поскольку отражательные свойства земной поверхности в этих диапазонах мало отличаются друг от друга.

Для того чтобы устранить избыточность информации и зависимость данных в разных спектральных диапазонах, используют преобразование, которое основано на методе главных компонент.

Сущность метода главных компонент состоит в формировании преобразованных некоррелированных изображений по исходным многоспектральным изображениям. Каждая компонента будет соответствовать разложению спектральных яркостей по базису, состоящему из собственных векторов корреляционной матрицы спектральных измерений (значениям яркостей в каждом спектральном канале). Преобразование состоит в уменьшении размерности набора данных и переходе к меньшему количеству новых «каналов», которые называются главными компонентами.

Процедура преобразования состоит в том, чтобы распределить максимальное количество информации из исходных данных по минимальному числу новых компонент. Например, данные, полученные в семи спектральных диапазонах сенсора ТМ можно преобразовать так, что 90% всей исходной информации будет содержаться в трех первых главных компонентах. Такой набор некоррелированных данных существенно проще анализировать и интерпретировать.

Таким образом, основная задача применения метода главных компонент состоит в том, чтобы преобразовать данные к новой системе координат, а затем попытаться снизить размерность пространства данных, отбросив те компоненты, которые не несут информации. Формально эту задачу можно сформулировать следующим образом.

Пусть  $P$  – мультиспектральное изображение, содержащее  $K$  (по числу каналов) матриц цифровых изображений размера  $N \times N$ :

$$P = \{P^1, P^2, \dots, P^K\}. \quad (3.22)$$

Элементы  $p_{ij}^k$  исходных изображений, составляющих многоспектральное изображение  $P$  – это значения спектральных яркостей, измеренных в соответствующих каналах  $K$  съемочной системы. Значения  $p_{ij}^m$  и  $p_{ij}^i$ , полученные из разных каналов, для большинства из них сильно коррелированы.

Метод главных компонент позволяет перейти от многозонального изображения  $P$  к новому представлению

$$P_G = \{P_G^1, P_G^2, \dots, P_G^K\}. \quad (3.23)$$

Здесь  $P_G^i$  являются некоррелированными ( $i = 1 \dots K$ ). Первые изображения  $P_G^1, P_G^2, P_G^3$ , называются главными компонентами многоспектрального изображения  $P$ , так как эти компоненты представляют основную информацию, содержащуюся в исходных изображениях.

В матричной форме преобразование вектора  $\mathbf{I}$  спектральных данных исходного снимка в вектор  $\mathbf{P}$  главных компонент записывается в виде:

$$\mathbf{P} = \mathbf{W}_{PC} \mathbf{I}, \quad (3.24)$$

где  $\mathbf{W}_{PC}$  – матрица весовых коэффициентов, применяемая к исходным спектральным данным каждого снимка. Матрица преобразования  $\mathbf{W}_{PC}$  зависит от исходного набора данных.

Как и при геометрическом трансформировании (см. п.п. 2.2.2), преобразование (3.24) описывает поворот, изменение масштаба и смещение пространства спектральных данных исходного снимка.

Принцип преобразования методом главных компонент показан на рис. 3.14. Схематическое представление данных, полученных по двум каналам регистрации, показано на рис. 3.14, а. Рис. 3.14, б иллюстрирует смещение начала исходной системы координат, а рис. 3.14, в – поворот координатных осей на угол  $\varphi$ . Направление первой оси новой системы координат ( $P_1$ ) выбрано так, чтобы оно совпадало с направлением максимального разброса исходных данных. Вторая ось ( $P_2$ ) перпендикулярна первой.

Конечный результат преобразования не зависит от того, когда выполняется сдвиг системы координат – до или после поворота.

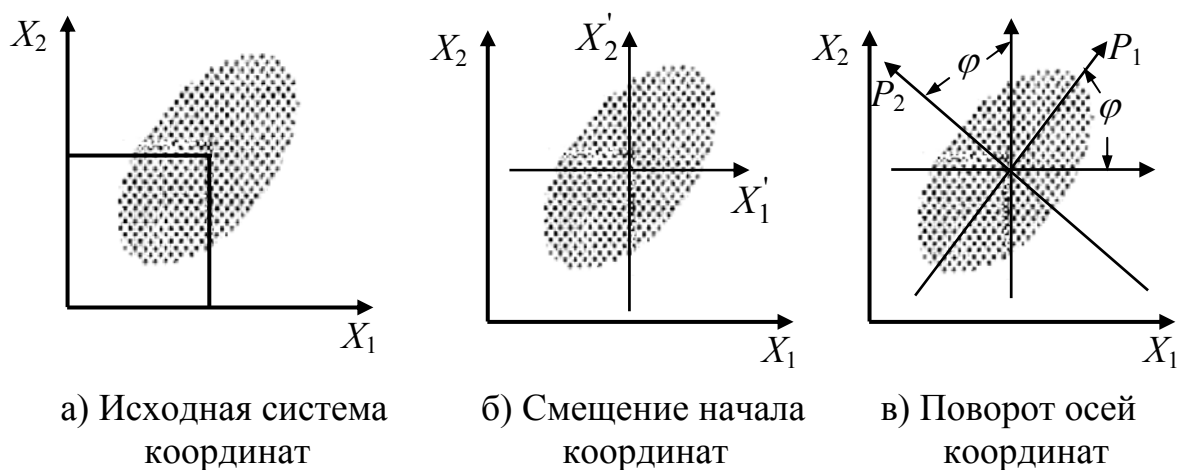


Рис. 3.14 – Схема преобразования данных к главным компонентам

Таким образом, преобразование набора данных к главным компонентам приводит к оптимальному перераспределению дисперсий. Изображение, соответствующее первой главной компоненте, при любой линейной комбинации исходных многоспектральных данных всегда обладает наибольшей дисперсией. Следующую по величине дисперсию будет иметь изображение, соответствующее второй главной компоненте, и т. д. При этом суммарная дисперсия исходного набора данных будет сохраняться.

Преобразование к главным компонентам можно применять и для анализа многовременных данных, если область снимка, на которой происходят изменения, относительно мала. Все изменения будут особенно четко видны на изображениях, соответствующих главным компонентам высших порядков. Анализ временных изменений можно упростить, если сначала вычислить по двум многоспектральным снимкам разностное изображение, а затем применить к нему метод главных компонент.

### Вопросы для самоконтроля

1. С какой целью производят дешифрирование космических снимков?
2. В чем отличие между прямым и индикационным дешифрированием космических снимков?
3. Какие виды дешифровочных признаков Вы знаете?
4. В чем состоит задача классификации объектов? В чем различие между методами контролируемой и неконтролируемой классификации?
5. Какие основные требования предъявляются к обучающим выборкам?
6. Какие способы создания обучающих выборок Вы знаете? На чем основаны параметрические и непараметрические обучающие выборки?
7. Приведите решающее правило классификации по максимуму правдоподобия.
8. Приведите последовательность выполнения шагов кластерного

алгоритма.

9. Какие способы используются для оценки точности классификации? Опишите способ оценки точности классификации, основанный на построении матрицы классификации.

10. Дайте определение вегетационного индекса.

11. Что такое почвенная линия?

12. Назовите вегетационные индексы, устойчивые к влиянию почвы.

13. Какие вегетационные индексы являются устойчивыми к влиянию атмосферы?

14. Какие вегетационные индексы необходимо использовать в случае изучения территории с разряженной растительностью?

15. С какой целью производится анализ главных компонент?

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. Учебное пособие. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
2. Лисицин В. Э. Практикум по фотограмметрии и дистанционному зондированию. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 200 с.
3. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования. / пер. с англ. М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
4. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. Электронный ресурс. [portal.tpu.ru](http://portal.tpu.ru) > SHARED/o/OST/publication
5. Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / С. К. Гош – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
6. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 516 с.
7. Журнал «Геоматика» // <http://www.geomatika.ru>
8. Космоснимки // <http://www.kosmosnimki.ru>
9. Сайт компании «ДАТА+» // [www.dataplus.ru](http://www.dataplus.ru)
10. Самардак А. С. Геоинформационные системы. Электронный учебник. 2005. // [studentam.net](http://studentam.net)>content/view/1014/111
11. Программный пакет ERDAS IMAGINE 2010. Электронный ресурс. <http://erdas-russia.ru>



*Навчальне видання*

**ТОЛСТОХАТЬКО** Віктор Антонович  
**ПЕНЬКОВ** Володимир Олексійович

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни

**«ФОТОГРАММЕТРІЯ ТА ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ»**

Модуль 2: «Дистанційне зондування»

(для студентів 4 курсу денної та заочної форм навчання за напрямом  
підготовки 6.080101 «Геодезія, картографія та землеустрій»)  
(рос. мовою)

Відповідальний за випуск *К. А. Метешкін*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *О. А. Балашова*

План 2011, поз. 30Л

---

Підп. до друку 18.09.2012  
Друк на ризографі.  
Тираж 60 пр.

Формат 60×84/16  
Ум. друк. арк. 6,64  
Зам. №

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства  
вул. Революції, 12, Харків, 61002,  
Електронна адреса: [rektorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rektorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.