

Санкт-Петербургский государственный университет

**КУЧЕРЕНКО Ольга Николаевна**

**Выпускная квалификационная работа**

**МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННЫХ  
МЕТОДОВ И ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ**

Основная образовательная программа бакалавриата  
“Картография и геоинформатика”  
Профиль “Геоинформатика”

Научный руководитель: ст.преп,  
ПОЗДНЯКОВА Наталия Александровна

Рецензент: к.б.н.  
РЯБЦЕВ Иван Сергеевич

Санкт-Петербург  
2018

# СОДЕРЖАНИЕ

## ВВЕДЕНИЕ

### ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

- 1.1 Диапазон длин волн и окна прозрачности
- 1.2 Общая характеристика дистанционных методов
- 1.3 Характеристики космических снимков
- 1.4 Характеристики сенсоров

### ГЛАВА 2. ОБРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

- 2.1 Радиометрическая коррекция
- 2.2 Геометрическая коррекция
- 2.3 Улучшение изображений для визуального дешифрирования

### ГЛАВА 3. ВЫЯВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЕСАХ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

- 3.1 Дешифрирование и его признаки
- 3.2 Примеры дешифрирования нарушений лесных экосистем

### ГЛАВА 4. РОЛЬ ГИС ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

### ГЛАВА 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СНИМКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЕСОВ ПОСЛЕ ПОЖАРОВ

- 5.1 Районы исследования
- 5.2 Разработка и апробация методики оценок степени повреждения и восстановления растительности после пожара
- 5.3 Результаты исследования

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

## ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование Земли в последнее время довольно стремительно развивается – улучшается пространственное и спектральное разрешения снимков, полученных с различных космических аппаратов. Это позволяет изучать объекты земной поверхности, в частности лесной покров, на более локальном уровне. При анализе изменений, произошедших на территориях, имеется необходимость использовать большой объем как пространственных, так и атрибутивных данных. Их хранить, преобразовывать и анализировать позволяют геоинформационные системы (ГИС).

Целью работы является мониторинг лесных экосистем с помощью дистанционного зондирования и ГИС. В работе уделяется большее внимание оценке степени повреждения и восстановления участка леса в Алтайском заповеднике на основе использования разновременных снимков Landsat.

Для решения цели были поставлены следующие задачи:

1. Литературный обзор;
2. Разработка методики проведения мониторинга лесов в результате пожара, а именно оценки степени повреждения и восстановления участка гари
3. Апробация методики на примере двух участков, находящихся на разных территориях

# ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

## 1.1 Диапазон длин волн и окна прозрачности

Сенсоры измеряют свет в видимом и невидимом диапазонах. Свет - это форма энергии, также известная как электромагнитное излучение, которое распространяется в виде волн. Он распространяется с одинаковой скоростью, но состоит из различных по длине волн. Чем больше длина волны, тем меньше энергии несет в себе волна (рис. 1.1.1). Видимый свет наблюдается на длинах волн 0.4 - 0.7 мкм от фиолетового к красному. Инфракрасный свет и радиоволны имеют большие длины волн и меньшие энергии по сравнению с видимым светом. В то же время ультрафиолетовый свет, рентгеновское и гамма излучения имеют более низкие длины волн и большую энергию. Большая часть электромагнитного излучения исходит от Солнца. Когда солнечный свет достигает Земли, он поглощается, проходит или отражается (поглощенная энергия затем излучается в виде более длинноволнового излучения). Любая поверхность или объект поглощает, излучает или отражает свет уникально, это связано с химическим составом любого объекта. Хлорофилл растений, например, поглощает красный и синий свет, но отражает зеленый и инфракрасный, поэтому листья растений кажутся зелеными. Уникальные свойства поглощения и отражения объектов называют спектральными характеристиками (рис. 1.1.2).

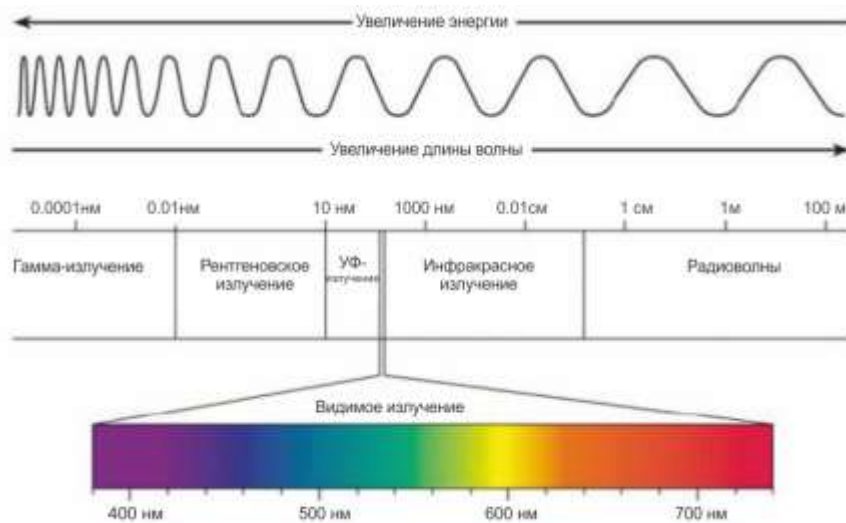


Рисунок 1.1.1 Спектр электромагнитного излучения, зависимость излучаемой энергии от длины волны (<https://cone.gollnerfire.com>)

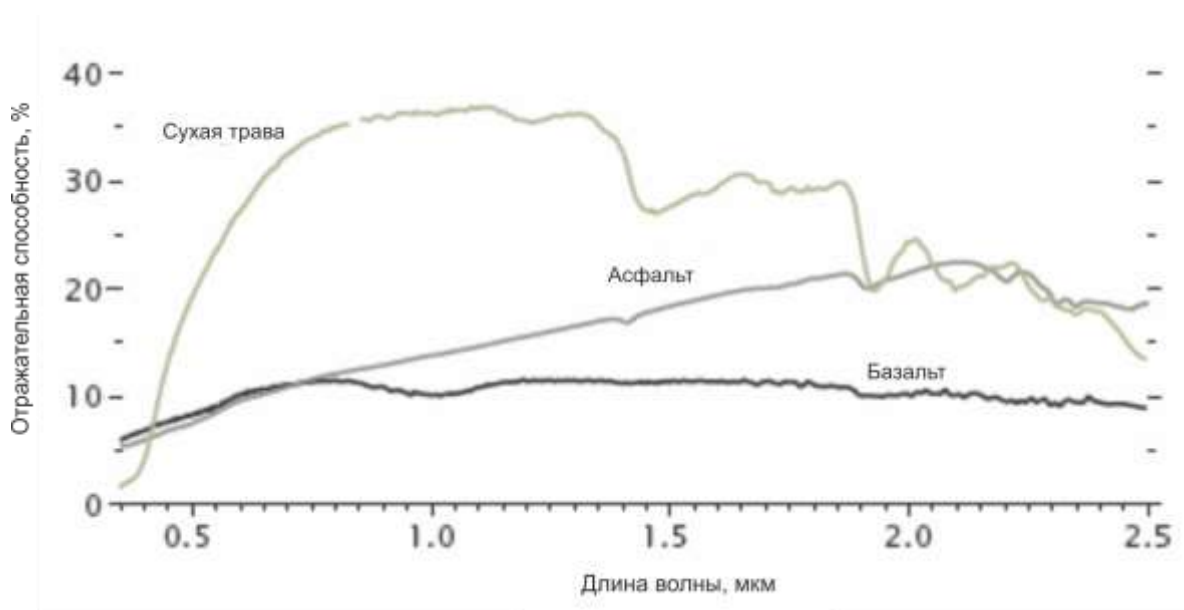


Рисунок 1.1.2 Спектральные характеристики различных объектов. Асфальт и недавно застывший базальт отражают различное количество инфракрасного света, хотя в видимом диапазоне они довольно похожи (<https://earthobservatory.nasa.gov>)

Подобно различным объектам на Земле газы в атмосфере также обладают уникальными спектральными характеристиками - поглощают некоторые длины волн и испускают другие. Также газы позволяют некоторым длинам волн проходить через них беспрепятственно. Ученые называют такие диапазоны волн - окнами прозрачности (рис. 1.1.3). В пределах этих окон в основном и размещаются каналы сенсоров спутников (рис. 1.1.4).

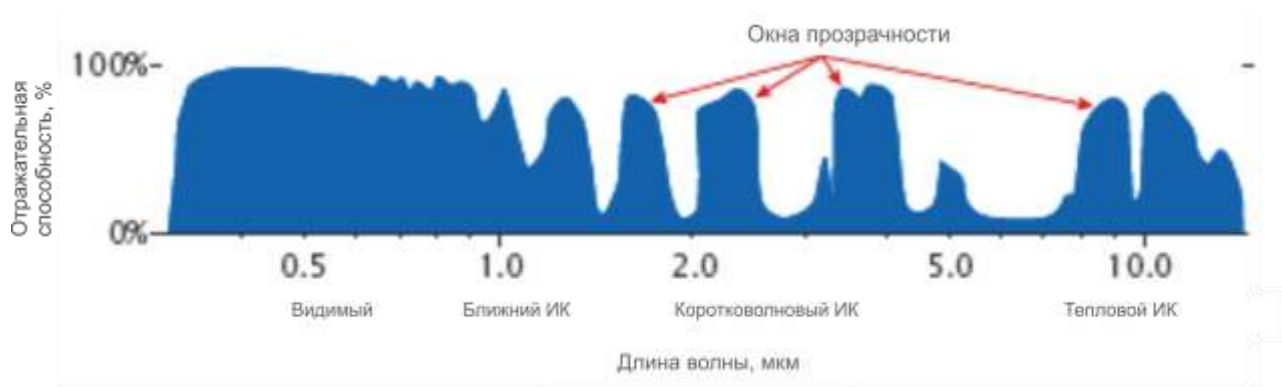


Рисунок 1.1.3 Окна прозрачности - это диапазоны электромагнитного спектра, в пределах которых большая часть света свободно проходит через атмосферу, позволяя спутникам наблюдать поверхность Земли (<https://earthobservatory.nasa.gov>)

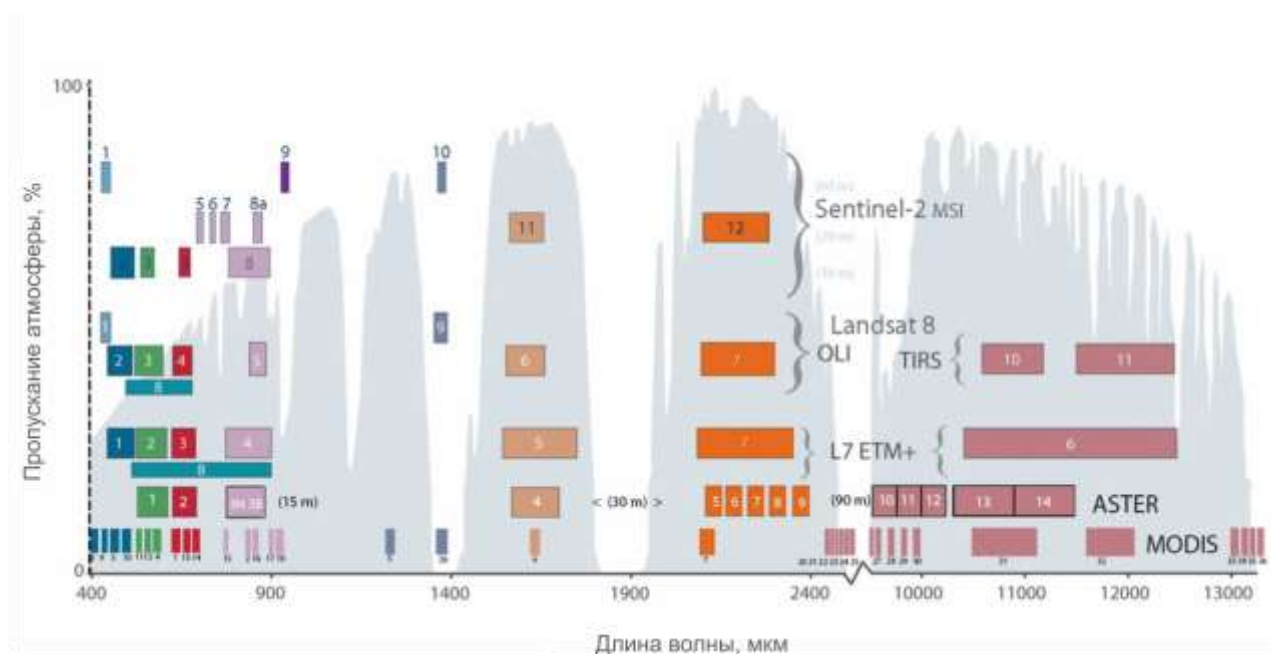


Рисунок 1.1.4 Каналы различных спутниковых систем расположены в пределах окон прозрачности (<https://gis.stackexchange.com>)

## 1.2 Общая характеристика дистанционных методов

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) может осуществляться активным и пассивным методами (рис. 1.1.5).

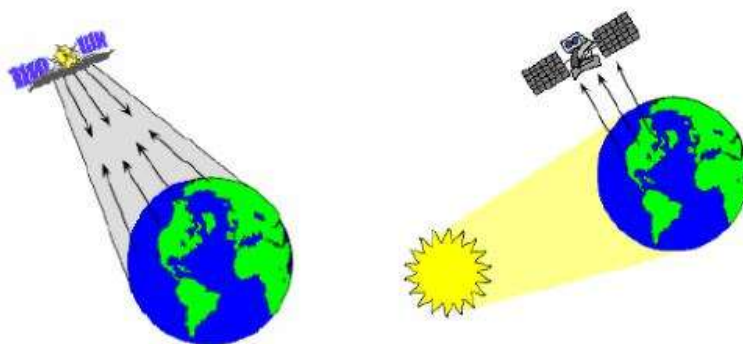


Рисунок 1.1.5 Активный и пассивный методы ДЗЗ (<http://www.myshared.ru>)

Активные сенсоры сами генерируют энергию излучения с борта аэро- или космического летательного аппарата с помощью искусственного излучателя (лазера – оптического генератора, радиогенератора) и регистрируют отраженное излучение от поверхности Земли. [10]

Плюсы активных съёмочных систем (сенсоров) в том, что они не зависят от погоды и времени суток. Облачность также в этом случае не является препятствием.

При пассивном методе устройства, установленные на борту носителя, измеряют характеристики отраженного солнечного и образованного системой «Земля-атмосфера» электромагнитного излучения в широком диапазоне волн.

При этом, сенсоры (датчики) в одних условиях могут быть пассивными, а в других – активными. К примеру, фотоаппарат при обычной съемке играет роль пассивного сенсора, но при съемке со вспышкой уже является активным.

Пассивные сенсоры, установленные на борту космического аппарата, измеряют либо отраженное от объекта исследования солнечное излучение, либо излучение, которое генерируется самим объектом (собственное излучение объекта).

К пассивным сенсорам относят:

- 1.фотографические;
- 2.телевизионные;
- 3.инфракрасные;
- 4.многоканальные сканеры.

В зависимости от поставленных задач сенсоры могут располагаться на наземных, воздушных или космических аппаратах.

В целом же выделяют следующие виды аэрокосмических съемок:

- 1.Фотографическая
- 2.Сканерная
3. Радиолокационная
- 4.Инфракрасная (тепловая)
- 5.Спектрометрическая
- 6.Лидарная

### 1.3 Характеристики космических снимков

Разрешение - это минимальное расстояние между двумя объектами, которые могут быть различимы на снимке. Объекты, расстояние между которыми меньше величины разрешения, воспринимаются как единый объект на снимке. Однако в случае с ДЗЗ разрешение это не только способность различать объекты между собой, но и определять их свойства. На качественном уровне, разрешение - это количество деталей, которое можно наблюдать на снимке. Таким образом, изображение с большим количеством деталей имеет более высокое разрешение.

Выделяют 4 типа разрешений в ДЗЗ:

- \* пространственное;
- \* спектральное;
- \* радиометрическое;
- \* временное (Kumar, 2016)

#### **Пространственное разрешение**

Цифровое изображение состоит из множества пикселей, каждый пиксель содержит информацию о небольшой площади поверхности Земли. Пространственное разрешение - это размер самого малого объекта, который может быть различим на снимке. Оно выражается в виде размера пикселя, измеряется в метрах. Пространственное разрешение зависит от мгновенного поля обзора (IFOV) (прямо пропорционально) и от длины волны (обратно пропорционально). На величину мгновенного поля обзора влияют высота полета спутника и угол обзора (рис. 1.3.1). Чем меньше угол обзора и высота полета, тем меньше мгновенное поле обзора.



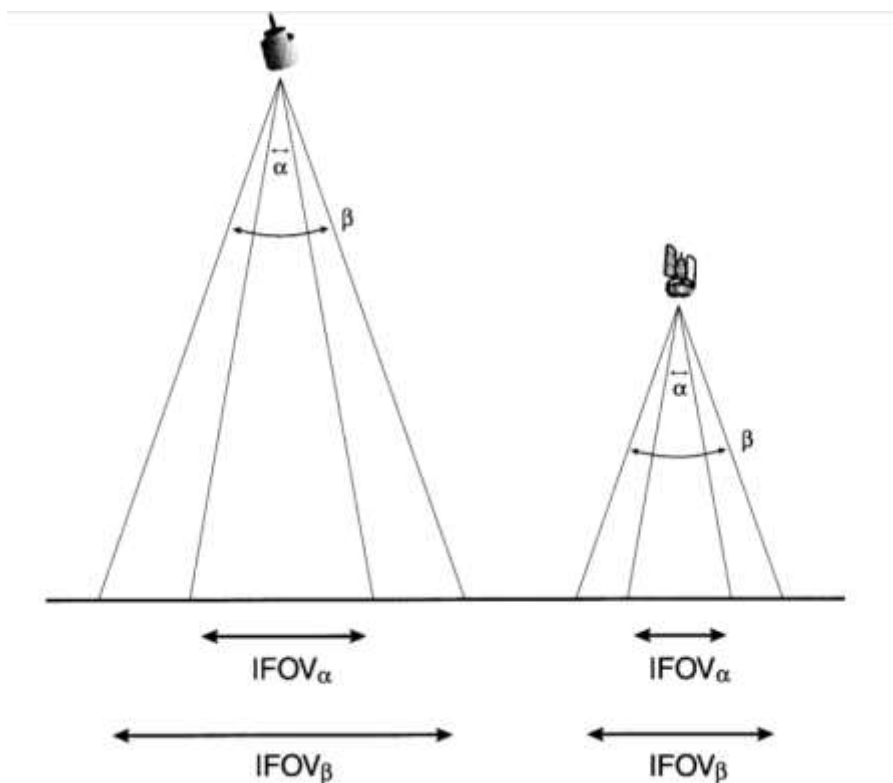


Рисунок 1.3.1 Величина мгновенного поля обзора (IFOV) в зависимости от угла обзора ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) и высоты полета (1 и 2) (Kumar, 2016). В случае с наибольшей высотой (1) и углом обзора ( $\beta$ ) наблюдается большее мгновенное поле обзора

По пространственному разрешению спутниковые системы разделяют на (рис.1.3.2): системы с низким разрешением ( $> 1$  км). Например, MODIS и AVHRR.

системы со средним разрешением (0.1 - 1 км). Пример, IRS WIRS 6-ой канал (188 м), тепловой ИК канал Landsat TM (120 м).

системы с высоким разрешением (5-100 м). К ним относят Landsat ETM+ (30 м), SPOT 5 (5 м панхроматическое изображение), Sentinel 2 (10 м).

системы со сверхвысоким разрешением (до 5 м). Включают GeoEye (0.45 м - панхром и 1.65 м - MSS), IKONOS (0.8-1 м), QuickBird (2.4-2.8 м).

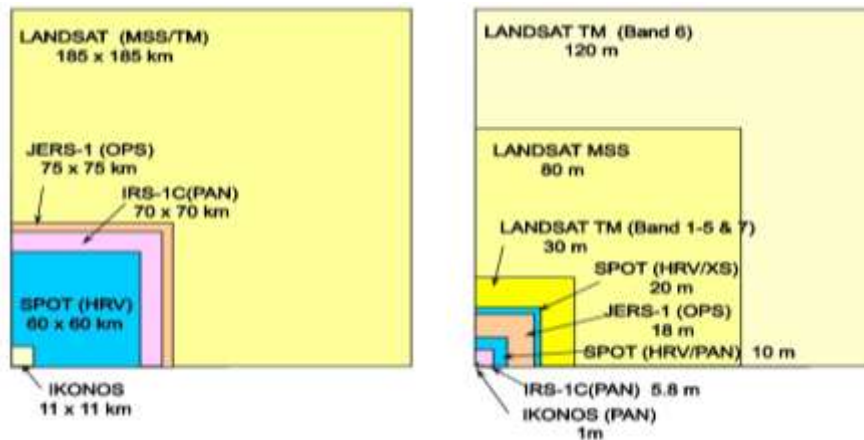


Рисунок 1.3.2 Размер снимков (слева) и их пространственное разрешение (справа)  
(<http://slideplayer.com>)

*Снимки низкого разрешения* могут быть применимы для исследования растительных сообществ на национальном и глобальном уровнях. Области применения - мониторинг крупных пожаров, засушливых территорий, крупномасштабные вырубки леса.

Снимки с высоким разрешением наиболее широко применимы для исследований растительных сообществ на локальном и региональном уровне. Например, более локальные вырубки леса, пожары, видовой состав растительности.

Снимки со сверхвысоким разрешением могут быть использованы для изучения небольших территорий, так как размер снимков достаточно мал несмотря на их хорошее пространственное разрешение. В отличие от снимков с более низким разрешением, доступны лишь платные снимки.

### **Спектральное разрешение**

Спектральное разрешение представляет собой ширину спектрального канала фильтра и чувствительность детектора. Спектральное разрешение - способность сенсора воспринимать энергию, полученную в диапазоне длин волн канала, для разделения разных объектов на земной поверхности (например, воду от растительности). Чем лучше спектральное разрешение, тем уже диапазон длин волн для канала. Множество систем ДЗЗ являются мультиспектральными, которые записывают энергию для отдельных диапазонов длин волн, и имеют различные спектральные разрешения. К примеру, на рисунке 1.3.3 показано условное представление систем ДЗЗ с различными спектральными разрешениями. 9

ячеек - это пиксели, в которых записаны спектральные характеристики. На верхнем рисунке значения получены по 1 каналу, диапазон волн в нем от 0.4 до 0.7 мкм. На втором и третьем рисунках те же ячейки, но значения получены по большему числу каналов - 3-м и 6-и соответственно. При этом, чем больше каналов, тем меньше диапазон длин волн и лучше спектральное разрешение.

В основном объекты на поверхности Земли могут быть различимы при использовании множества узких каналов, а не одного канала с широким диапазоном длин волн. Показателен пример, изображенный на рисунке 1.3.4. Слева объект А, справа - В. Если использовать значения по каналу с диапазон волн от 0.4 до 0.6 мкм, то эти 2 объекта не различимы. Если же использовать 2 канала с длинами волн 0.4-0.5 (канал 2) и 0.5-0.6 (канал 3) мкм, то явно будут проявлены различия этих 2 объектов. Объект А обладает высокими значениями во 2-ом канале и низкими- в 3-ем. Объект В, наоборот, имеет низкие значения в 2-ом канале и высокие - в 3-ем.

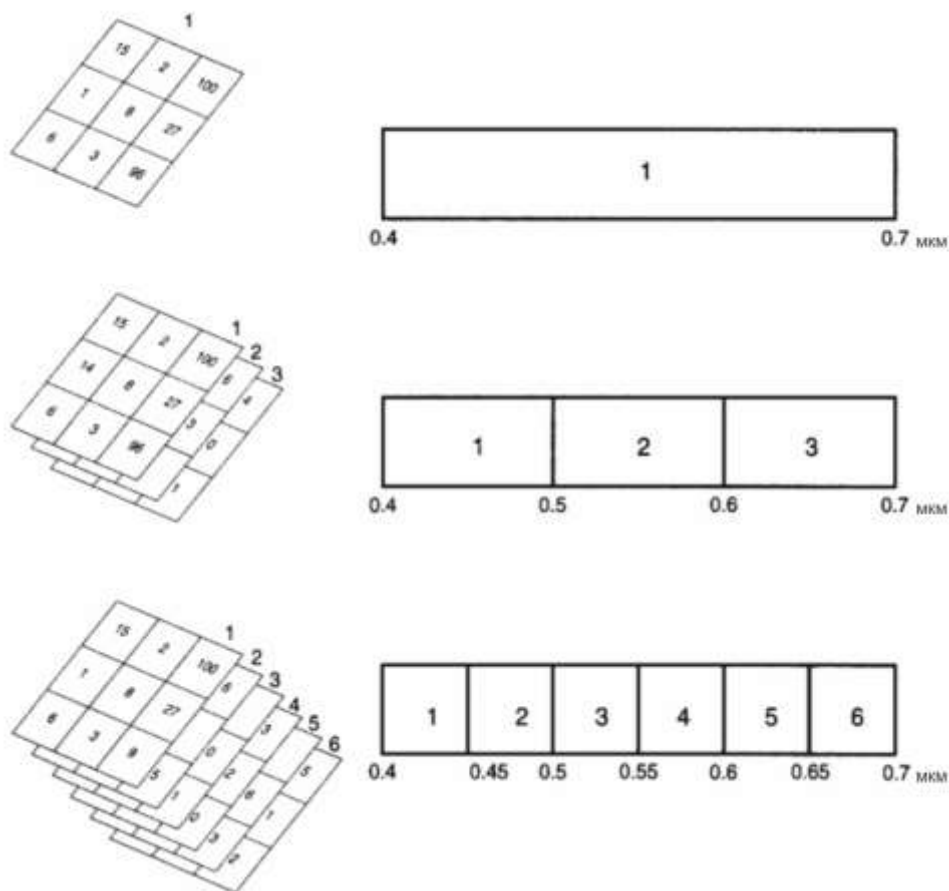


Рисунок 1.3.3 Условное представление систем ДЗЗ с различными спектральными разрешениями (Kumar, 2016). Сверху вниз увеличивается количество каналов и соответственно спектральное разрешение.

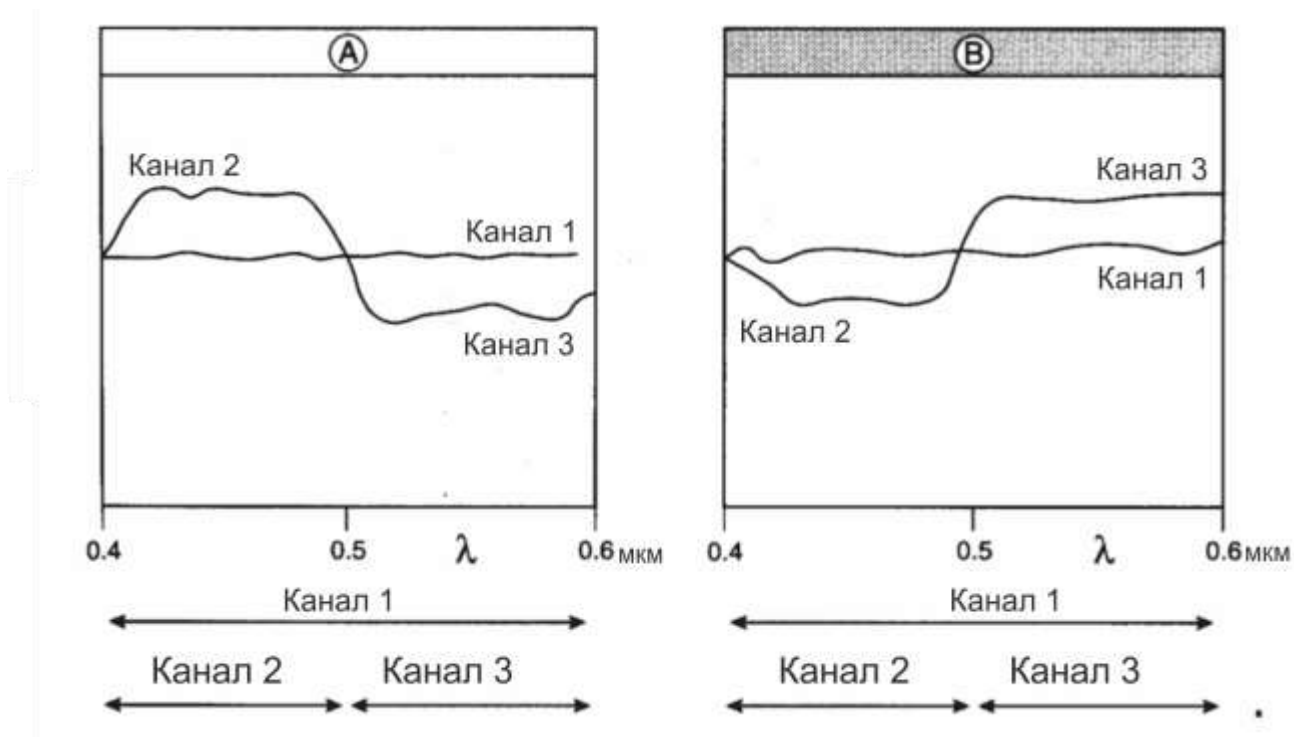


Рисунок 1.3.4 разные поверхности (А и В) неразличимы на 1-ом канале (0.4-0.6 мкм), но могут быть разделены по 2-ум каналам (2-ому - 0.4-0.5 мкм и 3-ему - 0.5-0.6 мкм) (Kumar, 2016).

Пример. Данные Landsat 8 включают 11 каналов в пределах от 0.07 до 12 мкм.

### Радиометрическое разрешение

Радиометрическое разрешение сенсора - это количество оттенков серого в черно-белом представлении канала (рис.1.3.5) или другими словами это чувствительность сенсора. Чем больше радиометрическое разрешение, тем меньше погрешность измерения интенсивности электромагнитного излучения для каждой ячейки (пикселя). Радиометрическое разрешение измеряется в битах (например, 8 бит). Каждый бит может содержать 0 или 1 (двоичная система счисления). Так, например, сенсор Landsat TM использует 8-бит для записи данных (8-битное радиометрическое разрешение), что позволяет получить значение в каждой ячейке от 0 до 255 (всего  $2^8$  или 256 возможных значений для

каждой ячейки) (рис. 1.3.6). Пример сенсора с 11-битным радиометрическим разрешением (2048 значений) - NOAA-AVHRR. Необходимо понимать, что чем выше радиометрическое разрешение, тем больший объем памяти занимает снимок.

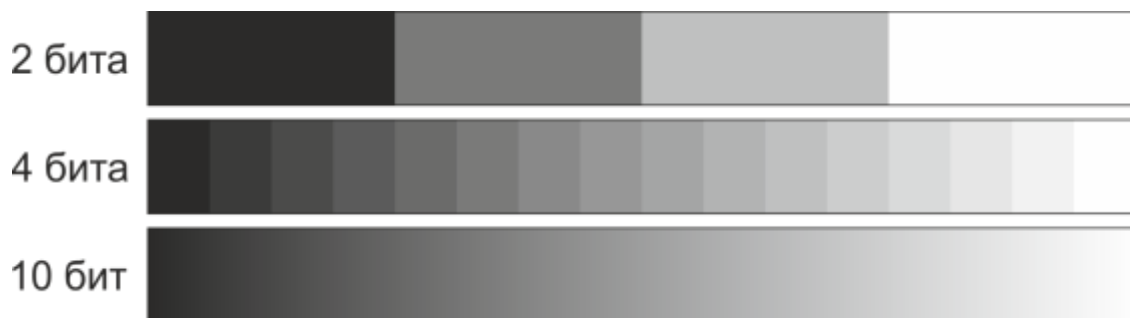


Рисунок 1.3.5 Визуальное представление радиометрического разрешения

							8 бит			11 бит	
							↓			↓	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Количество бит
2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	Предельные значения

Рисунок 1.3.6 Радиометрическое разрешение и количество уровней яркости изображений

### Временное разрешение

Временное разрешение - это период времени между получением снимков определенной местности. Для каждого спутника оно своё. Бывает 2 видов: абсолютное временное разрешение и действительное. Первое - период времени между снимками одной местности при одном угле обзора сенсора, зависит от периода обращения спутника. Например, для Landsat составляет 18 дней. Действительное временное разрешение обычно охватывает меньший период времени, чем абсолютное. На него влияют такие факторы как поперечное перекрытие снимков (sidelap) и наличие снимков не в надире. Поперечное перекрытие в экваториальной области меньше, чем в полярной, поэтому территории высоких широт имеют лучшее действительно временное разрешение (рис.1.3.7).

Разновременные снимки используются для мониторинга растительного покрова, использования земель, природных катастроф, таких как наводнения, извержения вулканов, пожары.

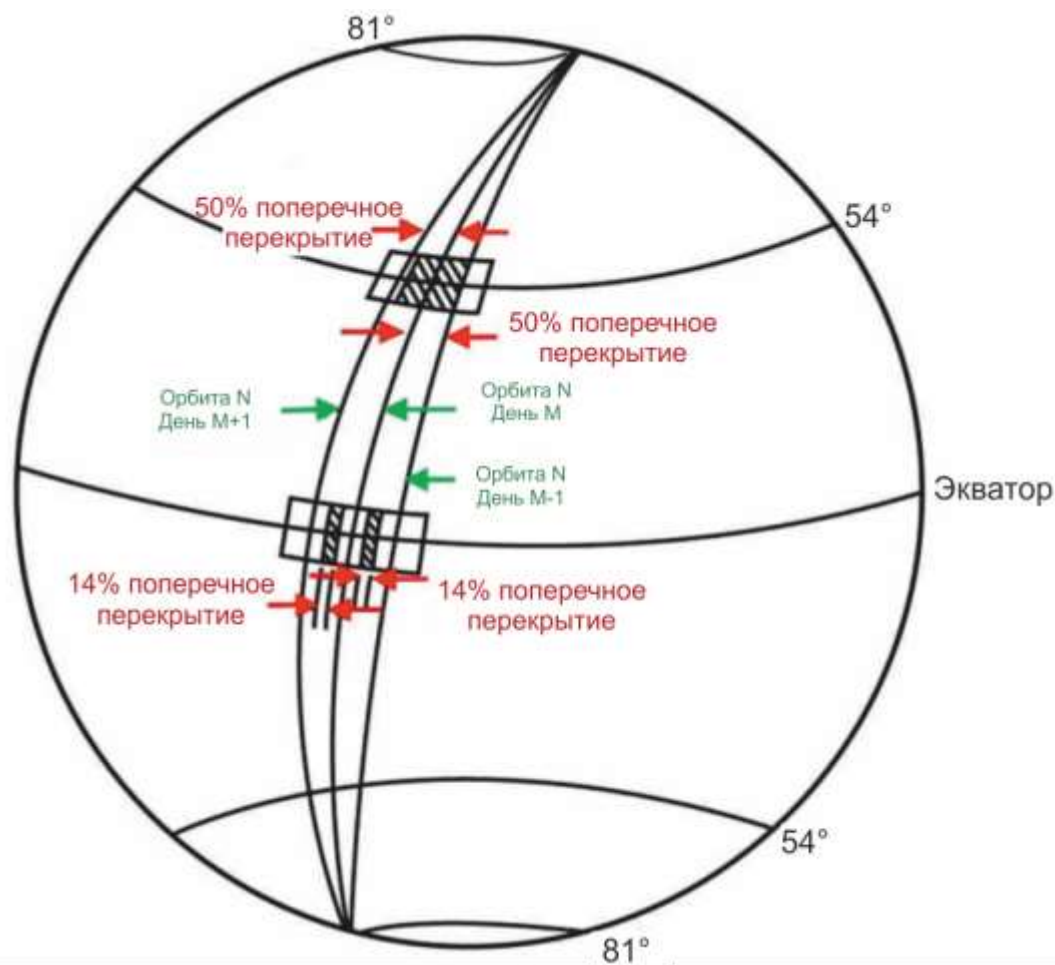


Рисунок 1.3.7 Схематический рисунок поперечного перекрытия снимков на различных широтах (<https://eros.usgs.gov>)

#### 1.4 Характеристики сенсоров

За последние 50 лет снимки были получены с различных бортовых и космических датчиков от мультиспектральных сенсоров до гиперспектральных с длиной волны от видимого до микроволнового диапазона. Пространственное разрешение снимков варьируется от полуметра до километра, а временное – от 30 минут до нескольких недель или месяцев. Поскольку разные сенсоры имеют разные пространственные, временные, спектральные и радиометрические характеристики, выбор подходящего сенсора очень важен для картирования растительного покрова.

Выбор изображений, полученных с разных сенсоров, в значительной степени определяется четырьмя факторами:

1. цель картирования
2. стоимость изображений
3. климатические условия (облачность)
4. технические аспекты при интерпретации изображений.

Во-первых, необходимо определиться с тем, что должно изображаться и какая точность отображения ожидается. Во-вторых, стоимость космического снимка может быть весьма высокой, соответственно, цена также играет роль при выборе изображений. Как правило, при картировании небольших участков растительности целесообразно использовать снимки с высоким разрешением, в то время как преимущество снимков с низким разрешением – большой охват территории. В области картографирования растительности наиболее часто применяются такие сенсоры как Landsat (главным образом TM и ETM +), SPOT, MODIS, NOAA-AVHRR, IKONOS и QuickBird. Характеристики этих сенсоров приведены и описаны в таблице 1.4.1.

Таблица 1.4.1 - Основные характеристики сенсоров (Хие и др., 2008)

Сенсор	Особенности	Использование при картографировании растительности
Landsat TM	Среднее или высокое пространственное разрешение с мультиспектральными данными (120 м для теплового инфракрасного диапазона и 30 м для мультиспектральных каналов), снимки имеются с 1982 года (Landsat 4 и 5) по настоящее время. Каждая сцена занимает площадь 185 × 185 км. Временное разрешение - 16 дней.	Подходят при мелкомасштабном картографировании на региональном уровне с целью отображения растительности на уровне сообщества.

<p>Landsat ETM+ (Landsat 7)</p>	<p>Среднее или высокое пространственное разрешение с мультиспектральными данными (15 м для панхроматического канала, 60 м для теплового инфракрасного излучения и 30 м для мультиспектральных каналов), снимки существуют с 1999 года по настоящее время. Каждая сцена занимает площадь 185 км × 185 км. Временное разрешение - 16 дней.</p>	<p>Картографирование в среднем масштабе (1:100000), как правило, отображается растительность на уровне сообщества с возможным выделением преобладающих видов растительности.</p>
<p>SPOT</p>	<p>Полный диапазон средних пространственных разрешений от 20 м до 2,5 м и SPOT VGT с низким пространственным разрешением 1 км. Каждая сцена охватывает 60 × 60 км для HRV / HRVIR / HRG и 1000 × 1000 км (или 2000 × 2000 км) для VGT. SPOT 1, 2, 3, 4 и 5 были запущены в 1986, 1990, 1993, 1998 и 2002 годах соответственно. SPOT 1 и 3 сейчас не предоставляют данные.</p>	<p>На снимках различима растительность на уровне сообществ или видов в глобальном / национальном / региональном масштабе (от VGT), заметны типы растительного покрова (например, городская застройка, классы растительности, акватория и т. д.)</p>
<p>MODIS</p>	<p>Низкое пространственное разрешение (250-1000 м) и мультиспектральные снимки со спутника Terra (с 2000 года по настоящее время) и Aqua (с 2002 года по настоящее время). Временной интервал составляет около 1-2 дней. Подходит для картографирования растительности в крупных масштабах. Ширина полосы обзора составляет 2330 км на 10 км (в надире).</p>	<p>Картирование в глобальном, континентальном или национальном масштабе. Подходит для картирования типов растительного покрова (т. е. городской местности, классов растительности, акватории и т. д.)</p>



<p>AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)</p>	<p>Характеризуется низким пространственным разрешением (1 км). Мультиспектральные данные, полученные от спутников NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) имеются с 1980 года по настоящее время. Примерный размер сцены - 2400 × 6400 км.</p>	<p>Глобальное, континентальное или национальное картирование. Подходит для картирования типов растительного покрова (т. Е. Городской местности, классов растительности, акватории и т. Д.)</p>
<p>IKONOS</p>	<p>Первый коммерческий спутник, обеспечивающий съемку с разрешением 1 м в панхроматическом режиме. Пространственное разрешение в мультиспектральном режиме 4 м (включая красный, зеленый, синий и ближний инфракрасный диапазоны). Период повторной съемки 3-5 дней. Возможна съемка больших территорий за один проход, размер сцены - 11 × 11 км.</p>	<p>Отображение растительности на местном или региональном уровнях с возможным распознаванием видов или сообществ растительности.</p>
<p>QuickBird</p>	<p>Отличается высоким разрешением (2,4-0,6 м), спутник предназначен для съемки в панхроматическом и мультиспектральном режимах. Площадь одной сцены составляет 16,5 × 16,5 км. Частота повторения - около 1-3,5 дней в зависимости от широты.</p>	<p>Отображение растительности на региональном уровне на уровне, а также для проверки растительного покрова, извлеченного из других изображений.</p>

<p>ASTER</p>	<p>Изображения со средним пространственным разрешением (15-90 м) с 14 спектральными каналами спутника Terra (с 2000 года по настоящее время). Видимые и инфракрасные каналы имеют пространственное разрешение 15 м, 30 м для коротковолновых инфракрасных каналов и 90 м для тепловых инфракрасных каналов.</p>	<p>Отображение растительности на национальном уровне.</p>
<p>AVIRIS (The airborne visible/infrared imaging spectrometer)</p>	<p>Гиперспектральное изображение с 220 каналами от видимого до коротковолнового инфракрасного. Пространственное разрешение составляет 30 м. Данные доступны с 2003 года.</p>	<p>Отображение растительности на региональном уровне.</p>

## ГЛАВА 2. ОБРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Обработка спутниковых снимков до расчета различных индексов необходима для удаления шума и увеличения возможности дешифрирования снимков. Особенно это важно, когда используются разновременные снимки или изучаемая территория охватывает площадь нескольких снимков, так как изображения должны быть хорошо привязаны в пространстве и иметь единую, сопоставимую шкалу спектральных характеристик (коэффициенты отражений и поглощений). Идеальный результат обработки снимков – это получение таких снимков, которые словно получены с одного и того же сенсора (Hall et al. 1991). Важно то, что обработка снимков – это необходимое условие для расчета вегетационных индексов. Указанные ниже процедуры обработки могут быть не всегда необходимы, так как некоторые из них могут быть выполнены заранее поставщиками снимков. Поэтому рекомендуется проконсультироваться с ними и выяснить какой уровень обработки был произведен на момент приобретения снимка (обычно включают уровни 0, 1А, 1В, 2А, 2В, 3А, 3В, от 0 к 3 улучшается уровень обработки). К примеру, для некоторых сенсоров уровень 3А значит, что были произведены радиометрическая, геометрическая коррекция и ортотранформирование.

Обработка изображений обычно включает в себя серию операций, включая (но не ограничиваясь этим) замену пустых линий, радиометрическую и геометрическую коррекцию, улучшение изображения и маскировка (облаков, воды, неподходящих объектов), хотя могут существовать некоторые отклонения выполнения процедур для снимков, полученных с разных сенсоров. Замена пустых линий – это определение в целом качества изображений (например, определение отсутствующих линий) с помощью визуального анализа изображений канал за каналом. Визуальный анализ обычно выполняется с целым снимком, внимание уделяется определению линий или блоков отсутствующих данных в каждом канале для будущего восстановления снимков. Замена линий снимка – это процедура, в результате которой происходит заполнение отсутствующих линий линиями других снимков.

### 2.1 Радиометрическая коррекция

Радиометрическая коррекция включает в себя также и атмосферную коррекцию (рис. 2.1.1) (устранение влияния состояния атмосферы на получаемые данные). Радиометрическая коррекция данных ДЗЗ представляет собой процесс исправления ошибок или искажений

цифровых снимков для улучшения точности значений яркостей и получения отражательной способности.

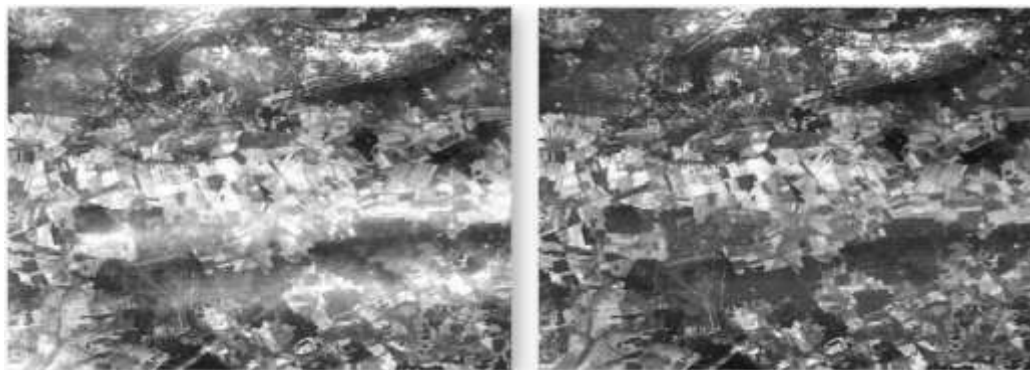


Рисунок 2.1.1 Снимок до (слева) и после (справа) атмосферной коррекции. На снимке до коррекции наблюдается дымка (<https://www.utsa.edu>)

Несколько методов доступно для проведения радиометрической коррекции. Одни из них основаны на сложных математических моделях с рядом переменных. Однако значения этих переменных (например, состав атмосферы) должен быть предварительно известен.

Другие методы основаны на наблюдении за изучаемым объектом (например, вода или пустыня), чьи радиометрические свойства известны.

Независимо от методов радиометрической коррекции, саму радиометрическую коррекцию можно разделить на 2 типа: абсолютную и относительную (Хіе и др., 2008).

Абсолютная радиометрическая коррекция направлена на извлечение абсолютных отражательных способностей объектов на снимках на поверхности Земли. Входными параметрами для коррекции служат свойства атмосферы в момент выполнения снимка и калибровка сенсора, эти параметры зачастую достаточно сложно получить.

Относительная радиометрическая коррекция же предназначена для уменьшения влияния атмосферных условий и других нежелательных воздействий среди множества снимков одной территории. Известные радиометрические характеристики, примененные для получения абсолютной радиометрической коррекции одного снимка, применяются для других снимков этой же территории (Hall et al. 1991), поэтому относительная коррекция является более простой в использовании.

Исследователи Schroeder и др. (2006) and Chen и др. (2005) сравнили эффективность методов абсолютной (6S model, MDDV model и DOS model) и относительной (MAD model

and PIF model) радиометрической коррекций и показали плюсы и минусы каждой модели. Исправления ошибок или искажений цифровых снимков для улучшения точности значений яркостей и получения отражательной способности снимка. Такие факторы, как фенология, состояние грунта и атмосферные условия могут вносить вклад в изменчивость спектральных характеристик.

## 2.2 Геометрическая коррекция

Геометрическая коррекция предназначена для удаления геометрических искажений и достигается благодаря установлению связи между системой координат изображения и географической системой координат, используя данные калибровки сенсора, данные о положении и высоте спутника, а также опорные точки. Поэтому геометрическая коррекция обычно включает выбор картографической проекции и совместную регистрацию данных снимка с другими данными, используемыми для калибровки. Результат геометрической коррекции должен быть таким, что ошибка должна достигать величины +/- один пиксель (соответствует пространственному разрешению) от реального положения объекта. Это позволяет производить анализ поведения объектов по разновременным снимкам.

## 2.3 Улучшение изображений для визуального дешифрирования

Изображения лучше интерпретируются, если произведено улучшение изображения, цель которого – визуальное усиление определенных особенностей изображений (например, определенных видов растений). Традиционный метод улучшения изображения заключается в различном преобразовании шкал отображаемых каналов. Всего для визуализации используют 3 канала, один из них закрашивают синим, 2-ой зеленым, 3-ий красным. Если канал синего представлен в синем цвете, зеленого – зеленым, а красного – красным, то получившееся цветное изображение называют изображением в естественных цветах. Если же комбинация каналов иная, то изображение называют псевдоцветным.

При картировании растительного покрова с использованием методов ДЗЗ (особенно картирование крупных регионов) облака и тени перекрывают растительность и представляют собой шум, поэтому их удаляют или маскируют.

## **ГЛАВА 3. ВЫЯВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЕСАХ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

### **3.1 Дешифрирование и его признаки**

Дешифрирование аэрокосмических снимков – это процесс, с помощью которого раскрывается содержание аэроснимков, то есть устанавливается соответствие между объектами исследования и их изображением; их качественная и количественная характеристика.

При дешифрировании используют прямые и косвенные дешифровочные признаки объектов местности.

Прямыми называют те, которые позволяют непосредственно определять особенности и характеристики объектов земной поверхности. Они свойственны почти всем объектам местности, изображенным на снимке. К прямым относят рельеф, форму, цвет и фототон объектов, структуру и текстуру изображения, тени объектов.

Форма объекта характеризуется общим очертанием в плане, объемностью и характером границ. Выделяют линейную, геометрическую (определенную или неопределенную), компактную и объемную формы объектов.

Цвет объектов один из наиболее важных прямых дешифровочных признаков. Цветное изображение (как в естественных цветах, так и псевдоцветное) легче воспринимается и дает больше информации, чем черно-белое.

Фототон (яркость) является очень изменчивым признаком. Он зависит не только от свойств самого объекта, но и от времени года и освещенности предмета.

Структура изображения представляет собой совокупность элементов на снимке, объединяющиеся по каким-либо признакам. Она характеризует особенности почвенно-растительного покрова, гидрографию элементов рельефа местности и т.д. Структура бывает звездчатая, струйчатая, пятнистая, губчатая, сетчатая, линейная, полосчатая, точечная. Перечисленные виды могут встречаться вместе.

Текстура это также совокупность элементов, как и структура, но на более локальном уровне. Бывает мелкозернистая, крупнозернистая и нормальнозернистая текстуры.

Тени могут быть собственными (на самом объекте) или падающими (то есть откидываться от одних объектов на другие). На снимках мелкого масштаба тени

отображаются слабо, заметны лишь тени от облаков и выделяющихся над поверхностью объектов (например, горы). На снимках крупного масштаба тени различимы практически для любых объектов (деревья, дома и пр.).

Многие объекты непосредственно не отображаются на снимках или несколько объектов могут иметь одни и те же прямые дешифровочные признаки и поэтому не могут быть корректно отдешифрированы. В этом случае используются косвенные признаки. Они основываются на разных зависимостях между объектами и элементами ландшафта.

### 3.2 Примеры дешифрирования нарушений лесных экосистем

В результате дешифрирования разновременных снимков возможно выявить следующие изменения: гарь, ветровалы и буреломы, вырубки лесов; повреждения, вызываемые насекомыми-вредителями и пр. Далее приводятся примеры перечисленных случаев.

Гарь - это выгоревший участок леса. На снимке, в год после пожара, наблюдается почернение участка, охваченного пожаром (рис. 3.1.1). На рисунке показана территория лесной зоны города Тольятти между Автозаводским (слева) и Центральным (справа) районами. По разновременным снимкам хорошо определим участок сгоревшего леса, пожар произошел в 2011 году.

Ветровалы и буреломы - это деревья, поваленные сильным ветром. Признаки ветровала на снимках - значительная протяженность и отсутствие прямых углов (характерных для вырубок), на снимках со сверхвысоким разрешением видны поваленные деревья. Причины, вызывающие ветровалы - шквал и смерч. Для первых характерно превышение длины над шириной ветровала в 3-10 раз, в то время как для смерча - в 20-50 раз (Шихов, 2014). На рисунке показана территория Рузского района Московской области до (2015 год) и после (2016 год) ветровала, связанного, вероятно, с сильным смерчем (рис. 3.1.2). Ширина участка поваленных деревьев составляет до 0.3 км, длина - более 40 км (рис.3.1 3).

Вырубки лесов - спил, сруб или срез деревьев, кустарников или лиан в лесу. Для них характерны четкие угловатые края на снимках (рис. 3.1.4). На рисунке отображена динамика вырубки лесов в южной части штата Пара на севере Бразилии в период с 1986 по 2008 годы. Площадь вырубок составляет более 1 млн. га по данным снимков.





Рисунок 3.1.1 Снимки до, в год и через 5 лет после пожара (выполнены с использованием ПО Google Earth)

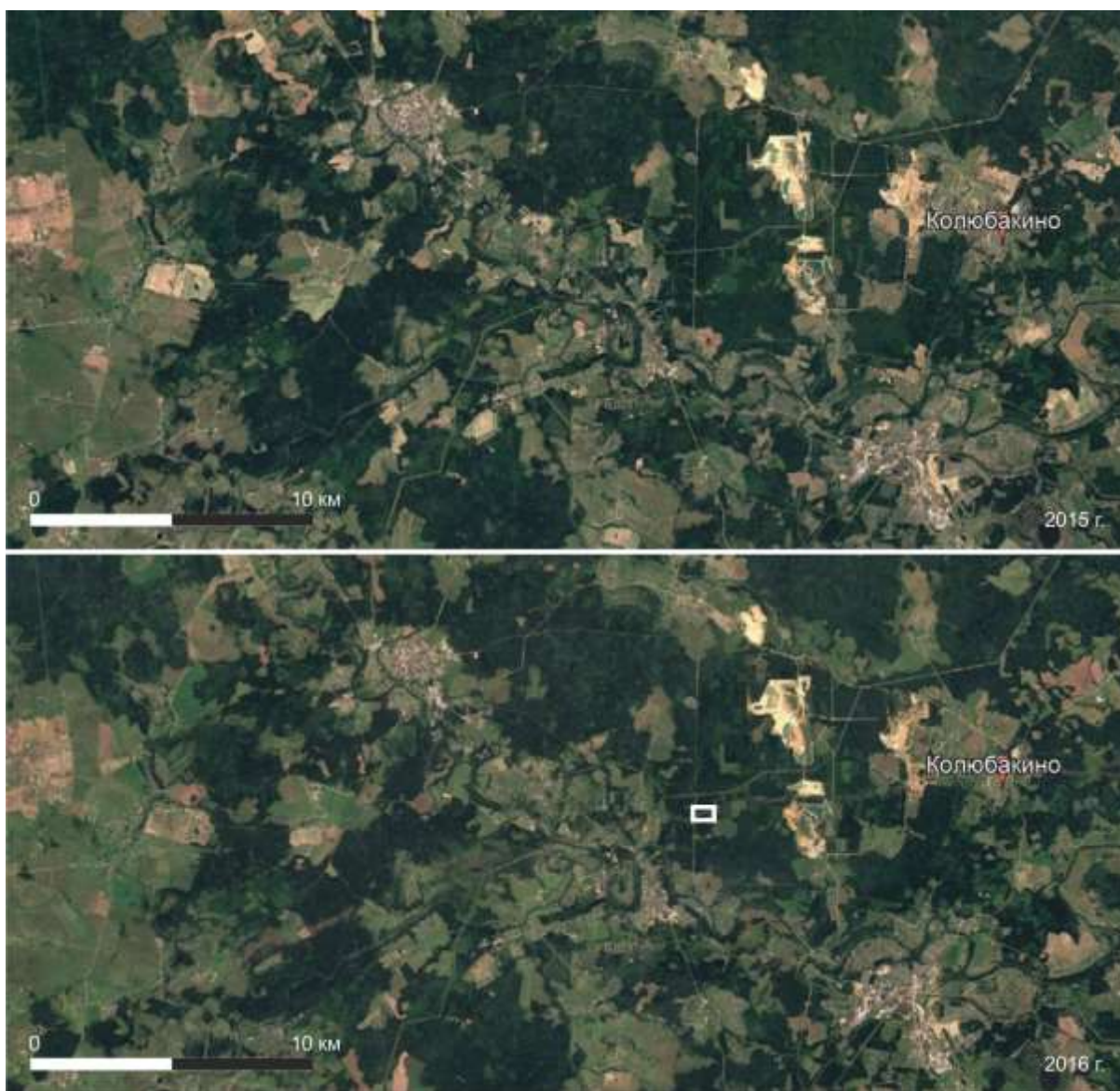


Рисунок 3.1.2 Снимки до (2015 г.) и после (2016 г.) бурелома (выполнены с использованием ПО Google Earth).



Рисунок 3.1.3 Снимки до (2013 г.) и после (2016 г.) бурелома (выполнены с использованием ПО Google Earth). Местоположение показано белым прямоугольником на предыдущем рисунке

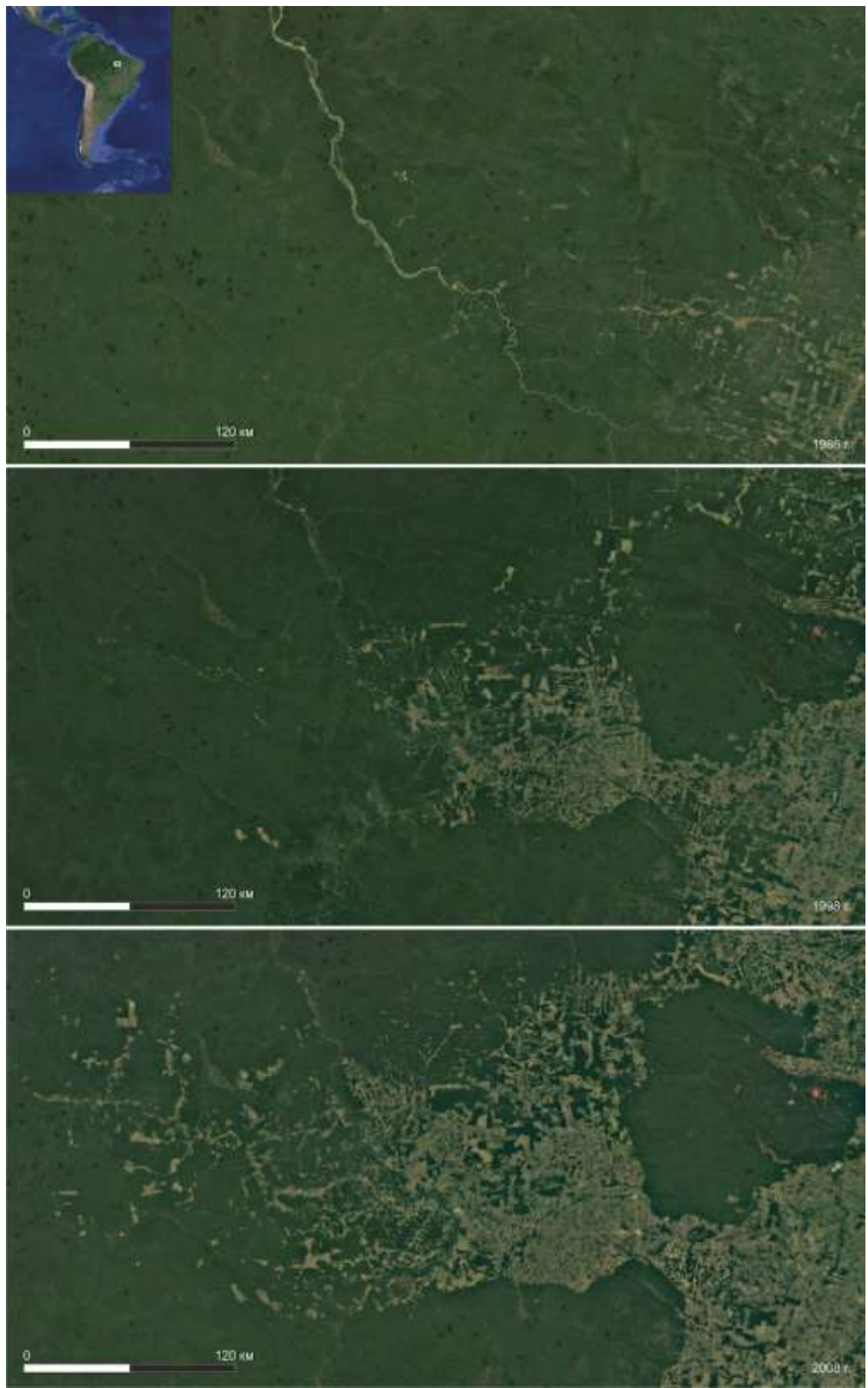


Рисунок 3.1.4 Разновременные снимки южной части штата Пара севера Бразилии, отображающие уменьшение площади леса вследствие вырубок (выполнены с использованием ПО Google Earth).

Вверху слева показано расположение снимков в пределах Южной Америки

### 3.2 Вегетационные индексы, применяемые для выявления повреждений лесного покрова

Спектральные свойства растений схожи между собой, так как здоровые листья имеют характерные свойства отражения (рис.3.2.1). Выделяют 3 спектральные области: до 0.7 мкм (отвечает за листовые пигменты), 0.7-1.3 мкм (структура клетки), 1.3-2.5 (содержание воды). В первой области наблюдается в целом поглощение (около 85%), при этом в диапазоне зеленого цвета больше отражение, поэтому мы видим растения зелеными и считаем хлорофилл зеленым пигментом. Во второй области поглощение пигментов и целлюлозы минимально (10%), при этом пропускание и отражение (40%) велики. Существует прямая зависимость между отражательной способностью растительности и разнообразием форм клеток, их структурой, размером, расстоянием между клетками и количеством слоев. Для третьей спектральной области характерно слабое поглощение воды в листьях. Отражательная способность для длин волн 1.45, 1.95, 2.5 мкм не применима, так как наблюдается сильное поглощение воды. На других длинах волн этой спектральной области отражательная способность тем больше, чем меньше количество жидкости в листьях.

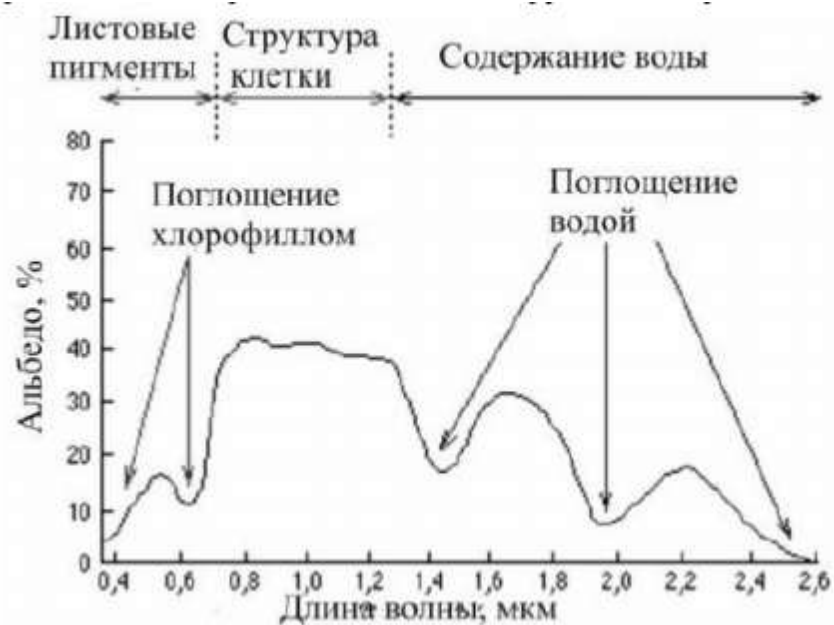


Рисунок 3.2.1 Спектральные характеристики здоровой растительности (переведена после <https://www.peauproductions.com>)

Вегетационные индексы (их около 160) (Черепанов, 2011) используются для получения новых изображений земной поверхности, которые дают возможность оценивать состояние растительности и более эффективно дешифровать объекты. Большинство вегетационных индексов используют красный (связан с поглощением хлорофиллом света) и ближний ИК (связан с плотностью зеленой растительности) каналы. Различия между почвой и растительностью максимальны в этих каналах (рис. 3.2.2).

На вегетационные индексы влияют растительность, атмосфера и подстилающая поверхность. Некоторые индексы минимизируют влияние последних двух факторов. Индексы способны определить не только присутствие растительности, но и разделить хвойные деревья от лиственных, выделить внутри них виды и определить возраст деревьев. Ниже приведена таблица (табл. 2), в которой описаны особенности распространенных вегетационных индексов.

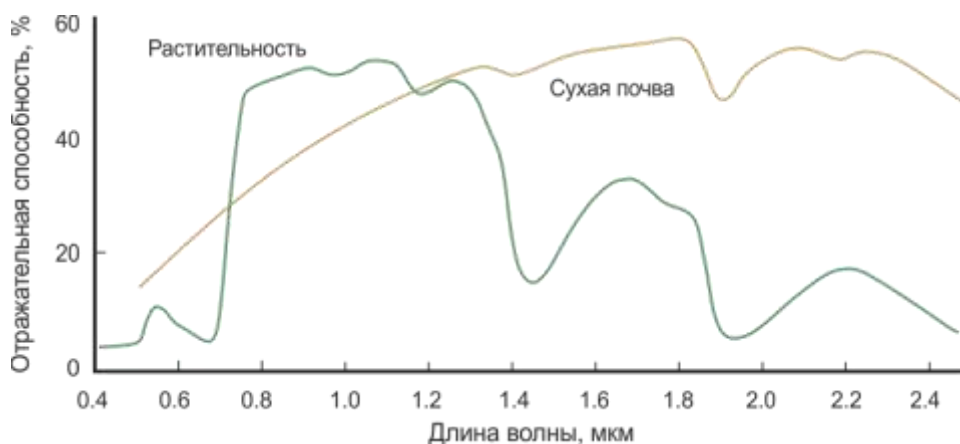


Рисунок 3.2.2 Спектральные характеристики растительности и почвы (<http://www.microimages.com>)

Таблица 3.2.1-Характеристика изображений, полученных с использованием различных вегетационных индексов (переведено после Бардиш и Бурштинська, 2014)

Индексы	Интерпретационные характеристики
PVI, PVI1, PVI2	Заметно влияние атмосферы, влияние подстилающей поверхности уменьшается. Водные объекты и почвы почти не различимы. Хорошо

	идентифицируются пахотные земли.
DVI	Заметно влияние подстилающей поверхности и атмосферы. Хорошо различимы лиственные и хвойные леса. Определим возрастной, но не видовой состав.
RVI, NDVI, MSR, NRVI, TVI,CTVI, TTVI	Хорошо различим лиственный лес от хвойного, их возрастной состав, заметно влияние подстилающей поверхности.
SAVI	Уменьшенное влияние подстилающей поверхности, влияние атмосферы велико.
RDVI	Заметно влияние атмосферы, различим возрастной, но не различим видовой состав.
AVI	Сильное влияние подстилающей поверхности и атмосферы. Хорошо определимы пахотные земли.
TSAVI	Хорошо выделяем карьер и дорога к нему. Растительность разделяется хуже.
WDVI	Очень хорошо определимы пахотные земли, но заметно сильное влияние подстилающей поверхности и атмосферы.
MSAVI1	Уменьшенное влияние подстилающей поверхности. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной состав.
MSAVI2	Уменьшенное влияние подстилающей поверхности. Водным объектам, карьерам, дорогам присписывается значение No Data. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной состав, но не видовой состав.
EVI	Применим для съемочной аппаратуры MODIS и Landsat. Заметно влияние атмосферы и подстилающей поверхности.
OSAVI	Уменьшенное влияние атмосферы и подстилающей поверхности. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной, но не видовой состав.

GEMI	Уменьшенное влияние атмосферы и подстилающей поверхности. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной, но не видовой состав. Хорошо видны пахотные земли, разные покрытия полей.
ARVI	Уменьшено влияние атмосферы. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной, но не видовой состав.
IPVI	Уменьшено влияние подстилающей поверхности. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной, но не видовой состав.
SARVI	Уменьшенное влияние подстилающей поверхности. Водным объектам, карьерам, дорогам приписывается значение No Data. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной состав, но не видовой состав.
VI3	Заметны аномалии на водных объектах. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной состав, но не видовой состав.
GNDVI	Уменьшено влияние подстилающей поверхности. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной состав.
BI	Значительное влияние атмосферы и подстилающей поверхности. Хорошо различимы пахотные земли и видовой состав.
NRVI	Влияние атмосферы минимальное. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса, определим возрастной состав, но не видовой состав.
GNVI	Заметно влияние подстилающей поверхности. Хорошо разделяются лиственные и хвойные леса.

Для оценки состояния растительности и динамики её состояния также используются иные индексы, например, разностный нормализованный индекс гарей (DNBR) и регенерационный индекс (RI). Первый служит для оценки степени повреждения территории вследствие пожара, второй - для оценки восстановления леса после пожара.



## ГЛАВА 4. РОЛЬ ГИС ПРИ МОНИТОРИНГЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Географические информационные системы (ГИС) обеспечивают сбор, обработку, отображение, распространение и интеграцию пространственно координированных данных (Лурье, 2008). При управлении лесными экосистемами ГИС решаются две задачи (McKendry и Eastman, 2014):

1. Учет лесных ресурсов и их мониторинг;
2. Анализ, моделирование и прогнозирование для принятия управленческих решений.

Первая задача включает в себя ввод пространственных данных, редактирование и создание карт. Анализ имеющихся карт выполняется как при первой (мониторинг), так и при второй задаче, поэтому граница между задачами не всегда четкая. Для второй задачи характерен управленческий подход, то есть большее внимание уделяется мероприятиям, направленным на изменение экосистемы. Этапы моделирования и прогноза необходимы для понимания того, что произойдет, если человек будет или не будет воздействовать на лесные экосистемы.

Дистанционное зондирование Земли тесно связано с ГИС, так как данные, полученные с космических аппаратов удобно хранить и преобразовывать в системе, которая отображает геопривязанные данные.

На основании географической привязки космических снимков и других данных возможно их совмещение в одном проекте ГИС, даже если снимки получены в разное время с разных систем дистанционного зондирования (MODIS, Landsat и пр.) (Воробьева, 2012). Отличительной особенностью ГИС является возможность хранения большого объема пространственной и атрибутивной информации, наличие инструментария, позволяющего проводить различные операции со слоями (обрезка слоев, расчет вегетационных и иных индексов, извлечение мультимнозначений в точках и пр.).

## **ГЛАВА 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СНИМКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЕСОВ ПОСЛЕ ПОЖАРОВ**

В настоящее время на Земле происходит большое количество пожаров. Сами пожары являются источником парниковых газов и аэрозолей [7], а лес – ценным природным сырьем. В связи с этим существует необходимость проводить мониторинг лесных пожаров и оценивать их последствия.

Методы дистанционного зондирования Земли широко применяются в различных областях науки, один из них – мониторинг лесных пожаров [2-6]. Космические снимки Ландсат, находящиеся в открытом доступе с 2008 года [1], открывают большие возможности для этого. Их преимуществом является большой временной охват снимков (с 1973 года) и удовлетворяющее пространственное разрешение - 15-30 м.

### **5.1 Районы исследования**

Были исследованы два участка сгоревшего леса. Первый располагается в Алтайском Крае, в северной части Алтайского заповедника (рис. 5.1.1, участок справа), где климат горный континентальный с коротким влажным летом и продолжительной морозной зимой [8]. Высота местности в пределах заповедника колеблется от 300 до 3500 м над уровнем моря, поэтому существует вертикальная поясность (снизу вверх) – таежный лес, кустарники, луг, мхи. Верхняя граница леса на северо-западе заповедника расположена на высоте до 2000 м над уровнем моря [9], а высота изучаемого участка от 1700 до 1950 м над уровнем моря.

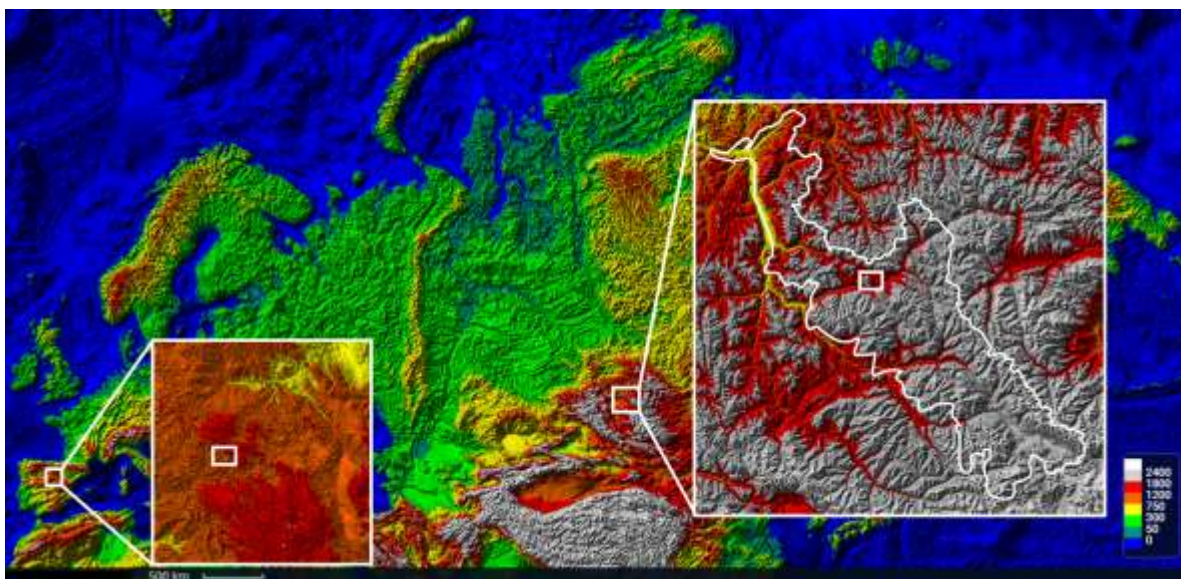


Рисунок 5.1.1 Карта рельефа Евразии [10] и участки исследования

Второй изучаемый участок находится на северо-востоке Пиренейского полуострова (Испания), в Иберийских горах (рис. 5.1.1, участок слева) на неохраняемой территории, высоты 1200 – 1400 метров. На северо-западе горной системы располагаются леса (<https://www.vedu.ru>). На высотах до 1000 м среди деревьев преобладают дуб и бук, от 1000 до 1800 метров - сосна, а выше 1800 - 1900 м – кустарники. Климат сухой и жаркий (<http://karatu.ru>). Снег на вершинах гор встречается с октября до середины мая.

## 5.2 Разработка и апробация методики оценок степени повреждения и восстановления растительности после пожара

Описание методики приводится на примере гари в Алтайском заповеднике. Участок сгоревшего леса был обнаружен на основе визуального дешифрирования в ПО Google Earth, пожар произошел в 2001 году весной. Для оконтуривания участка гари были использованы 4 снимка Ландсат 2-го уровня обработки (прошедшие геометрическую и радиометрическую коррекции [11-12]) (рис. 5.2.1) за 1998 и 2001 годы (табл. 5.2.1 ) с вычисленным нормализованным индексом гарей NBR по формуле  $NBR = (NIR - MIR) / (NIR + MIR)$ , где NIR и MIR – ближний и средний инфракрасные каналы электромагнитного спектра соответственно. Из облачных снимков 2001 был сформирован один на основе заполнения облачных участков безоблачными из снимков того же года. Затем был посчитан разностный нормализованный индекс гарей  $dNBR = NBR$  (до пожара) -  $NBR$  (после пожара). По значению  $DNBR=0.1$  [13] был оконтурен участок пожара (рис. 2), его площадь составила 107 км<sup>2</sup>.

### Additional Processing (Landsat Only)

Level-2 Products

- [Surface Reflectance](#)
- [Top of Atmosphere Reflectance](#)
- [Brightness Temperature](#)
- [Pixel QA](#)
- [Spectral Indices](#)

- [NDVI](#)
  - [EVI](#)
  - [SAVI](#)
  - [MSAVI](#)
  - [NDMI](#)
  - [NBR](#)
  - [NBR2](#)

Рисунок 5.2.1 Заказ «индексных снимков» с вычисленным NBR и NDVI на сайте <https://espa.cr.usgs.gov>

Таблица 5.2.1 - Исходные данные для оценки степени повреждения леса пожаром

Период	Дата съемки	Сенсор
до пожара	26 августа 1998	Landsat 5 TM
после пожара	9 июля 2001	Landsat 7 ETM
	18 июля 2001	
	25 июля 2001	
	10 августа 2001	

Оценка степени повреждения леса пожаром проводилась на основе шкалы dNBR [13] (рис. 5.2.2), так как существует хорошая корреляция параметра dNBR с наземными данными (индекс СВИ) для таёжного леса [4]. Всего было выделено 5 степеней повреждения леса вследствие пожара – негорелый лес (dNBR < 0.1), слабая (0.1-0.27), средняя (0.27-0.44), повышенная (0.44-0.66) и высокая (>0.66), от общей площади гари они занимают 8%, 24%, 31%, 29%, 8% соответственно.

*Примечание:* Важно отметить, что NBR после пожара необходимо брать по снимку того года, в который этот пожар произошел в связи с тем, что NBR быстро восстанавливается в течение года после пожара [14].

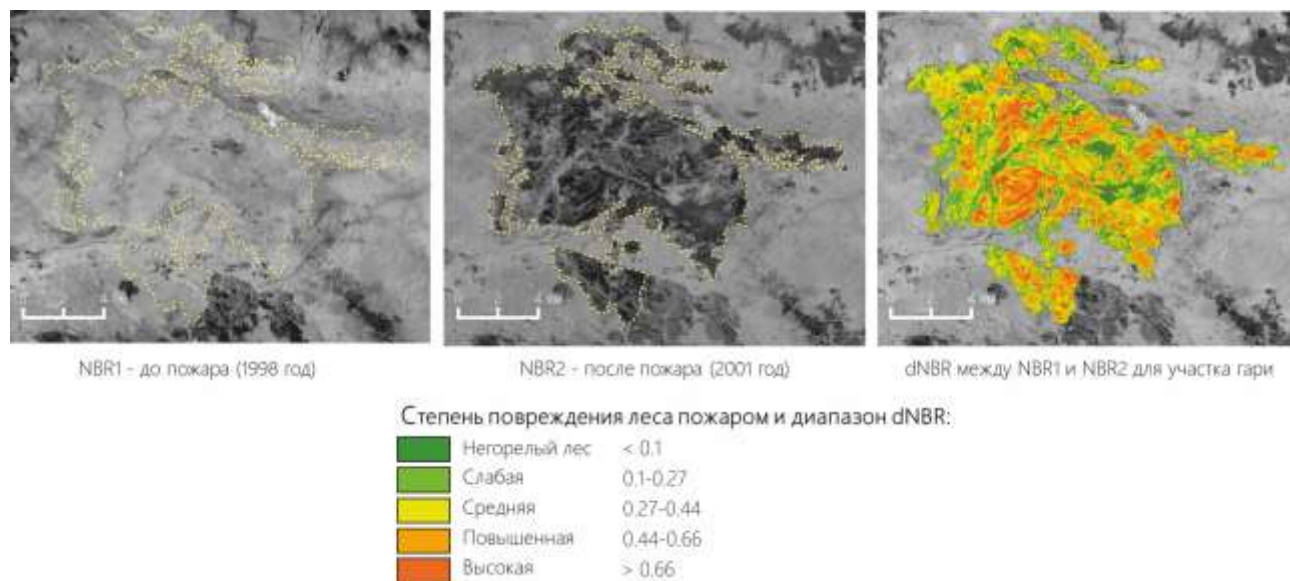


Рисунок 5.2.2. Оконтуривание гари и степень повреждения леса по dNBR (Алтайский заповедник)

Для определения темпов регенерации растительности и времени для полного её восстановления в зависимости от степени повреждения использовались индексы NDVI и RI. Нормализованный вегетационный индекс (NDVI) – наиболее распространенный вегетационный индекс для оценки восстановления растительности после пожара. [2, 3]. С этой же целью он используется в работе. Исходными данными послужило 17 разновременных снимков Landsat 2-го уровня обработки с вычисленным NDVI [12] за середину лета (для устранения влияния фенологии) с 2000 по 2017 годы (табл.5.2.2).

С помощью инструмента «Построить сетку» в ПО ArcGIS была создана регулярная сеть точек в пределах участка исследования (интервал между точками – 500 м, общее количество точек 1110). В точках были извлечены значения NDVI и dNBR с помощью инструмента «Извлечь мультисзначения в точке». Из таблицы атрибутов были удалены значения, соответствующие облакам на основе визуального осмотра снимков. Для каждой степени повреждения леса пожаром были посчитаны средние значения NDVI, при этом значениям dNBR < 0.1 соответствует здоровая растительность. Результаты расчётов

представлены в таблице 5.2.3. На их основе был рассчитан регенерационный индекс (RI) = NDVI(пожара)/NDVI(здоровой растительности). Этот индекс позволяет частично устранить внешние влияния на значения NDVI [3]. Поведение регенерационного индекса со временем после пожара можно представить в виде логарифмического уравнения:  $RI=a+b*\ln(t)$ , где a и b – коэффициенты, t – количество дней, прошедших после пожара [3]. Для каждой степени повреждения в ПО Excel было рассчитано своё логарифмическое уравнение (рис. 5.2.3). На основе него можно вычислить, когда растительность полностью восстановится (RI=1). Так, для участков со слабой степенью повреждения леса вследствие пожара необходим 31 год для восстановления, средней – 37 лет, повышенной – 44 года, высокой– 49 лет (рис.5.2.4). Это свидетельствует о том, что существует прямая связь между степенью повреждения леса пожаром по dNBR и временем восстановления растительности.

Таблица 5.2.2- Исходные снимки с посчитанным NDVI

Дата	Сенсор
22 июля 2000 г.	7 ETM+
9 июля 2001 г.	7 ETM+
28 июля 2002 г.	7 ETM+
23 июля 2006 г.	7 ETM+
28 июля 2008 г.	7 ETM+
15 июля 2009 г.	7 ETM+
26 июля 2010 г.	5 TM
23 июля 2012 г.	7 ETM+
18 июля 2013 г.	8 OLI
21 июля 2014 г.	8 OLI
1 августа 2015 г.	7 ETM+
26 июля 2016 г.	8 OLI

Таблица 5.2.3- Средние значения NDVI для различных dNBR

dNBR	годы и NDVI											
	2000	2001	2002	2006	2008	2009	2010	2012	2013	2014	2015	2016

менее 0.1	0,74	0,73	0,75	0,77	0,75	0,73	0,72	0,74	0,77	0,77	0,76	0,78
0.1-0.27	0,81	0,49	0,67	0,71	0,70	0,73	0,74	0,73	0,73	0,75	0,74	0,74
0.27-0.44	0,79	0,43	0,62	0,68	0,68	0,70	0,72	0,73	0,71	0,74	0,72	0,73
0.44-0.66	0,79	0,36	0,53	0,64	0,64	0,67	0,71	0,68	0,68	0,70	0,69	0,69
более 0.66	0,79	0,27	0,46	0,61	0,61	0,64	0,69	0,67	0,64	0,69	0,66	0,68

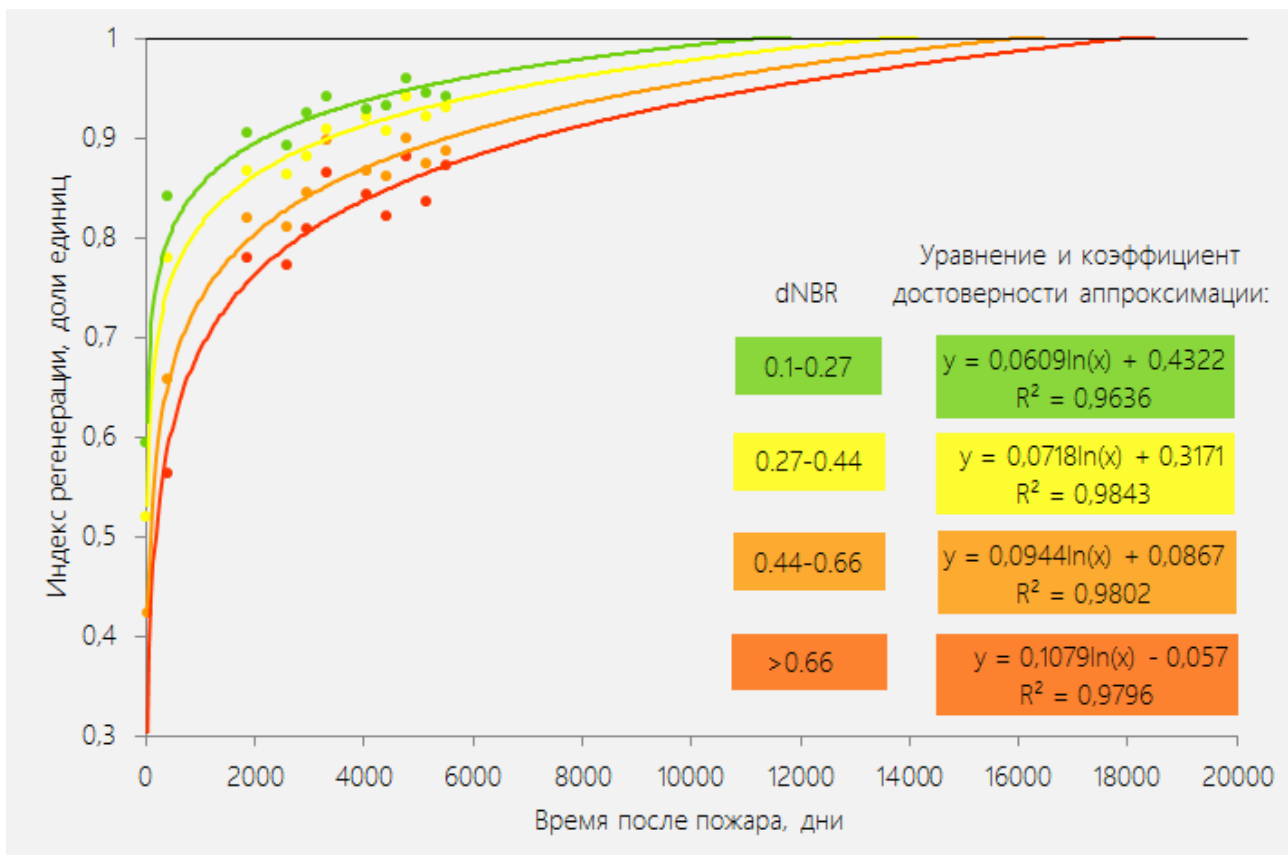


Рисунок 5.2.3 График естественной регенерации растительности со временем и её прогноз для различных диапазонов dNBR

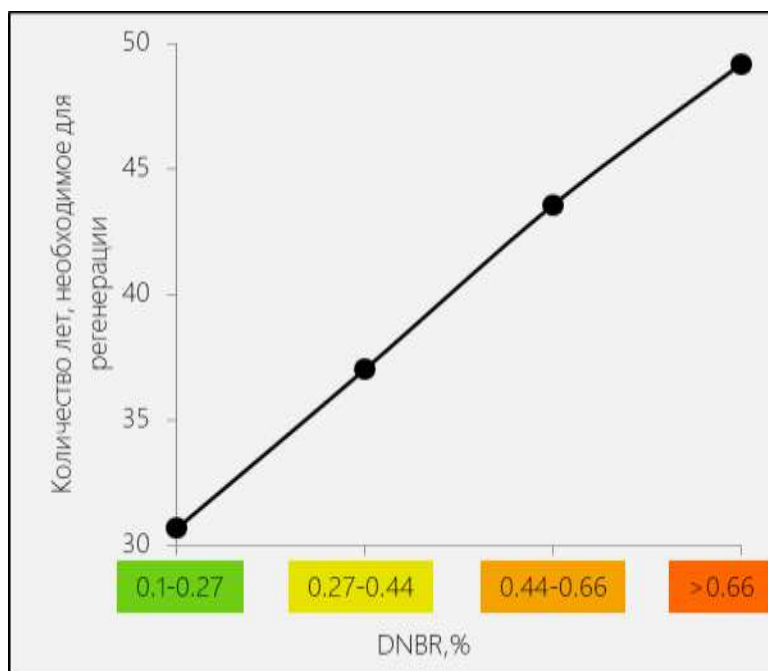


Рисунок 5.2.4 Зависимость времени восстановления леса от dNBR

Представленная методика также была использована для гари в Иберийских горах.

Пожар произошел в 2006 году. Для оконтуривания гари использовались снимки Ландсат 2-го уровня обработки с вычисленным нормализованным индексом гарей NBR (табл. 5.2.4). Успешно были подобраны безоблачные снимки. Технологическая схема использовалась прежняя. С помощью «Калькулятора раstra» в ПО АркГИС был рассчитан dNBR. После оконтуривания гари подсчитывалась ее площадь, которая составила 117 км<sup>2</sup>. Значения dNBR ниже 0.1 не вошли в общую площадь сгоревшего участка, так как гарью не являются.

Таблица 5.2.4- Исходные данные для оценки степени повреждения леса пожаром

Период	Дата съемки	Сенсор
до пожара	18 июня 2005	Landsat 5 TM
после пожара	9 июля 2006	Landsat 5 TM

Далее, значения пикселей были поделены на 5 классов и окрашены в соответствии со шкалой (рис. 5.2.4). Диапазоны и цвет шкалы взяты из литературных источников (ссылка ).



После проведения этой процедуры имеется возможность узнать степень повреждения леса и какой процент от общей площади гари занимает та или иная степень повреждения (6%, 7%, 28%, 40% и 21% соответственно)

Для того, чтобы проследить динамику восстановления леса необходим индекс NDVI. Используя снимки приведены в Таблице 5.2.5. С помощью инструмента «Построить сетку» с шагом в 500 метров была создана регулярная сеть точек в пределах исследуемой территории (общее число точек 1140). Были одновременно извлечены значения dNBR и NDVI благодаря инструменту «Извлечь мультисзначения в точке». Далее, вся обработка полученных значений проводилась в ПО Эксель. В первую очередь, рассчитывались средние значения NDVI в пределах каждого класса dNBR. Результаты представлены в Таблице 5.2.6. Они же и используются при расчете регенерационного индекса. После расчета логарифмических уравнений получаем время, необходимое для восстановления участка гари до состояния, которое было непосредственно до пожара (в нашем случае, на 2005 год). Так, для слабоповрежденной растительности время восстановления составит 13 лет, для сильно поврежденной 28 лет (рис. 5.2.5)

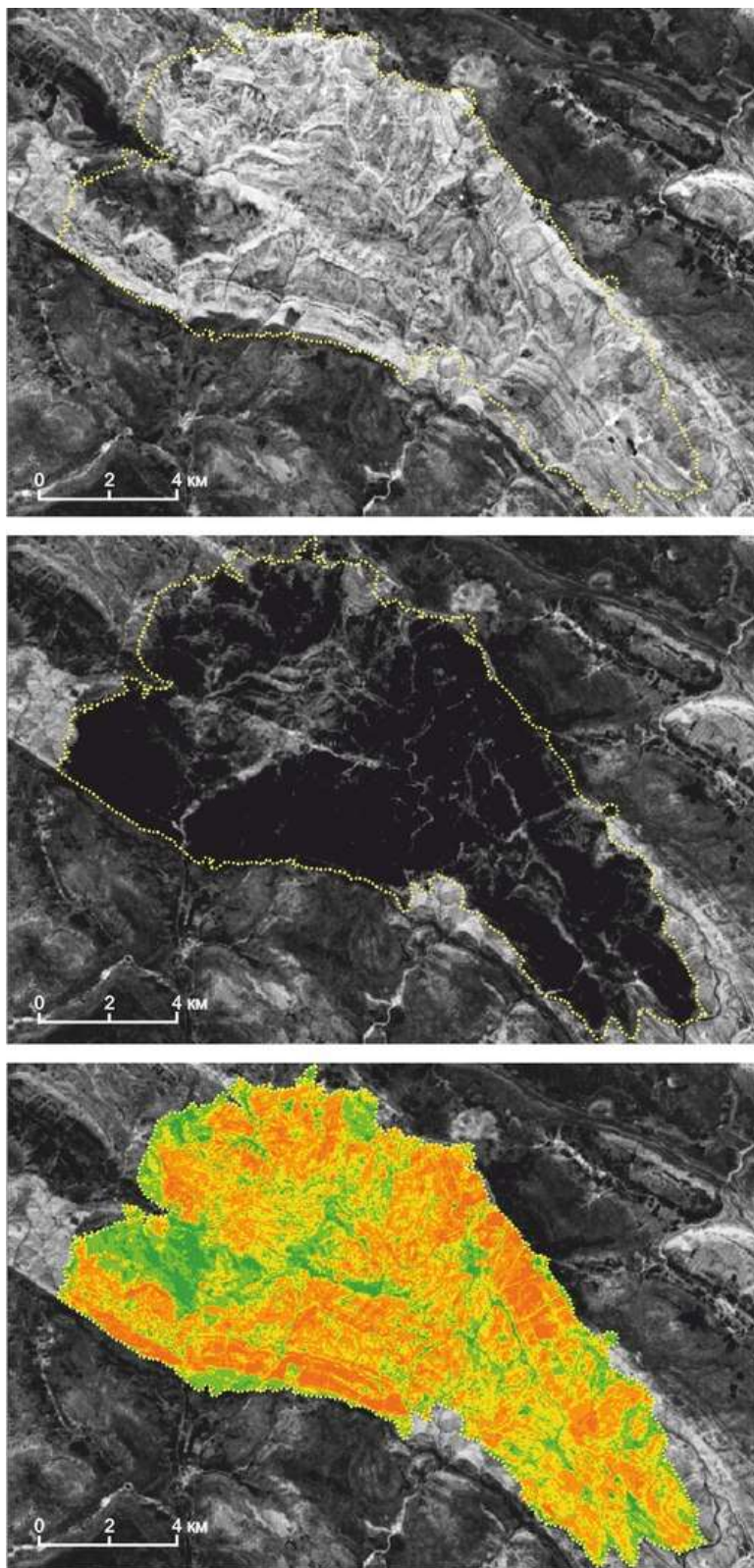


Рисунок 5.2.4 Оконтуривание гари и степень повреждения леса по dNBR (Иберийские горы)

Таблица 5.2.5- Исходные снимки с посчитанным NDVI

Дата	Сенсор
18 июня 2005 г.	5 TM
9 июля 2006 г.	5 TM
26 июля 2007 г.	5 TM
28 июля 2008 г.	5 TM
15 июля 2009 г.	5 TM
26 июля 2010 г.	7 ETM+
19 июня 2011 г.	5 TM
31 июля 2012 г.	7 ETM+
26 июля 2013 г.	8 OLI
21 июля 2014 г.	7 ETM+
30 июня 2015 г.	8 OLI
18 июля 2016 г.	8 OLI
5 июля 2017 г.	8 OLI

Таблица 5.2.6- Средние значения NDVI для различных dNBR

dNBR	годы и NDVI									
	2005	2006	2007	2008	2010	2013	2014	2015	2016	2017
менее 0.1	0,57	0,53	0,54	0,58	0,60	0,63	0,58	0,62	0,65	0,64
0.1 – 0.27	0,56	0,44	0,43	0,50	0,55	0,57	0,52	0,55	0,60	0,58
0.27 – 0.44	0,58	0,36	0,40	0,49	0,52	0,56	0,52	0,53	0,58	0,57
0.44 – 0.66	0,58	0,26	0,33	0,41	0,45	0,52	0,47	0,50	0,54	0,52
более 0.66	0,59	0,22	0,31	0,39	0,43	0,52	0,48	0,50	0,54	0,51

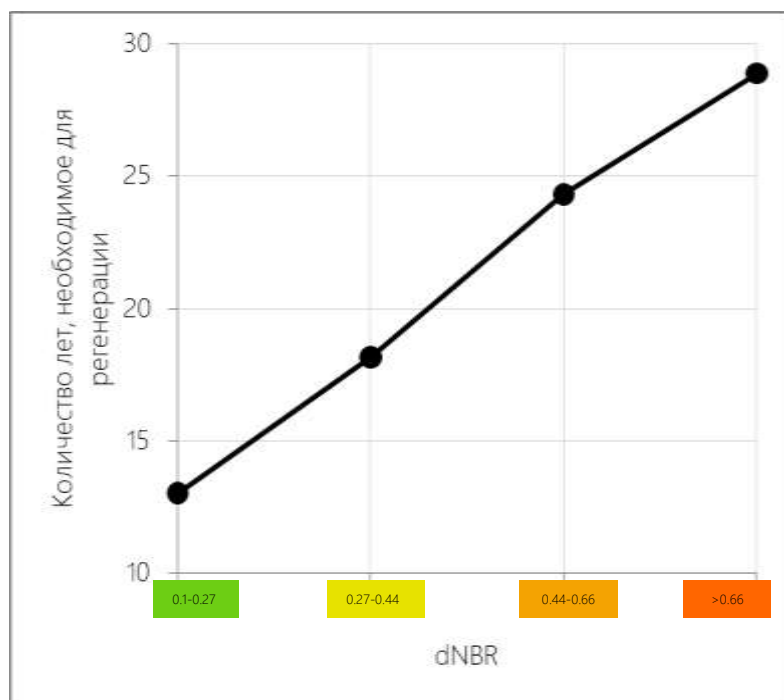


Рисунок 5.2.5 Зависимость времени восстановления леса от dNBR

### 5.3 Результаты исследования

Проведенное исследование на примере Алтайского заповедника позволило сделать ряд выводов:

1. Пожар произошел в 2001 году, его площадь составила 107 км<sup>2</sup>;
2. Преобладающие степени повреждения пожаром на участке гари – слабая (24%), средняя (31%) и повышенная (29%);
3. время восстановления леса после пожара колеблется от 31 до 49 лет;

Для выявленной гари в Иберийских горах:

1. Пожар произошел в 2006 году, его площадь составила 117 км<sup>2</sup>;
2. Преобладающие степени повреждения пожаром на участке гари – средняя (28%), повышенная (40%) и высокая (21%);
3. Время восстановления леса после пожара колеблется от 13 до 28 лет.

В обоих случаях существует прямая связь между степенью повреждения леса пожаром по dNBR и временем полной естественной регенерации растительности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены теоретические основы методов дистанционного зондирования Земли, их применение при мониторинге лесных экосистем, роль ГИС для решения целей мониторинга лесов. В качестве самостоятельного исследования была разработана методика проведения мониторинга состояния леса как в результате пожара (оценка степени повреждения леса), так и после него (время восстановления растительности на участке, где прошел пожар). Методика прошла апробацию на 2 участках гари, расположенных удаленно друг от друга (Алтайский заповедник в России и Иберийские горы в Испании). На основе проделанной работы можно сделать несколько выводов:

1. выделенные в результате апробации методики пожары прошли в 2001 (Алтайский заповедник) и 2006 (Иберийские горы) годы. Их площади составили 107 и 117 км<sup>2</sup> соответственно;

2. в Алтайском заповеднике пожар был слабее по степени повреждения, чем в Иберийских горах;

3. растительность после пожара в Алтайском заповеднике в целом медленнее восстанавливается (31-49 лет), чем в Иберийских горах (13-28 лет). Это может быть связано с высотой местности (1800-1950 и 1200-1400 м соответственно), так и количеством солнечных дней, которых больше на меньших широтах (51° с.ш. по сравнению с 41° с.ш. соответственно);

4. существует прямая связь между степенью повреждения леса пожаром по dNBR и временем полной естественной регенерации растительности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://cone.gollnerfire.com/remote-sensing/>
2. <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/FalseColor/>
3. <https://gis.stackexchange.com/questions/276871/conversion-of-spectral-indices-formulas-from-landsat-to-sentinel>
4. <https://eros.usgs.gov>
5. <http://www.myshared.ru/slide/768520/>
6. D. Nagesh Kumar, Bangalore, 2016. Remote Sensing Systems. Module – 2 lecture notes – 2 and 3. Spatial and spectral resolutions
7. <http://slideplayer.com/slide/9206947/>
8. Yichun Xie, Zongyao Sha, Mei Yu, 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. Journal of Plant Ecology, Volume 1, Issue 1, 1 March 2008, Pages 9–23, <https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005>
9. Hall FG, Strebel DE, Nickeson JE, SJ Goetz. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images, Remote Sens Environ , 1991, vol. 35 (pg. 11-27)
10. <https://www.utsa.edu/LRSG/Teaching/EES5083/L4-Radiom.pdf>
11. Schroeder TA, Canty MJ, Yang Z, et al. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon, Remote Sens Environ , 2006, vol. 103 (pg. 16-26)
12. Chen X, Vierling L, Deering D. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time, Remote Sens Environ, 2005, vol. 98 (pg. 63-79)
13. А.Н. Шихов, 2014. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по многолетним рядам данных космической съемки. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 11. № 1. С. 21-29
14. А.С. Черепанов, 2011. Вегетационные индексы. Геоматика, № 2 (2011), стр. 98-102.
15. <https://www.peauproductions.com/pages/calibrating-dji-camera-ndvi-red-nir-images>
16. <http://www.microimages.com>

17. Б. Бардиш, Х. Бурштинська, 2014. ВИКОРИСТАННЯ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, випуск II(28)
18. Лурье, 2008. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2008 – 424 стр.
19. Jean E. McKendry and J Ronald Eastman, 2014. Applications of GIS in Forestry: A Review
20. Воробьева Алиса Андреевна, 2012. Дистанционное зондирование земли. Учебно-методическое пособие.
21. <https://www.vedu.ru/bigencdic/22871/>
22. <http://karatu.ru/gory-ispanii-geologiya-i-tektonika-gidrografiya-karakteristika-otdelnyx-gorn-ux-massivov/>
23. Michael A. Wulder, Jeffrey G. Masek , Warren B. Cohen, Thomas R. Loveland, Curtis E. Woodcock, 2012. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. Remote Sensing of Environment vol. 122: pp. 2–10. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.010. [Online]. Available: <http://www.cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/33282.pdf>
24. Ricardo Díaz-Delgado, Raimon Salvador and Xavier Pons, 1998. Monitoring of plant community regeneration after fire by remote sensing. Fire Management and Landscape Ecology, Publisher: International Association of Wildland Fire, pp. 315-324. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/263168534\\_Monitoring\\_of\\_plant\\_community\\_regeneration\\_after\\_fire\\_by\\_remote\\_sensing](https://www.researchgate.net/publication/263168534_Monitoring_of_plant_community_regeneration_after_fire_by_remote_sensing)
25. D. Rian˜o, E. Chuvieco, S. Ustin, R. Zomer, P. Dennison, D. Roberts, J. Salas, 2002. Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains. Remote Sensing of Environment vol. 79, pp. 60 – 71. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00239-5
26. Jennifer L. Allen and Brian Sorbel, 2008. Assessing the differenced Normalized Burn Ratio's ability to map burn severity in the boreal forest and tundra ecosystems of Alaska's national parks. International Journal of Wildland Fire, vol. 17, pp. 463–475. DOI:10.1071/WF08034. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/228917606\\_Assessing\\_the\\_differenced\\_Normalize](https://www.researchgate.net/publication/228917606_Assessing_the_differenced_Normalize)

- d\_Burn\_Ratio%27s\_ability\_to\_map\_burn\_severity\_in\_the\_boreal\_forest\_and\_tundra\_ecosystems\_of\_Alaska%27s\_national\_parks
27. Х.Б. Куулар, 2013. Оценка гарей Уюкского хребта на основе данных Landsat. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 239–244. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/sb2013t4/239-244.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t4/239-244.pdf)
  28. Key, C. H., Benson, N. C. 1999. Measuring and remote sensing of burn severity: the CBI and NBR. Poster abstract. In L. F. Neuenschwander and K. C. Ryan (Eds.), Proceedings Joint Fire Science Conference and Workshop, Vol. II, Boise, ID, 15–17 June 1999. University of Idaho and International Association of Wildland Fire. – p. 284 [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/241687936\\_Measuring\\_and\\_remote\\_sensing\\_of\\_burn\\_severity\\_the\\_CBI\\_and\\_NBR](https://www.researchgate.net/publication/241687936_Measuring_and_remote_sensing_of_burn_severity_the_CBI_and_NBR)
  29. M. O. Andreae, P. Merlet, 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. Global Biogeochemical Cycles, vol. 15, №4, pp. 955–966. DOI: 10.1029/2000GB001382. [Online]. Available: [http://amicuscuria.com/wordpress/wp-content/uploads/2010/10/Emissions\\_Trace\\_Gas\\_from\\_Biomass\\_Burning1.pdf](http://amicuscuria.com/wordpress/wp-content/uploads/2010/10/Emissions_Trace_Gas_from_Biomass_Burning1.pdf)
  30. Официальный сайт Алтайского заповедника. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.altzapovednik.ru>
  31. Особо охраняемые природные территории Российской Федерации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zapoved.ru/catalog/1>
  32. Earth observing system [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://eos.com/landviewer/>
  33. United States Geological Survey [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://earthexplorer.usgs.gov>
  34. Earth Resources Observations and Science Center [Электронный ресурс] – Режим доступа <https://ers.cr.usgs.gov>
  35. Carl H. Key, Nathan C. Benson, 2004. Assessment (LA). Sampling and Analysis Methods. p. 38. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_gtr164/rmrs\\_gtr164\\_13\\_land\\_assess.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr164/rmrs_gtr164_13_land_assess.pdf)



36. S. Veraverbeke, S. Lhermitte, W.W. Verstraeten, R. Goossens, 2010. The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: The case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece. *Remote Sensing of Environment* vol. 114, pp. 2548–2563. DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.029. [Электронный ресурс] – Режим доступа:  
[http://www.earthmapps.io/pubs/2010\\_Veraverbeke\\_RSE\\_The%20temporal%20dimension%20of%20differenced.pdf](http://www.earthmapps.io/pubs/2010_Veraverbeke_RSE_The%20temporal%20dimension%20of%20differenced.pdf)