



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра «ФИЗИКИ»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: **«Использование коэффициента спектральной яркости(КСЯ) и спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) при дистанционном мониторинге объектов »**

Исполнитель студент группы Ф-Б17-1 _____

Пяткина Ирина Витальевна

Руководитель **Ведущий научный сотрудник НИЦЭБ РАН,**
д-р ф.-м.н., профессор Биненко Виктор Иванович

**«К защите
допускаю»**

**Заведующий
кафедрой**

к.ф.-м.н., доцент

Бобровский Анатолий Петрович

«10» июня 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

Оглавление:

Введение.....	5
1. Глава 1.....	8
1.1. Дистанционное зондирование земли (ДЗЗ).....	8
1.2. Активные источники.....	9
1.3. Пассивные источники.....	10
1.4. Электромагнитное излучение.....	12
1.5. Взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой.....	16
1.6. Основные характеристики спутников.....	19
1.7. Спутники.....	18
1.7.1. Спутники программы Landsat.....	20
1.7.2. Спутник SPOT.....	21
1.7.3. Спутник Ресурс-01.....	22
1.7.4. Спутник Электро-Л.....	22
2. Глава 2.....	25
2.1. Коэффициент спектральной яркости (КСЯ).....	25
2.2. Моделирование коэффициента спектральной яркости.....	27
2.3. Спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ).....	31
2.4. Отражательная способность	31
2.5. Вегетационные индексы.....	33
2.6. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).....	35
2.7. Приборы, работающие на КСЯ И СПЭЯ.....	40
2.7.1. Прибор MSS (спутник Landsat).....	40
2.7.2. Прибор HRV (спутник SPOT).....	43
2.7.3. Прибор МСУ-Э (Спутник Ресурс-01).....	46
2.7.4. Микроволновые радиометры SMMR и SSM/I.....	46
2.7.5. Аппаратура МСУ-ГС.....	48
3. Глава 3.....	51

3.1. Методы и алгоритмы тематической обработки данных космического дистанционного зондирования.....	51
3.2. Основные принципы построения систем дешифрирования ДДЗ.....	54
3.3. Программное обеспечение, используемое для автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования.....	55
3.4. Материалы и методы исследования.....	56
3.5. Результаты обработки.....	49
Заключение.....	62
Список используемых источников.....	65

Определения, обозначения и сокращения.

В настоящей пояснительной записке применяют следующие термины с соответствующими определениями:

ВИ - Вегетационный индекс

ДЗ - Дистанционное зондирование.

ДЗЗ - Дистанционное зондирование земли.

ДФСО – двухлучевая функция спектрального отражения

ИК – инфракрасный диапазон

ИСЗ - искусственные спутники земли

КСЯ - коэффициент спектральной яркости.

МСУ-ГС – многозональное сканирующее устройство
гидрометеорологического обеспечения

СПЭЯ - спектральной плотности энергетической яркости.

BRF - Bidirectional Reflectance Factor

DHR - Directional-Hemispherical Reflectance

ENVI - Environment for Visualizing Images

HDRF- Hemispherical-directional Reflectance Factor

HRV - High Resolution Visible

MSS - Multispectral Scanner System

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

Введение.

Изучение спектральных отражательных свойств ландшафта считается одним из ведущих составляющих в исследовании природной среды аэрокосмическими методами. Невозможно проектировать съемочные системы, а тем более прогнозировать результаты дистанционного зондирования земли без знания спектральных характеристик природных образований в области отражения, пропускания и поглощения падающего на них солнечного излучения.

Научные исследования в спектральных характеристик природных объектов были начаты в 30-х годах прошлого века. Первая и наиболее полная классификация объектов ландшафта по спектральным отражательным характеристикам в «фотографическом», видимом диапазоне длин волн 0,40 – 0,85 мкм была разработана в лаборатории аэрометодов под руководством Е.Л.Кринова только в 1947 году.

Эта спектрофотометрическая классификация природных образований широко применяется до сих пор. В настоящее время в литературе не имеется более поздних обобщенных данных спектральных коэффициентов яркости по всем видам природных образований, как это сделано Е.Л.Криновым. [13]

До последнего времени в дистанционном зондировании базовой основой исследования закономерностей конфигурации оптических данных объектов считается коэффициент спектральной яркости (КСЯ). Это отношение спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) объекта и образца. При применении для этих задач точечных (профильных) спектрорадиометров это обосновывалось важным взаимодействием на итоги критериев выполнения аэрокосмической или же полевой съёмки, некорректностью сравнения при этом СПЭЯ объектов. КСЯ в значимой мере избавляет эти влияния, но и вносит при вычислениях искажения характера начальных

(измеренных) данных СПЭЯ. К этому не проявлялся интерес до появления в последние десятилетия видеоспектрометров – устройств, позволяющих получать спектральную информацию по площади аэрокосмической или полевой съёмки практически одновременно. Это, в свою очередь, позволяет объективно в одинаковых условиях проводить сравнение оптических характеристик в пределах площади съёмки. При этом встаёт вопрос о «потерях и искажениях» спектральной информации при вычислениях КСЯ.

Целью данной работы является исследовать использование коэффициента спектральной яркости и спектральной плотности энергетической яркости при дистанционном мониторинге объектов.

Основными задачами работы являются рассмотрение сущности и задач мониторинга, изучение приборов работающих на КСЯ И СПЭЯ, анализ снимков, полученных с помощью данных приборов.

В первой главе дано определение дистанционному зондированию земли и кратко описаны его методы. В этом разделе мы сначала обсудим некоторые важные характеристики спутников, а так же приведем примеры таких спутников как Landsat, SPOT, Ресурс-01. Спутники имеют несколько уникальных характеристик, которые делают их особенно полезными для дистанционного зондирования поверхности Земли.

Во второй главе даны определения коэффициенту спектральной яркости (КСЯ) и спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ). Рассказано о моделировании коэффициента спектральной яркости (КСЯ). Так же обсудим отражательную способность и вегетационные индексы, а затем рассмотрим различные спутниковые приборы.

В третьей главе разберем методы и алгоритмы обработки данных космического дистанционного зондирования, основные принципы построения

систем дешифрирования ДЗЗ, приведем примеры изображений полученных с помощью приборов HRV, МСУ-Э.

Глава 1.

1.1. Дистанционное зондирование земли (ДЗЗ)

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) представляет собой процесс, посредством которого собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. К дистанционному зондированию относят все виды неконтактных съемок, которые проводятся с различных измерительных платформ: летательных воздушных и космических аппаратов (самолетов, вертолетов, космических кораблей, спутников и т.д.), судов и подводных лодок, наземных станций. При этом снимок определяется как двумерное метрическое изображение конкретных объектов, получаемое целенаправленно в результате дистанционной регистрации и (или) измерения собственного или отраженного излучения, и представляет собой наиболее целесообразную форму измерения, регистрации и визуализации излучения, несущего географическую информацию об исследуемых объектах[3].

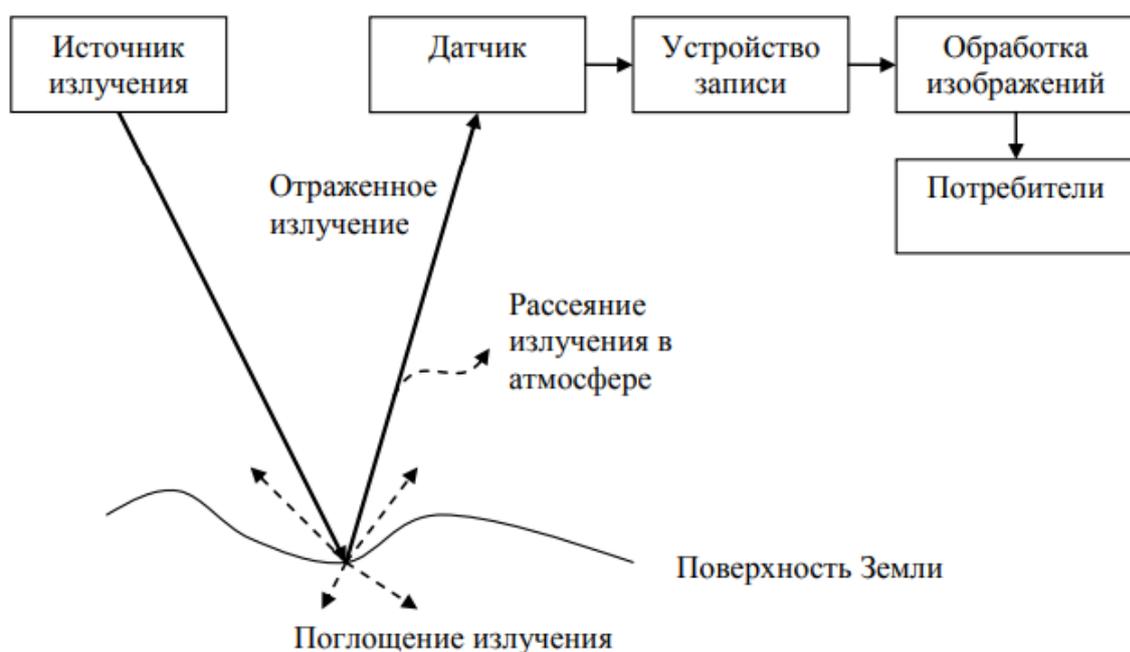


Рисунок 1.1. Схема дистанционного зондирования

Таким образом, дистанционное зондирование Земли – способ получения информации об объекте либо явлении путем анализа данных, собранных без контакта с изучаемым объектом. Огромный вклад имеют:

-развитие космической техники и технологий, используемые для 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.

Поэтому при помощи средств дистанционного зондирования решаются совершенно новые такие задачи как создание геоинформационных технологий, алгоритмов и программ, предназначенных для дешифрирования снимков и другие.

ДЗЗ методы можно разделить на:

- Активные
- Пассивные

1.2. Активные источники

Активный метод ДЗЗ - спутник отправляет на Землю сигнал собственного источника энергии.

Активная система ДЗ может быть моно-статической, когда передатчик и приемник средства ДЗ размещаются на одной позиции, бистатической, или даже мульти-статической, когда система состоит из одного или нескольких передатчиков и нескольких приемников, расположенных в разных позициях.

Классификация не будет достаточно полной, если не указать основные технические средства ДЗ: радиолокаторы, радиометры, лидеры и другие устройства или системы, используемые в качестве датчиков ДЗ.

1.3. Пассивный метод ДЗЗ.

При дистанционном зондировании чаще используют пассивные методы, которые основаны на регистрации отраженной от поверхности объектов солнечной энергии или на регистрации собственного электромагнитного излучения участков поверхности.

Отраженное излучение несет информацию о свойствах участка подстилающей поверхности, на котором произошло отражение. Это излучение собирается приемной системой спутника, трансформируется в электрический сигнал и передается на Землю для дальнейшей обработки. Отраженный сигнал на пути к приемной системе спутника поглощается и рассеивается атмосферой, а рассеянное излучение собирается приемной системой вместе с отраженным излучением. Такова очень упрощенная схема пассивного дистанционного зондирования

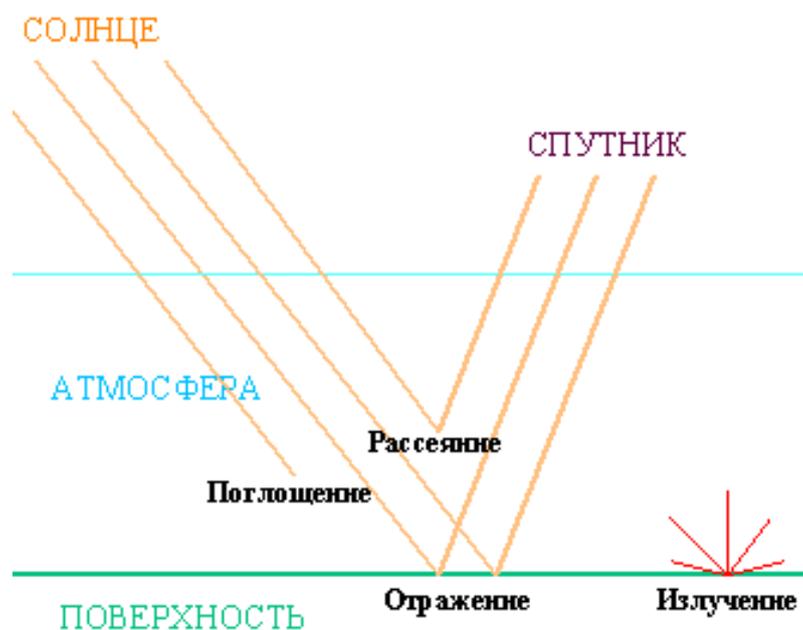


Рисунок 1.2 Трансформации электромагнитного излучения в дистанционном зондировании.

На самом деле происходящие процессы гораздо сложнее. Во-первых, солнечное излучение рассеивается и поглощается атмосферой как на пути к земной поверхности, так и после взаимодействия с интересующим нас объектом земной поверхности на пути, который проходит излучение от объекта до приемного устройства спутника. Во-вторых, рассеянное в атмосфере излучение (не взаимодействовавшее с интересующим нас объектом) также собирается приемной системой в случае, когда излучение рассеяно атмосферой в направлении визирования спутника. Вследствие чего, мы получаем помехи двух типов - ослабление (поглощение + рассеяние) в атмосфере излучения, взаимодействовавшего с объектом, и прием излучения, с нашим объектом не взаимодействовавшего.

Так же следует уточнить, что представленные проблемы полностью относятся только к дистанционному зондированию в видимой области спектра. Вклад рассеяния в искажение излучения в инфракрасной области спектра несущественный, главную роль играет поглощение. К тому же, источником излучения в инфракрасной области спектра является земная

поверхность, и излучение искажается лишь на пути следования от поверхности до приемного устройства спутника. В связи с этим, прежде чем рассматривать возможности некоторых приборов, следует, хотя бы вкратце, познакомиться с особенностями взаимодействия электромагнитного излучения с атмосферой и с подстилающей поверхностью в различных диапазонах спектра.

1.4. Электромагнитное излучение

Электромагнитное излучение проявляется и как свет, который мы видим, и как тепло, которое мы ощущаем, и как радиоволны, которые принимают наши радио- и телевизионные приемники. Электромагнитное излучение характеризуется двумя взаимосвязанными величинами - длиной волны (λ) и частотой (ν). Связь между этими величинами определяется формулой:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

Где c - скорость света в вакууме ($c=3 \times 10^8$ м/с). Если известна одна из этих величин, то вторая может быть с легкостью рассчитана. Чем короче длина волны, тем больше частота и наоборот, чем меньше частота, тем больше длина волны. Длины волн в диапазоне, используемом для дистанционного зондирования, обычно измеряются в нанометрах (нм, 10^{-9} м), в микрометрах (мкм, 10^{-6} м) или в сантиметрах (см, 10^{-2} м). Частота измеряется в герцах (Гц). Обычно, сравнительно короткие длины волн (меньше сантиметра) характеризуют длиной волны, а более длинные - частотой.

Электромагнитное излучение всех возможных длин волн принято называть электромагнитным спектром.

В этом спектре выделяются следующие диапазоны (рисунок.1.3): гамма-диапазон, рентгеновский, ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный, радио-диапазон.

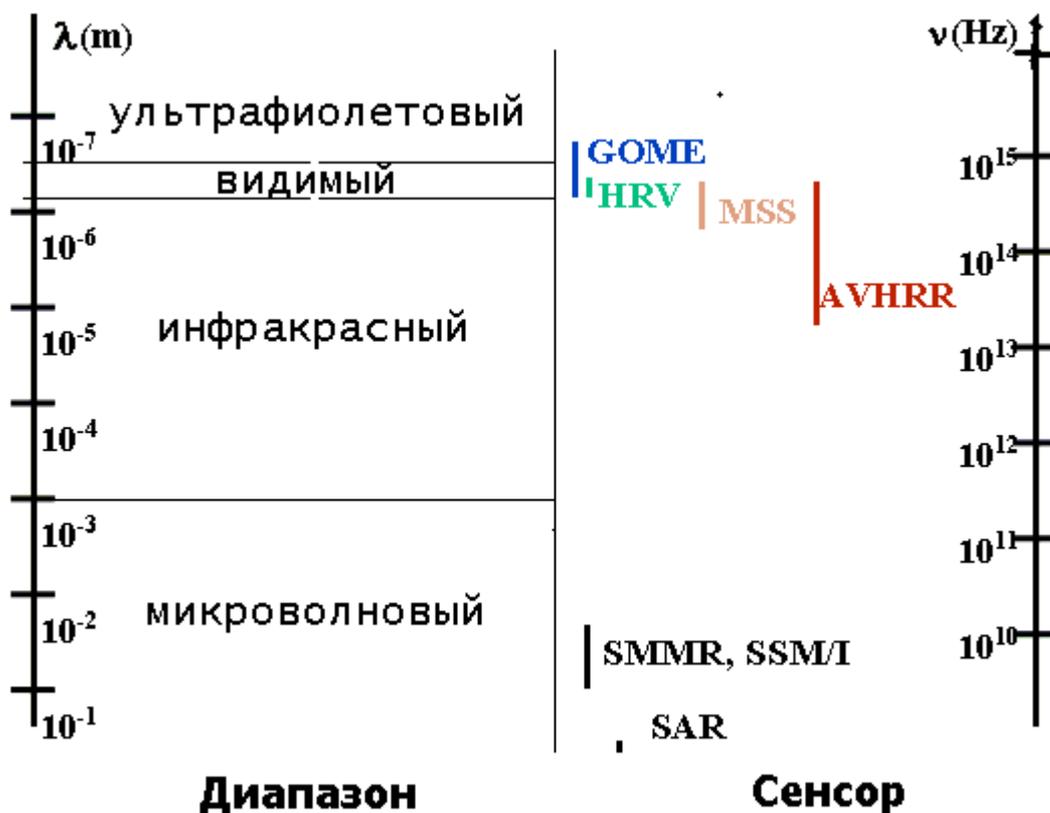


Рисунок.1.3. Спектральные диапазоны некоторых спутниковых сенсоров

Приборы дистанционного зондирования (сенсоры) могут принимать излучение в гораздо более широком диапазоне электромагнитного спектра (рисунок 1.3) и, таким образом, предоставлять огромное количество информации о состоянии окружающей среды. Основная проблема в этом отношении - создание таких алгоритмов обработки спутниковых данных, которые позволили бы извлекать содержащуюся в них информацию из данных.

При пассивном дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) из космоса используется участок электромагнитного спектра в диапазоне длин волн от

0,25 мкм до 1 м (рисунок 1.4). Этот широкий участок спектра принято подразделять на ряд диапазонов:

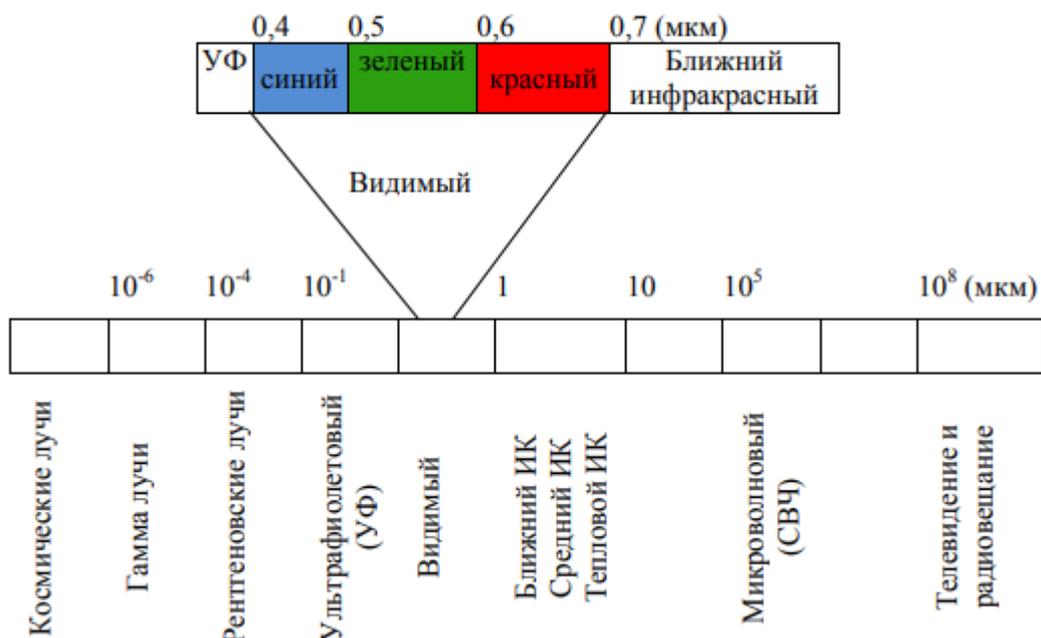


Рисунок 1.4. Диапазон спектров

Таблица 1 . Границы диапазонов спектров.

Ультрафиолетовый диапазон	0,25-0,4 мкм
Видимый диапазон	0,4-0,7 мкм
Ближний инфракрасный	0,7-1,3 мкм
Средний инфракрасный	1,3-3,0 мкм
Дальний инфракрасный	3,0-1000 мкм
Микроволновый диапазон	1000 мкм- 1 м

Рассмотрим кратко особенности этих диапазонов.

Ультрафиолетовая часть спектра включает наиболее короткие длины волн, используемые в дистанционном зондировании. Ультрафиолетовое излучение генерируется Солнцем, и оно было бы весьма опасно для живых существ, если бы большая часть его не поглощалась земной атмосферой -

кислородом и озоном. В ультрафиолетовом диапазоне спектра традиционно выделяют 3 поддиапазона (А, В и С): А от 320 нм до 400 нм, В от 295 нм до 320 нм и С короче 295 нм. Большая часть ультрафиолетового излучения из поддиапазона А не поглощается ни кислородом, ни озоном атмосферы и достигает поверхности Земли. Ультрафиолетовое излучение из поддиапазона В поглощается озоном и то, какая его часть достигнет поверхности, зависит от содержания озона в атмосфере. И, наконец, ультрафиолетовое излучение из поддиапазона С поглощается и озоном, и кислородом атмосферы и поверхности Земли достигает очень малая часть излучения из этого поддиапазона. Свет, который может воспринимать наш глаз, принадлежит к видимой части электромагнитного спектра. В этой же части спектра (от 0.4 до 0.7 мкм) Солнце излучает максимальное количество энергии. Наиболее длинные волны из видимой части электромагнитного спектра воспринимаются как красный свет, а наиболее короткие - как фиолетовый свет. То, что мы видим окружающие нас предметы окрашенными в разные цвета, определяется различными коэффициентами поглощения и отражения для квантов различной длины волны.

Следующий спектральный диапазон, представляющий интерес для дистанционного зондирования, называется инфракрасным (ИК) и простирается от 0.7 мкм до 1000 мкм. Инфракрасный диапазон подразделяется на два поддиапазона в зависимости от радиационных свойств излучения каждого поддиапазона. В первом поддиапазоне, который называется ближний ИК (0.7 - 3.0 мкм), инфракрасное излучение представляет собою отраженное от земной поверхности излучение, источником которого является Солнце. В дистанционном зондировании излучение этого диапазона используется так же, как излучение видимого диапазона, оно подвержено тем же искажениям в атмосфере. Во втором поддиапазоне, который называется дальним или тепловым ИК (3.0 - 1000 мкм), источником излучения является поверхность Земли, которая излучает электромагнитное излучение в виде тепла. Если

излучение ближнего ИК диапазона при прохождении через атмосферу участвует как в процессе рассеяния, так и в процессе поглощения, то излучение дальнего ИК диапазона практически подвержено лишь поглощению в атмосфере. Излучение с большими (чем рассмотренные) длинами волн называется микроволновым и занимает диапазон от 0.1 см до 1 м. Излучение этого типа еще меньше рассеивается в атмосфере и оно может даже проникать сквозь сравнительно мощную облачность, туман. Это позволяет исследовать поверхность Земли почти в любую погоду. Как и для теплового ИК излучения источником микроволнового излучения являются различные объекты на поверхности земли и моря, а также атмосфера, это обуславливает возможность принимать сигнал от поверхности Земли, как днем, так и ночью.

1.5. Взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой.

Излучение, регистрируемое приборами дистанционного зондирования должно пройти через атмосферу Земли прежде, чем оно достигнет спутника. Все компоненты атмосферы - атомы, молекулы, частицы и т.п., могут взаимодействовать с электромагнитным излучением, когда оно распространяется в атмосфере. Основные эффекты данного взаимодействия - рассеяние и поглощение. Вероятность рассеяния или поглощения, с одной стороны, зависит от длины волны излучения, а с другой от типа и размера атома, молекулы или другой вовлеченной в процесс взаимодействия частицы.

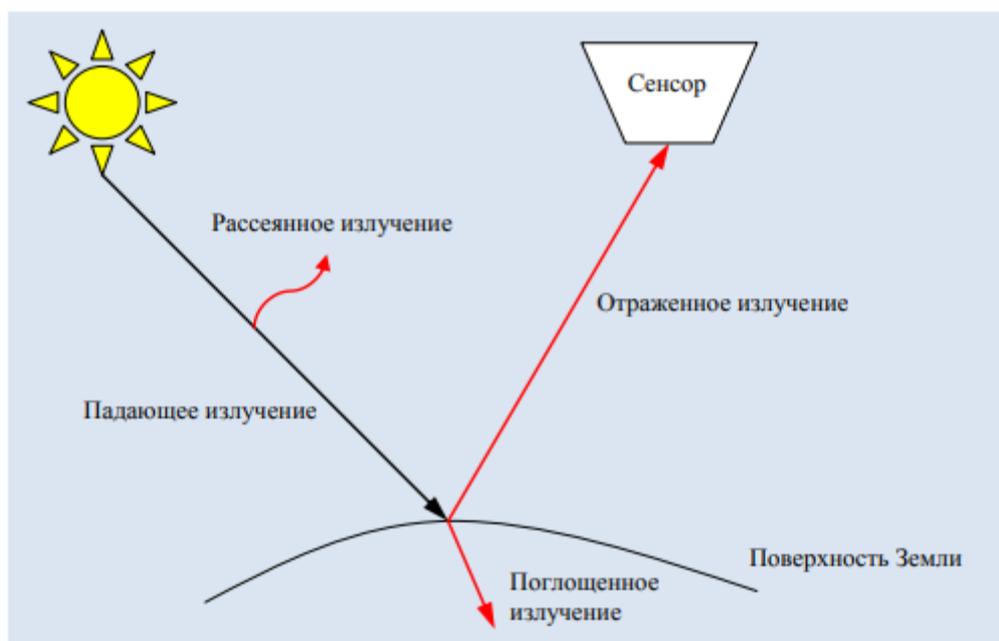


Рисунок 1.5. Взаимодействие излучения с атмосферой.

Рассеяние происходит, когда аэрозольные частицы или газовые молекулы, которые присутствуют в атмосфере, а так же взаимодействуют с распространяющимся излучением и вызывают его отклонение от первоначального пути, но длина волны остается постоянной. Степень рассеяния излучения зависит от нескольких факторов. Основные из них: соотношение между длиной волны излучения и размером частицы, расстояние между рассеивающими частицами, число рассеивающих объектов на пути излучения и длина пути излучения через атмосферу. Мы можем разделить все процессы рассеяния на два различных типа, свойства которых обсуждаются в следующих абзацах.

Рэлеевское рассеяние происходит, когда материальные частицы малы в сравнении с длиной волны излучения. Практически такое рассеяние происходит на молекулярных комплексах и называется также молекулярным. Из формулы Рэля, описывающей этот тип рассеяния, можно получить, что показатель рассеяния света по всем направлениям пропорционален числу

рассеивающих частиц в единице объема (N) и обратно пропорционален 4-ой степени длины волны:

$$K(\lambda) = \frac{\alpha \cdot N}{\lambda^4}, \quad (2)$$

Если принять коэффициент молекулярного рассеяния для красного цвета ($\lambda = 0,7$ мкм) за единицу, то для более коротких длин волн видимого участка спектра получаются следующие соотношения:

Таблица 2 . Показатели рассеивания света

λ	0,62	0,57	0,52	0,47	0,44
K	1,6	2,2	3,3	4,9	6,4
$(\lambda)/K(0,7)$					

Это подразумевает, что в рассеянном излучении на долю более коротких длин волн (фиолетовый, синий и голубой цвета) приходится, по сравнению с более длинными длинами волн, больше энергии, чем в пришедшем от Солнца излучении. Из этого следует что , рассеянный на молекулярных комплексах свет уже не может оставаться белым, а должен иметь сине-голубой цвет.

Аэрозольное рассеяние - это рассеяние на частицах, размер которых сравним с длиной волны падающего излучения. Аэрозольные частицы в атмосфере представлены как в жидкой, так и в твердой форме. Это частицы самых разных веществ: солей, минеральной пыли, капель воды и разных растворов и пр. Процесс рассеяния на аэрозольных частицах описывается теорией Ми. Главное отличие от рассеяния на молекулах состоит в том, что крупные частицы рассеивают в основном в направлении падающего луча. Небольшая часть падающего излучения рассеивается в других направлениях, в частности - для капель воды на углах рассеяния вблизи 140о наблюдается небольшой максимум интенсивности рассеянного света, соответствующий явлению радуги. (Простое объяснение явления радуги в рамках

геометрической оптики с использованием законов преломления и отражения света в капле воды было дано еще Декартом и дополнено Ньютоном.) Расчеты показывают, что когда капля воды становится достаточно большой, рассеяние почти не будет зависеть от длины волны (нейтральное рассеяние). Если такие частицы присутствуют в атмосфере и их много, то цвет неба становится белесым, поскольку свет всех длин волн рассеивается в одинаковой степени. По этой причине облака и туманы имеют белый цвет.

1.6. Основные характеристики спутников.

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

Геостационарные орбиты это круговые орбиты, которые ориентированы в плоскости экватора Земли на высоте 35,800 км. Когда спутник летит на такой высоте, его орбитальный период точно соответствует периоду вращению Земли, поэтому спутник всегда располагается над одной и той же точкой земной поверхности. Это позволяет обеспечить регулярные наблюдения выбранной территории в любое время суток и в любое время года. Высокое временное разрешение и постоянные углы зрения - очевидные преимущества геостационарных изображений. Однако геостационарный спутник располагается слишком далеко от Земли и не может, поэтому обеспечить также хорошее пространственное разрешение измерений и высокоточные количественные наблюдения. К тому же, приборы, установленные на таких спутниках вообще не видят полюсы, а, чтобы обеспечить хорошие условия наблюдения в экваториальной области, необходимо одновременно разместить

на орбите пять-шесть спутников. Геостационарные орбиты имеют обычно метеорологические спутники и спутники связи.

Большинство спутников дистанционного зондирования в настоящее время летает по полярным орбитам. Это означает, что спутник летит в северном направлении над одной стороной Земли, пролетает вблизи полюса, а затем летит в южном направлении по второй половине орбиты. Многие из таких спутниковых орбит являются также солнечно-синхронными (sun synchronous), т.е. спутники пролетают над любым местом на земной поверхности в тот же самый временной промежуток. Это обеспечивает приблизительно одинаковые условия освещенности в одно и то же время года в течение последовательных лет. Половина орбиты, на которой спутник летит в северном направлении, называется восходящей (ascending) орбитой, а другая половина называется нисходящей (descending). Полярные орбиты существенно ниже, чем геостационарные. Приборы, которые размещены на полярноорбитальных носителях обеспечивают лучшее пространственное разрешение и позволяют получать высококачественные данные дистанционного зондирования.

1.7. Спутники

В данном пункте рассмотрим несколько видов спутников, их предназначение и технические характеристики.

1.7.1. Спутники программы Landsat.

Программа Landsat является наиболее продолжительным проектом по получению спутниковых фотоснимков Земли. Установленное на спутниках серии Landsat оборудование позволило получить миллионы спектрзональных снимков, востребованных в области сельского хозяйства, в картографии, геологии, лесоводстве, образовании и национальной безопасности. Например, съемочная аппаратура спутника Landsat-7 позволяет получить снимки в 8

спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 15 до 60 метров на пиксель, при этом периодичность сбора данных изначально составляла 16-18 суток. В данной работе были использованы снимки, полученные с космических аппаратов Landsat-8.

Съемочные системы спутников этой серии основаны на использовании сканирующих устройств. Это мультиспектральный сканер Multispectral Scanner (MSS). Оптико-механические сканеры системы MSS начали использоваться с первых полетов ИСЗ Landsat – Landsat 1 и, по мере совершенствования, используются сейчас при полетах спутников второго («оперативного») поколения – Landsat 4 и Landsat 5.

Снимки высокого разрешения с ресурсных спутников имеют небольшой охват. Повторяемость съемки с солнечно-синхронных орбит, используемых для таких ИСЗ, обеспечивается через 16-18 суток. Поэтому для сокращения периода повторения съемки использовалась съемка с двух одновременно работавших спутников «Landsat-1» и «Landsat-2».

Орбита этих спутников солнечно-синхронная, имеет наклон к плоскости экватора (наклонение) $98,2^\circ$, при высоте 705 км (первые три спутника этой серии имели высоту 917 км). При таких параметрах орбиты возможна съемка территорий от 82° северной широты до 82° южной широты. Повторяемость съемки составляет 16 дней.

1.7.2. Спутник SPOT.

Спутниковая система наблюдения за поверхностью Земли SPOT спроектирована Национальным космическим агентством Франции совместно с Бельгией и Швецией, и является одной из самых долго функционирующих и надежных систем в мире. Спутник SPOT 4 находится на орбите с 1998 года. Аппаратура спутника производит съемку поверхности Земли с пространственным разрешением 10 м в панхроматическом и 20 м в

многозональном режиме, в полосе шириной 60 - 120 км. Большой охват снимков позволяет использовать данные спутника SPOT 4 для мониторинга экологического состояния территории, лесопользования, сельского хозяйства и решения многих других задач.

Орбита SPOT полярная, круговая, солнечно-синхронная и фазированная. Наклон плоскости орбиты в сочетании с вращением Земли вокруг полярной оси позволяет спутнику пролететь над любой точкой Земли в течение 26 дней. Орбита имеет высоту 832 км, наклонение $98,7^\circ$ и совершает 14 оборотов в сутки.

1.7.3. Спутник Ресурс-01.

Спутник Ресурс-01- серия российских гражданских аппаратов ДЗЗ. Полученные с помощью его данные используются для редактирования и составления карт, контроля состояния окружающей среды, а так же на различных диапазонах можно определять уровень засоленности почв, зрелость разного рода злаковых культур и биологическую частоту водоемов.

Первый спутник этой серии (спутник Космос-1939) был запущен в середине 80-х годов. В конце 90-х годов основная информация поступала со спутника РЕСУРС-01 №3, запущенного 4 ноября 1994 на высоту 678 км.

Ресурс-01 находится на солнечно-синхронной орбите, имеет наклон к плоскости экватора (наклонение) $97,27^\circ$, при средней высоте 475 км. Аппаратура спутника производит съемку поверхности Земли с пространственным разрешением 1,0 в полосе шириной 950 км.

1.7.4. Спутник Электро-Л.

Космические аппараты «Электро-Л» входят в состав геостационарной гидрометеорологической космической системы «Электро» и предназначены для получения и предварительной обработки

многоспектральных снимков облачности и подстилающей земной поверхности в пределах всего наблюдаемого диска Земли, получения гелиофизических данных на высоте орбиты, выполнения телекоммуникационных функций по распространению, обмену гидрометеорологическими и гелиогеофизическими данными, ретрансляции сигналов от аварийных радиобуев системы КОСПАС-САРСАТ. Основная область применения космических аппаратов системы «Электро» — обеспечение Росгидромета и других ведомств оперативной информацией в целях:

1. синоптического анализа и прогноза погоды в глобальном масштабе (характер и параметры облачных образований, фронтальные разделы, особенности циркуляции воздушных масс, стихийные гидрометеорологические явления);
2. анализа и прогноза состояния акваторий морей и океанов (волнение, температура поверхности моря, стонно-нагонные процессы у побережий);
3. анализа пространственно-временного изменения состояния снежного покрова, влаго-запасов с целью прогноза произрастания сельскохозяйственных культур;
4. анализа и прогноза условий для полетов авиации (балльность и высота верхней границы облачности, направление и скорость ветра на трех уровнях атмосферы, струйные течения, зоны турбулентности для летательных аппаратов, зоны развития активной конвекции в атмосфере);
5. анализа и прогноза гелиогеофизической обстановки в околоземном космическом пространстве, состояния ионосферы и магнитного поля Земли;
6. мониторинга климата и глобальных изменений;

7. обеспечения экологического контроля и охраны окружающей среды (экологический контроль в промышленных районах, выявление загрязнений снежного покрова);
8. контроля чрезвычайных ситуаций (наблюдение районов чрезвычайных ситуаций с целью оценки последствий стихийных бедствий, аварий, катастроф и планирования мероприятий по их ликвидации, контроль возникновения и последствий лесных пожаров).

Электро-Л находится на геостационарной орбите , имеет наклон к плоскости экватора (наклонение) 76° , при средней высоте 36000 км. Аппаратура спутника производит съемку поверхности Земли с пространственным разрешением 1,0 в полосе шириной 950 км.

Глава 2.

2.1. Коэффициент спектральной яркости (КСЯ).

Коэффициент спектральной яркости показывает отношение яркости в данном направлении (ν, φ) к яркости в том же направлении ортотропной поверхности в определенном интервале длин волн ($\lambda, \lambda + d\lambda$) при данных условиях освещения: [26]

$$r_{\lambda}(\nu, \varphi) = \frac{A_{\lambda}(\nu, \varphi)d\lambda}{A_{\lambda}^0(\nu, \varphi)d\lambda} \dots\dots\dots (3)$$

Поскольку объекты земной поверхности имеют конкретную окраску, их яркость в различных спектральных зонах неодинакова, то и характеризуются они разными коэффициентами спектральной яркости. Графически коэффициенты спектральной яркости представляют в виде так называемой кривой спектральной яркости r_{λ} . Значения коэффициентов спектральной яркости хроматических объектов обнаруживают конкретный спектральный ход. Коэффициенты спектральной яркости определяют с помощью фотоэлектрических приборов (спектрометров) путем сравнения двух отраженных лучистых потоков - от исследуемого объекта и от эталона. Точность определения коэффициентов спектральной яркости характеризуется относительной погрешностью в 5-10 % при спектральном разрешении 10-20 нм. Спектральную отражательную способность исследуют лабораторно, в полях, с самолетов, а так же космических аппаратов. В лабораторных условиях на отдельных образцах определяют зависимость коэффициента яркости от определенных свойств, к примеру, почв от содержания гумуса, их влаги и минералогического состава и т.д. При наземном спектрометрировании в полевых условиях изучается суточный ход коэффициентов спектральной яркости, их зависимость от фенологической фазы развития растительности. При аэрокосмическом

спектрометрировании, которое является главным способом определения коэффициентов спектральной яркости, охватываются значительные площади, а получаемые оптические характеристики определяют большие разнородные объекты. Синхронные спектрометрические измерения на земле, с самолета и космического аппарата производятся для оценки влияния атмосферы на оптические характеристики объектов. Надо учитывать, что отражательная способность, к примеру, отдельного древесного листа отличается от отражательной способности дерева, а она, следовательно, от отражательной способности участка леса или лесного массива.

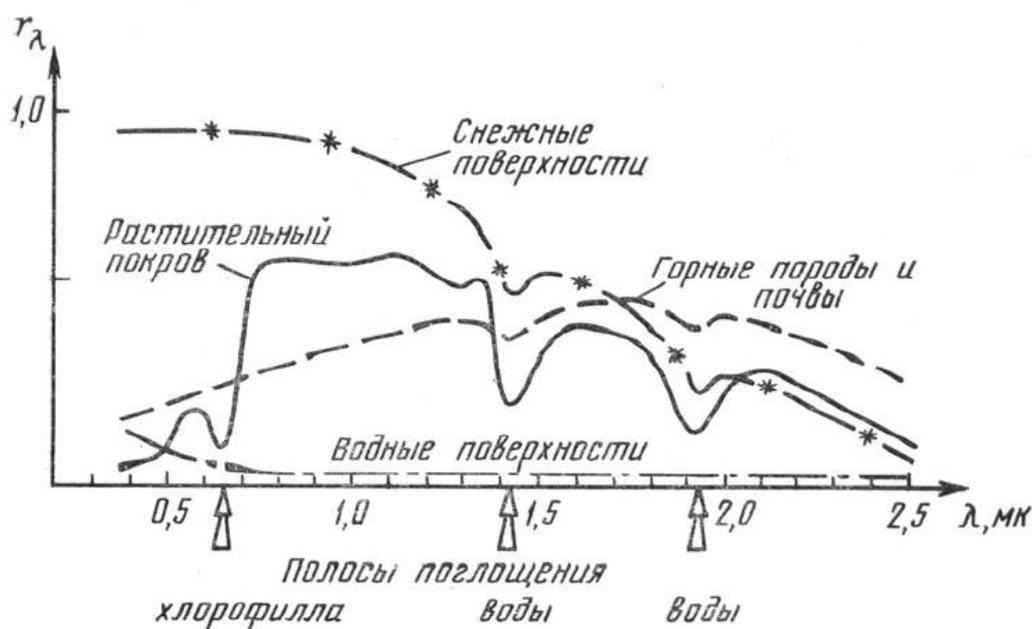


Рисунок 2.1. Спектральная отражательная способность основных классов природных объектов.

В данный момент лучше всего исследована спектральная отражательная способность геологических объектов, почв и растительности. По отражательной способности в видимом диапазоне все многообразие объектов на ландшафте можно разделить на четыре класса, каждый из

которых отличается своеобразной кривой спектральной яркости (рисунок 2.1.).

1 класс - горные погоды и почвы.

2 класс - растительный покров.

3 класс - водные поверхности

4- снежный покров .

Спектральная отражательная способность, различна для всех классов, а так же неодинакова у тех же объектов внутри класса.

2.2. Моделирование коэффициента спектральной яркости.

Для оценки биофизических параметров растительного покрова на основе данных ДЗЗ необходима модель его взаимодействия с солнечным излучением. Исторически моделирование взаимодействия солнечного излучения с растительной средой в оптическом диапазоне на основе физических принципов проводилось по двум (взаимно дополняющим) направлениям, а именно[7]:

1) моделирование отражения от поверхности растительной среды

2) моделирование объемного рассеяния растительной средой.

Каждое из этих направлений представлено рядом моделей, в основе которых, как правило, лежат принципы геометрической оптики для моделирования поверхностного отражения растительным покровом и уравнение переноса для описания рассеяния внутри растительной среды. Наличие двух подходов к моделированию взаимодействия солнечного излучения с растительной средой, пожалуй, отражает наличие корпускулярно- волнового дуализма природы света. Для количественного

описания отражательной способности растительной поверхности используются следующие функции. Пусть мощность светового излучения характеризуется потоком F [Вт]. Тогда плотность потока излучения на единицу площади поверхности A и единицу телесного угла Ω характеризуется интенсивностью I [Вт/($m^2 \cdot \text{ср}$)][7]:

$$I \equiv \frac{\partial^2 F}{\partial A \partial \Omega \cos \theta} \quad (4)$$

Направление телесного угла Ω задано зенитным θ и азимутальным φ углами. Интерпретация физического смысла телесного угла и площади поверхности зависит от типа вычислений[36]:

1) для расчета потоков на излучателе dA – площадь элемента излучателя, а $d\Omega$ – телесный угол, в который рассеивается энергия излучателя;

2) для расчета потоков на сенсоре dA – площадь элемента сенсора, а $d\Omega$ – раствор телесного угла, под которым виден излучатель.

Анизотропия отражательных свойств различных поверхностей измеряется относительно ламбертовской поверхности – изотропного отражателя, для которого интенсивность отраженного излучения не зависит от направления (рисунок. 2.2а). Для ламбертовской поверхности выполняется закон косинуса Ламберта – величина потока, отраженного от ламбертовской поверхности, пропорциональна косинусу угла между направлением визирования и нормалью к поверхности (рисунок. 2.2б). Оба утверждения (для интенсивности и потока) математически эквивалентны. Физически они выражают тот факт, что хотя интенсивность отраженного излучения изотропна, при пологом визировании площадка видна в меньшем растворе телесного угла и, следовательно, меньшее количество энергии попадает на сенсор. Косинус угла визирования служит

нормировочным коэффициентом для перевода изотропной величины (интенсивность) в анизотропную (поток).

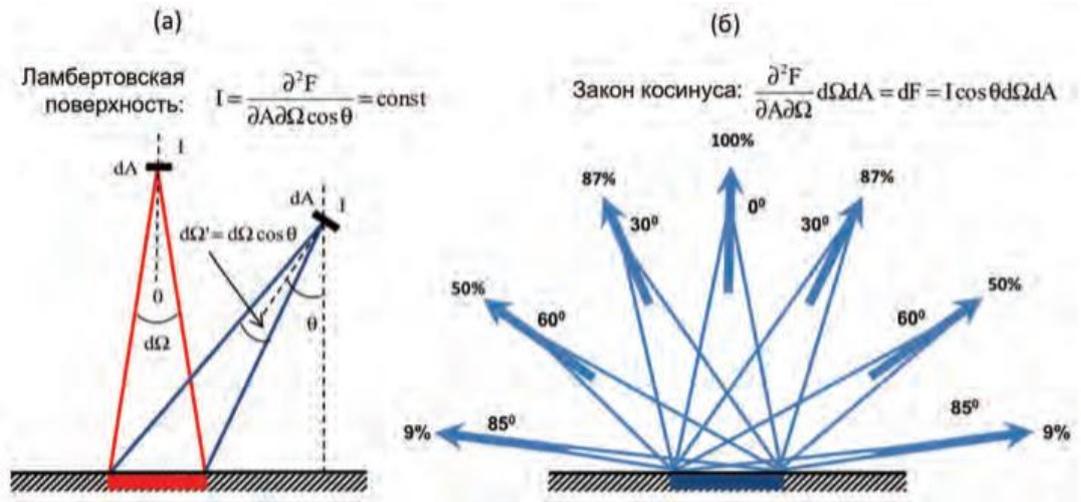


Рисунок 2.2. Измерение отраженной энергии от ламбертовской поверхности: (а) интенсивность отраженного излучения не меняется в зависимости от угла визирования; (б) плотность потока отраженного излучения пропорциональна косинусу угла визирования (закон косинуса Ламберта).

Пусть падающее излучение в направлении (ϑ_i, φ_i) характеризуется интенсивностью I^i , а излучение, отраженное в направлении (θ_v, φ_v) имеет интенсивность I^v (θ – зенитный, φ – азимутальный углы, характеризующие направление распространения излучения). Отражательная способность растительного покрова характеризуется двухлучевой функцией спектрального отражения (ДФСО), определенной как отношение плотности отраженного потока излучения на единицу площади поверхности и телесного угла в направлении $\Omega^v(\theta_v, \varphi_v)$ к плотности падающего потока в направлении $\Omega^i(\theta_i, \varphi_i)$ [8]

$$\text{ДФСО}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^v}{\partial A \partial \Omega^v} / \frac{\partial^2 F^i}{\partial A \partial \Omega^i} = \frac{I^v(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v}{I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i} \quad (5)$$

Однако чаще используется термин индикатриса отражения (ИО) или коэффициент спектральной яркости (КСЯ), определенный как отношение

плотности отраженного от данной поверхности потока излучения на единицу площади поверхности и телесного угла $\Omega^V(\theta_v, \varphi_v)$ к интенсивности излучения, отраженного от ламбертовской поверхности, при тех же условиях освещения и наблюдения [9]:

$$\text{КСЯ}(\theta_v, \varphi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^V}{\partial A \partial \Omega^V} \frac{\partial^2 F_L^V}{\partial A \partial \Omega^V \cos \theta_v} = \frac{I^V(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v}{\left(\frac{1}{\pi}\right) \int_{2\pi} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i} \quad (6)$$

Здесь и далее мы используем следующие обозначения для пределов интегрирования: $2\pi^-$ – по нижней полусфере, $2\pi^+$ – по верхней полусфере, 4π – по всей сфере. Для понимания смысла выражения в знаменателе заметим, что поскольку ламбертовская поверхность отражает все приходящее излучение равномерно по углам с интенсивностью I^0 , верно соотношение: $\left(\frac{1}{\pi}\right) \int_{2\pi} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i = \left(\frac{1}{\pi}\right) I^0 \cos \theta_v d\Omega^V = I^0$ (7)

КСЯ связан с ДФСО следующим соотношением[8]:

$$\text{КСЯ}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) = \frac{\left(\frac{1}{2}\right) \int_{2\pi} \text{ДФСО}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}{\int_{2\pi} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i} \quad (8)$$

В западной литературе принята иная терминология описания отражательных свойств поверхности. Двухлучевая функция распределения отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF [ср⁻¹]) определена как отношение интенсивности отраженного излучения в направлении $\Omega^V(\theta_v, \varphi_v)$ к плотности падающего потока на единицу площади:

$$\text{BRDF}(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^V}{\partial A \partial \Omega^V \cos \theta_v} / \frac{\partial F^i}{\partial A} = \frac{I^V(\theta_v, \varphi_v)}{\int_{2\pi} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i} \quad (9)$$

(Для ламбертовской поверхности ($I^V = \text{const}$) в соответствии с соотношением $\text{BRDF} = 1/\pi$. В зависимости от типа падающего и

отраженного выделяются следующие 4 класса коэффициентов отражения поверхности:

BRF (Bidirectional Reflectance Factor) – отношение мононаправленного потока излучения, отраженного от данной поверхности, к отраженному от идеально рассеивающей ламбертовской поверхности потоку на единицу ее площади при одинаковых условиях освещения мононаправленным потоком излучения.

DHR (Directional- Hemispherical Reflectance) – отношение потока излучения, отраженного по всей верхней полусфере, к падающему мононаправленному потоку на единицу площади поверхности. Эта величина соответствует альбедо для мононаправленного освещения.

HDRF (Hemispherical- directional Reflectance Factor) – отношение мононаправленного потока отраженного излучения к падающему потоку из всей верхней полусферы. BHR (Bihemispherical Reflectance) – отношение потока излучения, отраженного по всей верхней полусфере, к падающему потоку из всей верхней полусферы на единицу площади поверхности. Эта величина соответствует альбедо для диффузного освещения.

2.3. Спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ).

Спектральная плотность энергетической яркости - величина, равная отношению энергетической яркости dL_g , соответствующему узкому участку спектра, к ширине этого участка $d>v$. [2] Определяется по формуле:

$$L_e(\lambda) = \frac{\partial L_e}{\partial \lambda} \quad (10)$$

Единица измерения СПЭЯ - ватт на стерадиан - метр в кубе. $[\frac{\text{Вт}}{\text{ср.м}^3}]$

2.4. Отражательная способность

Отражательные свойства земной поверхности можно охарактеризовать, измерив относительную долю энергии отраженного излучения как функцию длины волны. Эта функция называется спектральной отражательной способностью и определяется как отношение энергии отраженного излучения R_0 с заданной длиной волны λ к энергии падающего излучения R_1 с той же длиной волны, выраженное в процентах:

$$\rho_{\lambda} = 100\% \cdot \frac{R_0 \lambda}{R_1 \lambda} \quad (11)$$

Различные элементы земной поверхности – растительность, почвы, вода – по-разному отражают падающее на них излучение в разных зонах электромагнитного спектра. Кривой спектральной отражательной способности называется график зависимости спектральной отражательной способности объекта от длины волны. Вид этой кривой позволяет изучить спектральные характеристики объекта и имеет большое значение при выборе спектрального диапазона, в котором будет проводиться сбор данных дистанционного зондирования для определенной исследовательской задачи. Отражательную способность можно измерить в лабораторных или полевых условиях с помощью спектрометра.

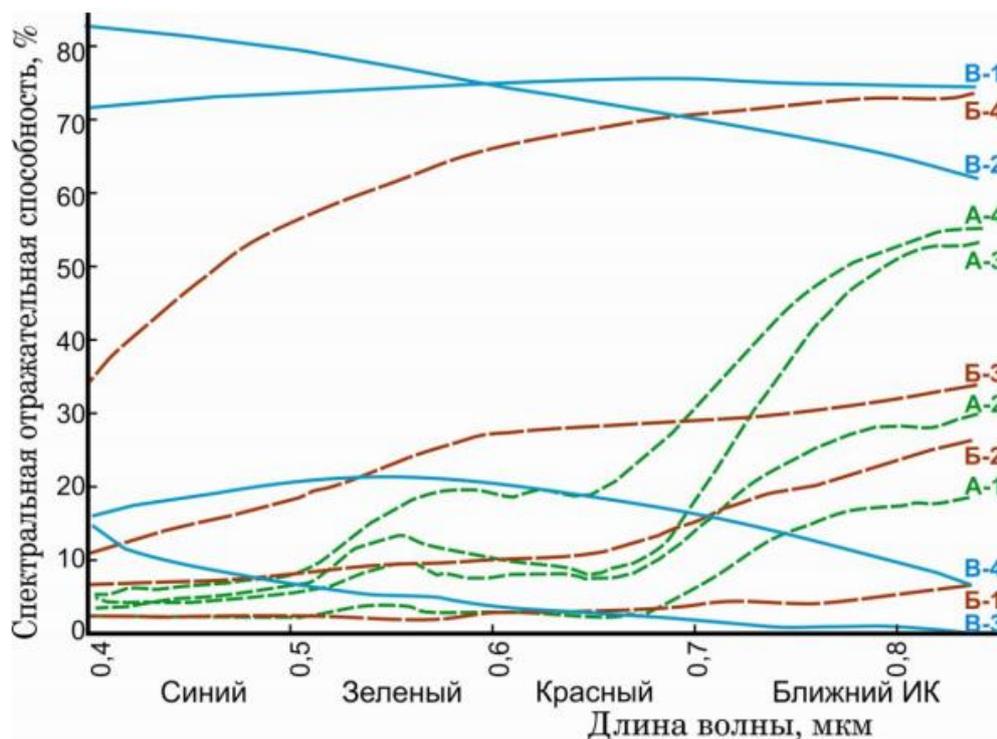


Рисунок 2.3. Кривые спектральной отражательной способности различных природных объектов

Ход кривых спектральной отражательной способности меняется в зависимости от состояния объекта. Например, различаются кривые сухой и влажной почвы, водоемов с чистой и загрязненной водой, лесов в разное время года. На рис.2.3. приведены примеры обобщенных спектральных кривых для типичных объектов Земли.

2.5. Вегетационные индексы

Как было отмечено выше, характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с ее отражательными способностями позволяют использовать космические снимки для идентификации типов растительности и их состояния.

Для работы со спектральной информацией часто прибегают к созданию так называемых «индексных» изображений. На основе комбинации значений яркости в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчета по этим значениям «спектрального индекса» объекта строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. Спектральные индексы, используемые для изучения и оценки состояния растительности, получили общепринятое название вегетационных индексов.

Вегетационный индекс (ВИ) - показатель, рассчитываемый в результате операций с разными спектральными диапазонами (каналами) данных дистанционного зондирования, и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка. Эффективность ВИ определяется особенностями отражения; эти индексы выведены, главным образом, эмпирически.

В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов. Они подбираются экспериментально (эмпирическим путем), исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (0,62 - 0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75 - 1,3 мкм) максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Т. е. высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с большой фитомассой растительности) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Как это хорошо известно, отношение этих показателей друг к другу позволяет четко

отделять растительность от прочих природных объектов. При обработке космических снимков в программном комплексе ENVI имеется специальный калькулятор вегетационных индексов ENVI (калькулятор ВИ ENVI), который позволяет рассчитать 27 вегетационных индексов, используемых для оценки состояния растительности, содержания пигментов, азота, углерода, воды. По снимкам, где есть только красная и ближняя инфракрасная спектральные зоны, программа предложит рассчитать два индекса – NDVI и RVI. При работе с гиперспектральным снимком будет предложен расчет всех 27 индексов.

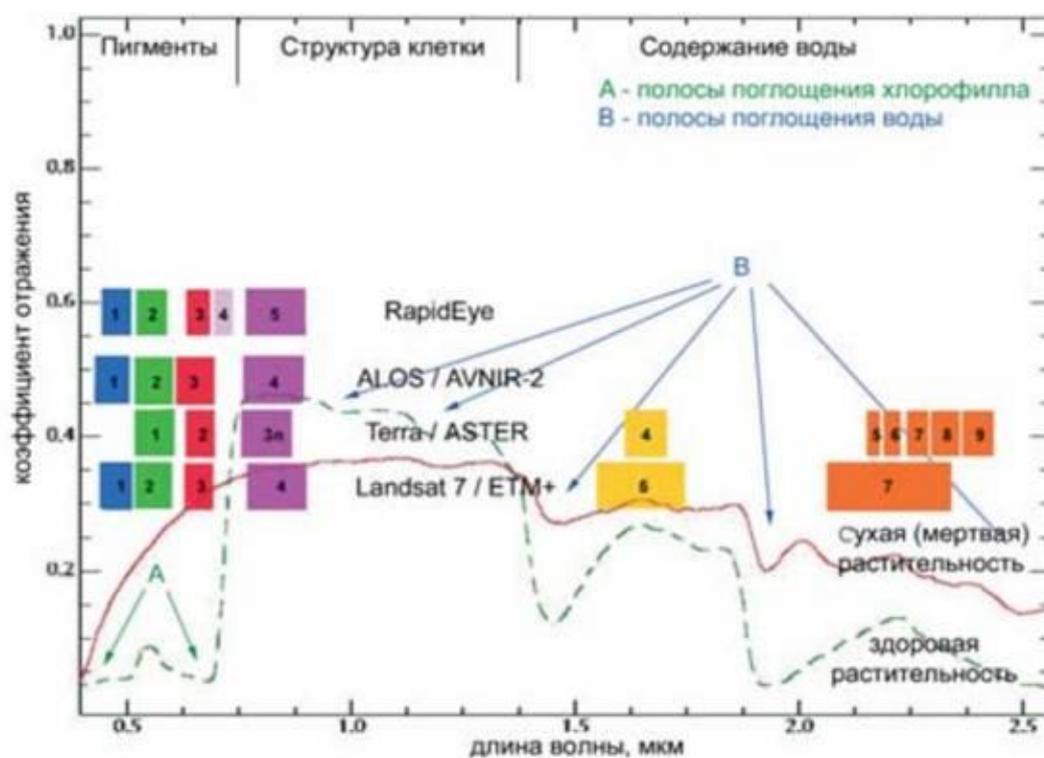


Рисунок 2.4. Индексы сгруппированы в категории по свойству растительности, которое они характеризуют.

2.6. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова, вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation

Index) – нормализованный относительный индекс растительности, который для растительности принимает положительные значения, и чем больше зеленая фитомасса, тем он выше. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью.

Вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (12)$$

Где, NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра.

NDVI может быть рассчитан на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющих спектральные каналы в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. В красной области спектра (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7-1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Следовательно, высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной (рисунок.2.5).

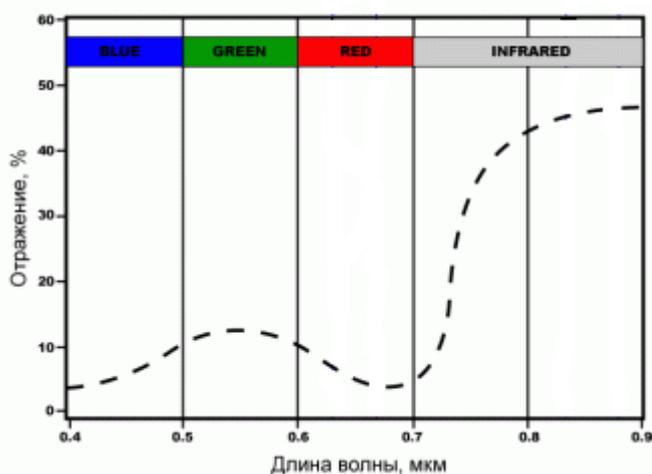


Рисунок 2.5. Участки характеристической кривой отражения растительности (усредненной), используемые для расчета NDVI с помощью данных MODIS.

Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять и анализировать растительные от прочих природных объектов. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и пр.

Для растительности индекс NDVI принимает положительные значения, и чем больше зеленая фитомасса, тем они выше. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. Индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного фона, кроме случаев, когда густота растительного покрова ниже 30%. Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для зеленой растительности индекс обычно принимает значения от 0,2 до 0,8.

NDVI может быть рассчитан на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющим спектральные каналы в красном (0,55-0,75 мкм) и инфракрасном диапазоне (0,75-1,0 мкм). Алгоритм расчета NDVI встроен практически во все распространенные пакеты программного обеспечения, связанные с обработкой данных дистанционного зондирования (ArcView Image Analysis, ERDAS Imagine, ENVI, Ermapper, Scanex MODIS Processor, ScanView и др.).

Благодаря минимальному временному разрешению данных AVHRR/NOAA вычисление NDVI на их основе может давать оперативную информацию об эколого- климатической обстановке и возможность отслеживать динамику различных параметров с периодичностью менее

суток. А большой пространственный охват позволяет проводить мониторинг территорий, соразмерный с площадями областей и целых стран.

Таблица 3. Комбинации каналов камер спутников используемые для расчета NDVI:

Космический аппарат/ Прибор	Используемые каналы (длина волны)	Пространственное разрешение
NOAA/ AVHRR	1 (0.58-0.68 мкм), 2 (0.72-1.0 мкм)	1100м
Terra(Aqua)/ MODIS	1 (0.62-0.67 мкм), 2 (0.841-0.876 мкм)	250 м.
Landsat(4)/ MSS	5 (0.6-0.7 мкм), 6 (0.7-0.8 мкм) или 7 (0.8-1.1 мкм)	30м
Landsat(5)/ TM	3 (0.63-0.69 мкм), 4 (0.76-0.90 мкм)	30м
SPOT 2, 4	2 (0.61 – 0.68 мкм), 3 (0.78 – 0.89 мкм)	20 м
Монитор-Э	3 (0,626-0,672 мкм) 4 (0,783-0,883 мкм)	15 м.
SPOT 5	2 (0.61 – 0.68 мкм), 3 (0.78 – 0.89 мкм)	10 м.
Landsat7/ ETM+	3 (0.63-0.69 мкм), 4 (0.75-0.90 мкм)	30 м.
SPOT 2, 4	2 (0.61 – 0.68 мкм), 3 (0.78 – 0.89 мкм)	20 м.
SPOT 5	2 (0.61 – 0.68 мкм), 3 (0.78 – 0.89 мкм)	10 м.

Как известно, отражение растительного покрова в красной и ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра тесно связано с его зеленой фитомассой. Для того чтобы количественно оценить состояние растительности, широко применяется так называемый нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). NDVI характеризует также плотность растительности, позволяет растениеводам оценить всхожесть и рост растений, продуктивность угодий. Индекс рассчитывается как разность значений отражения в ближней инфракрасной и красной областях спектра, деленная на их сумму. В результате значения NDVI меняются в диапазоне от -1 до 1 (рисунок.2.6).



Рисунок 2.6. Значения NDVI и соответствующие им типы растительного покрова.

Для зеленой растительности отражение в красной области всегда меньше, чем в ближней инфракрасной, за счет поглощения света хлорофиллом, поэтому значения NDVI для растительности не могут быть меньше 0.

Таблица 4. Расчет индекса для каждого пиксела космического снимка по красной и ближней инфракрасной спектральным зонам.

Тип объекта	Коэффициент отражения в красной области спектра	Коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0,1	0,5	0,7
Разряженная растительность	0,1	0,3	0,5
Открытая почва	0,25	0,3	0,025
Облака	0,25	0,25	0
Снег и лед	0,375	0,35	-0,25
Вода	0,02	0,01	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

Расчет индекса для каждого пиксела космического снимка по красной и ближней инфракрасной спектральным зонам позволяет получить производное изображение — карту NDVI.

NDVI позволяет выявить проблемные зоны угнетенной растительности, давая возможность принимать наиболее верные в долгосрочной перспективе решения, направленные на повышение урожайности. Участки с различным состоянием растительности или объемом зеленой фитомассы могут быть изображены различными цветами. При помощи статистической обработки карт NDVI помимо определения количества фитомассы можно также выделить площади посева различных сельскохозяйственных культур.

2.7. Приборы, работающие на КСЯ И СПЭЯ .

2.7.1. Прибор MSS (спутник Landsat)

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

Таблица 5. Основные технические характеристики прибора MSS

Спектральные диапазоны	
I	0.5 - 0.6 мкм
II	0.6 - 0.7 мкм
III	0.7 - 0.8 мкм
IV	0.8 - 1.1 мкм
Ширина полосы обзора в надире	185 км
Разрешение на местности в надире	80x80 м

Прибор MSS был одним из первых приборов, который позволил начать систематическое изучение поверхности Земли из космоса. В связи с этим уместно напомнить, что в начале 70-х было только две великие космические державы - США и СССР. Советскому Союзу удалось запустить первый искусственный спутник (1957) и осуществить первый в истории человечества полет космического корабля с человеком на борту (1961). Но США, уже в то время, начала несколько программ автоматического дистанционного зондирования с передачей получаемых данных на Землю. Из таких программ стоит упомянуть спутник TIROS, который был запущен в 1960 г. для метеорологических наблюдений и спутник LANDSAT, запущенный в 1972 г с целью наблюдения поверхности Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах с достаточно высоким пространственным разрешением. Первый спутник серии LANDSAT назывался ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) и с этого спутника начался непрерывный ряд наблюдений поверхности Земли. В конце 1999 г. на орбите находились спутник Landsat-5, запущенный в 1984 г. и спутник Landsat-7, запущенный 15 апреля 1999 г.

Упрощенная схема прибора MSS представлена на рисунке 2.7

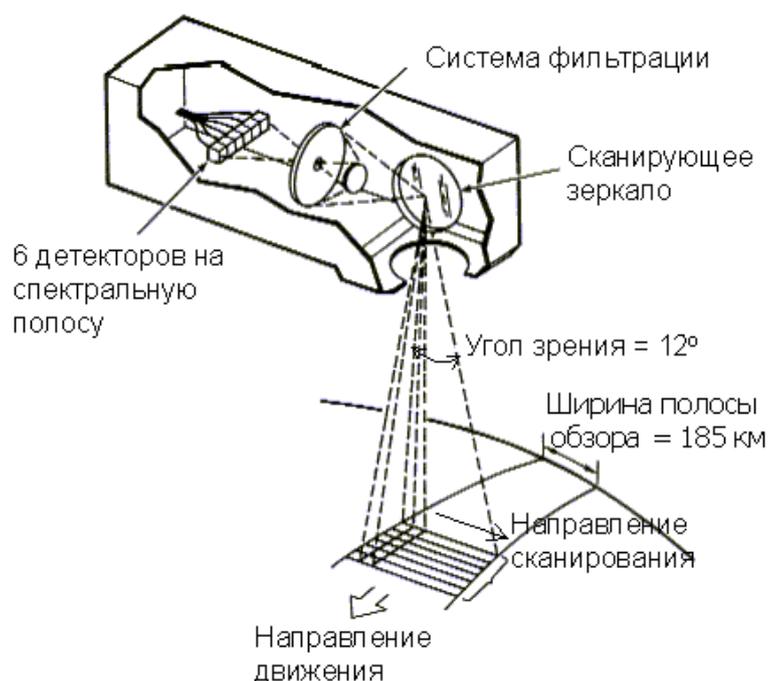


Рисунок.2.7. Упрощенная схема прибора MSS

Прибор MSS на спутнике Landsat 1,2,3 являлся классическим сканером и работал следующим образом. Излучение, отраженное от поверхности Земли собиралось телескопической системой (не показанной на рисунке) и направлялось на сканирующее зеркало. Это зеркало поворачивалось вокруг некоторой оси с периодом 3.3 миллисекунды, обеспечивая сканирование местности в направлении перпендикулярном движению спутника с углом зрения равным приблизительно 12° . Такой угол зрения при высоте спутника равной 920 км обеспечивал ширину полосы обзора равную 185 км. Отраженное от сканирующего зеркала излучение попадало на систему фильтров. Эта система обеспечивала разделение излучения на спектральные диапазоны. После этого излучение регистрировалось с помощью системы детекторов. В приборе MSS было предусмотрено по 6 детекторов для каждого спектрального диапазона. Это позволяло одновременно принимать рассеяное излучение от 6 полос шириной около 80 м каждая, обеспечивая, тем самым, пространственное разрешение на местности 80×80 м. Система детектирования преобразовывала принимаемое излучение в цифровой сигнал в диапазоне

от 0 - 255. Этот диапазон определяет яркостное (радиометрическое) разрешение прибора. Зарегистрированные сигналы с помощью системы телеметрии передавались на Землю, где из них формировались изображения для каждой из спектральных полос. Каждое из таких изображений состояло приблизительно из 7,581,600 элементов (пикселей).

2.7.2. Прибор HRV (спутник SPOT)

Первый спутник SPOT (Франция) запущен в 1986 г., высота орбиты этого спутника 831 км. На борту спутника был размещен прибор HRV (High Resolution Visible). Основные характеристики этого прибора приведены в таблице:

Таблица 6. Основные технические характеристики прибора HRV.

Спектральные диапазоны	
I	0.50 - 0.59 мкм
II	0.6 - 0.68 мкм
III	0.79 - 0.89 мкм
Ширина полосы обзора в надире	117 км
Разрешение на местности в надире	20x20 м(10x10 в панхроматической моде)

Если прибор MSS, описанный в предыдущем разделе, являлся типичным сканером, то в приборе HRV реализована иная схема, представленная на рисунок. 2.8. У сканеров есть несколько недостатков, которые привели к тому, что эта схема практически перестала использоваться для приборов высокого пространственного разрешения. Во- первых, сканеры неизбежно имеют движущиеся части, что снижает надежность прибора. Во- вторых, при использовании небольшого числа

детекторов, возникают проблемы с обеспечением высокого пространственного разрешения.

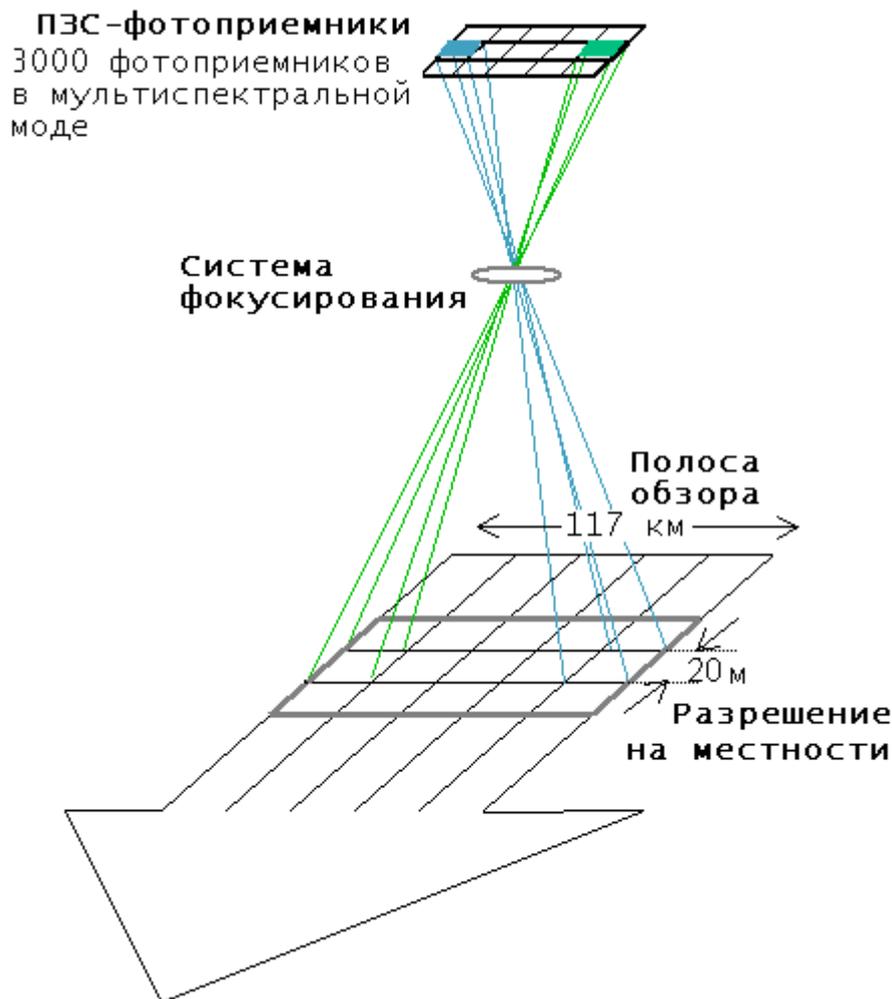


Рисунок.2.8. Принципиальная схема прибора HRV

Поэтому в современных приборах высокого пространственного разрешения используется очень большое число фотоприемников (ПЗС-линеек). В приборе HRV используется три такие ПЗС- линейки длиной около 15 см по 1000 элементов в каждой для трех спектральных диапазонов. Система фокусирования устроена таким образом, что небольшая площадка 20*20 м на поверхности Земли, отображается на индивидуальный элемент ПЗС- линейки, как показано на рисунке. 2.8. Таким образом, пространственное разрешение прибора HRV составляет 20*20 м в каждом из трех спектральных диапазонах. В панхроматической моде (0.51 - 0.70 мкм), в которой интегрируются сигналы от отдельных

спектральных каналов, удастся достичь даже большего разрешения - 10×10 м.

Спутник пролетает над одной и той же местностью каждые 26 дней, а полоса обзора прибора HRV составляет 117 км. В действительности наблюдение подстилающей поверхности может осуществляться в полосе 950 км. Это достигается с помощью поворотного зеркала, так, как показано на рисунке. 2.9.

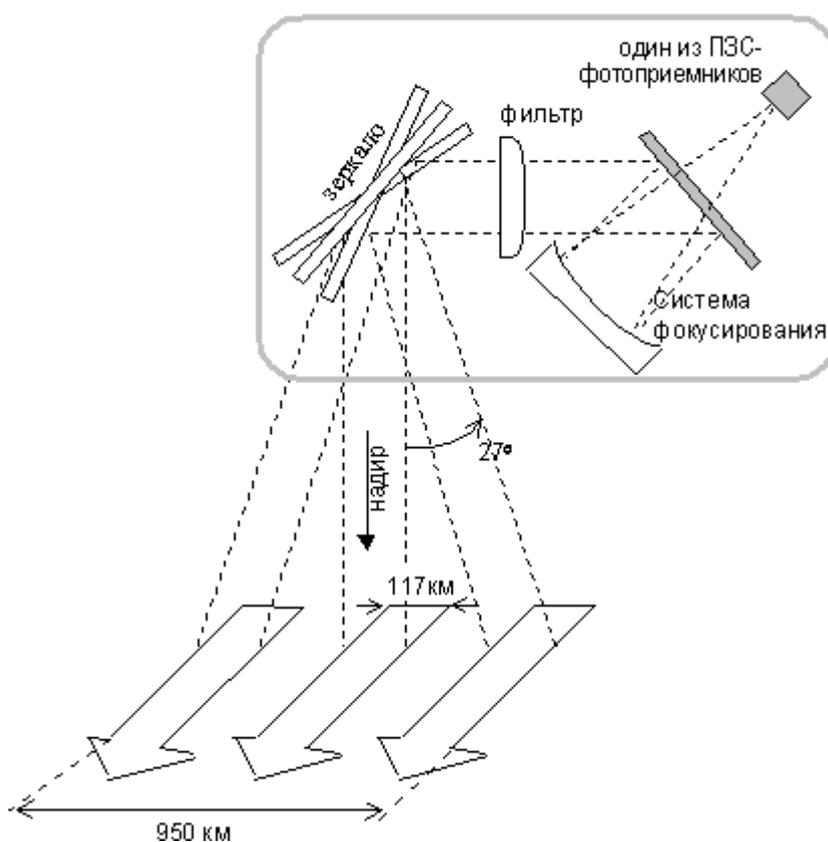


Рисунок .2.9. Система формирования изображения прибора HRV

Зеркало может поворачиваться на угол 27° , что обеспечивает выбор любой полосы шириной 117 км в пределах полосы обзора прибора равной 950 км. После зеркала излучение поступает в систему фильтров, обеспечивающую разделение принимаемого сигнала на три спектральных диапазона 1-ый [зеленый] от 0.50 до 0.59 мкм, 2-ой [красный] от 0.6 до 0.68 и 3-ий [в ближней инфракрасной области спектра] от 0.79 до 0.89 мкм.

Затем с помощью системы фокусирования излучение собирается на один из 3000 ПЗС-приемников.

2.7.3. Прибор МСУ-Э (Спутник Ресурс-01).

Приблизительно по той же схеме, что и прибор HRV устроен сканер высокого разрешения МСУ-Э российского природно-ресурсного спутника РЕСУРС-01. Первый спутник этой серии (спутник Космос-1939) был запущен в середине 80-х годов. В конце 90-х годов основная информация поступала со спутника РЕСУРС-01 №3, запущенного 4 ноября 1994 на высоту 678 км. Основные технические характеристики прибора МСУ-Э приведены в таблице.

Таблица.7 Основные технические характеристики МСУ-Э.

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

2.7.4. Микроволновые радиометры SMMR и SSM/I

Микроволновые радиометры - это пассивные приборы, принимающие излучение Земли в окне прозрачности атмосферы приблизительно от 1 and 200 ГГц (3 м до 1.5 мм).

Прибор SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) был запущен в 1978 г. на спутнике Nimbus-7 (США) и летал по август 1987. Прибор принимал излучение на 5 частотах - 6.63, 10.69, 18.0, 21.0 and 37.0

ГГц (на каждой частоте принималась и горизонтальная, и вертикальная поляризации). SMMR имеет шесть независимых супергетеродинных модуляционных приемников, единую антенну и калибровочную подсистему. Два радиометра на частоте 37 ГГц одновременно измеряют вертикально (V) и горизонтально (H) поляризованные компоненты сигнала. Радиометры на остальных 4-х частотах (6.6, 10.69, 18.0, 21.0 ГГц) в каждой последующей половине скана работают на разной поляризации. Сканирующая антенна SMMR состоит из параболического рефлектора диаметром 79 см и многочастотной схемы питания. Радиометр обеспечивает коническое сканирование вперед под углом 42° от надира в поперечном направлении от направления полета в секторе азимутальных углов $\pm 25^\circ$, что соответствует полосе обзора Земли 780 км. Сканирование выполняется с помощью механического вращения рефлектора вокруг вертикальной оси со скоростью, меняющейся по синусоидальному закону. Калибровка осуществляется на краях скана поочередным приемом сигнала космоса и калибровочной нагрузки с температурой радиометра. За один скан длительностью 4.096 сек радиометр просматривает две полосы обзора на поверхности, смещаясь вдоль подспутнико19 вой дорожки на 26 км. Первую половину каждого скана SMMR измеряет на горизонтальной поляризации, а вторую половину скана измерения выполняются на вертикальной поляризации за исключением канала 37 ГГц. Спутник имеет круговую орбиту с наклоном 99.2° , высотой около 955 км и периодом 104.16 минуты (13.8 витка в сутки). Глобальное покрытие Земли обеспечивается за 6 суток Угловая стабилизация спутника не хуже $\pm 1^\circ$. Основным рабочим режимом в течение срока функционирования радиометра был режим работы через сутки с включением приблизительно в полночь по всемирному времени и выключением через сутки.

Прибор SSM/I (Special Sensor Microwave/ Imager) размещается на спутниках F8, F10, F11, F12, F13 и F14 серии DMSP (Defense

Meteorological Satellite Program). Прибор принимает излучение на 4 частотах - 19.35, 37.0, 85.5 ГГц (и горизонтальная и вертикальная поляризации) и 22.235 ГГц (только вертикальная поляризация) Высота полета спутников около 850 км, полоса захвата 1400 км.

Пространственное разрешение 25*25 км. Сигнал имеет 128 градаций. Данные микроволновых радиометров SMMR и SSM/I распространяются Национальным центром по снегу и льду США (National Snow and Ice Data Center (NSIDC)) и используются главным образом для изучения динамики изменения ледового и снежного покрова на планете.

2.7.5. Аппаратура МСУ-ГС.

Многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения (МСУ- ГС) обеспечивает получение многоспектральных изображений облачности и поверхности Земли в видимом и ИК диапазонах в пределах видимого диска Земли во всем диапазоне условий наблюдения (высота Солнца – 10-900 , коэффициент отражения – 0.07-0.9, контраст объектов – 0.2-0.7).

МСУ-ГС имеет следующие основные характеристики:

1. полоса обзора - видимый диск Земли и часть околоземного пространства. Размер полосы обзора – 20 град. x 20 град.;
2. количество спектральных зон – 10 со следующими номинальными значениями спектральных интервалов и требуемыми отношениями сигнал/ шум (или температурной чувствительностью - ΔT):

Таблица 8. Спектральные зоны.

Номер канала	Спектральный интервал, (мкм)	S/N, ΔT	Область применения
1	0.5-0.65	>10	Детектирование облачности, слежение за облаками-трассерами для определения ветра, наблюдения аэрозоля
2	0.65-0.8		
3	0.8 - 0.9	>7	Детектирование облачности малых размеров
4	3.5-4.01	$<0.35^{\circ}\text{K}$	Детектирование низкой облачности, туманов, оценки температуры поверхности океанов (ТПО) и температуры поверхности суши (ТПС) для ночных условий
5	5.7-7.0	$<0.75^{\circ}\text{K}$	Наблюдения за водяным паром, оценки ветра, высоты полупрозрачной облачности
6	7.5 – 8.5	$<0.28^{\circ}\text{K}$	Наблюдения полупрозрачной
7	8.2 - 9.2		слоистой облачности
8	9.2-10.2	$<1.5^{\circ}\text{K}$	Мониторинг общего содержания

			озона, ветер в нижней стратосфере
9	10.2	-	Оценка ТПО, ТПС, количества осажденной воды над океанами
10	11.2		
	11.2	-	
	12.5		

3. проекция элемента приемника изображения на поверхность Земли в надире:

1. в видимом диапазоне и ближнем ИК диапазоне (1-3 каналы) - не более 1 км;
 2. в ИК диапазоне (4 - 10 каналы) - не более 4 км.
4. МСУ-ГС обеспечивает получение измерений по каждому спектральному диапазону в терминах энергетических величин (яркость, радиационные температуры). Диапазон радиационных температур, измеряемых в диапазоне 3.5мкм – 12.5 мкм – 220К - 340К.

Глава 3.

3.1. Методы и алгоритмы тематической обработки данных космического дистанционного зондирования.

В настоящее время большая часть ДДЗ поступает сразу в цифровом виде, что позволяет непосредственно использовать для их обработки современные компьютерные технологии. Компьютерная обработка данных открывает новые перспективы автоматизации многочисленных трудоемких процессов и позволяет в короткий срок произвести обработку больших объемов данных[31].

Использование космической информации для исследования природных образований и антропогенных объектов требует дешифрирования получаемых снимков. Автоматизированное дешифрирование – один из этапов процесса 25 компьютерной обработки ДДЗ, представленных в цифровом виде, т.е. в форме цифровых изображений, включающий ввод изображений в компьютер (оцифровку аналоговых или импорт цифровых изображений), тематическое дешифрирование и экспертную оценку данных [15].

Методы обработки изображений подразделяют на две группы, предназначенные для частичного или полного компьютерного решения поставленной задачи:

1. Методы, обеспечивающие яркостные и геометрические преобразования снимков (предварительная обработка космических снимков); они направлены на облегчение визуального дешифрирования, повышение его объективности и достоверности, а также подготовку снимков к последующему автоматизированному дешифрированию и созданию карты;
2. Методы автоматизированного дешифрирования (классификации) объектов по снимкам с использованием априорной информации о признаках выделяемых объектов или без нее.

3.1. Основные принципы построения систем дешифрирования ДДЗ

Общая система дешифрирования ДДЗ для решения прикладных задач состоит из нескольких этапов [21]:

1) Нормализация, которая включает процедуры, устраняющие основные типы искажений исходных данных. На этом этапе следует использовать только те процедуры, которые не приводят к значительным потерям информации: еще неизвестно, какие характеристики изображения наиболее существенны для решения задачи, а какими можно пренебречь. Например, геометрические преобразования могут привести к искажению исходных яркостных характеристик объектов подстилающей поверхности. На этом этапе они нужны только в тех случаях, когда имеются наземные измерения, требующие строгой координатной привязки тестовых участков к 26 изображению. Нельзя трансформировать изображение в какую-либо картографическую проекцию, если предполагается выполнение его классификации по спектральным признакам;

2) Визуализация и комплексный анализ данных. На этом этапе производится анализ информативности имеющихся данных с точки зрения поставленной задачи и выбор принципа декомпозиции системы распознавания. При наличии нескольких изображений на обследуемую территорию выполняется их пространственное совмещение (приведение к единой системе координат). Для визуального анализа применяются процедуры усиления контраста. При анализе многозональных изображений применяется RGB-синтез в удобной для анализа цветовой палитре, а также анализ главных компонент;

3) На основе комплексного анализа данных формируется общая схема решения задачи. Схема включает основной набор процедур классификации, последовательность их применения, перечень входных и выходных данных и вспомогательных процедур их обработки и анализа. Выбор процедур предварительной обработки изображений должен быть согласован с принципами классификации и не должен приводить к искажению тех характеристик изображения, которые могут быть использованы как признаки в системе распознавания;

- 4) Формирование перечня классов и выделение признаков. В системах распознавания, основанных на классификации пикселей изображения. Очень важно правильно выбрать количество классов в системе координат яркостных признаков (спектральном пространстве). Если выбранное количество классов значительно меньше количества различающихся по этим признакам объектов земной поверхности, ошибки классификации могут оказаться недопустимо высокими. Для выбора необходимого количества исходных классов в таких системах применяется неконтролируемая классификация и сегментация изображений. При большом количестве яркостных признаков для сокращения размерности задачи применяется корреляционный анализ данных;
- 5) Классификация – основной этап дешифрирования, хотя отдельные процедуры дешифрирования могут присутствовать и на этапе выделения признаков, и на этапе постклассификационной обработки. Процесс классификации может осуществляться в несколько этапов или в несколько итераций, в зависимости от выбранной схемы распознавания;
- 6) Тематическая классификация заключается в сопоставлении каждому из выделенных классов некоторой тематической категории объектов земной поверхности. Оцениваются ошибки классификации и достоверность результата. При неудачном выборе количества или описаний исходных классов может быть принято решение о повторной классификации на основе другого набора классов и системы признаков. При удовлетворительном результате выбирается схема постклассификационной обработки для перехода к тематической карте;
- 7) Постклассификационная обработка – набор интерактивных и автоматических процедур, необходимых для формирования карты объектов исследования, классифицированных в соответствии с выбранной тематической областью. К таким процедурам относятся группировка и редактирование выделенных классов, устранение обнаруженных ошибок классификации. В процессе постклассификационной обработки также можно использовать процедуры распознавания, применяющиеся при анализе сцен;

8) Подсчет количественных характеристик включает площадные оценки по выделенным классам объектов, а также точечные оценки в соответствии с физическими моделями исследуемых процессов и явлений, оценки динамики процессов при обработке мультитременных данных и т.п. Этот этап, не имеющий прямого отношения к процессу дешифрирования, тем не менее, важен для его оптимизации. Накопление и анализ характеристик выделяемых классов объектов позволяет совершенствовать как саму систему дешифрирования, так и отдельные ее этапы;

9) Процесс получения тематических карт (тематического картографирования) на основе результатов дешифрирования включает процедуры преобразования изображения к нужной картографической проекции, растровый ГИС-анализ, а также растрово-векторное преобразование при использовании результатов в векторных ГИС. Выполнение растрово-векторного преобразования требует, как правило, сглаживания результатов в пределах некоторых участков для получения однородных по классам контуров. С точки зрения данного этапа наиболее эффективны такие процедуры классификации, которые обеспечивают наибольшую однородность изображения по классам и наиболее четкие границы между объектами определенных типов. Если результат классификации не удовлетворяет этим условиям, процедуры сглаживания могут привести к искажению реальных границ между классами.

3.2. Программное обеспечение, используемое для автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования

Современные системы обработки ДДЗ, как правило, разрабатываются на основе специализированных программных комплексов – ГИС-пакетов, а также распространенных графических программных средств. Подобные программные средства ГИС, преимущественно коммерческие, широко используются в самых разнообразных научно-исследовательских, производственных и образовательных организациях. Если в задачу входит дешифрирование снимков, то предпочтение следует отдавать

интегрированным ГИС, включающим подсистему обработки изображений. Интегрированные растрово-векторные ГИС-пакеты предоставляют пользователям, с одной стороны, различные возможности по обработке снимков, обеспечиваемые заложенными в них средствами ГИС-анализа, с другой – средства подготовки данных для ГИС. Как правило, эти средства включают некоторый обязательный стандартный набор, по большей части интерактивных процедур предварительной коррекции, трансформирования и классификации 29 снимков с визуальным контролем их выполнения на экране монитора в комплексе с другими растровыми и векторными ГИС-технологиями. Все расширения или модификации этого набора предназначены для решения задач различных уровней сложности при всестороннем использовании данных дистанционного зондирования. Среди полнофункциональных ГИС-пакетов подобного рода выделяются ERDAS Imagine, Global Mapper, ENVI (Environment for Visualizing Images). С точки зрения возможностей цифровой обработки снимков эти пакеты отличаются в основном удобством пользовательского интерфейса [24].

3.3. Материалы и методы исследования.

Исходные данные для обработки и анализа были взяты с портала геологической службы США. И представляют собой снимки со спутника Landsat – 8 в разных диапазонах длин волн. Снимки необходимые для измерения индекса NDVI находятся в диапазонах ближнего инфракрасного и красной области спектра, а также они должны удовлетворять следующим критериям:

1. На снимках не должно быть облачности;
2. Снимки должны быть взяты за период май – август.

Для анализа используются программные пакеты QGIS и SAGA GIS. Это свободные географические информационные системы с открытым кодом,

предназначенные для обработки, редактирования, создания, визуализации и анализа геопространственной информации.

Для расчетов всех типов индексов для начала необходимо использовать значения отражения в соответствующей области спектра, выраженные в реальных единицах измерения. Однако все данные Landsat представлены в виде растровых изображений, построенных в безразмерных условных единицах (Digital Numbers – DN). Для пересчета из DN в отражательную способность используется формула 13.

$$L\lambda = MLQ_{cal} + Al \quad (13)$$

Где ML – коэффициент пересчета, значение которого указано в файле с метаданными, прилагающемся к каждому набору данных Landsat (в строке RADIANCE_MULT_BAND_x, где вместо x- номер соответствующего канала), Q_{cal} – значение DN, Al – константа, значение которой находится в файле метаданных в строке RADIANCE_ADD_BAND_x.

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Расчет NDVI выполняется по формуле 12:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (12)$$

где: NIR отражение в ближней инфракрасной области спектра, а RED- отражение в красной области спектра.

Все действия производится в программном пакете. SAGA GIS, в нем все полученные растры обрабатываются с помощью калькулятора растров. Открыть модуль калькулятора растров можно через пункт меню «Geoprocessing/Grid/ Calculus/Grid Calculator» и в нем произвести все вычисления по формулам 13 и 12. А также провести итоговый анализ,

выполнив расчет разницы индексов за разные года, и по итоговым данным провести анализ.

3.4. Результаты обработки.

После анализа и обработки вышеописанными методами были получены следующие результаты.

Примеры изображений, полученных с помощью прибора HRV, приведены на рисунках 3.1. – 3.4.

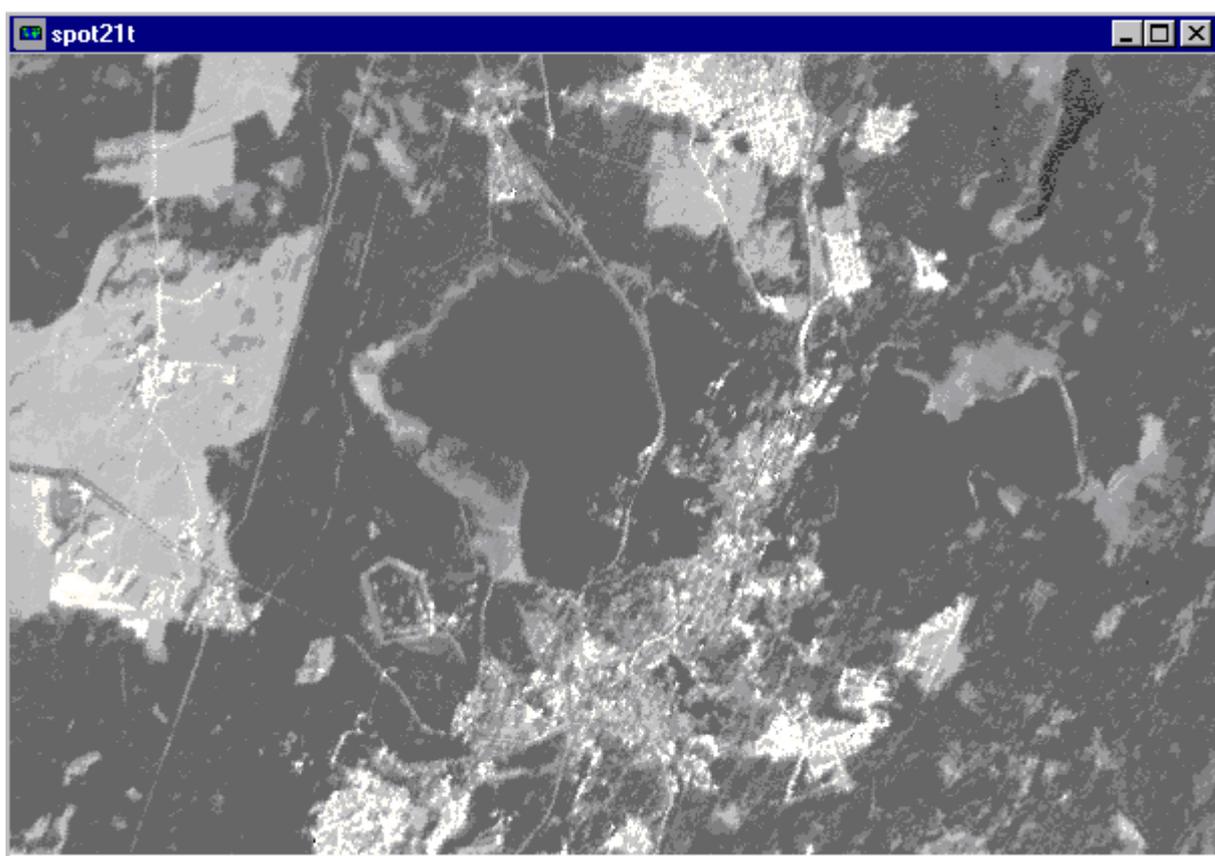


Рисунок .3.1. Прибор HRV, Диапазон 1, 16/08/26. Окрестности пос. Токсово.

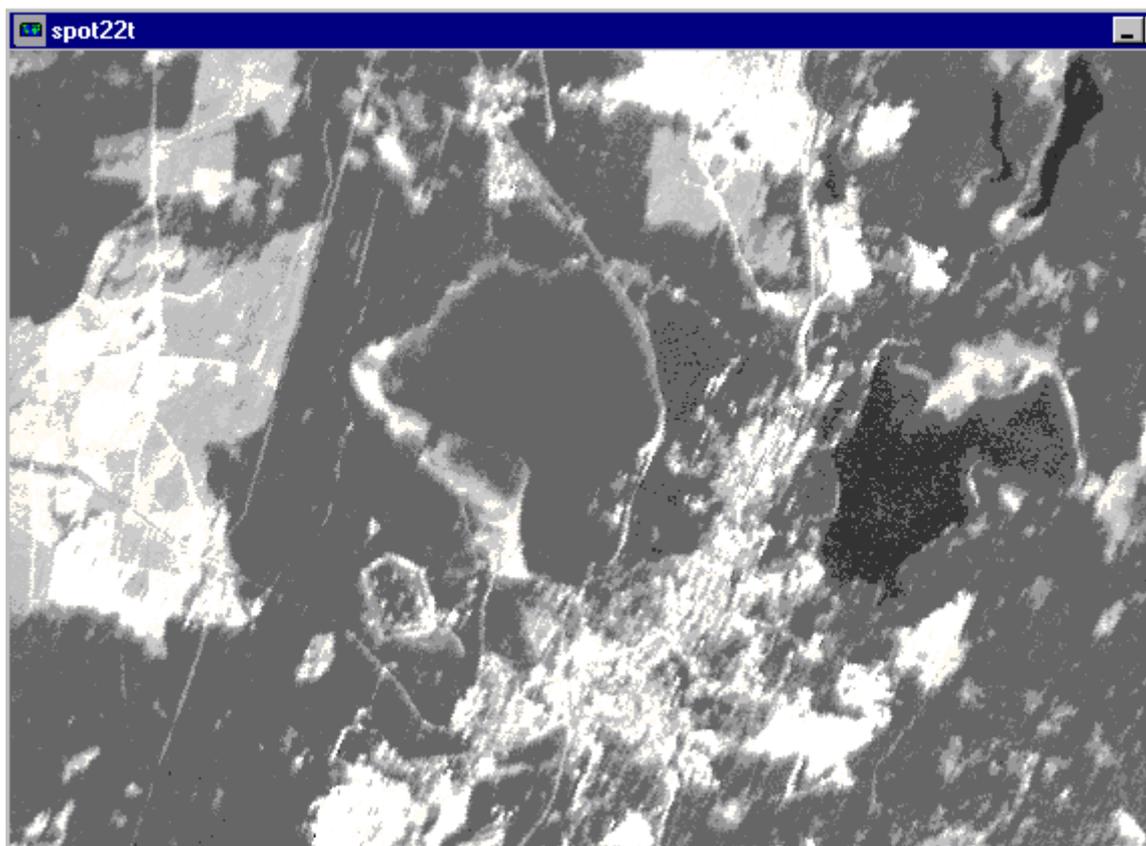


Рисунок.3.2 Прибор HRV, Диапазон 2, 16/08/26. Окрестности пос. Токсово

На данном снимке присутствует не большая облачность.

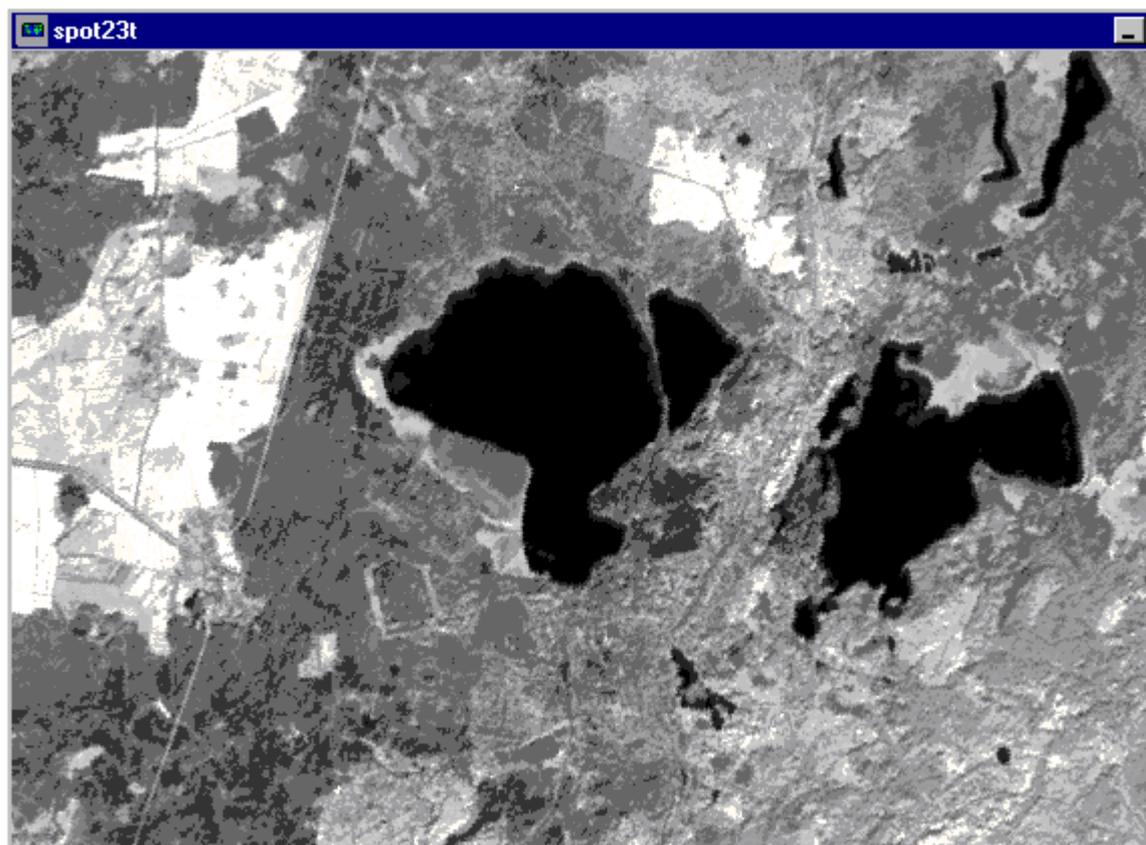


Рисунок 3.3 Прибор HRV, Диапазон 3, 16/08/26. Окрестности пос. Токсово

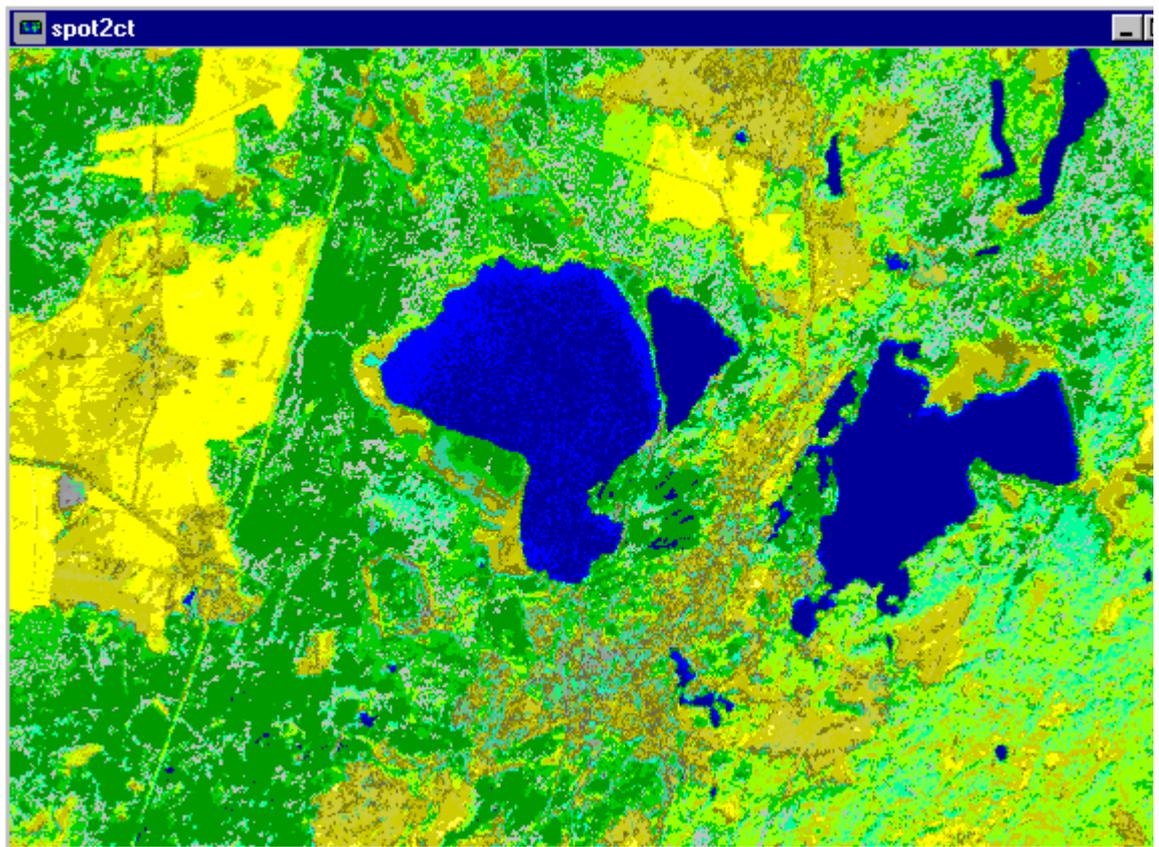


Рисунок 3.4. Прибор HRV, 16/08/26. Окрестности пос. Токсово.

Рисунок 3.4 получен при синтезе изображений рисунок 3.1 – 3.3 с помощью модуля COMPOSIT ГИС IDRISI.

На данном снимке мы видим, что большая часть территории покрыта хвойными лесами, часть территории занимают вторичные мелколиственные леса, а так же з можно заметить свежую вырубку. Так же на территории пос. Токсово находятся несколько озер.

Пример обработанных данных, полученных с помощью прибора МСУ-Э, представлен на рисунке 3.5

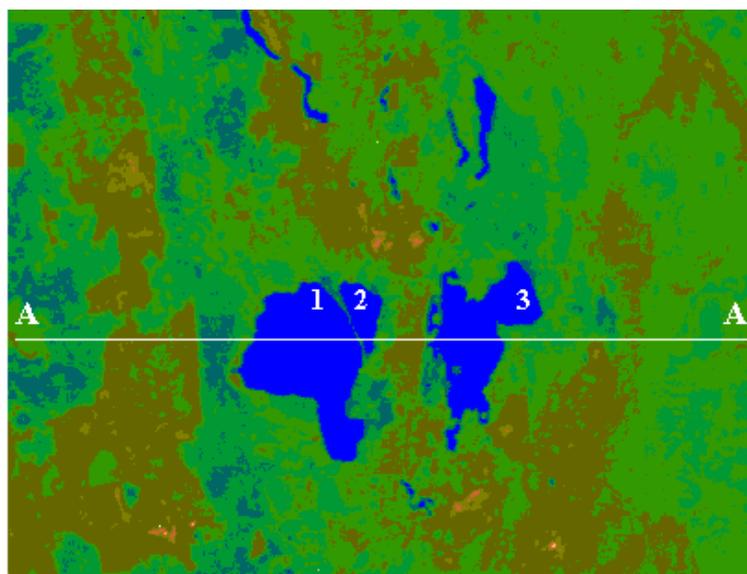


Рисунок 3.5. Фрагмент снимка 13.05.19 спутника Космос-1939 (канал 3) и изменение сигналов по профилю АА.. Район пос.Токсово, Ленинградская обл. 1-Кавголовское оз., 2-Курголовское оз., 3-Оз.Хеппо-Ярви.

Примеры снимков полученных с помощью прибора MSS установленного на спутнике LANDSAT-8.

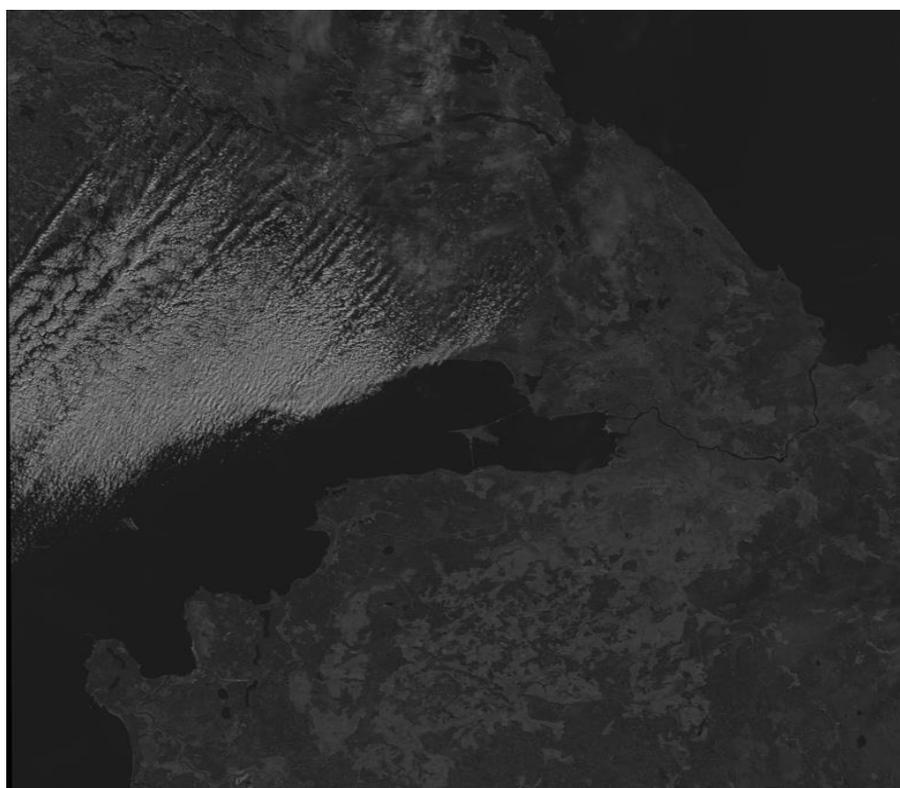


Рисунок 3.6. Фрагмент снимка 10.05.2013 со спутника LANDSAT-8. Район Санкт-Петербург и Ленинградская область.

На данном снимке часть территории покрывают облака.

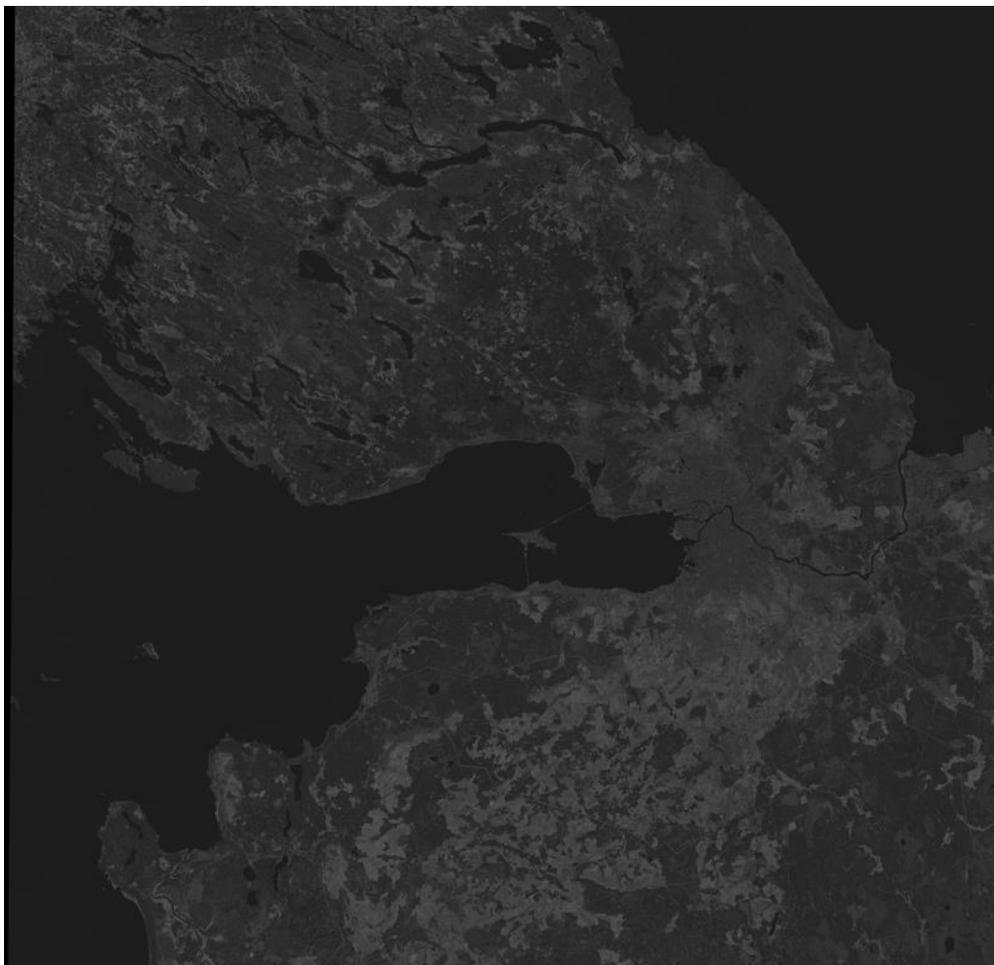


Рисунок 3.7. Фрагмент снимка 24.05.2021 со спутника LANDSAT-8. Район Санкт-Петербург и Ленинградская область.

Результаты обработки данных прибора SMMR показаны на рисунке 3.8



Рисунок 3.8. Данные SMMR за один день.

02.08.2019. Канал 18 ГГц/Н.

Заключение.

В данной работе были изложены базовые понятия дистанционного зондирования, физические основы дистанционных методов зондирования Земли. Освещено понятие коэффициента спектральной яркости и спектральной плотности энергетической яркости, электромагнитного излучения и его взаимодействие с атмосферой, а так же с подстилающей поверхностью и т. д. Кроме этого, рассмотрены основные технологии получения снимков и наиболее важные характеристики сканеров, описаны этапы предварительной обработки цифровых снимков, классификации и визуального дешифрирования снимков.

Главным преимуществом вегетационных индексов является легкость их получения и широкий диапазон решаемых с их помощью задач. Так, NDVI часто используется как один из инструментов при проведении более сложных типов анализа, результатом которых могут являться карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты ландшафтов и природных зон, почвенные, аридные, фито-гидрологические, фенологические и другие эколого-климатические карты. Также на его основе возможно получение численных данных для использования в расчетах оценки и прогнозирования урожайности и продуктивности, биологического разнообразия, степени нарушенности и ущерба от различных стихийных бедствий, техногенных аварий и т. д.

Следует отметить, что любые вегетационные индексы не дают абсолютных количественных показателей исследуемого свойства, и их значения зависят от характеристик сенсора (ширина спектральных каналов, разрешения), условий съемки, освещенности, состояния атмосферы. Они дают только относительные оценки свойств растительного покрова, которые могут быть интерпретированы и с привлечением полевых данных пересчитаны в абсолютные. Многие индексы, корректирующие влияние почвы, требуют

предварительной атмосферой коррекции. Если вы планируете использовать вегетационные индексы для долговременного мониторинга, вы должны очень внимательно проанализировать вариабельность почв и выполнить атмосферную коррекцию.

Совокупность технических средств и технологических процессов космической съемки образует информационную систему получения сведений о земной поверхности, необходимых для изучения природных ресурсов, мониторинга различных природных процессов, охраны окружающей среды, решения других народнохозяйственных и научных задач. Рассмотрена спектральная область от 400 до 2500 нм, включающая ближний ИК участок спектра. Данные работы дают возможность составить общее представление о закономерностях формирования поля восходящих отраженных излучений. Дальнейшие исследования в данной области должны быть направлены на получение экспериментальных данных, которые бы в итоге позволили разработать общенаучный и специализированные статистически обеспеченные каталоги оптических характеристик природных и искусственных объектов.

Список используемых источников.

1. А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. Геоматика №3. 2009
2. В.Н. Антонов. Л.А. Сладких. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ. Геоматика №3. 2009.
3. Дистанционное зондирование земли : учеб. пособие / Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.
4. Бондур В.Г. Основы аэрокосмического мониторинга окружающей среды // Курс лекций.- М.- Московский государственный университет геодезии и картографии.- 2006.- 369 с.
5. Гонсалес Р, Вудс Р. Цифровая обработка изображений // Москва, Техносфера.- 2006.- 813 с.
6. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. - М.: ИКИ РАН, 2016. - 208 с.
7. Росс Ю.К., Егоров В.В. Методические вопросы аэрокосмического зондирования Земли из космоса, 1983, № 2, с. 58-64.
8. Балтер Б.М., Егоров В.В. Статистическая оценка состояния природных объектов по данным дистанционных измерений Исследование Земли из космоса, 1981, 3, с. 46-55.
9. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. - М.: ИКИ РАН, 2016. - 208 с.
10. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М-Л. изд. АН СССР, 1947, 271 с.
11. Кондратьев К.Я., Федченко П.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л. Гидрометеоиздат, 1982, 216 с.

12. Харин Н.Г. Дистанционные методы изучения растительности. М. Наука, 1975, 132 с.
13. Виноградов Б.В. Космические методы изучения природной среды. М. Наука, 1976, 288 с.
- 14.. Аванесов Г.А. Проблемы аэрокосмической спектрометрии земной поверхности. Исследование Земли из космоса, 1980, №2, с.66-75
15. Кондратьев К.Я., Федченко П.П. Возможности использования спектров отражения почв для изучения их свойств. Исследования Земли из космоса, 1980, № I, с. П4-124.
16. Тищенко А.П., Степанова Г.И. К вопросу о методике составления карт отражательной способности почвенного покрова -Исследование Земли из космоса, 1980, 3, с. 34-39.
17. Мишев Д.Н. Дистанционные исследования на Землята от космоса -София, БАН, 1981, 206 с.
18. Книжников Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований : учеб. для студентов вузов / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – М. : Академия, 2004. – 336 с
19. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды : учеб. пособие / В. И. Козинцев [и др.] ; под ред. В. Н. Рождествина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с
20. Савиных В. П. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В. П. Савиных, В. Я. Цветков. – М. : Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. – 228 с
21. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие / О. С. Токарева. – Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2010. – 148 с.
22. Чандра А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с

23. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухонин. – М. : Логос, 2001. – 264 с.
24. Алтынов А.Е., Малинников В.А., Попов С.М., Стеценко А.Ф. Спектрометрирование ландшафтов.// Учебное пособие для студентов М.: Изд. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2010 г., 120 с.
25. Зиман Я.Л. Исследование природных ресурсов Земли из космоса. — М.: Знание, 1980
26. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. М.: Министерство обороны СССР, 1986
27. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П., Топчиев А.Г. Биосфера: Методы и результаты дистанционного зондирования. М. "Наука". 1990. 224 с.
28. Гнусарев Н.В., Шабиков Е.И., Григорьев А.Н. Метод определения спектральных характеристик объектов при решении задачи космического гиперспектрального наблюдения // Информация и космос. 2008. № 4. С. 77–82.
29. Григорьев А.Н. Методика формирования спектральных характеристик объектов на основе мультитременных данных космической гиперспектральной съёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 175–184.
30. Кондратьев С.А., Рыжиков Д.М., Тимофеев А.С., Чичкова Е.Ф. Идентификация типов подстилающей поверхности для оценивания территорий по данным спутниковой съёмки LANDSAT-8 на примере водосбора реки Нарвы // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. № 653. С. 121–125.
31. Жуков ВВ., Егоров С.Б. Многозональные аэрокосмические съёмки Земли.- М.- 1981.- 302с

32. Марчуков В.С. Автоматизированные методы оценки динамики пространственного распределения растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга // Исследование Земли из космоса.- 2010.- № 2.- с. 63-74
33. Титаров П.С. Метод приближенной фотограмметрической обработки сканерных снимков при неизвестных параметрах сенсора // Геодезия и картография, 2002. № 6. С. 30–34.
34. Назаров А.С. Фотограмметрия: учебное пособие для студентов вузов. Минск: Тетра-Системс, 2006.
35. Crippen, R. E. (1990) "Calculating the Vegetation Index Faster," Remote Sensing of Environment, vol 34., pp. 71-73
36. Nurit Agama, William P. Kustas, Martha C. Anderson, Fuqin Li, Christopher M.U. Neale. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery
37. Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Merzlyak M.N. Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS//Remote Sensing of Environment. - 1996. - №58. P.289-298.
38. Daughtry C. S. T., Walthall C. L., Kim M. S. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance //Remote Sensing of Environment. - 2000. - №74. P.229–239
39. Kaskaoutis DG, Rashki A, Houssos EE, Mofidi A, Goto D, Bartzokas A, Francois P, Legrand M. Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran// Climate Dynamics.- 2015.- vol. 45(1-2).- pp. 407-424.
40. Kiage LM, Liu KB, Walker ND, Lam N, Huh OK. Recent land-cover/use change associated with land degradation in the Lake Baringo catchment, Kenya, East Africa: evidence from Landsat TM and ETM+// International Journal of Remote Sensing.- 2007.- vol. 28(19).- pp. 4285-309.
- 41.. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование, [Электронный ресурс]. Режим доступа:

- http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20&table=news, доступ свободный.
42. дистанционное зондирование, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://loi.sccc.ru/gis/gt/9.html> , доступ свободный.
43. Автоматизированное дешифрирование, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.gisa.ru/12956.html.
44. Королев Ю.К. Как подойти к обработке снимков, электронные текстовые данные/ArcReview, современные геоинформационные технологии, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://loi.sccc.ru/gis/dataplus/arcrev/Number_11/2_Snimok.html , доступ свободный.