

Ввод и обработка данных дистанционного зондирования Земли

Лектор: к.т.н. Токарева Ольга Сергеевна

Лекция 1

Основная литература

- Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 148 с.
- Ввод и обработка данных дистанционного зондирования: Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Ввод и обработка данных дистанционного зондирования» для студентов V курса, обучающихся по специальности 230201 «Информационные системы и технологии», специализации «Геоинформационные системы» / сост. О.С. Токарева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 25 с.
- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
- Лурье И.К., Косиков А.Г. Теория и практика цифровой обработки изображений / Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: Научный мир, 2003. - 186 с.
- Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.

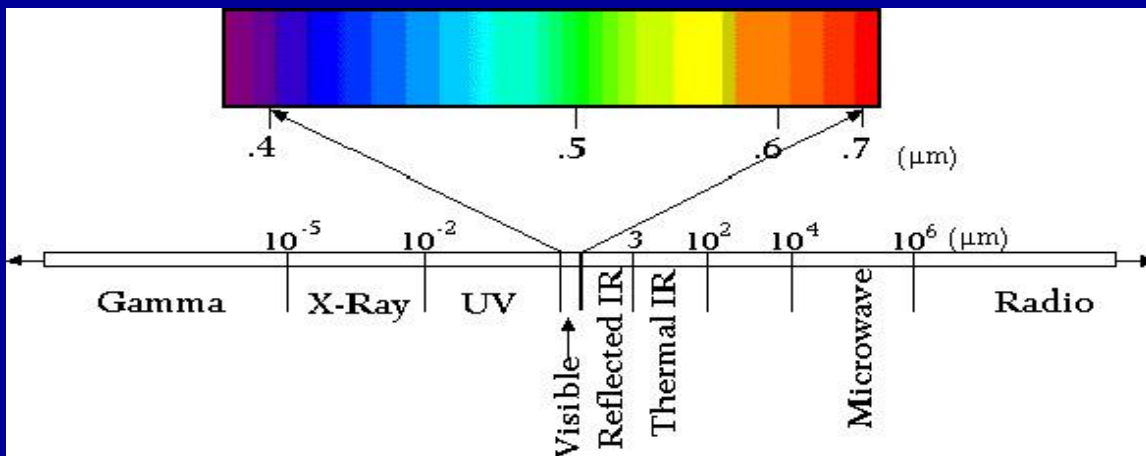
Дополнительная литература

- Замятин А.В., Марков Н.Г. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 176 с.
- Joseph J. Fundamental of Remote Sensing. – Hyderabad: Universities Press. – 2011 – 490 с.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote Sensing and Image Interpretation. – New Delhi: Wiley India Pvt. Ltd. – 2011. – 758 с.
- Jensen J.R. Remote Sensing of the Environment. – Pearson Education. – 2007. – 592 с.

Интернет-ресурсы

- Сайт геологической службы США // <http://usgs.gov>, просмотр и заказ снимков // <http://glovis.usgs.gov>, <http://earthexplorer/usgs.gov>
- Сайт неформального некоммерческого сообщества специалистов в области ГИС и ДЗЗ // <http://gis-lab.info>
Документация <http://gis-lab.info/docs.html#rs>
Статьи <http://gis-lab.info/qa.html#rs>
<http://gis-lab.info/qa/earthexplorer-work.html>
- Сайт Инженерно-технологического центра «СканЭкс» // <http://scanex.ru>
<http://search.kosmosnimki.ru/>
- Сайт компании «Совзонд» // <http://sovzond.ru>
- Журнал «Геоматика» // <http://www.geomatica.ru>
- Журнал «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» // http://d33.infospace.ru/d33_conf/sbornik_index.html
- [ftp.vt.tpu.ru/study/Tokareva/public/Earth remote sensing](ftp.vt.tpu.ru/study/Tokareva/public/Earth_remote_sensing)

Дистанционное зондирование Земли из космоса - определение



Уникальные св-ва объектов зависят от:

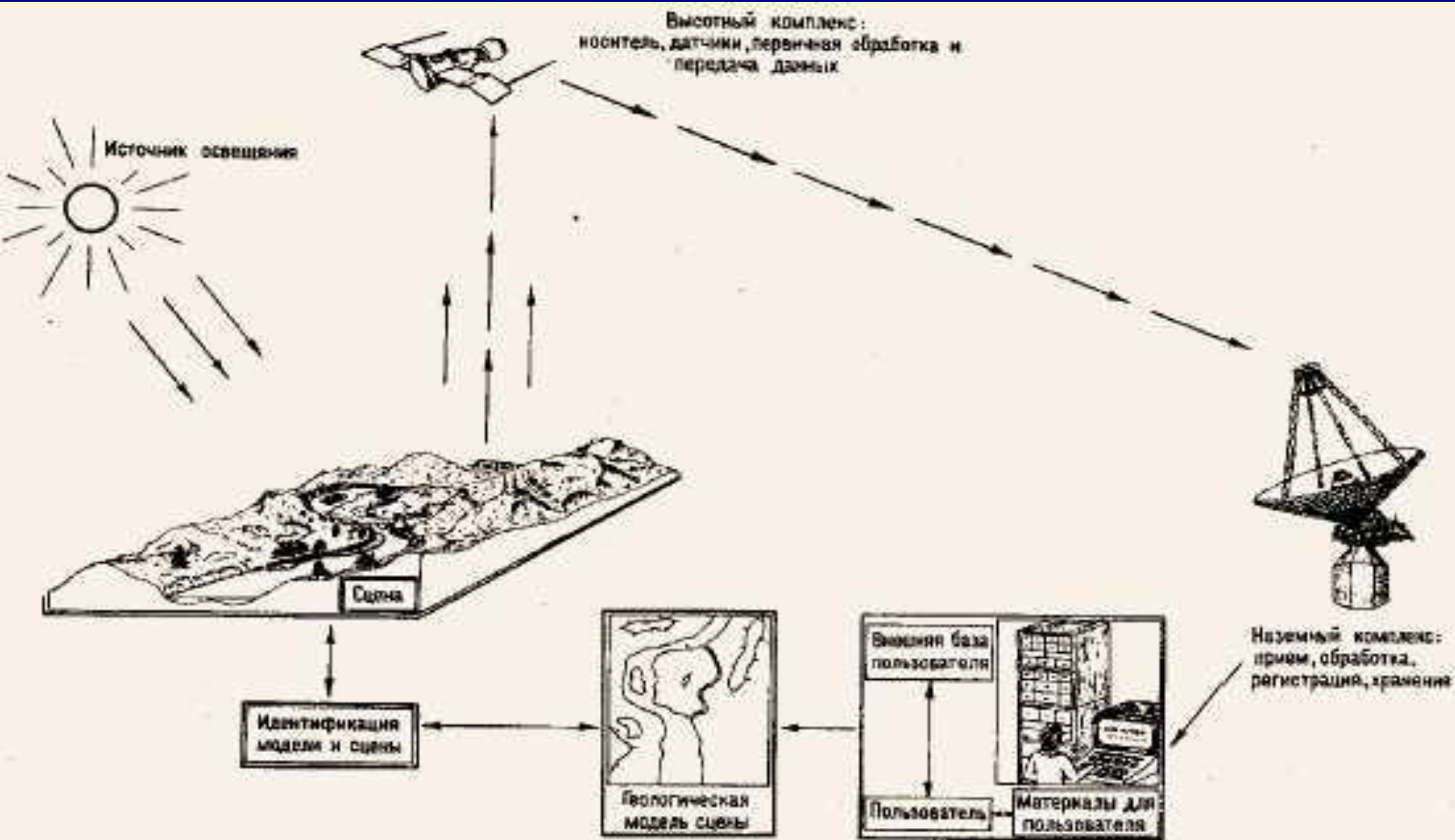
- Свойств материала (структурных, физических, химических).
- Шероховатости поверхности.
- Угла падения света.
- Длины волны излучения.

ДЗЗ – наблюдение и измерение энергетических и поляризационных характеристик излучения объектов в различных диапазонах ЭМ спектра с целью определения местоположения, вида, свойств и временной изменчивости объектов окружающей среды без непосредственного контакта с ними измерительного прибора.

ультрафиолетовый	0.1 нм - 0.4 мкм
видимый	0.4 мкм - 0.7 мкм
инфракрасный	0.7 мкм - 1000 мкм
микроволновый	1000 мкм - 1000000 мкм

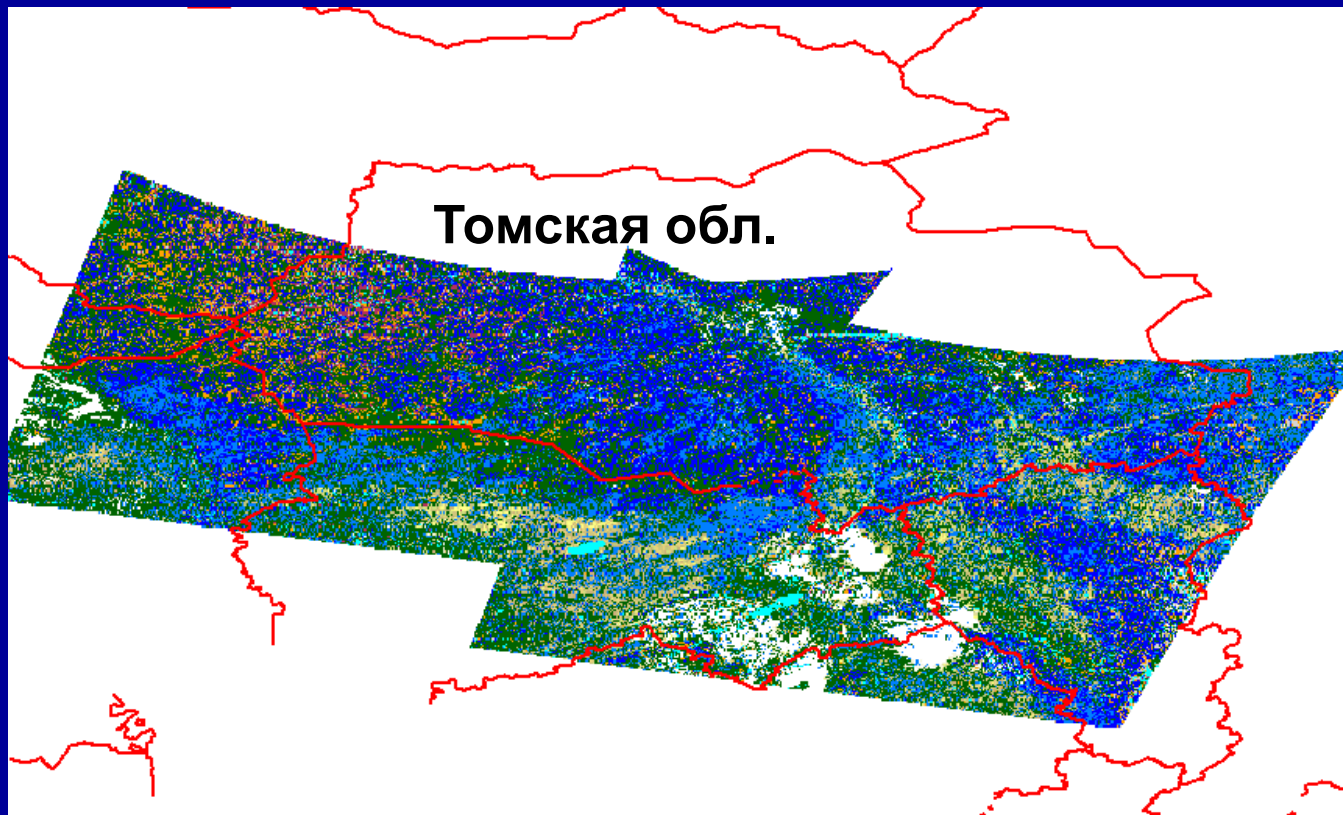
Диапазон регистрируемого излучения

Принципиальная схема дистанционного зондирования



Характеристики данных ДЗЗ

- Объективность;
- Актуальность;
- Масштабность;
- Экстерриториальность;
- Доступность.



Обработанные
космические снимки со
спутника Ресурс-О1
(сканер МСУ-СК)

Данные ДЗЗ в исследованиях окружающей среды

- Изучение атмосферы: осадки, распределение и тип облаков, концентрации газов и т.д.;
- Изучение земной поверхности: топография, температура, альbedo, тип и состояние почвы, тип и состояние растительности, антропогенные нагрузки и т.д.;
- Изучение океана: температура, топография, цвет водной поверхности и т.д.;
- Изучение криосферы: распределение, состояние и динамические подвижки снега, морского льда, айсбергов, ледников.

Тематическая обработка данных ДЗЗ

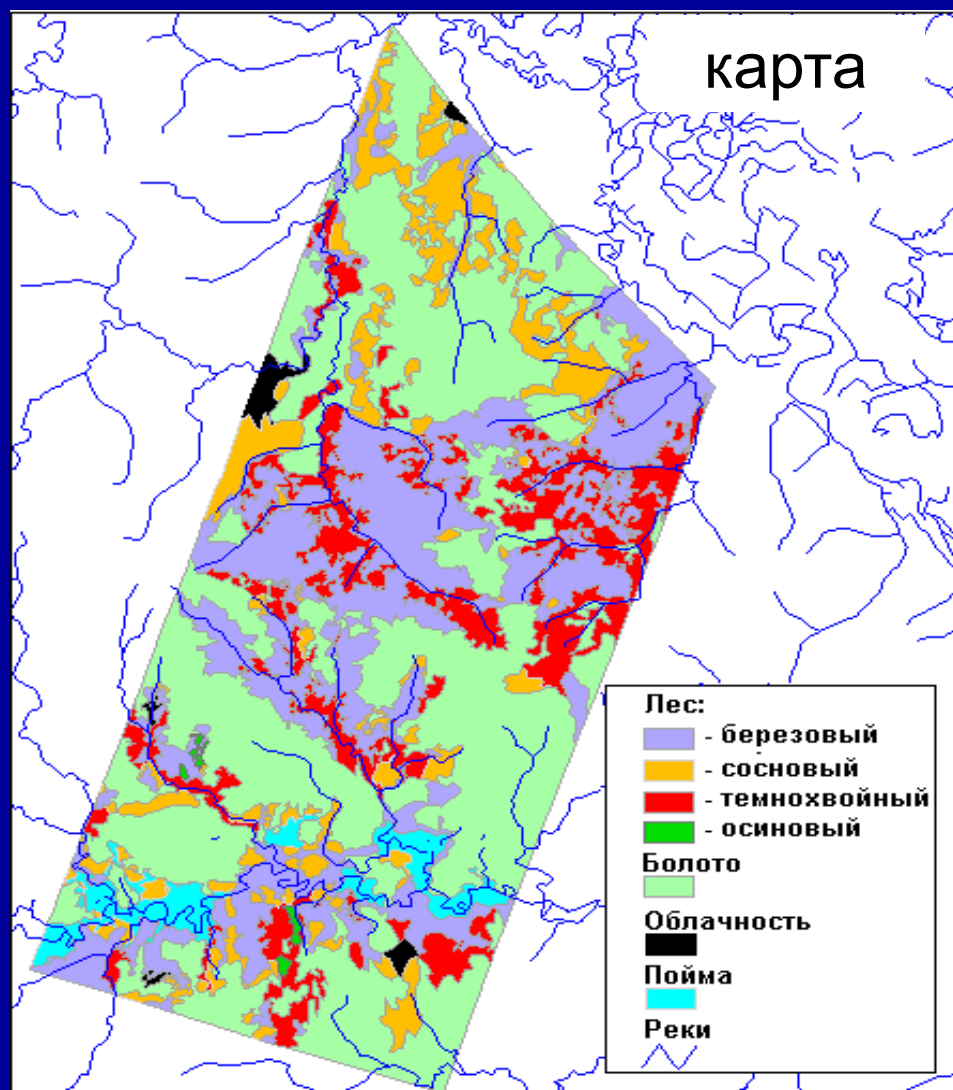
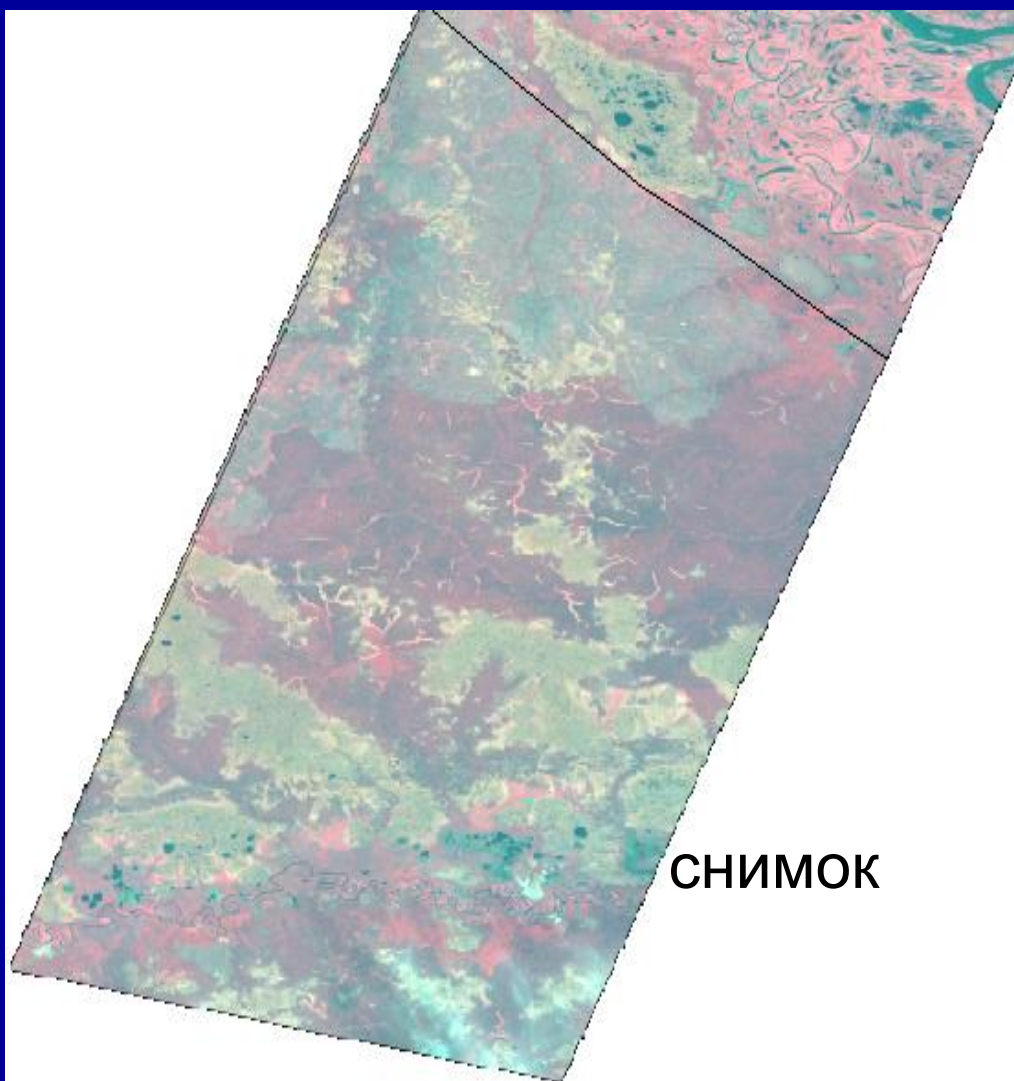
Решение задач тематической обработки является этапом анализа (интерпретации) изображения, прошедшего предварительную обработку, и конечной целью ставит реализацию процесса обнаружения и распознавания обнаруженных объектов, называемого на практике *дешифрированием изображения*.

Конечный результат дешифрирования - тематическая карта территории, представленной на снимке, с нанесенными на ней дешифрированными распознанными объектами

Примеры тематических проектов на основе спутниковых данных:

- построение ландшафтных карт;
- построение карт нарушенности растительного покрова;
- построение карт почвенного покрова;
- выявление загрязненных территорий и акваторий;
- изучение геологического строения территорий,
- выявление геологических структур и др.

Космический снимок со спутника Ресурс-01 (сканер МСУ-Э) и карта, построенная в результате его обработки



Обнаружение незаконных вырубок леса



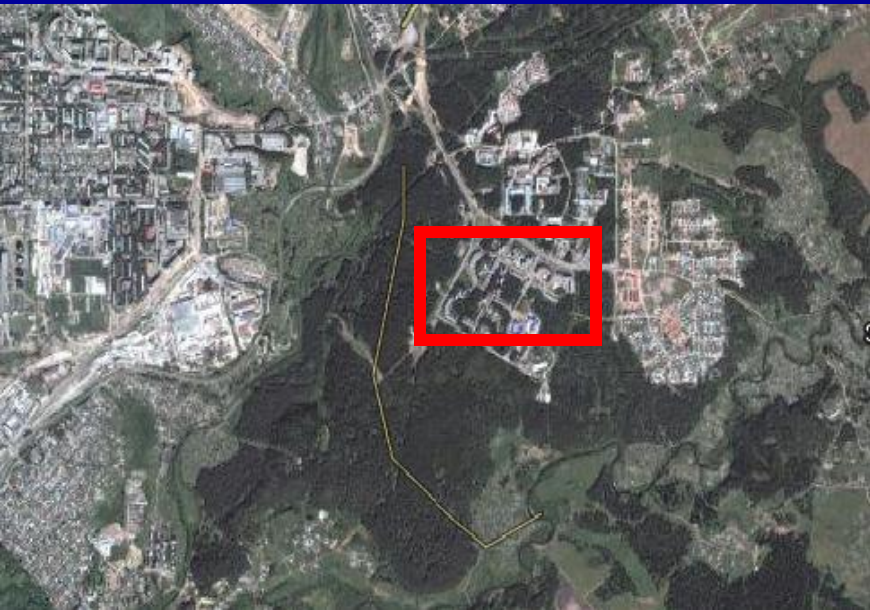
Огромный ущерб лесам причиняется незаконными порубками леса.

Оперативная информация, получаемая с космических спутников, позволяет вовремя выявить случаи незаконной вырубки леса без привлечения дорогостоящих вертолетных облетов.

Вырубки изображены светлыми прямоугольниками

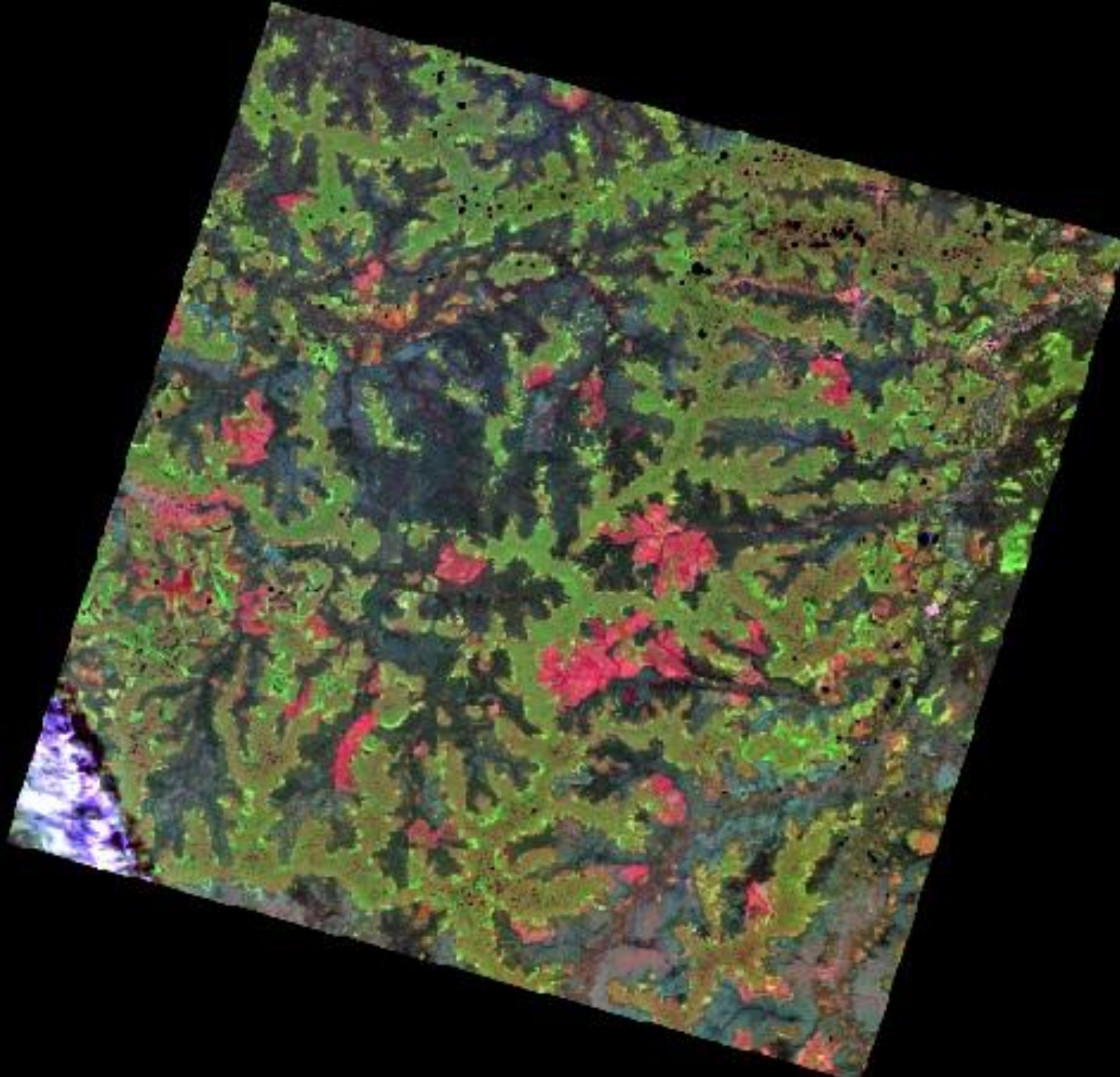
Изучение городских территорий

На снимках высокого пространственного разрешения можно рассмотреть даже небольшие изменения



Увеличенный фрагмент изображения одного из районов г. Томска

Landsat
19/09/1999



Обнаружение и оценка последствий разливов нефти

разлив нефти на фото



СНИМОК



обработанный снимок



Черным цветом выделены обнаруженные разливы нефти

Подтопление участков леса

Дешифрирование и сравнение разновременных КС позволяет установить изменение гидрологического режима в результате, например, строительства лесной дороги с перекрытием водотока, ведущее к гибели подтопленных деревьев



фото



Подтопление территории на космическом снимке (здесь выделено более темным цветом)



Загрязнение атмосферы в результате сжигания попутного газа на нефтяных месторождениях



Факелы на нефтяных месторождениях являются источниками хронического загрязнения атмосферы в течении длительного времени. Вокруг них формируются обширные шлейфы аэрозольного загрязнения атмосферы.

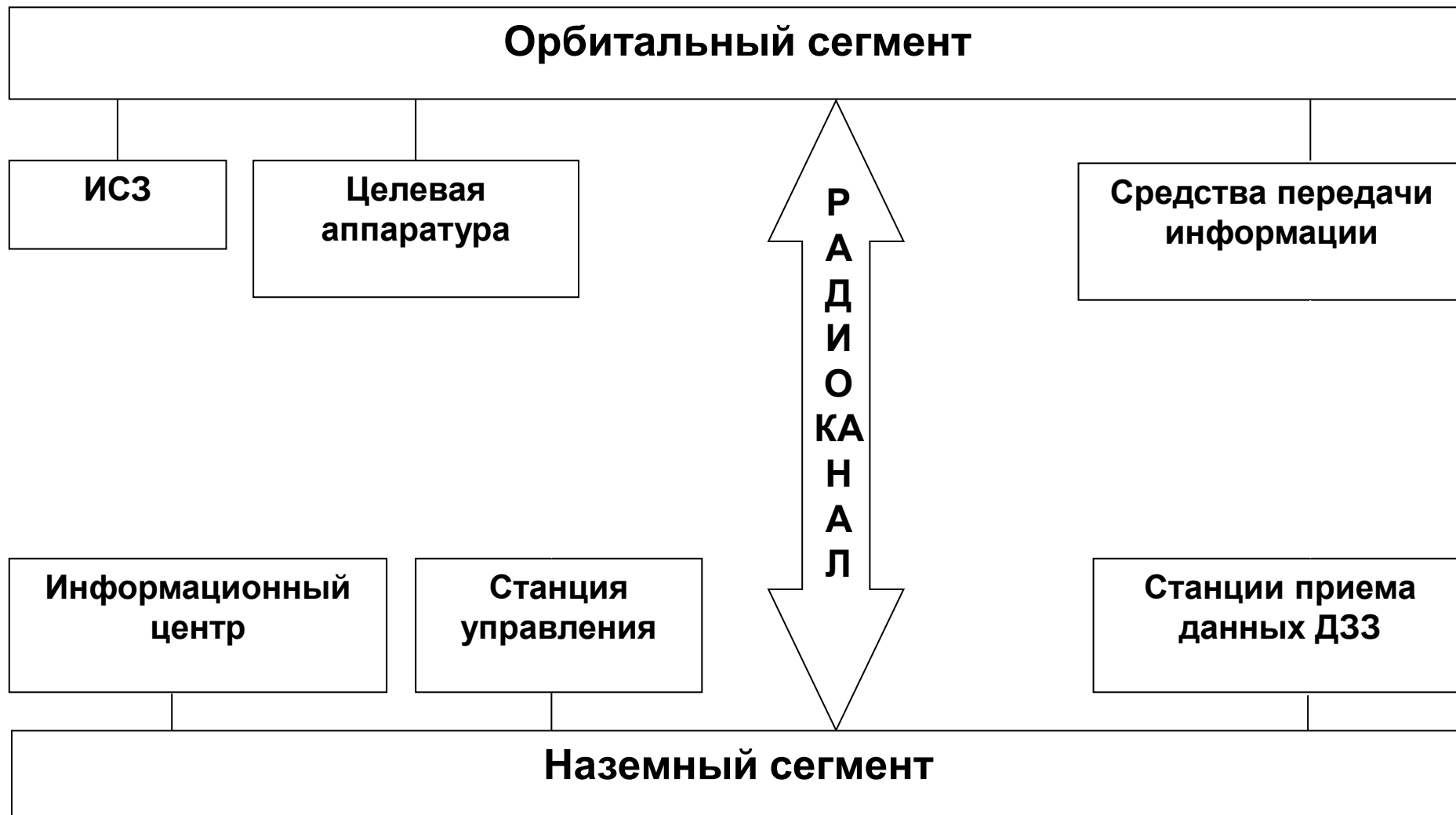
Факелы хорошо видны на космических снимках, при этом возможна оценка объемов сжигаемого газа

Ввод и обработка данных дистанционного зондирования Земли

Лектор: к.т.н. Токарева Ольга Сергеевна

Лекция 2

Структура системы ДЗЗ



Способы передачи данных

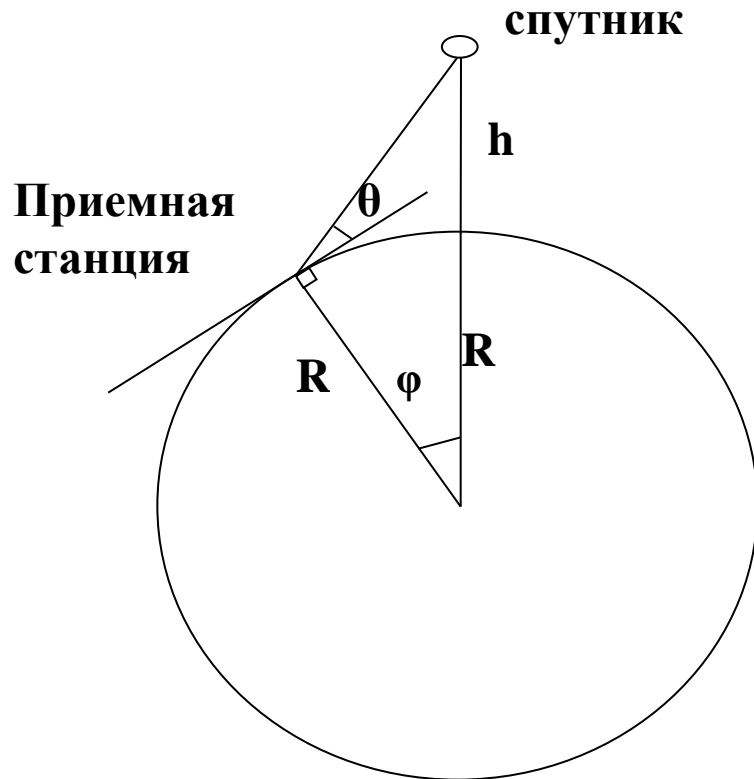
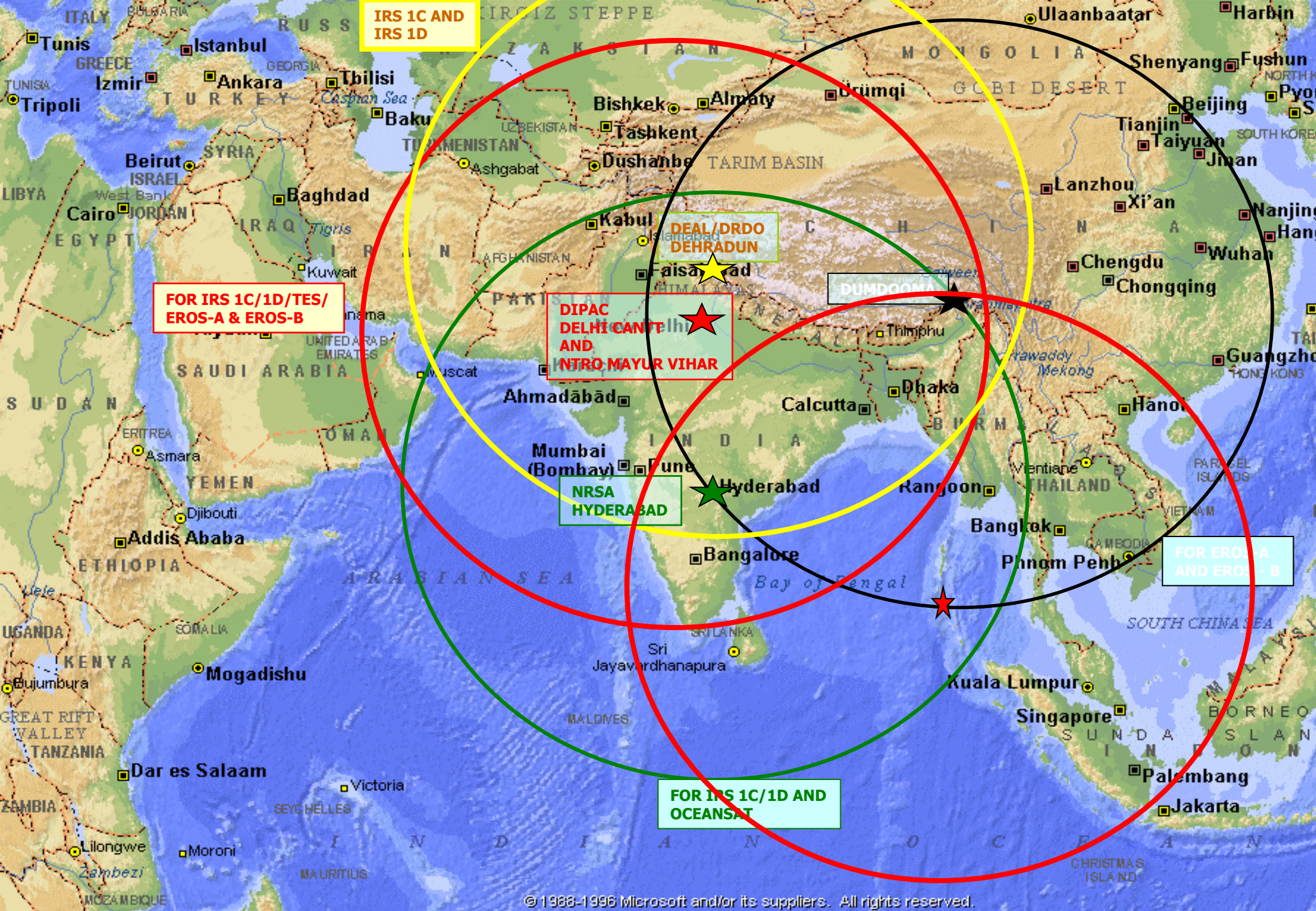


Схема расположения спутника относительно приемной станции

Угловое расстояние φ между спутником и станцией определяется из уравнения:

$$\cos(\theta + \varphi) = R * \cos(\theta) / (R + h)$$

где θ – угол подъема линии прямой видимости.



IRS 1C AND
IRS 1D

FOR IRS 1C/1D/TES/
EROS-A & EROS-B

DIPAC
DELHI CANTT
AND
INTRO MAYUR VIHAR

DEAL/DRDO
DEHRADUN

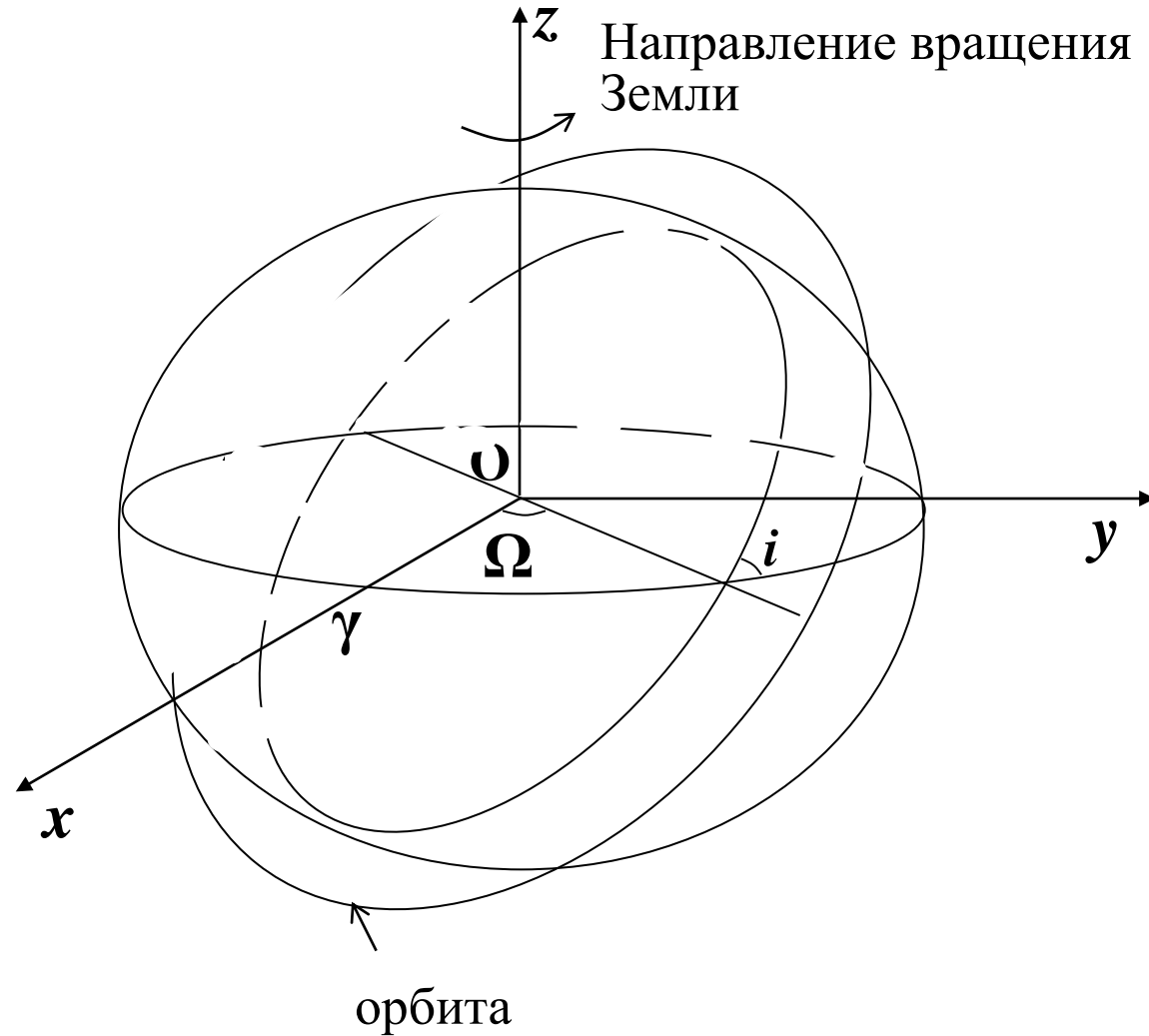
DUMDOOMA

NRSA
HYDERABAD

FOR EROS-A
AND EROS-B

FOR IRS 1C/1D AND
OCEANSAT

Параметры орбит ИСЗ



Типы орбит ИСЗ (по высоте)

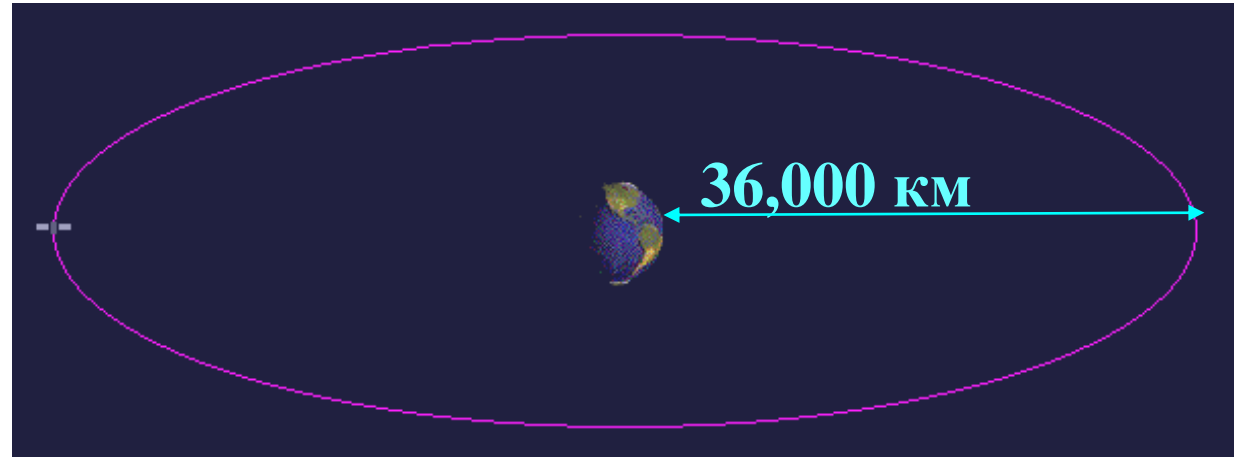
Низкая околоземная орбита (НОО, [англ. low-Earth orbit, LEO](#)) — космическая орбита вокруг Земли, имеющая высоту над поверхностью планеты в диапазоне от 160 км (период обращения около 88 минут) до 2000 км (период около 127 минут)



Высота 35 786 км над уровнем моря обеспечивает спутнику период обращения, равный периоду вращения Земли относительно звёзд ([Звёздные сутки](#): 23 часа 56 минут 4,091 секунды).

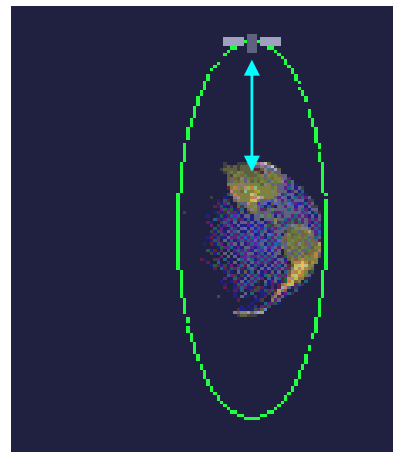
Типы орбит ИСЗ

GEO

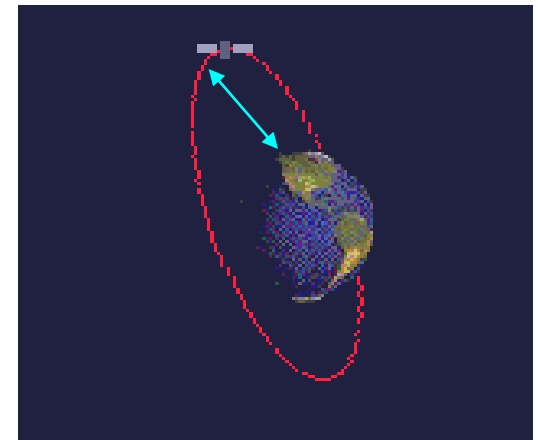


геостационарная

LEO



**150-2000
км**

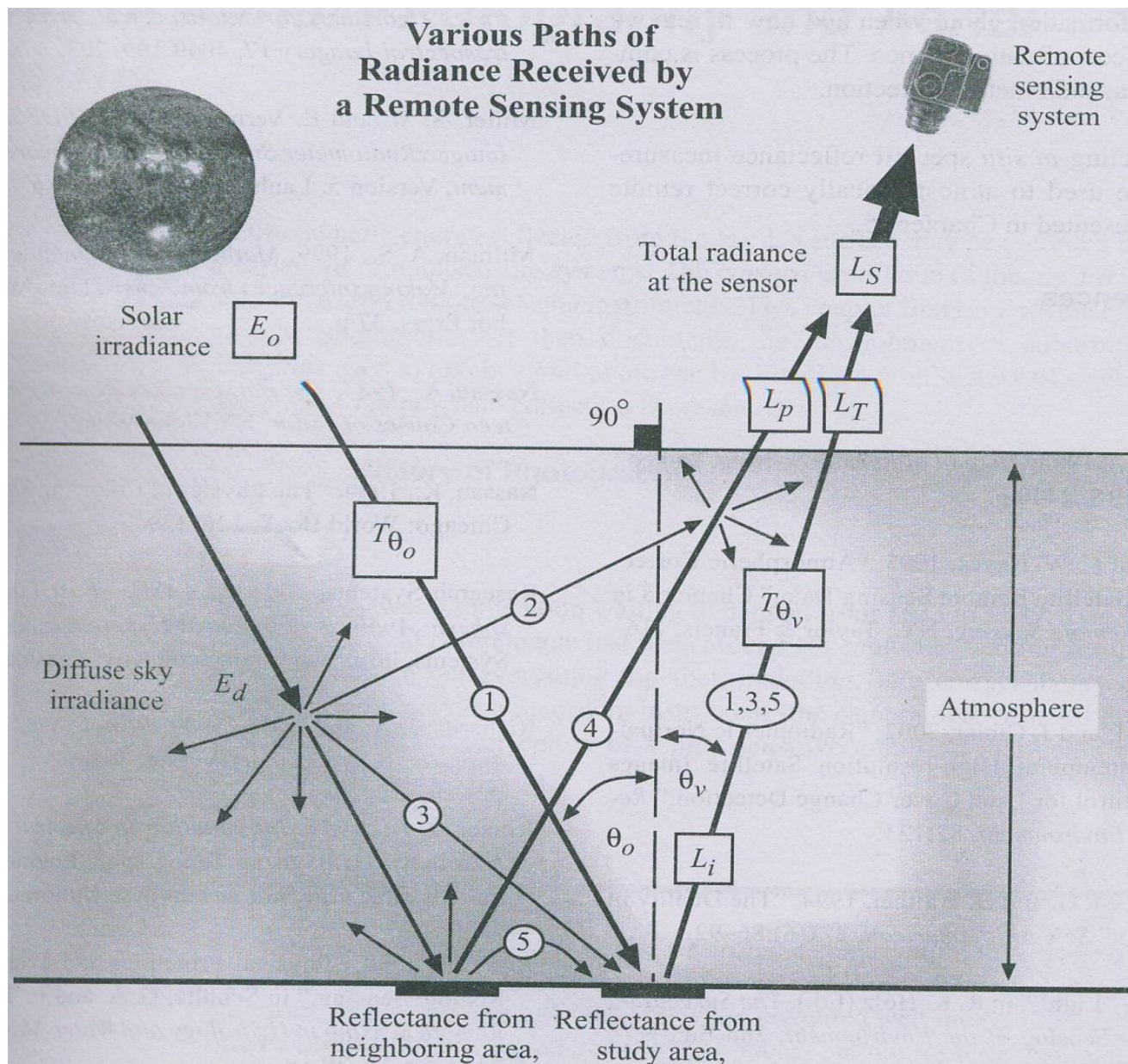


полярно-орбитальные

Физические основы ДЗЗ

Источники ЭМ волн:

- собственное излучение Земли
- излучение Солнца, отраженное от поверхности Земли
- искусственное излучение, отраженное от поверхности Земли



Физические основы ДЗЗ

Отраженное от поверхности солнечное излучение регистрируется в диапазонах:

- ближнем ультрафиолетовом
- видимом (0,38–0,72 мкм)
- ближнем (0,72–1,3 мкм) ИК
- среднем (1,3–3 мкм) ИК
- дальнем (тепловом, 7,0–15,0 мкм) ИК.

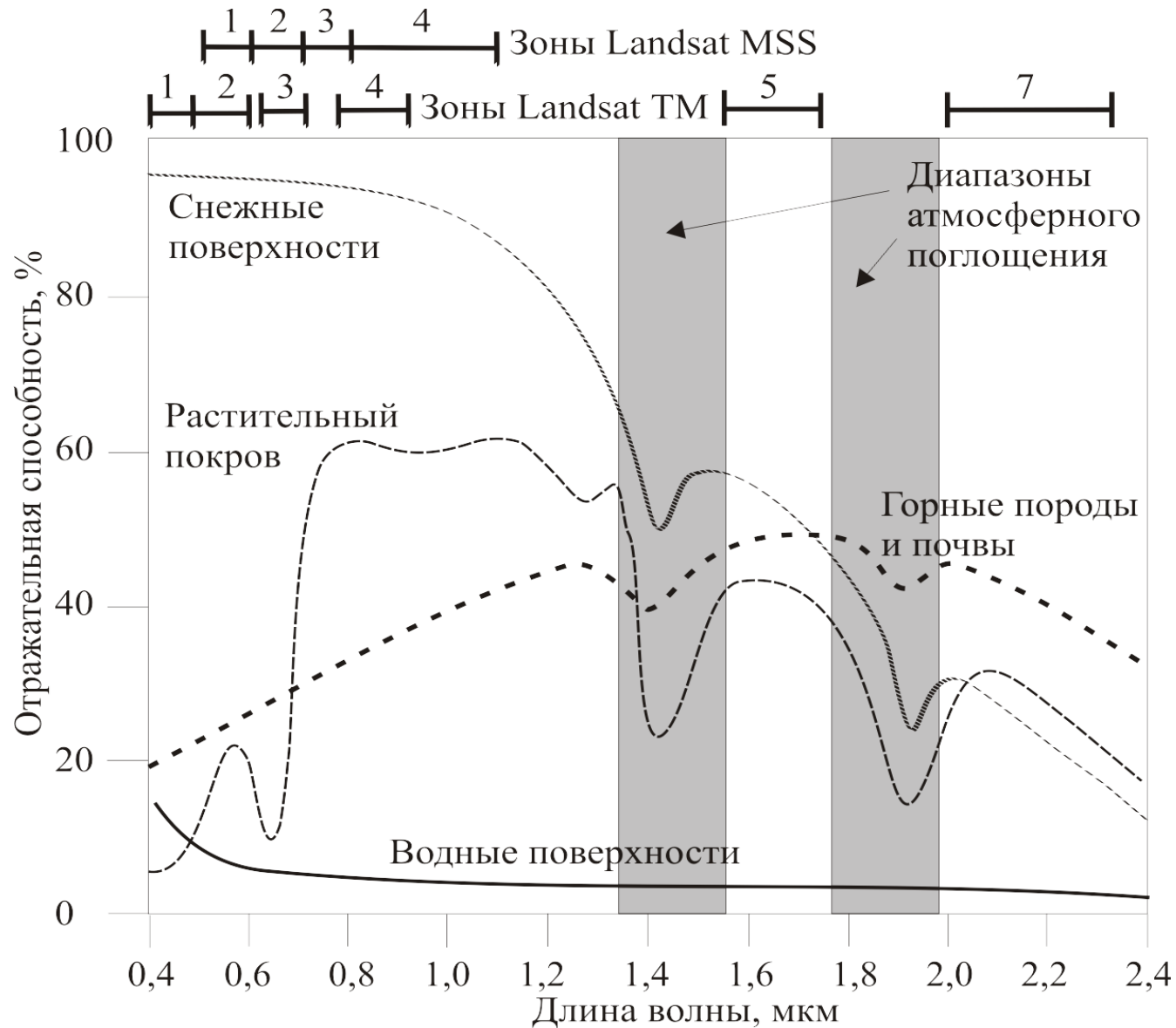
- **Окна прозрачности атмосферы** – спектральные области, где излучение проходит с относительно малым ослаблением и которые в основном расположены в видимом и ИК диапазонах:

- 0,3–1,3 мкм; - 3,0–3,6 мкм;
- 1,5–1,8 мкм; - 4,2–5,0 мкм;
- 2,0–2,6 мкм; - 7,0–15,0 мкм.

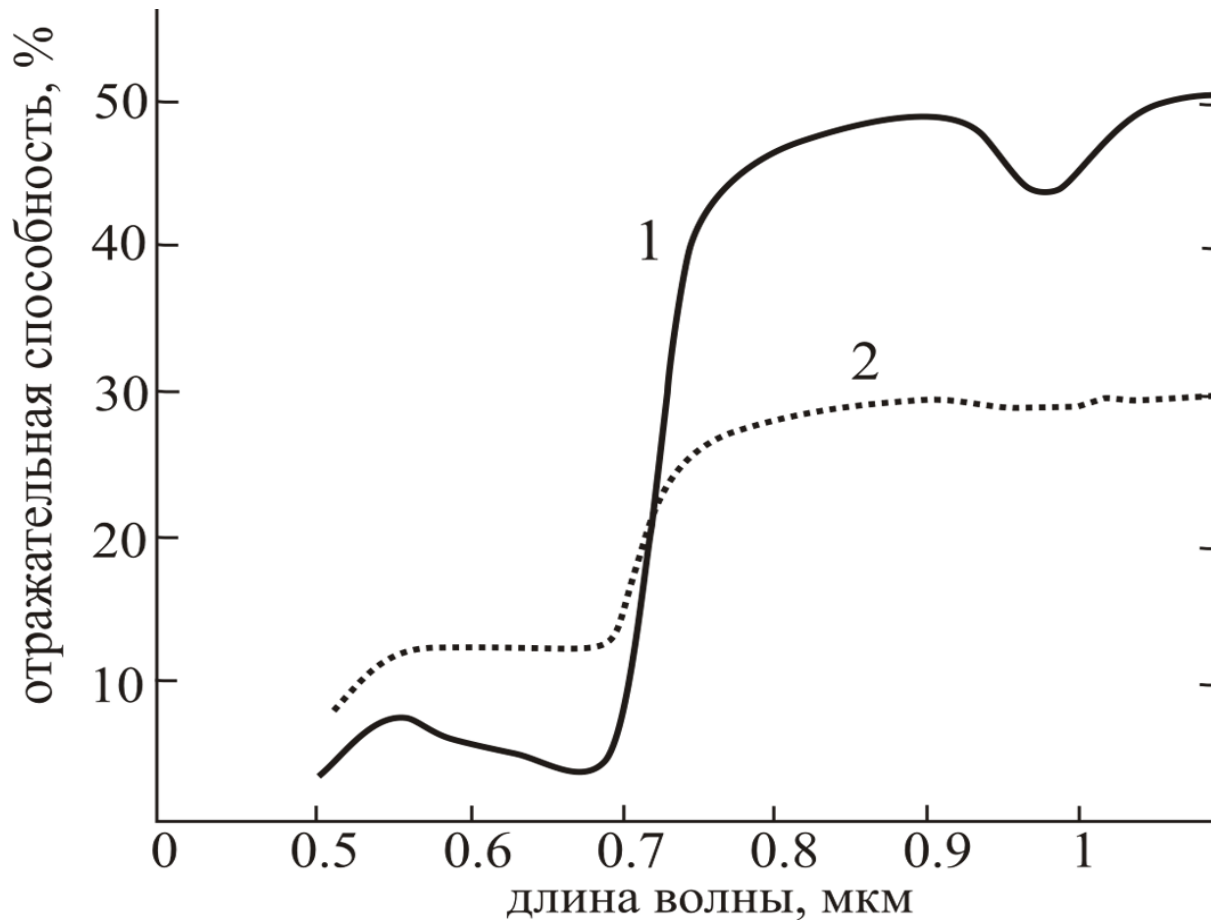
Физические основы ДЗЗ

- Радиолокационные системы работают в **микроволновом радиодиапазоне** длин волн от 1 мм до 1 м, при этом наиболее употребительными являются:
- *Ka* (0,8–1,1 см)-
- *X* (2,4–3,8 см)-
- *L* (15–30 см)-диапазоны.

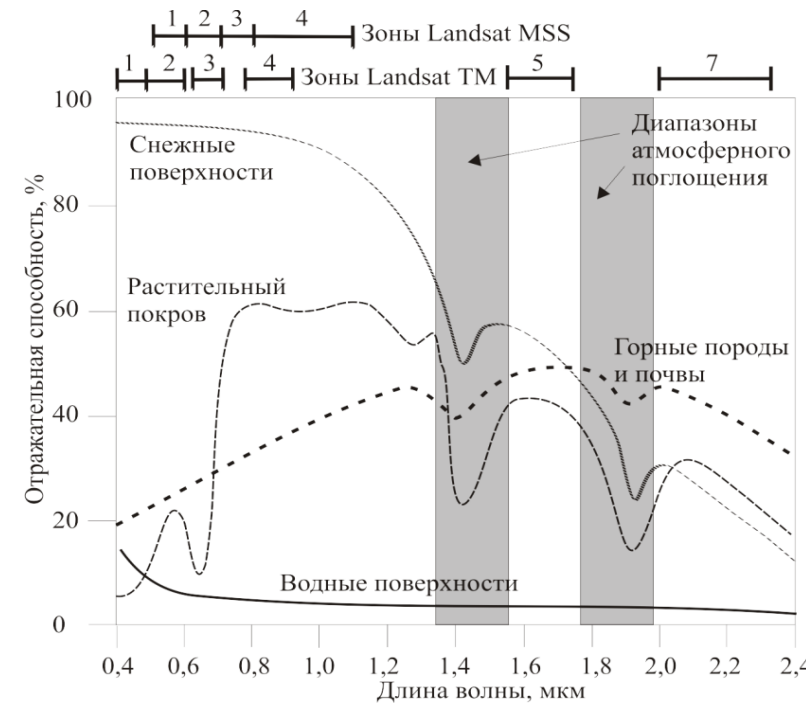
Особенности спектральных характеристик объектов



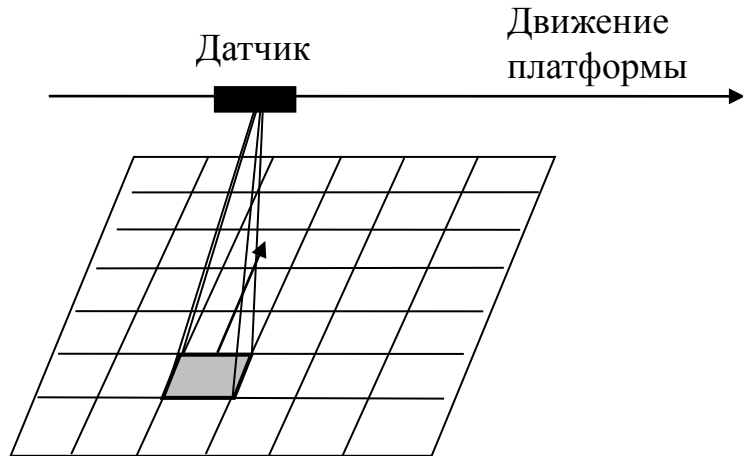
Особенности спектральных характеристик объектов



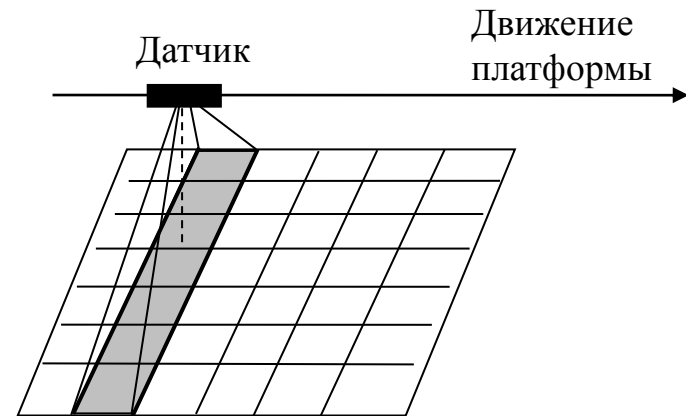
Спектральная отражательная способность здоровых (1) и поврежденных (2) листьев



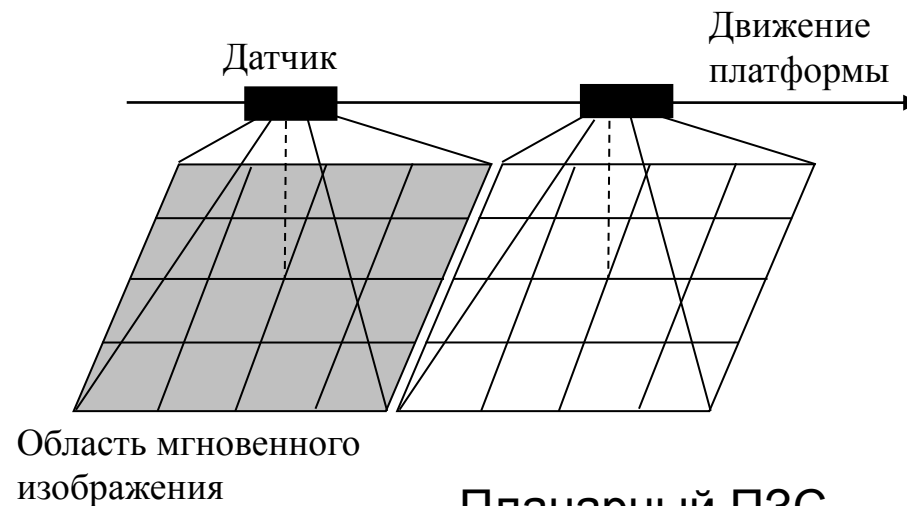
Схемы формирования изображения



Одноэлементный датчик



Линейный датчик



Планарный ПЗС

Характеристики КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

- Временное (temporal) разрешение
- Пространственное (spatial) разрешение
- Спектральное (spectral) разрешение
- Радиометрическое (radiometric) разрешение

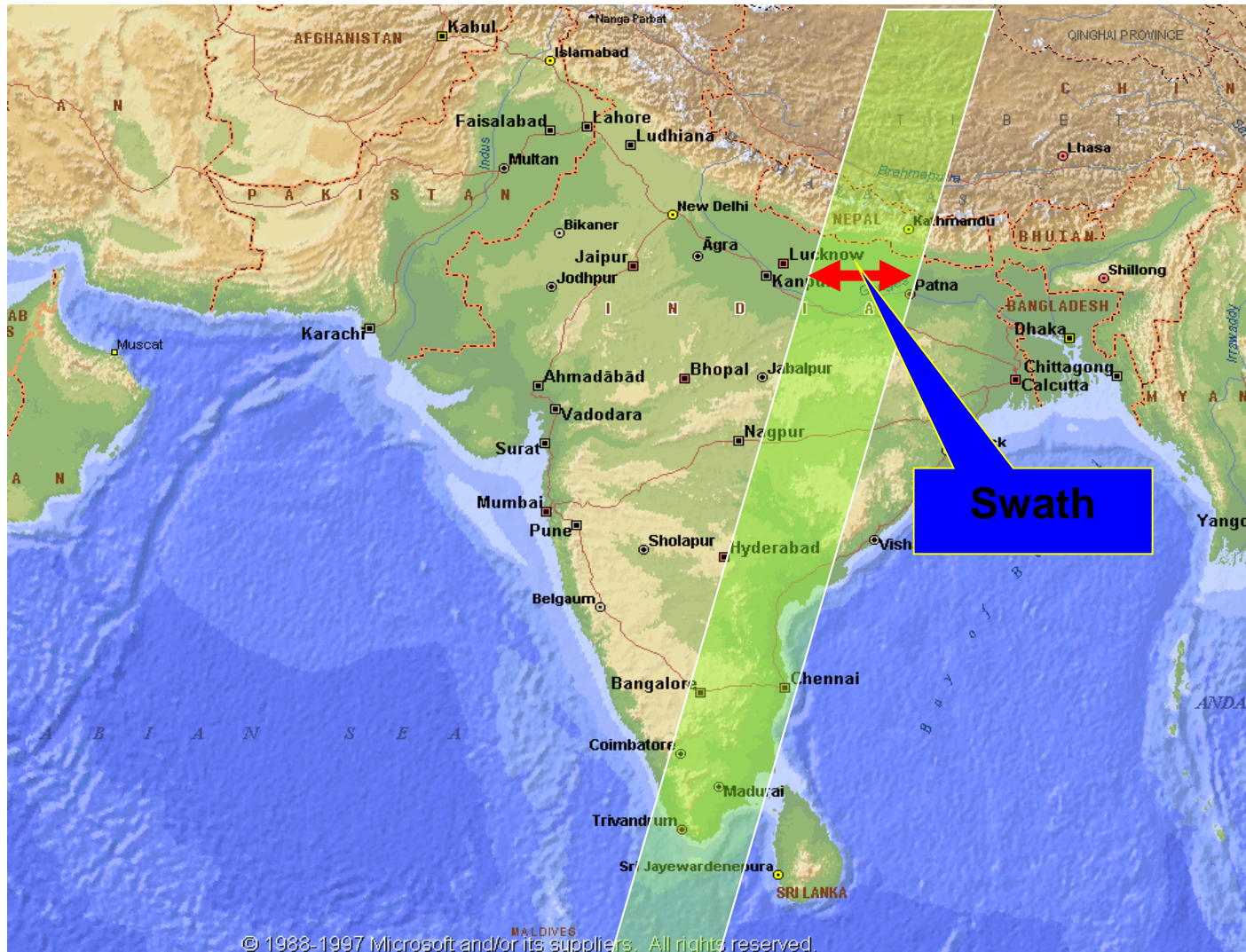
Временное разрешение

Временное разрешение определяет, как часто датчик получает изображение определенной области на поверхности Земли.

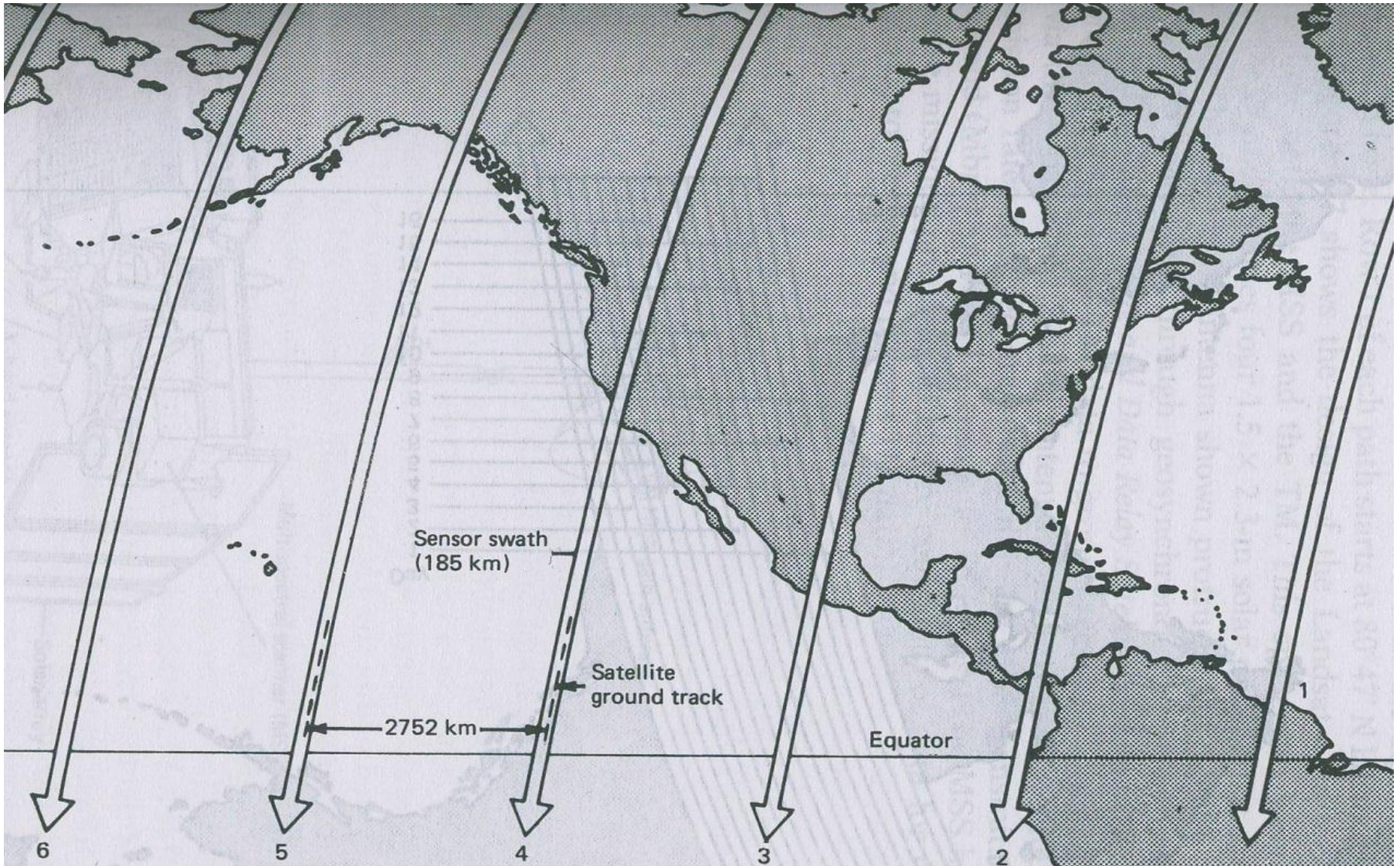
ВР является важным при изучении и обнаружении изменений поверхности и зависит от высоты орбиты, ширины полосы обзора, количества спутников, одновременно находящихся на орбите. Landsat имеет ВР 16 дней, SPOT – 1 день, NOAA – несколько часов.

Некоторые космические системы оснащены специальными устройствами, позволяющими отклонять аппаратуру ДЗЗ от направления в надир и проводить боковую съемку под углом к траассе пролета.

Ширина полосы обзора



Формирование покрытия поверхности Земли со спутника Landsat (4, 5, 7)



Пространственное разрешение

Пространственное разрешение (ПР) представляет собой минимальную линейную величину изобразившегося объекта местности, зафиксированного пикселем.

$$R \sim \lambda H/D$$

где λ – длина волны принимаемого излучения;

H – высота орбиты;

D – диаметр объектива.

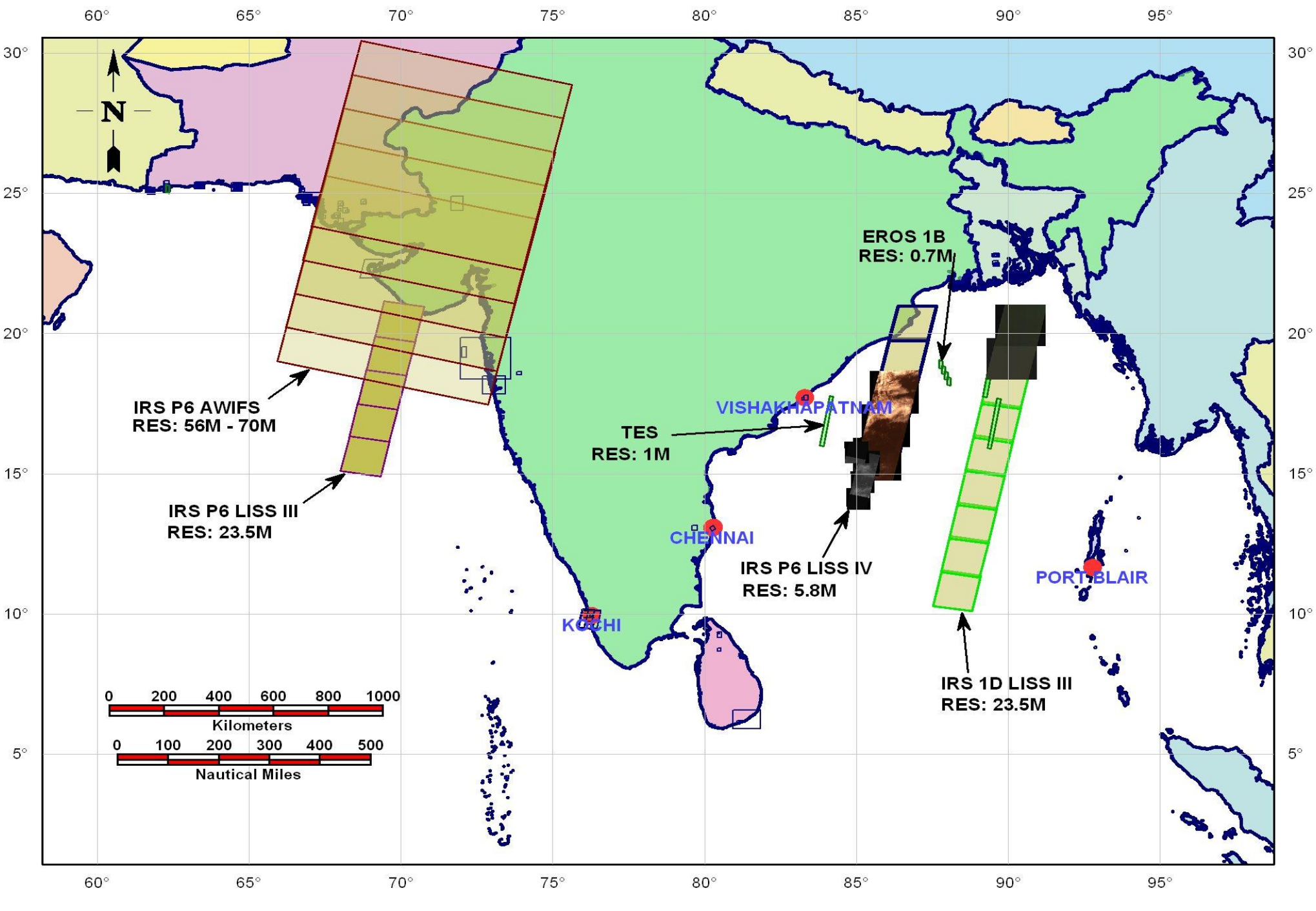
В случае радиолокационного наблюдения D – размер апертуры антенны.

ПР снимков, получаемых оптико-электронными сканерами, вычисляется по формуле:

$$R \sim wH/f$$

где w – линейный размер датчика;

f – фокусное расстояние оптической системы .



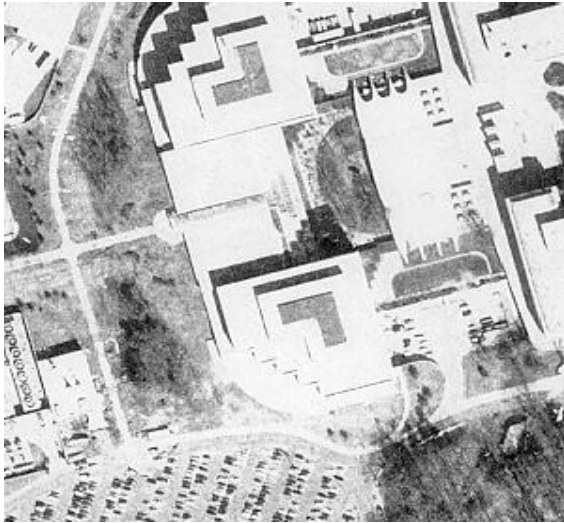
Пространственное разрешение

Различают системы (и космические снимки):

- низкого ($R > 500$);
- среднего ($20 \leq R \leq 500$ м);
- высокого (< 20 м);
- сверхвысокого ($R \leq 2$ м) пространственного разрешения.

Сравнение снимков с разным ПР

1.0 м



2.5 м



5.0 м



10.0 м



Спектральное разрешение (СР)

СР соответствует количеству диапазонов ЭМ спектра и размеру зон съемки, регистрируемых съемочной аппаратурой.

Съемочная аппаратура и КС, получаемые с ее помощью, делятся на:

- монохроматические (однозональные, интегральные или панхроматические);
- мультиспектральные (от 2 до 10 регистрируемых диапазонов);
- гиперспектральные (может быть более 100 зон).

Спектральное разрешение (СР)

При тематических исследованиях следует выбирать тот диапазон, который наиболее обособляет изучаемый объект

Синтезирование. Обычно используют три стандартных комбинации зон:

- красная, зеленая и синяя зоны создают композицию **истинного цвета**, объекты выглядят так, как они должны были бы восприниматься невооруженным глазом.
- ближняя ИК, красная и зеленая зоны создают композицию **ложного цвета**;
- средняя ИК, ближняя ИК и зеленая зоны создают композицию **псевдоцвета**, позволяющую подчеркнуть цветом различия объектов, что удобно для визуального дешифрирования снимков.

Радиометрическое разрешение

Радиометрическое разрешение (РР) цифровых КС определяется шириной динамического диапазона используемого датчика (количеством уровней дискретизации, соответствующих переходу от яркости абсолютно черного к абсолютно белому цвету-).

РР указывается числом бит. РР 8 бит соответствует 256 уровням градации яркости.

Для обнаружения элементарного объекта должно выполняться условие:

$$I_{об} S / R^2 > \Delta I$$

где $I_{об}$ – яркость объекта;

S – его площадь;

R – пространственное разрешение;

ΔI – радиометрическое разрешение.

Свободно распространяемые данные ДЗЗ

Landsat – серия спутников

Terra (камера Aster)

Terra (камера MODIS)

Aqua (камера MODIS)

Sentinel-2

СПУТНИКИ

Подробное описание спутников и их характеристик можно найти на сайте

<http://sovzond.com/products/spatial-data/satellites/>

Ввод и обработка данных дистанционного зондирования Земли

Лектор: к.т.н. Токарева Ольга Сергеевна

Лекция 3

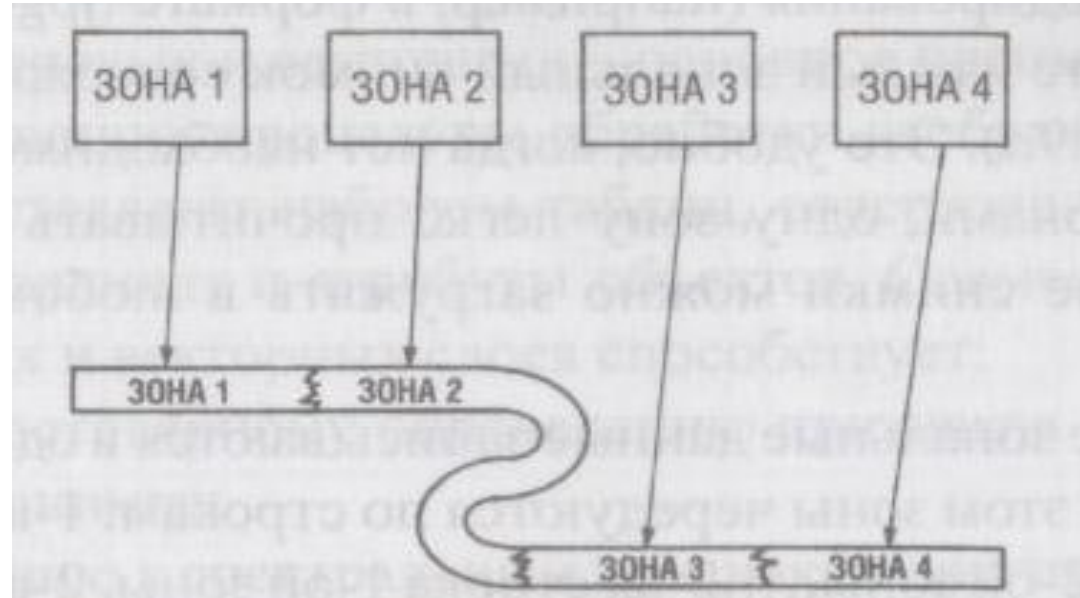
Методы обработки и интерпретации данных

Выделяют 3 стадии обработки данных:

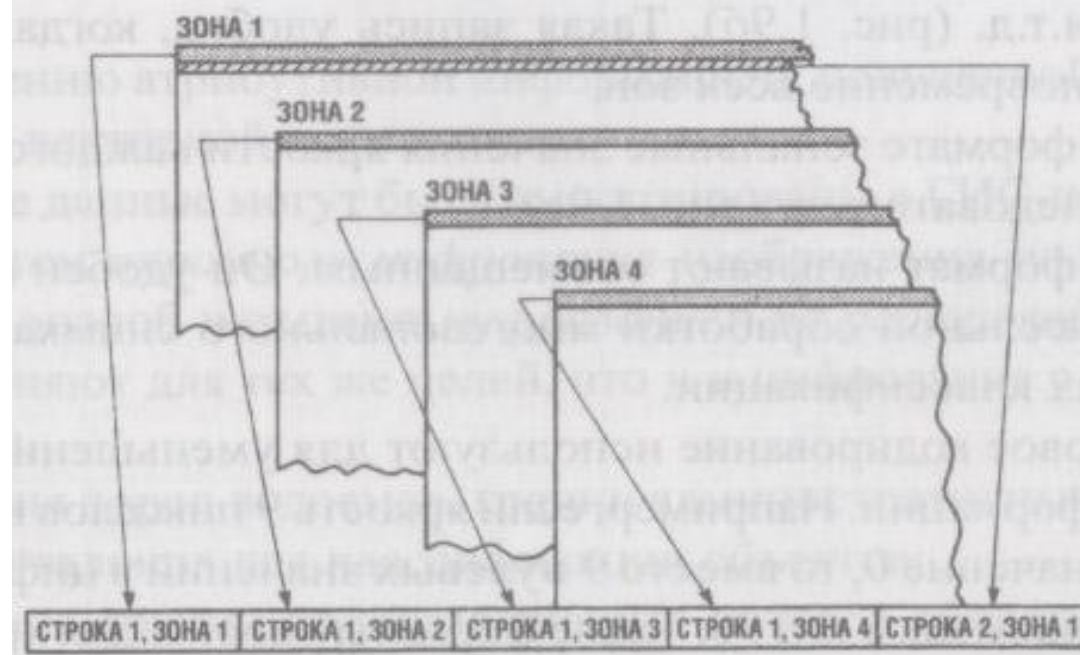
1. Предварительная обработка.
2. Улучшение изображений
3. Тематическая обработка данных (дешифрирование, интерпретация).

Форматы представления данных

- последовательность зон (Band Sequential, BSQ);

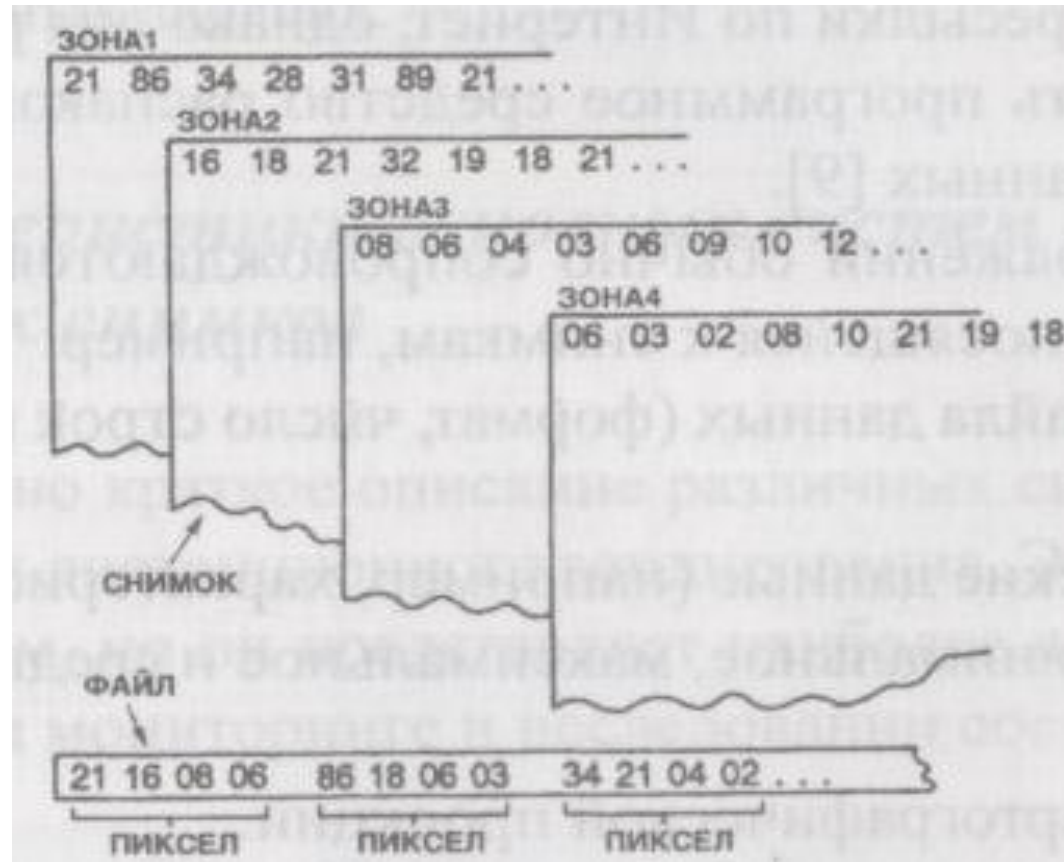


- зоны, чередующиеся по строкам (Band Interleaved by Line, BIL);



Форматы представления данных

- зоны, чередующиеся по пикселям (Band Interleaved by Pixel, BIP);



- последовательность зон со сжатием информации в файл методом группового кодирования (например, в формате jpg).

Дополнительная информация для файлов изображений

Файлы изображений обычно снабжаются следующей дополнительной информацией, относящейся к снимкам:

- описание файла данных (формат, число строк и столбцов, разрешение и т. д.);
- статистические данные (характеристики распределения яркостей – минимальное, максимальное и среднее значение, дисперсия);
- данные о картографической проекции.
- Дополнительная информация содержится либо в заголовке файла изображения, либо в отдельном текстовом файле с именем, совпадающим с именем файла изображения.

Уровни обработки

- 1А – радиометрическая коррекция искажений, вызванных разницей в чувствительности отдельных датчиков.
- 1В – радиометрическая коррекция на уровне обработки 1А и геометрическая коррекция систематических искажений сенсора, включая панорамные искажения, искажения, вызванные вращением и кривизной Земли, колебанием высоты орбиты спутника.

Уровни обработки

- 2А – коррекция изображения на уровне 1В и коррекция в соответствии с заданной геометрической проекцией без использования наземных контрольных точек. Для геометрической коррекции используется глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР, DEM) с шагом на местности 1 км. Используемая геометрическая коррекция устраняет систематические искажения сенсора и проектирует изображение в стандартную проекцию (UTM WGS-84).
- 2В – коррекция изображения на уровне 1В и коррекция в соответствии с заданной геометрической проекцией с использованием контрольных наземных точек;

Уровни обработки

- 3 – коррекция изображения на уровне 2В плюс коррекция с использованием ЦМР местности (ортотрансформирование).
- S – коррекция изображения с использованием контрольного изображения.

Преобразование DN в коэффициенты спектральной яркости (1 этап)

- Основная формула, используемая для пересчета:

$$L_{\lambda} = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{cal\max} - Q_{cal\min}} \cdot (Q_{cal} - Q_{cal\min}) + L_{min\lambda}$$

где, L_{λ} — количество приходящего излучения;

- L_{min} — количество приходящего излучения, которое после масштабирования становится $Q_{cal\min}$;
- L_{max} — количество приходящего излучения, которое после масштабирования становится $Q_{cal\max}$;
- $Q_{cal\min}$ — минимальное калиброванное значение DN (0 или 1);
- $Q_{cal\max}$ — максимальное калиброванное значение DN (255);
- Q_{cal} — калиброванное значение (DN).

Преобразование DN в коэффициенты спектральной яркости (2 этап)

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s}$$

Where:

ρ_p = Unitless planetary reflectance

L_λ = Spectral radiance at the sensor's aperture

d = Earth-Sun distance in astronomical units;

$ESUN_\lambda$ = Mean solar exo-atmospheric irradiances;

θ_s = Solar zenith angle in degrees

ESUN для ETM+ (Landsat 7)

Номер Канала	Значение ESUN (watts/(meter squared * μm))
• 1	1997
• 2	1812
• 3	1533
• 4	1039
• 5	230.8
• 7	84.90
• 8	1362.

Расстояние от Солнца да Земли

Номер Расстояние

дня

1	.98331	74	.99446	152	1.01403	227	1.01281	305	.99253
15	.98365	91	.99926	166	1.01577	242	1.00969	319	.98916
32	.98536	106	1.00353	182	1.01667	258	1.00566	335	.98608
46	.98774	121	1.00756	196	1.01646	274	1.00119	349	.98426
60	.99084	135	1.01087	213	1.01497	288	.99718	365	.98333

Для снимков со спутников Landsat из архива USGS значение этого расстояния в день съемки хранится в файле метаданных

Атмосферная коррекция

Состояние атмосферы влияет на значения яркости двумя способами:

- рассеяние;
- поглощение.

Для выполнения атмосферной коррекции необходимо знать:

- количество водяного пара;
- распределение аэрозолей;
- видимость сцены.

Атмосферная коррекция

Методы:

- Стандартная абсолютная коррекция:
 - вычитание абсолютно темных объектов;
 - эмпирическая коррекция линий.
- Стандартная относительная коррекция
 - калибровка по плоской области;
 - использование внутреннего среднего относительного коэффициента отражения.
- Исправление на основе заданных моделей
 - Модуль FLAASH, программа переноса MODTRAN

Атмосферная коррекция

Термальные инфракрасные радиометры:

- программные комплексы MODTRAN, LOWTRAN.
- метод разделенного окна:

$$T_{b0} = a_0 + a_1 T_{b1} + a_2 T_{b2}$$

- метод двойного обзора.

Ввод и обработка данных дистанционного зондирования Земли

Лектор: к.т.н. Токарева Ольга Сергеевна

Лекция 4

Геометрическая коррекция

Геометрическая коррекция

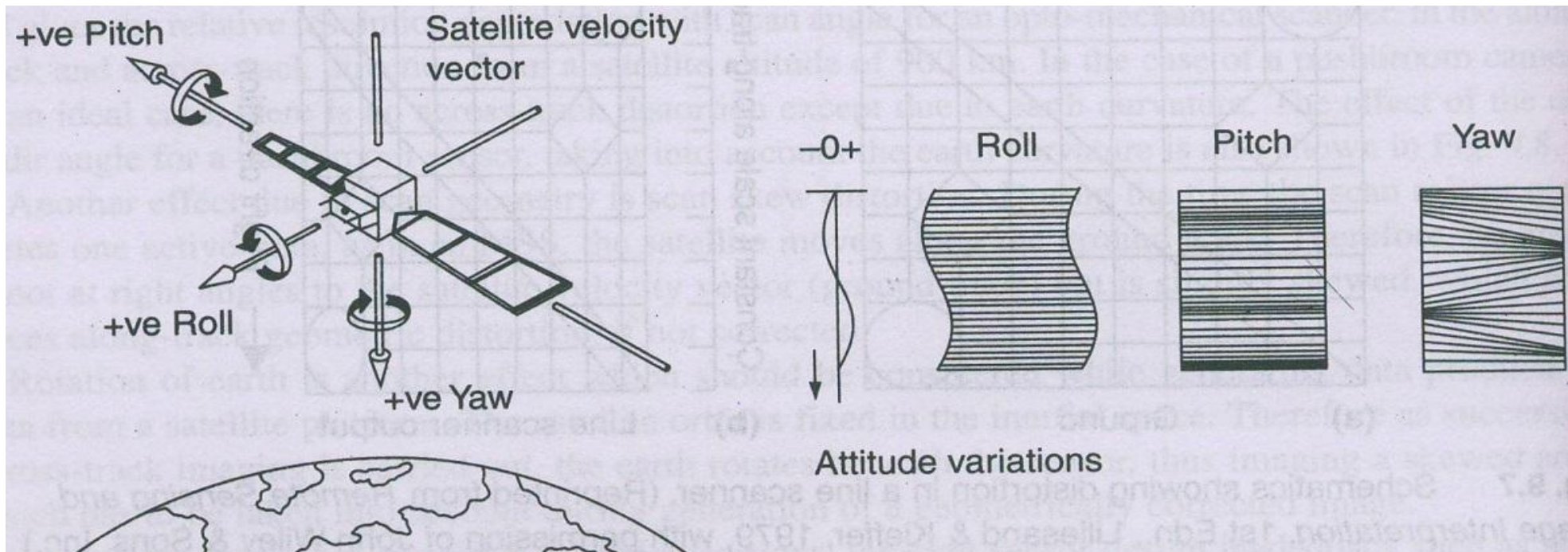
- исправляет искажения, определяемые съёмочной системой;
- исправляет пространственные и масштабные ошибки, происходящие от изменения высоты, скорости полета, пространственного положения съёмочной платформы;
- проводится для преобразования КС в определенную картографическую проекцию;
- проводится для более точного совмещения КС.

Геометрическая коррекция

Полосчатость – имеет место, если один из детекторов теряет настройку и записывает значения большие или меньшие, чем другие детекторы в той же зоне съемки над той же поверхностью Земли.

Выпадение строк – имеет место, если детектор выходит из строя или временно перенасыщается.

Геометрическая коррекция



Геометрическая коррекция

Координатная привязка, геокодирование – выполняется, чтобы снимок имел свойства карты или для более точного совмещения двух снимков

Задачи, требующие выполнения предварительного трансформирования:

- Выявление изменений на разных снимках одной территории, когда требуется попиксельное сопоставление;
- Создание мозаик изображений и фотокарт;
- Использование снимков в ГИС, в том числе совместно с векторными слоями;
- Получение точных величин расстояний и площадей;
- Выполнение географического анализа, требующего точной локализации данных.

Геометрическая коррекция

Этапы:

1. Выбор способа трансформирования.
2. Локализация контрольных точек.
3. Расчет ошибок и оценка результатов трансформирования.
4. Переопределение значений пикселей и создание выходного файла изображения с новой информацией о координатах.

При неопределенных свойствах изображения используются полиномиальные преобразования n -го порядка:

$$u=f(x,y)$$

$$v=g(x,y)$$

где x, y – координаты в исходной системе координат;
 u, v – трансформированные координаты

Геометрическая коррекция

Аффинные (линейные) преобразования выполняются полиномами 1-ой степени:

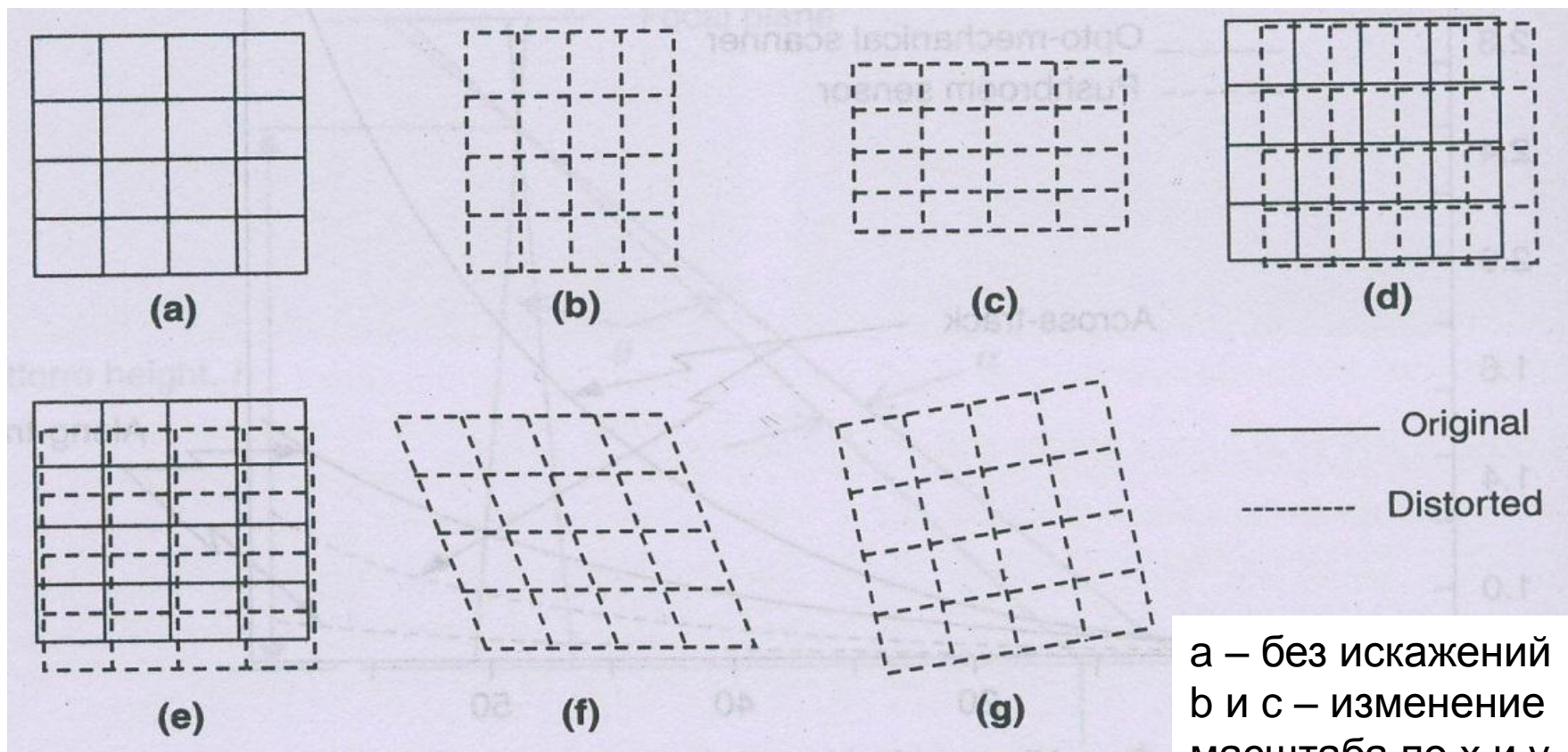
$$u = a_0 + a_1x + a_2y$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y$$

Используются для выполнения:

- параллельного переноса;
- поворота;
- масштабирования;
- зеркального отражения;
- комбинаций перечисленных выше преобразований;
- проектирования исходных изображений в картографическую проекцию и преобразования картографических проекций

Геометрическая коррекция



- a – без искажений
- b и c – изменение масштаба по x и y
- d и e – перемещение по x и y
- f – сдвиг
- g - поворот

Геометрическая коррекция

Нелинейные преобразования выполняются полиномами 2-ой степени и выше.

Полиномы 2-ой степени:

$$u = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$

$$v = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2$$

Число коэффициентов k , используемых для пересчета двух координат связано со степенью полинома соотношением:

$$k = (n+1)(n+2)$$

Геометрическая коррекция

Для вычисления коэффициентов используются наземные контрольные точки (НКТ) – пары точек на снимке (исходные) и на карте местности (эталонные).

Минимальное количество пар НКТ зависит от степени полинома:

$$N = k/2 = (n+1)(n+2)/2$$

Преобразование	Минимально требуемое количество пар НКТ	Рекомендуемый минимум пар НКТ
Линейное	3	6
Квадратичное	6	12
Кубическое	10	20

НКТ выбираются:

- в местах с хорошо выраженными особенностями ландшафта;
- равномерно по всей площади изображения, включая граничные области.

Геометрическая коррекция

$$AX - U = E_1 \quad AY - V = E_2$$

где $U^T = (u_1, u_2, \dots, u_6)$ – вектор новых координат U (известны);
 $V^T = (v_1, v_2, \dots, v_6)$ – вектор новых координат V (известны);
 $X^T = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_5)$ – вектор коэффициентов преобразования по X
(неизвестны);
 $Y^T = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_5)$ – вектор коэффициентов преобразования по Y
(неизвестны);
 E_1, E_2 – вектора невязок;

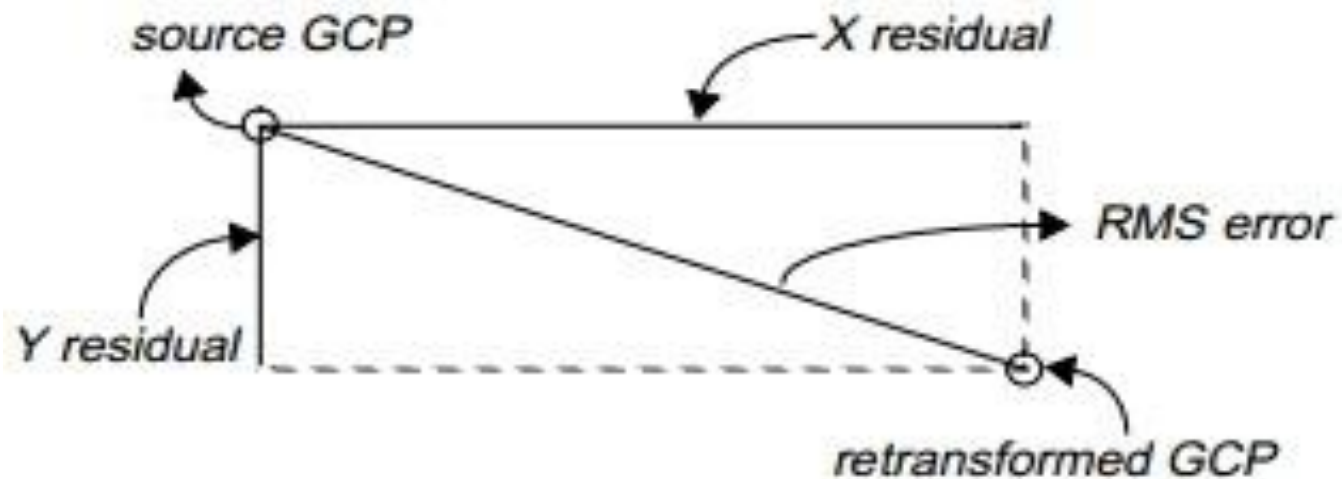
$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & y_2^2 \\ \dots & & & & & \\ 1 & x_6 & y_6 & x_6 y_6 & x_6^2 & y_6^2 \end{bmatrix}$$

Решение систем уравнений выполняется по способу наименьших квадратов под условием:

$$E_1^T E_1 = \min; \quad E_2^T E_2 = \min$$

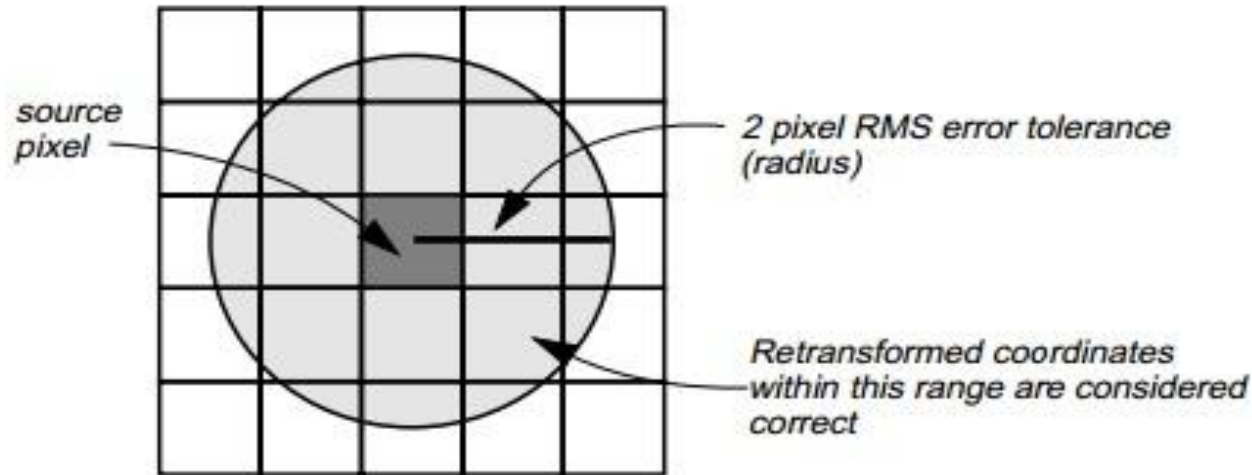
Геометрическая коррекция

$$CKH = \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2}$$



Здесь и далее использованы рисунки из
ERDAS Imagine: FieldGuide.pdf

Геометрическая коррекция

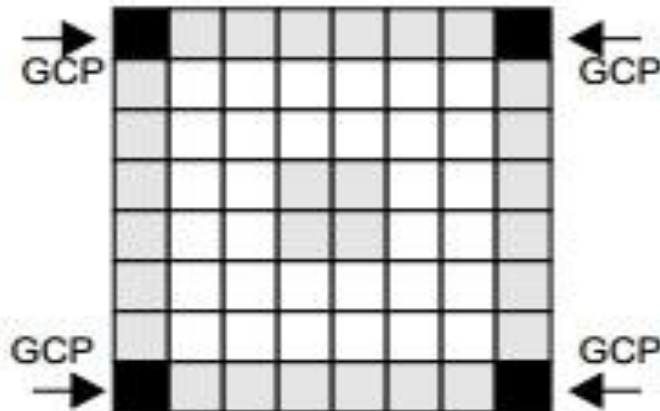


Для повышения точности трансформации:

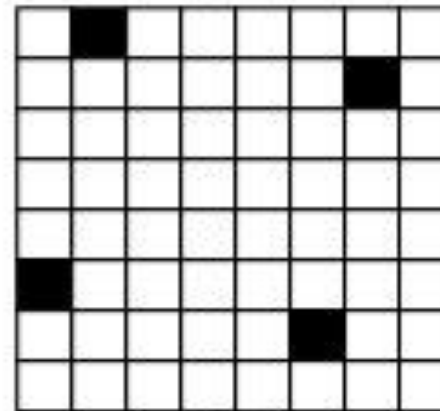
- Исключают контрольную точку с наибольшим значением среднеквадратичной невязки (ошибки) и вычисляют новые значения коэффициентов.
- Устанавливают новые параметры допуска ошибки.
- Увеличивают порядок трансформирования.
- Оставляют только те точки, относительно которых имеется наибольшая уверенность даже если их количество минимально допустимое.

Геометрическая коррекция

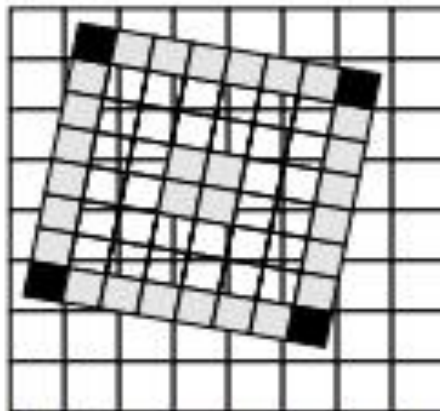
Переопределение значений пикселей



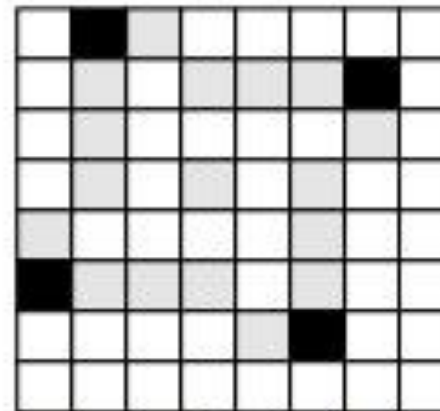
1. The input image with source GCPs.



2. The output grid, with reference GCPs shown.



3. To compare the two grids, the input image is laid over the output grid, so that the GCPs of the two grids fit together.

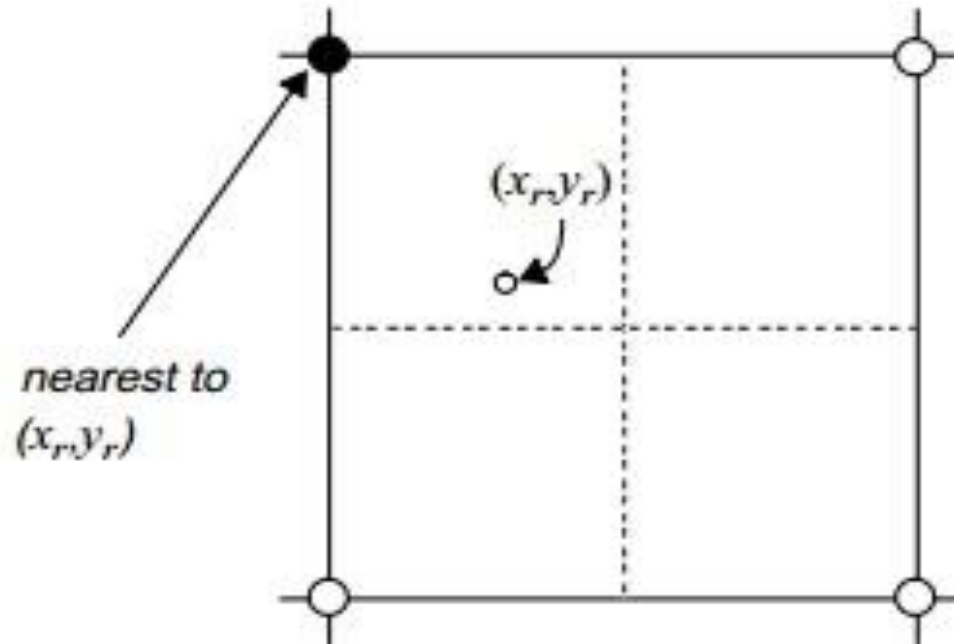


4. Using a resampling method, the pixel values of the input image are assigned to pixels in the output grid.

Геометрическая коррекция

Переопределение значений пикселей:

- Метод ближайшего соседа.

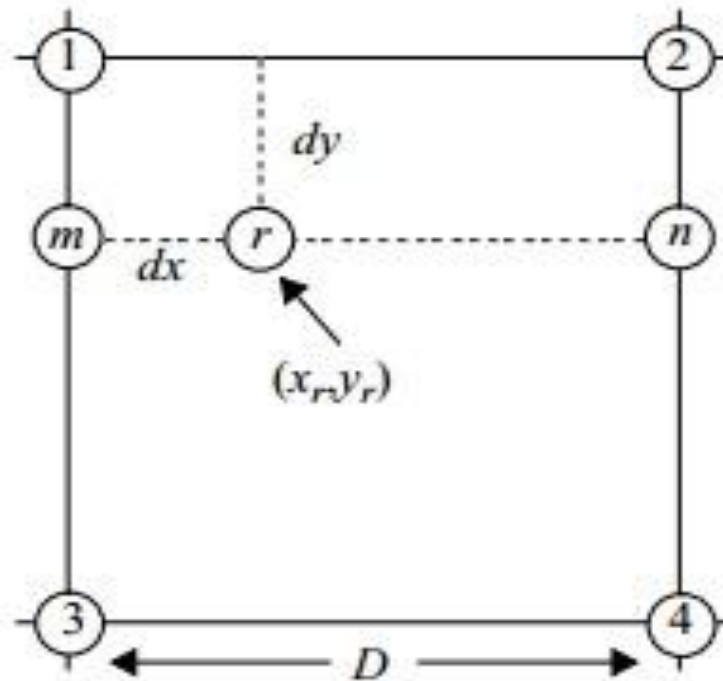


Геометрическая коррекция

Переопределение значений пикселей:

- Метод билинейной интерполяции

$$I'(u, v) = (1-u)\{vI(x, y+1) + (1-v)I(x, y)\} + u\{v(I(x+1, y+1) + (1-v)I(x+1, y))\}.$$



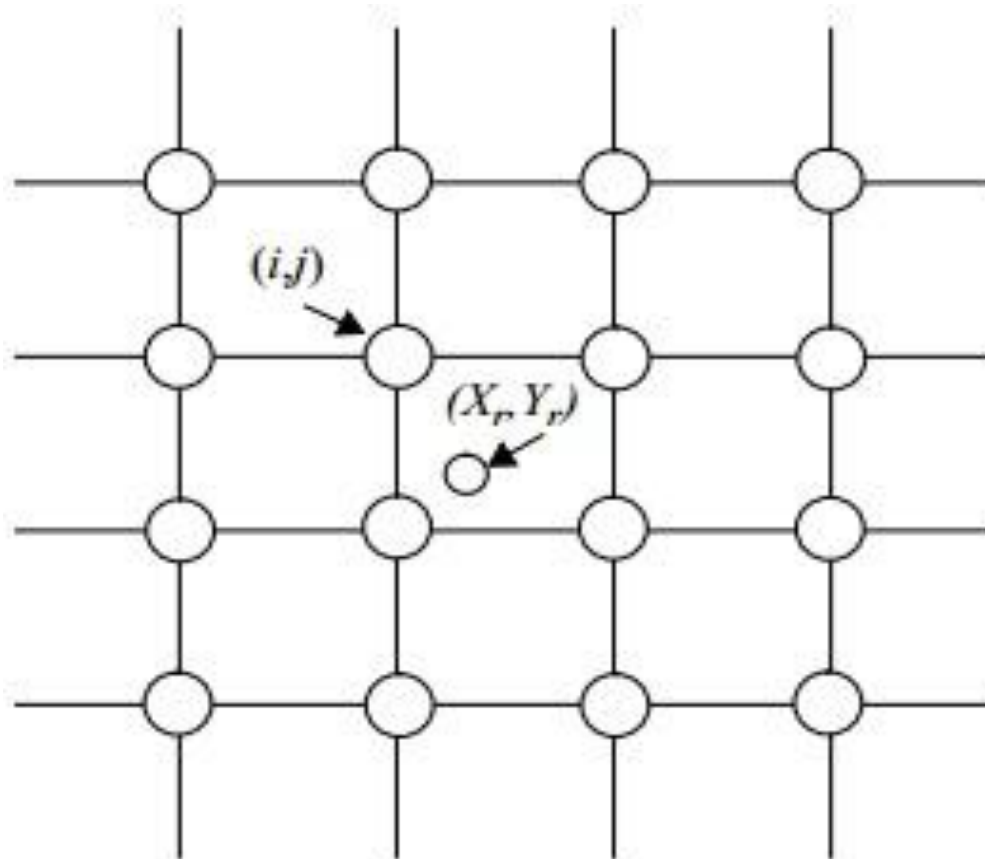
r is the location of the retransformed coordinate

Геометрическая коррекция

Переопределение значений пикселей:

- Метод бикубической интерполяции

$$I'(u, v) = \sum a_{m,n} I(x + m, y + n) \quad 1 \leq m, n \leq 2$$



Ввод и обработка данных дистанционного зондирования Земли

Методы улучшения изображений

Лектор: к.т.н. Токарева Ольга Сергеевна

Лекция 5

Методы улучшения изображений

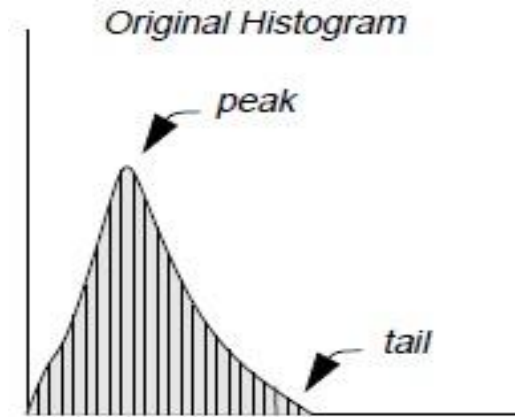
Улучшение изображений позволяет подчеркнуть важнейшие признаки изображения и облегчить задачу интерпретации.

Методы улучшения:

1. Спектральные - основаны на индивидуальных значениях яркости пикселей в пределах каждой зоны спектра. В основе - анализ и преобразование гистограмм.
2. Пространственные – основаны на анализе значений соседних пикселей.

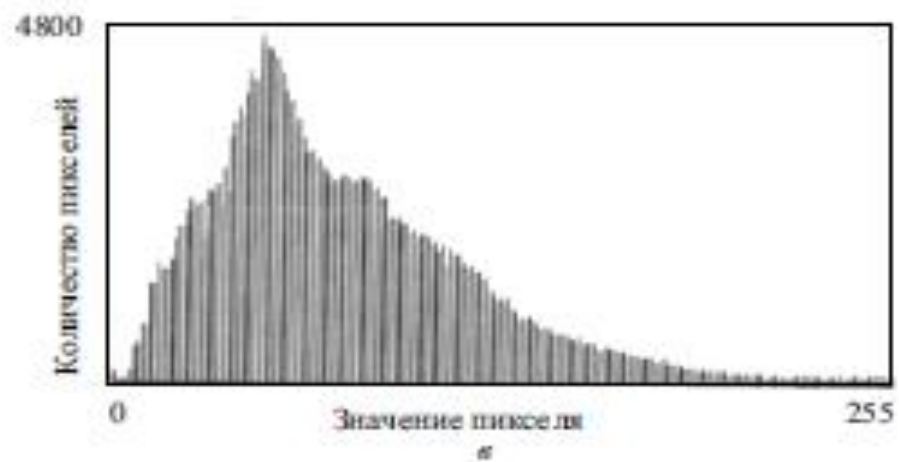
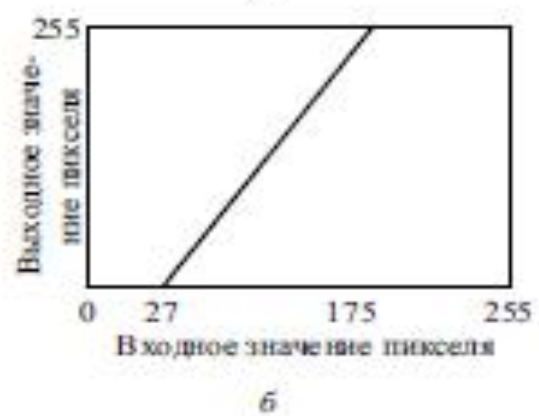
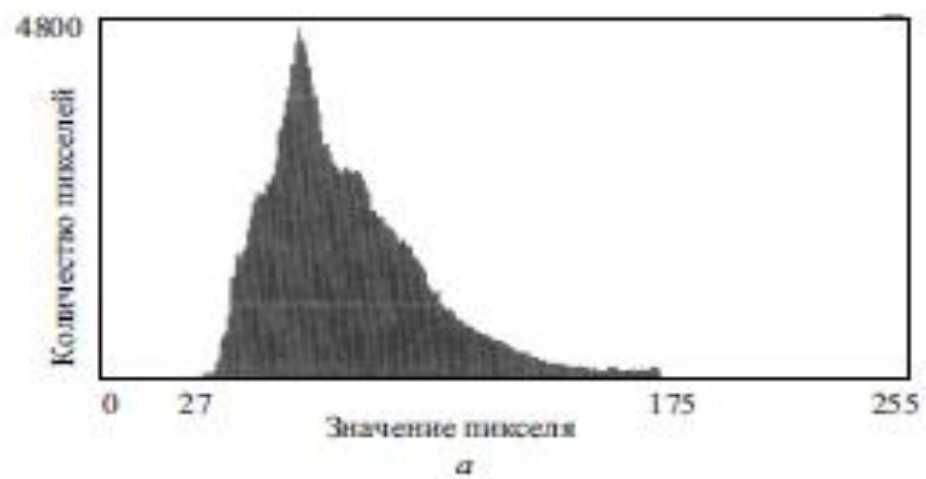
Спектральные улучшающие преобразования

Гистограмма – график или таблица, показывающая количество пикселей $h(I)$ в изображении, имеющих спектральную яркость I .

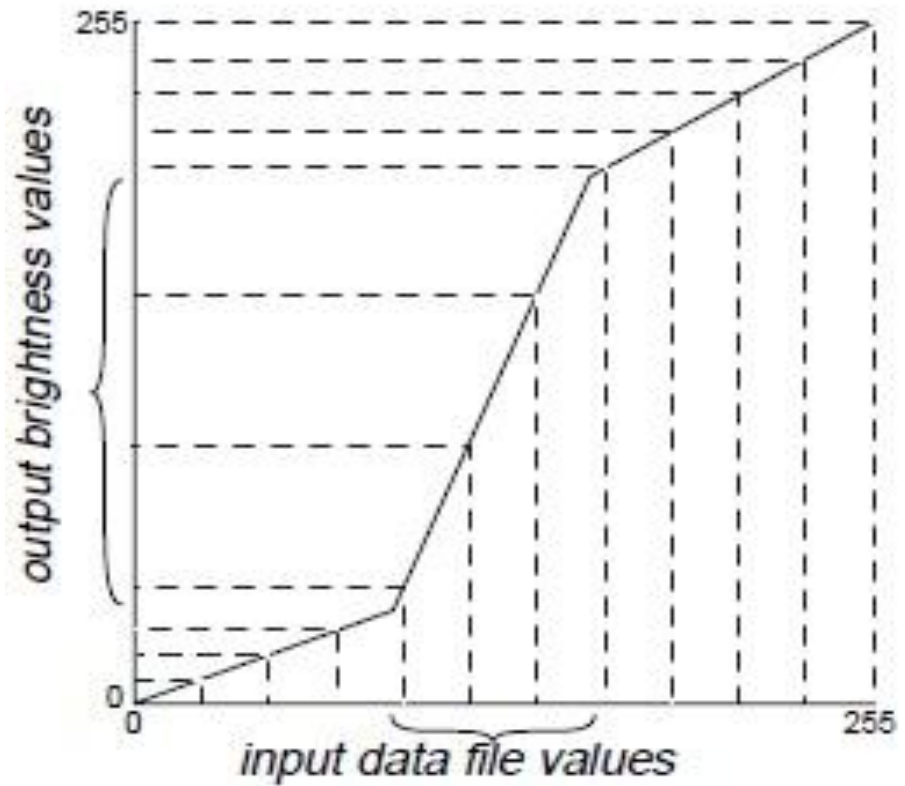


Спектральные преобразования:

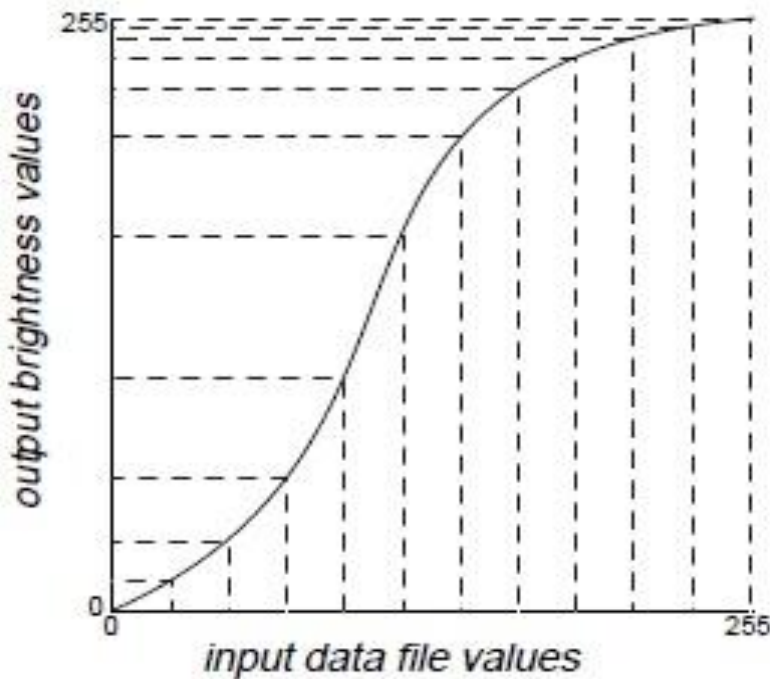
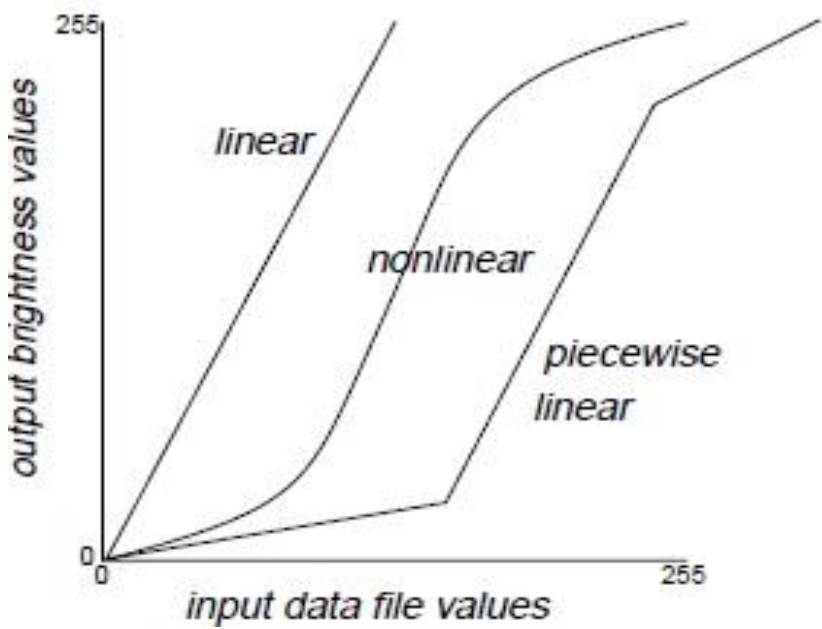
- Линейное, нелинейное, кусочно-линейное преобразование гистограмм, приводящее к изменению контраста;
- Эквиализация гистограммы - перераспределение пикселей в пределах радиометрического диапазона;
- Подгонка гистограмм – согласование гистограмм двух изображений (при составлении мозаик);
- Инверсия изображения – получение изображения с обратным контрастом.



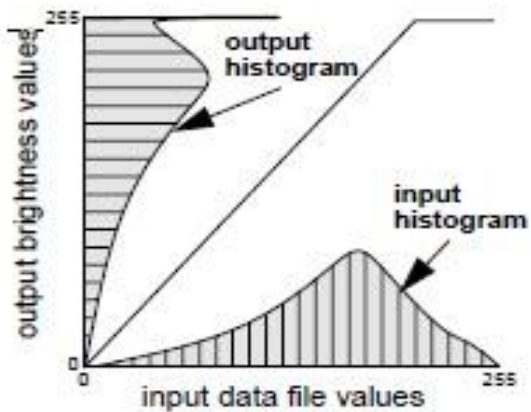
Спектральные улучшающие преобразования



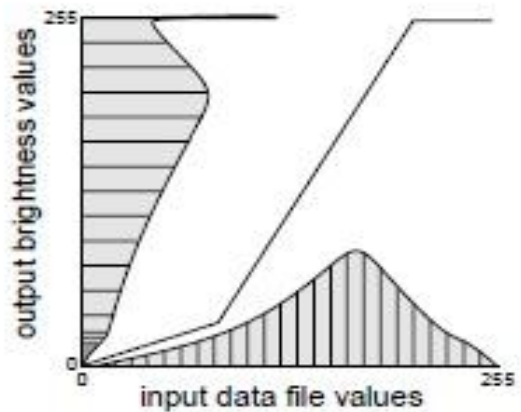
Спектральные улучшающие преобразования



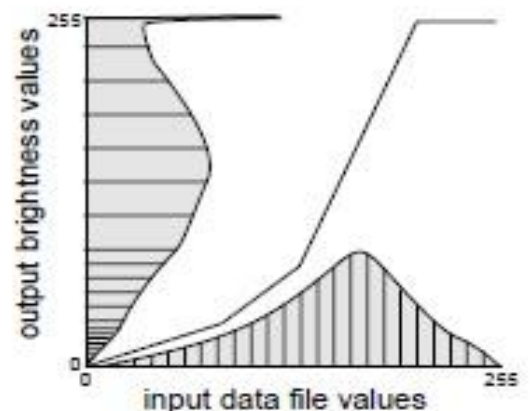
Спектральные улучшающие преобразования



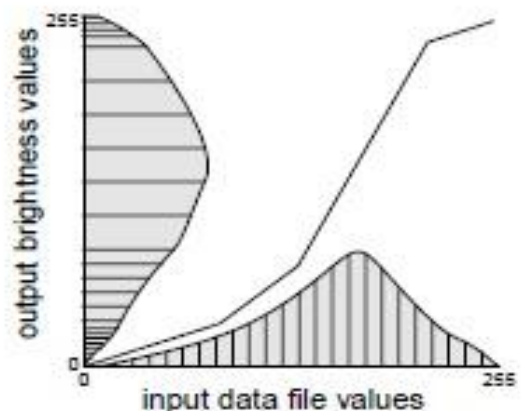
1. Linear stretch. Values are clipped at 255.



2. A breakpoint is added to the linear function, redistributing the contrast.



3. Another breakpoint added. Contrast at the peak of the histogram continues to increase.

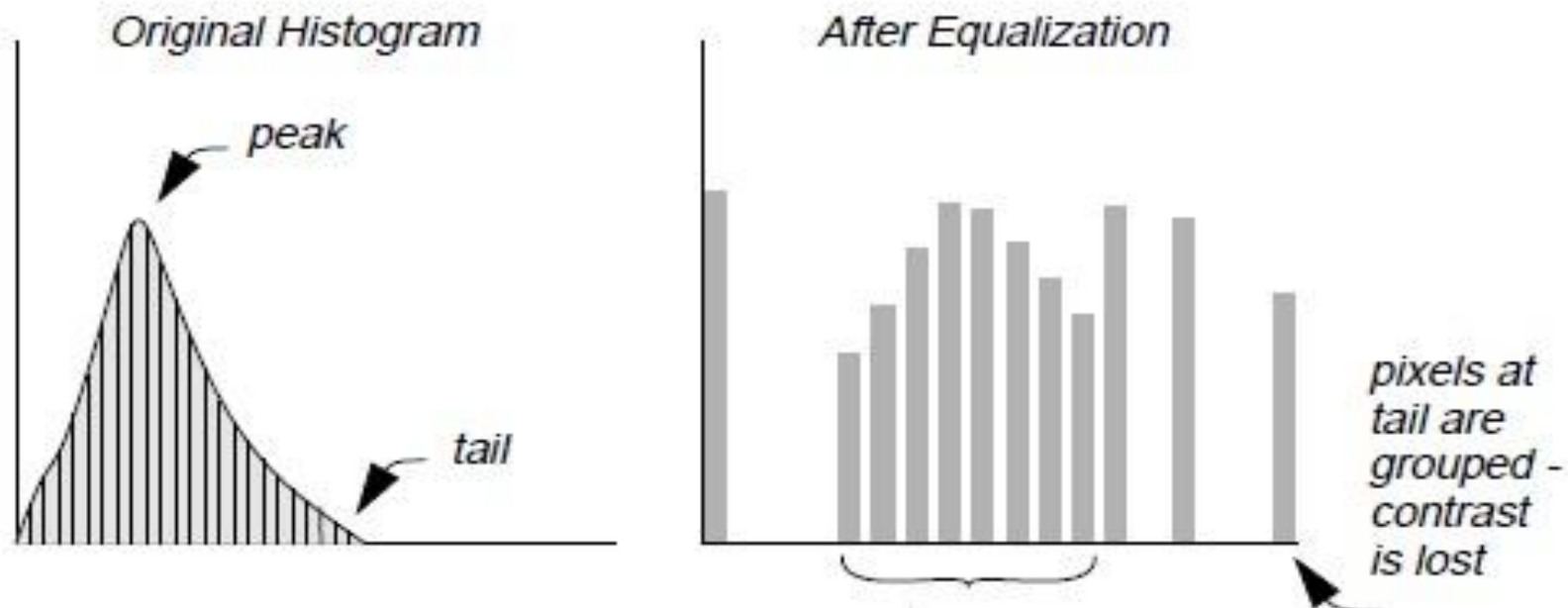


4. The breakpoint at the top of the function is moved so that values are not clipped.

Спектральные улучшающие преобразования

Эквализация гистограммы – нелинейное преобразование контраста приводит:

- к уменьшению контраста в очень светлых и темных областях;
- к увеличению контраста на пиках для наиболее часто встречающихся значений;
- к перераспределению средних значений яркости к началу и концу радиометрического диапазона



Спектральные улучшающие преобразования

Эквализация гистограммы

N – количество столбцов гистограммы (10)

M – максимум ранга выходных значений(9, граница радиометрического диапазона)

T – общее количество пикселей

$$A = T/N$$

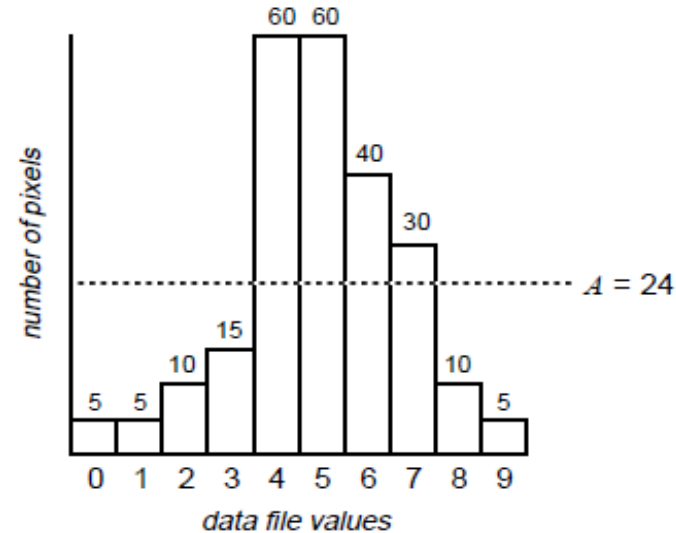
$$B_i = \text{int} \left[\frac{\left(\sum_{k=1}^{i-1} H_k \right) + \frac{H_i}{2}}{A} \right]$$

A = количество пикселей на один столбец

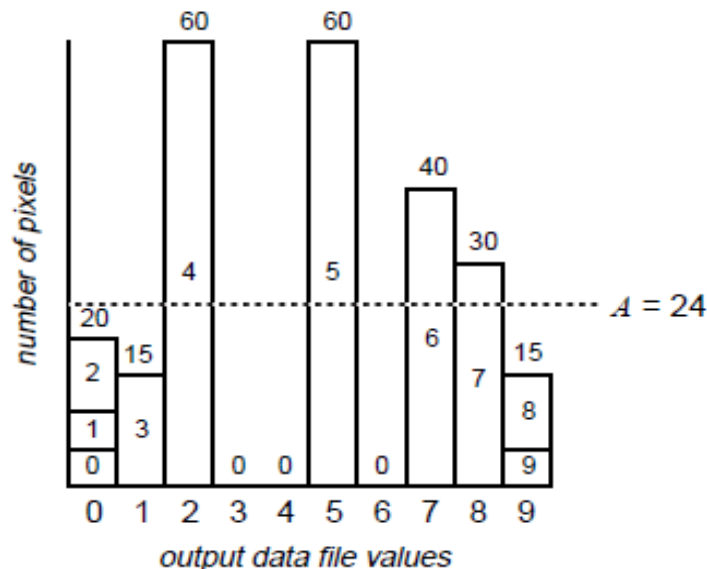
H_i = количество значений со значением i на исходной гистограмме

int = функция, округляющая до ближайшего целого

B_i = номер нового столбца гистограммы для пикселей со значением i

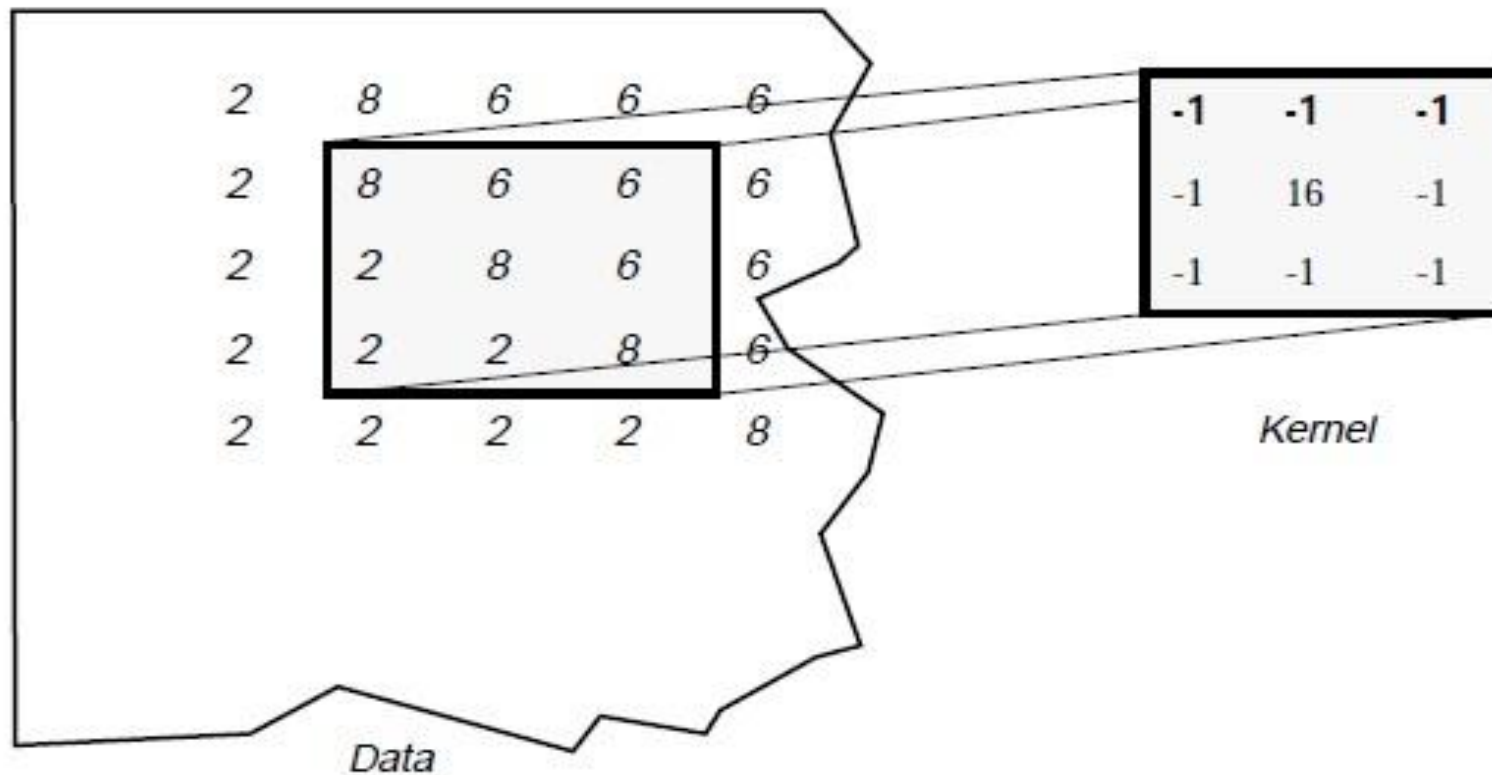


numbers inside bars are input data file values



output data file values

Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация



Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация

Общая формула фильтрации имеет вид:

$$I_f = \frac{\sum_{i=1}^q \left(\sum_{j=1}^q f_{ij} I_{ij} \right)}{F}$$

где f_{ij} – числовые значения коэффициентов фильтра, расположенные в i -ой строке и j -ом столбце матрицы;

I_{ij} – значение пикселя исходного изображения;

q – размер фильтра, определяющий размер стороны скользящего окна;

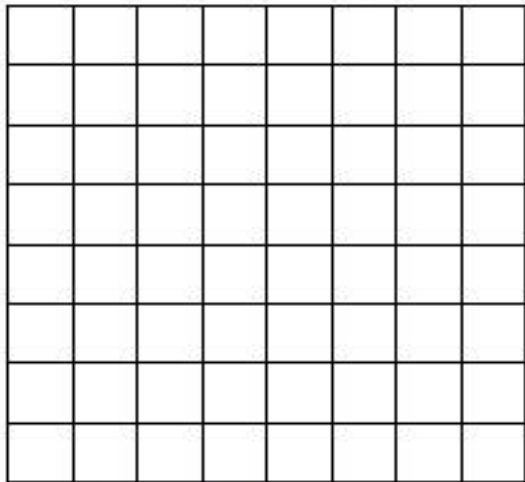
F – величина, зависящая от типа операции фильтрации и равная либо сумме коэффициентов фильтра, либо 1, если сумма коэффициентов равна 0. Используется для нормирования значений в пределах окна так, чтобы выходные данные находились примерно в том же диапазоне, что и исходные;

I_f – значение пикселя преобразованного изображения (результат фильтрации). Если $I_f < 0$, его заменяют на 0.

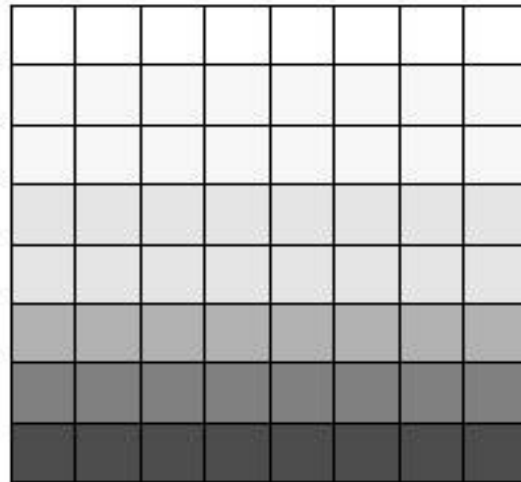
Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация

Пространственная частота определяет величину изменения значений яркости на единицу расстояния на любой части изображения. Выделяют области с

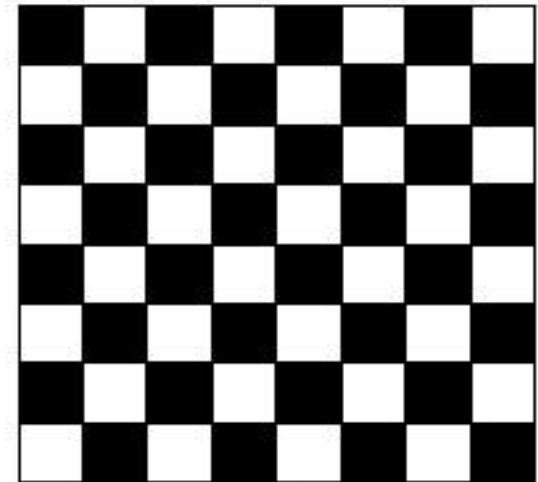
- нулевой
- низкой
- высокой пространственной частотой



zero spatial frequency



low spatial frequency



high spatial frequency

Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация

Пространственные фильтры:

1. Фильтры низкой частоты – подчеркивают детали низкой частоты, чтобы сгладить шум и уменьшить ступенчатость изображения (сглаживающие, усредняющие фильтры).
2. Фильтры высокой частоты – подчеркивают детали высокой частоты, выделяют и подчеркивают линейные особенности – дороги, границы земля/вода, увеличивают детализацию без воздействия на элементы низкой частоты (фильтры резкости).
3. Фильтры подчеркивания границ – подчеркивают границы, окружающие объекты изображения, чтобы сделать их более различимыми. Результатом является изображение с серым тоном и черно-белыми линиями, окружающими границы объектов на изображении.

Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация

Сглаживающие линейные фильтры

Однородный усредняющий фильтр

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Маска дающая средневзвешенное значение

1/16	1/8	1/16
1/8	1/4	1/8
1/16	1/8	1/16

Фильтры, основанные на порядковых статистиках (нелинейные сглаживающие):

- медианный
- модальный
- адаптивный

- максимума
- минимума

Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация

Пространственные фильтры повышения резкости

$$k*I+(1-k)A,$$

где I – оператор тождественности (равен 1 в центральной ячейке и нулю во всех остальных ячейках);

A – усредняющий фильтр;

k – некоторое число большее 1, определяющее степень резкости.

-1/9	-1/9	-1/9
-1/9	17/9	-1/9
-1/9	-1/9	-1/9

Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация

Пространственные фильтры выделения границ: лапласианы

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y)$$

$$\nabla^2 f = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)]$$

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

1	1	1
1	-8	1
1	1	1

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация

Пространственные фильтры выделения границ: лапласианы

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - \nabla^2 f(x, y), & \text{если } w(0, 0) < 0 \\ f(x, y) + \nabla^2 f(x, y), & \text{если } w(0, 0) > 0 \end{cases}$$

где $w(0, 0)$ – значение центрального коэффициента маски лапласиана.

Составные маски лапласианов:

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

маска, дающая изотропный результат для поворотов, кратных 90°

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

маска, дающая изотропный результат для поворотов, кратных 45°

Пространственные улучшающие преобразования: фильтрация

Пространственные фильтры выделения границ: Собеля

$$S = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

где $X = (I_3 + 2I_6 + I_9) - (I_1 + 2I_4 + I_7)$,

$Y = (I_1 + 2I_2 + I_3) - (I_7 + 2I_8 + I_9)$,

I – яркости в пределах окна :

I_1	I_2	I_3
I_4	I_5	I_6
I_7	I_8	I_9

Ландшафтно-индикационный подход к классификации

Лектор: к.т.н. Токарева Ольга Сергеевна

Лекция 6

Примеры индикаторов

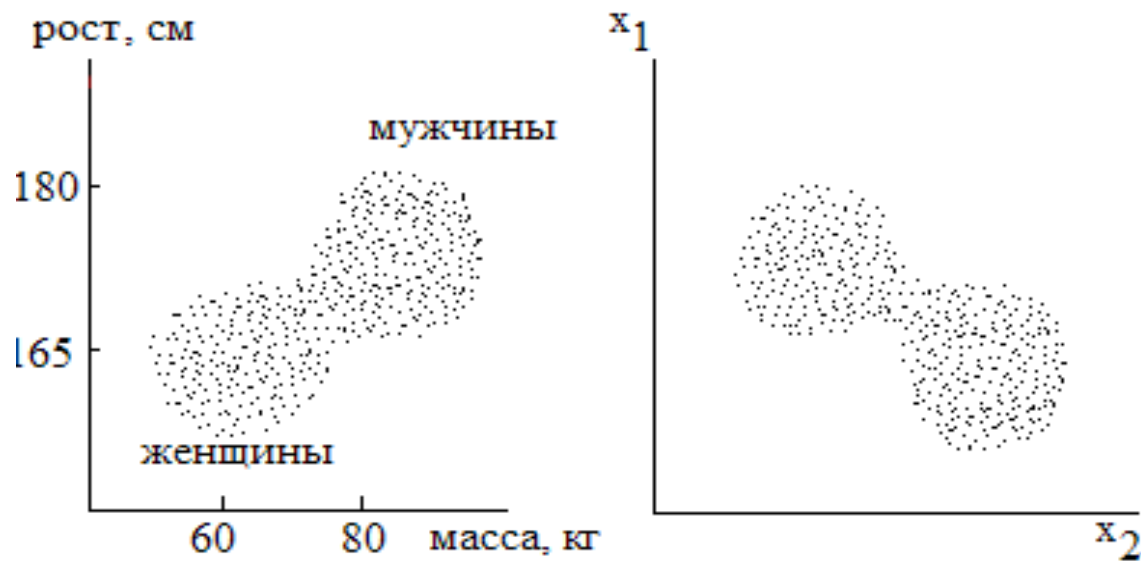
- Лекция проводится на основе рассмотрения различных видов ландшафтных индикаторов с использованием космических снимков, составляющих мозаики на картографических сервисах в интернет

Автоматизированный подход

- Методы контролируемой классификации
- Методы неконтролируемой классификации

Алгоритмы неконтролируемой
классификации:
ISODATA

Пример распределения объектов в пространстве признаков



Алгоритм кластеризации

Алгоритм работает следующим образом:

1. Выбрать m векторов в качестве начальных центров кластеров M_i , $i=1, 2, \dots, m$. Выбор произволен, но все начальные значения центров кластеров должны быть различны. Число центров кластеров должно быть задано аналитиком данных.
2. Отнести каждый вектор набора данных к ближайшему центру кластера. Обычно используется евклидово расстояние.
3. Вычислить векторы математического ожидания M_i , $i=1, 2, \dots, m$ для данных, отнесенных к каждому кластеру.
4. Если новые математические ожидания кластеров идентичны центрам кластеров, то перейти к шагу 5. Иначе установить центры кластеров равными новым математическим ожиданиям и вернуться к шагу 2.
5. Кластеризация закончена. Исследовать делимость полученных кластеров. Это требует использования меры расстояния между кластерами.

Алгоритмы контролируемой классификации: оценка обучающих выборок и точности классификации

Лектор: к.т.н. Токарева Ольга Сергеевна
Лекция 7

Обучающие выборки

Обучающие выборки (ОВ) – наборы пикселей, которые представляют распознаваемый образ (класс) и служат его идентификации.

Основные требования, предъявляемые к ОВ:

репрезентативность;

пиксели выборки должны отвечать одному классу на местности;

такой класс должен занимать территорию, которая достаточно хорошо представлена пикселями на снимке заданного ПР.

Репрезентативность ОВ определяет:

одномодальность гистограммы распределения яркости, характеризующая близость распределения к нормальному;

минимальность дисперсии, характеризующая однородность данных;

разделимость в спектральном пространстве.

Создание обучающих выборок

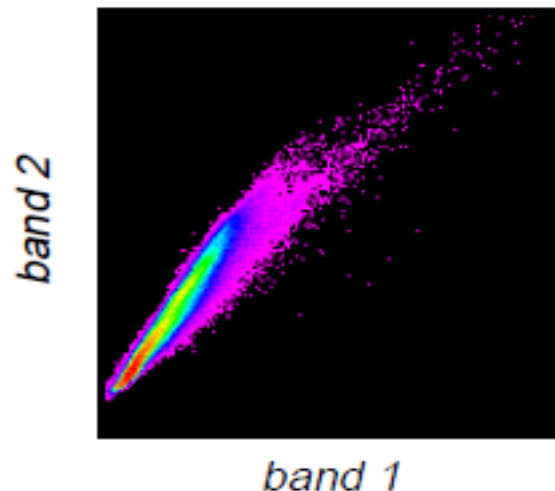
Способы выбора эталонов:

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

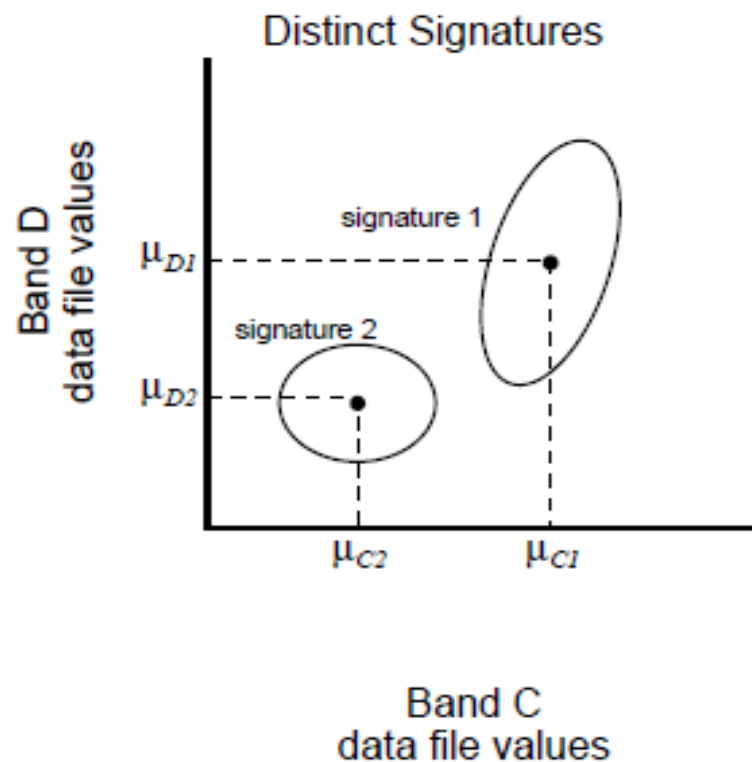
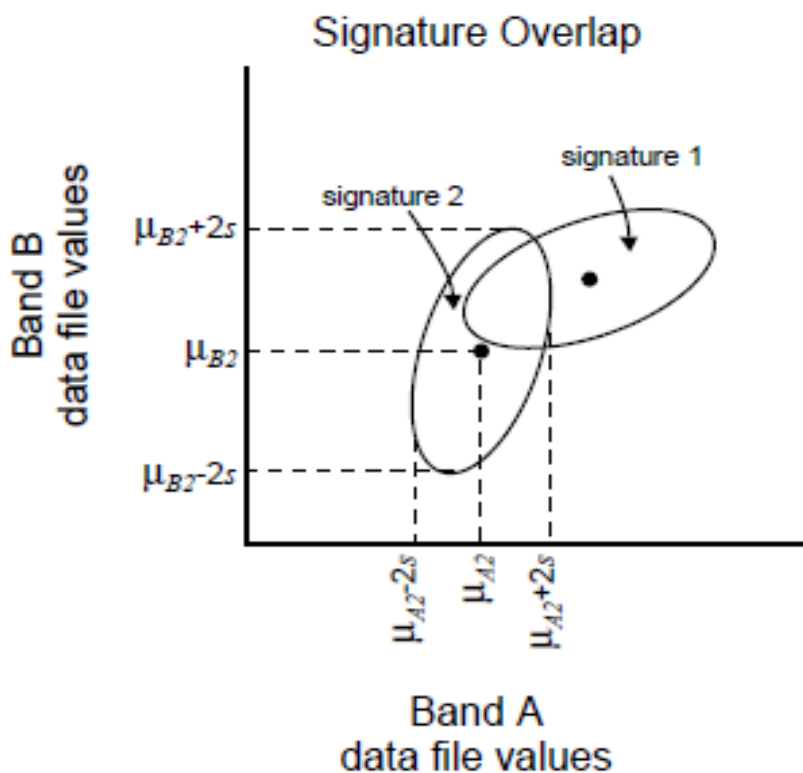
Обучающие выборки

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

Непараметрические ОВ основаны на дискретных объектах: полигонах или прямоугольниках, образуемых пользователем на изображении спектрального пространства признаков (СПП). Изображение СПП представляет собой двумерную спектральную гистограмму, т. е. график зависимости СЯ одной зоны снимка от яркостей другой зоны.



Оценка разделимости обучающих выборок



Оценка разделимости обучающих выборок. Евклидово расстояние

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

$$R(M_{\omega_1}, M_{\omega_2}) = \sqrt{\sum_{l=1}^L (X_{ij1}^l - X_{ij2}^l)^2}$$

где $R(M_{\omega_1}, M_{\omega_2})$ – расстояние между классами ω_1 и ω_2 ,

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

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

L - число зон.

Оценка разделимости обучающих выборок. Расстояние Джеффриса-Матуситы

$$\alpha = \frac{1}{8}(\mu_i - \mu_j)^T \left(\frac{C_i + C_j}{2} \right)^{-1} (\mu_i - \mu_j) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{|(C_i + C_j)/2|}{\sqrt{|C_i| \times |C_j|}} \right)$$

$$JM_{ij} = \sqrt{2(1 - e^{-\alpha})}$$

where:

i and j = the two signatures (classes) being compared

C_i = the covariance matrix of signature i

μ_i = the mean vector of signature i

\ln = the natural logarithm function

$|C_i|$ = the determinant of C_i (matrix algebra)

$$C_x = E\{(X - M_x)(X - M_x)^T\}$$

Оценка разделимости обучающих выборок. Дивергенция

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr}((C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1})) + \frac{1}{2} \text{tr}((C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T)$$

where:

i and j = the two signatures (classes) being compared

C_i = the covariance matrix of signature i

μ_i = the mean vector of signature i

tr= the trace function (matrix algebra)

T = the transposition function

Оценка разделимости обучающих выборок. Трансформированная дивергенция

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr}((C_i - C_j)(C_i^{-1} - C_j^{-1})) + \frac{1}{2} \text{tr}((C_i^{-1} - C_j^{-1})(\mu_i - \mu_j)(\mu_i - \mu_j)^T)$$

$$TD_{ij} = 2 \left(1 - \exp\left(\frac{-D_{ij}}{8}\right) \right)$$

where:

- i and j = the two signatures (classes) being compared
- C_i = the covariance matrix of signature i
- μ_i = the mean vector of signature i
- tr = the trace function (matrix algebra)
- T = the transposition function

TD is between 0 and 2000.

\mathcal{M} is between 0 and 1414.

Оценка точности классификации. Матрица ошибок классификации

Классификация	Классы на местности					
	Селитебные земли	Промзоны	Леса	Болота	Водоемы	Всего
Селитебные земли	70	5	13	0	0	88
Промзоны	3	55	0	0	0	58
Леса	0	0	37	4	0	41
Болота	0	0	0	99	0	99
Водоемы	0	0	0	0	121	121
Всего	73	60	50	103	121	407

Ошибка пропуска для класса «Леса» $13/50=26\%$,
ошибка добавления для класса «Селитебные земли» $18/88=20\%$

$$\text{Индекс Каппа } \kappa = (d - q) / (N - q)$$

где d – число случаев правильного получения результата (сумма значений, стоящих на диагонали матрицы соответствия);

$$q = \sum n_c n_r / N$$

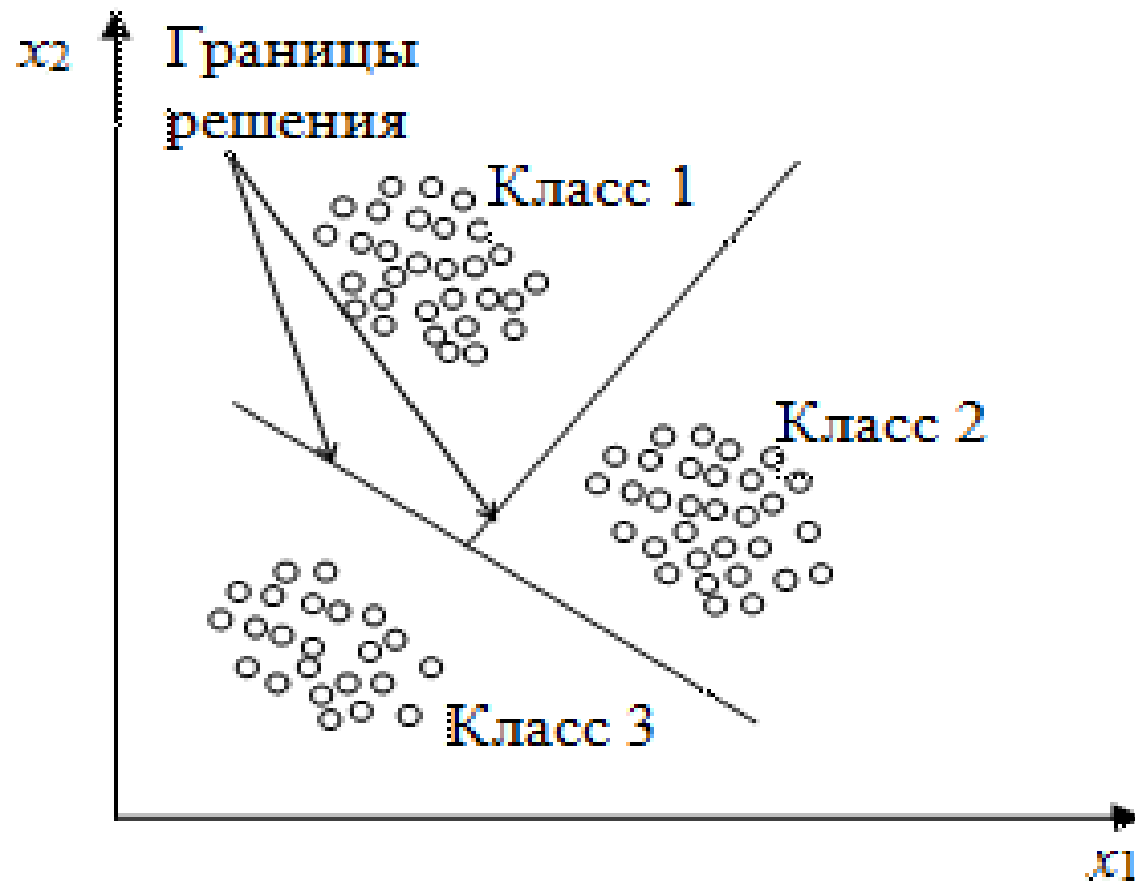
$$q = ((88*73 + 58*60 + 41*50 + 99*103 + 121*121)) / 407 = 90,398$$

$$\kappa = (382 - 90,398) / (407 - 90,398) = 0,921. \quad 382/407 = 0,9386$$

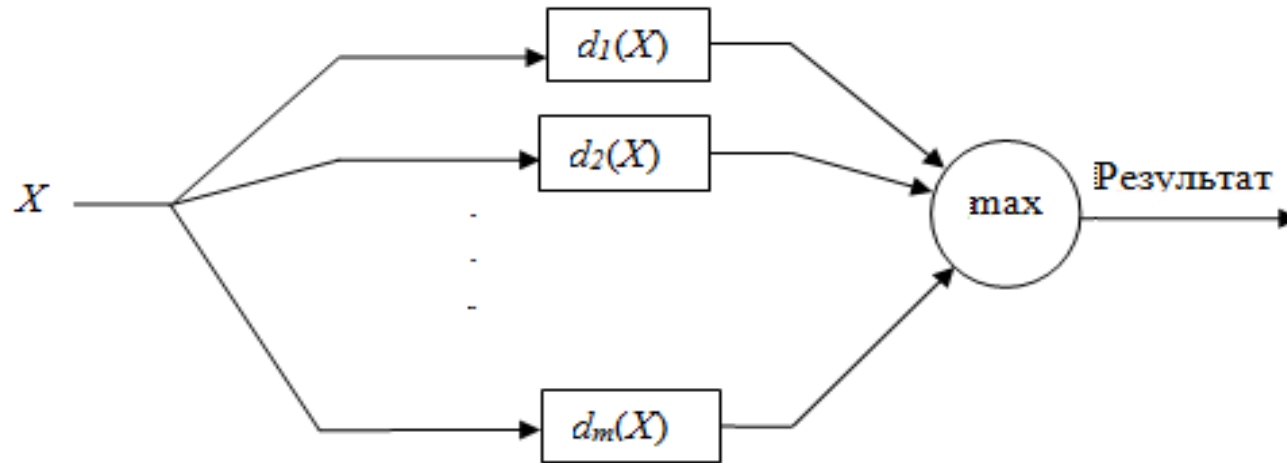
Контролируемая классификация: детерминистский подход

Лектор: к.т.н. Токарева Ольга Сергеевна
Лекция 8

Классификация: детерминистский подход



Классификация: детерминистский подход



Правило классификации: Если $d_i(X) > d_j(X)$

для всех $i, j = 1, 2, \dots, m, i \neq j$, то входной образ, представленный вектором признаков X , принадлежит классу ω_i .

Решающая граница

$$d_i(X) - d_j(X) = 0$$

Линейные дискриминантные функции

$$d_i(X) = \sum_{k=1}^N w_{ki} x_k + w_{N+1,i}, \text{ где } w_{1i}, w_{2i}, \dots, w_{N+1,i} - \text{весовые коэффициенты}$$

$$d_i(X) - d_j(X) = \sum_{k=1}^N w_k x_k + w_{N+1} = 0, \quad \text{где} \quad w_k = w_{ik} - w_{jk}$$
$$w_{N+1} = w_{N+1,i} - w_{N+1,j}$$

$$Y^T = [x_1, x_2, \dots, x_n, 1] = [X, 1]$$

Через T_1 и T_2 обозначим два множества дополненных векторов признаков, соответствующих двум множествам обучающих образов, принадлежащих двум различным классам ω_1 и ω_2 соответственно. В предположении о том, что два обучающих множества линейно разделимы, полагают о существовании вектора W , называемого вектором весов решения, такого, что

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{N+1} \end{bmatrix}$$

$$Y^T W > 0 \quad \text{для каждого } Y \in T_1$$

$$Y^T W < 0 \quad \text{для каждого } Y \in T_2$$

Процедура обучения для линейного классификатора

Для любого $Y \in T_1$ произведение $Y^T W > 0$ или $Y^T W < 0$ $Y^T W = 0$

то берется новый вектор весов

$$W' = W + \alpha Y \quad \text{где } \alpha > 0$$

Для $Y \in T_2$ произведение

$$\begin{array}{l} \text{Если} \\ Y^T W < 0 \end{array} \quad \text{или} \quad \begin{array}{l} \text{или} \\ Y^T W > 0 \end{array} \quad Y^T W = 0$$

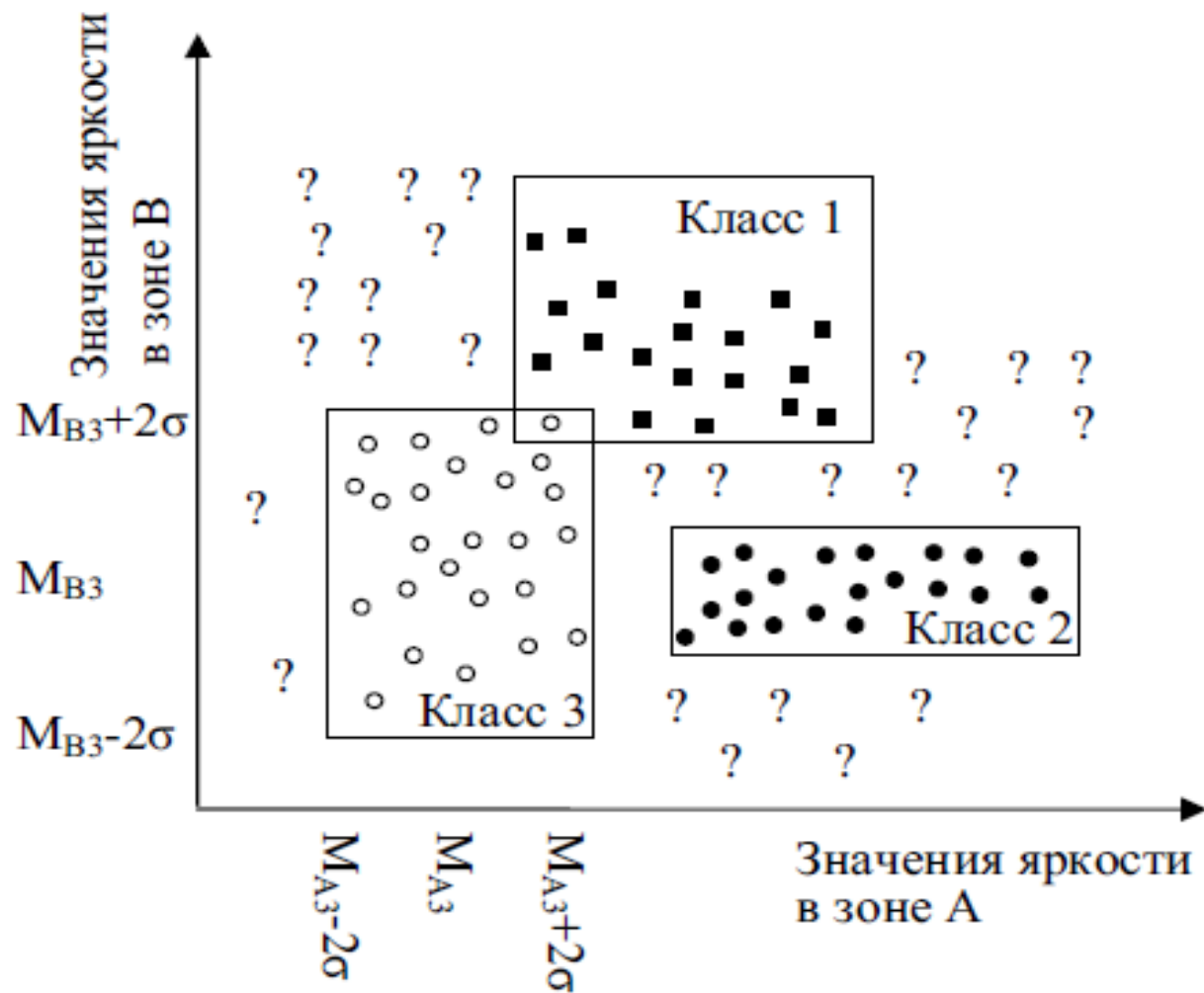
то принимается

Для выбора α может применяться одно из трех правил:

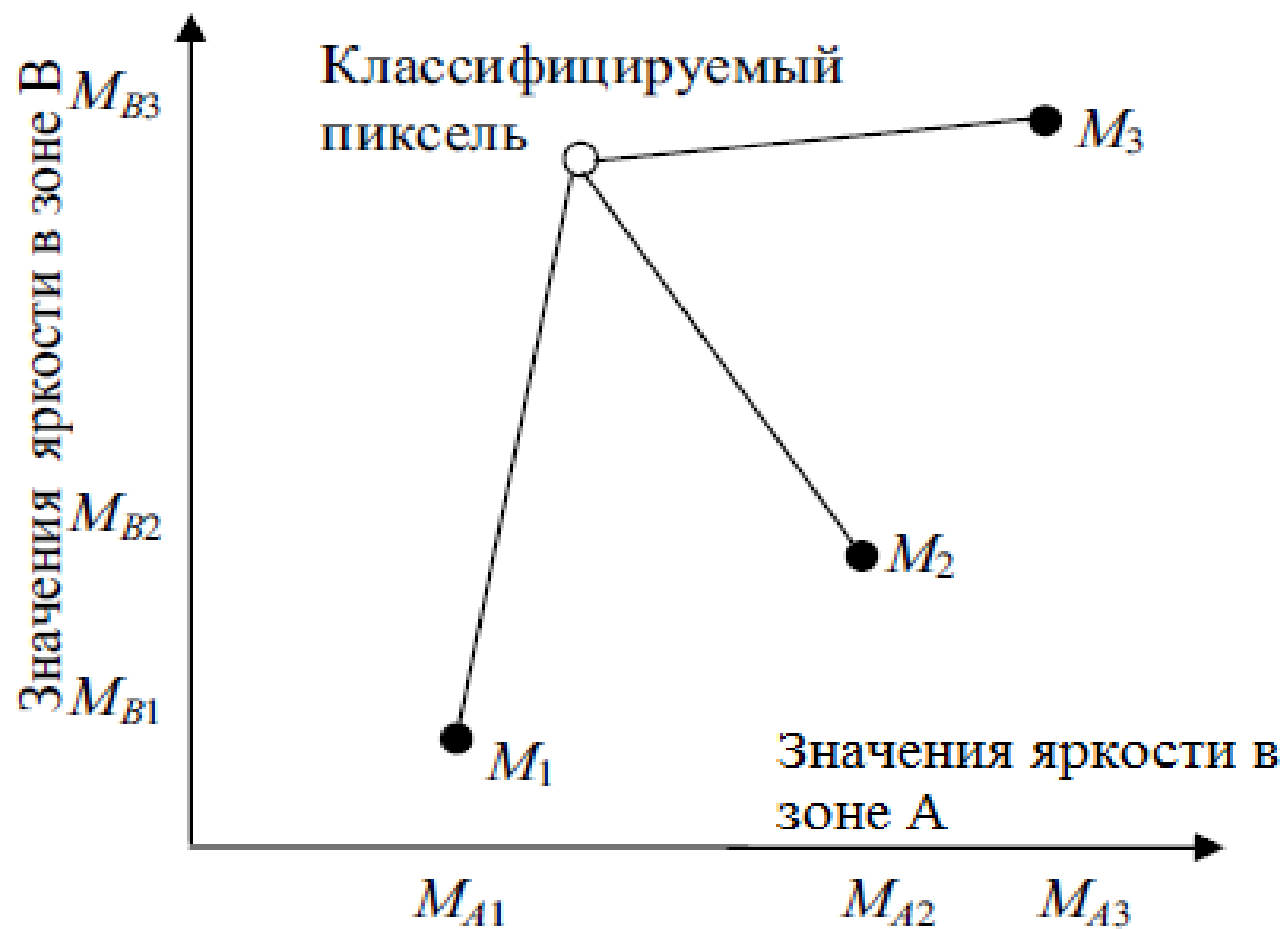
- Правило фиксированного дополнения: α является любым фиксированным положительным числом.
- Правило абсолютной поправки: α берется равным наименьшему целому числу, при котором значение $Y^T W$ переходит порог, равный нулю, т. е. α – наименьшее целое число большее
- Правило дробной поправки: $\alpha = \lambda |Y^T W| / Y^T Y$, при $0 < \lambda \leq 2$.

$$\alpha = \lambda |Y^T W| / Y^T Y$$

Метод параллелепипеда



Метод минимального расстояния



Метод минимального расстояния

$$d_j(X) = \|X - M_j\|, j = 1, 2, \dots, m$$

$$\|a\| = (a^T a)^{1/2} \text{ - Евклидова норма}$$

$$D_j^2 = \|X - M_j\|^T \|X - M_j\| = X^T X - 2X^T M_j + M_j^T M_j = X^T X - 2(X^T M_j + (1/2) * M_j^T M_j)$$

$$d_j(X) = X^T M_j - \frac{1}{2} M_j^T M_j, j = 1, 2, \dots, m$$

Разделяющая поверхность:

$$d_i(X) - d_j(X) = X^T (M_i - M_j) - \frac{1}{2} (M_i - M_j)^T (M_i - M_j) = 0$$

Метод минимального расстояния. Расстояние Махаланобиса

$$D = (X - M_c)^T (Cov_c^{-1}) (X - M_c)$$

where:

D = Mahalanobis distance

c = a particular class

X = the measurement vector of the candidate pixel

M_c = the mean vector of the signature of class c

Cov_c = the covariance matrix of the pixels in the signature of class c

Cov_c^{-1} = inverse of Cov_c

T = transposition function

Классификация: статистический подход

Методы статистического распознавания образов особенно

подходят для прикладных дистанционных исследований в силу ряда причин:

- 1) Вследствие случайного характера природных процессов данные ДЗЗ содержат много случайных вариаций, маскирующих характерные различия между интересующими нас классами. Статистический анализ позволяет учесть эти вариации и потенциально уменьшить их отрицательное влияние на точность классификации.
- 2) На практике часто имеется неопределенность относительно правильной идентификации обучающих образов, используемых для определения дискриминантных функций. Статистические методы допускают такие ошибки, пока частота их повторения относительно мала.
- 3) Исследуемые классы образов могут в действительности перекрываться в пространстве измерений, т.е. некоторые измерения из одного класса могут быть неотличимы от измерений других классов. В таких случаях статистические методы позволяют производить классификации, которые являются «наиболее вероятно» правильными.

Алгоритм классификации на основе метода максимального правдоподобия

Требует нормального распределения данных в каждой спектральной зоне.

Предполагаем, что

- появление на снимке объекта, относящегося к классу ω_i – случайное событие,
- X – вектор признаков - вектор случайных значений.

Для решения задачи нужно знать:

$P(\omega_i)$ – априорную вероятность появления объекта класса ω_i

$P(X|\omega_i)$ – функцию условной плотности распределения вероятностей вектора признаков X (функция правдоподобия, вероятность встретить X , если он принадлежит ω_i).

Процесс построения $P(X|\omega_i)$ называют **обучением классификатора**

Классификация осуществляется на основе Байесовского решающего правила.

Решающее правило: Принять решение X принадлежит ω_i , если и только если $p(X|\omega_i)p(\omega_i) > p(X|\omega_j)p(\omega_j)$ для всех $j=1, 2, \dots, m$.

На практике априорные вероятности и потери известны редко, поэтому предполагаются равными, так что решающее правило перейдет в условие

$p(X/\omega_i)/p(X/\omega_j) > 1$ (отношение правдоподобия) или $p(X/\omega_i) > p(X/\omega_j)$,

т.е. классификация относит каждое измерение к тому классу, для которого **правдоподобие** получения этого измерения максимально.

Алгоритм классификации на основе метода максимального правдоподобия

Пусть априори предполагается, что распределение спектральных яркостей пикселей объекта на многозональном снимке подчинено нормальному закону. Тогда плотность распределения случайного вектора $X=(X_1, \dots, X_L)$ имеет вид:

$$p(X | \omega_i) = \exp[-\frac{1}{2}(X-M_i)^T K_i^{-1} (X-M_i)] / ((2\pi)^{L/2} |K_i|^{1/2})$$

L – число зон спектра

M – вектор средних значений яркости

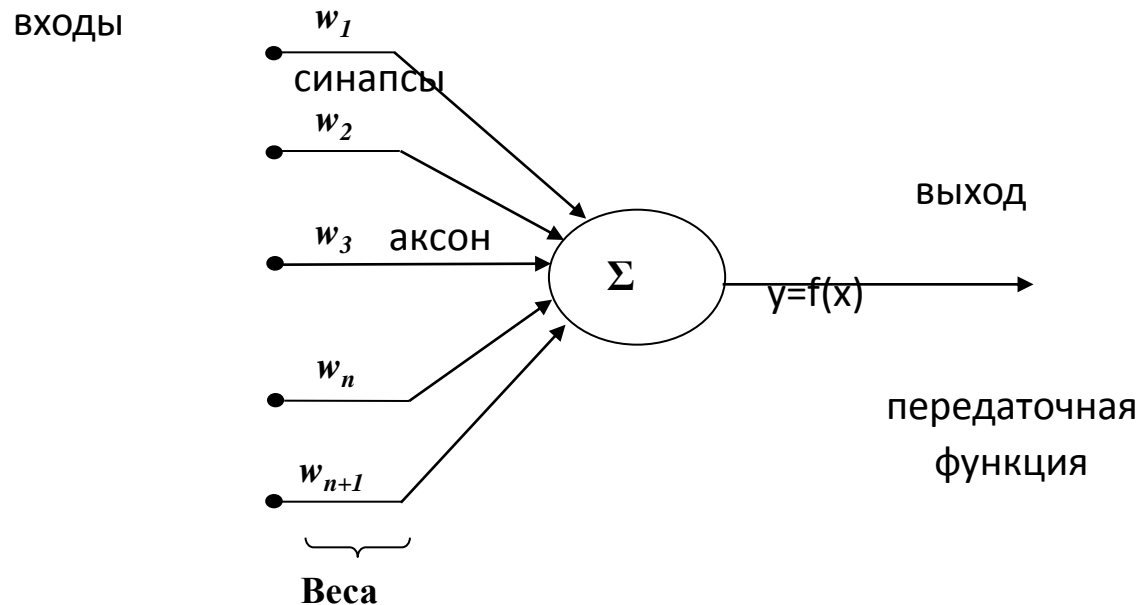
K_i – ковариационная матрица $L \times L$ для i -го класса.

Метод максимального правдоподобия относится к наиболее точным методам при условии, что исходные выборки имеют нормальное распределение.

При значительной дисперсии в эталонной выборке ее ковариационная матрица будет иметь высокие значения коэффициентов, что приводит к завышенному количеству пикселей, отнесенных к данному классу.

Дешифрирование на основе нейронных сетей

Искусственные нейронные сети – математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по типу организации и функционирования биологических нейронных сетей.



Нейрон – упрощенная математическая абстракция биологического нейрона

Каждый нейрон обладает группой **синапсов** – однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, и имеет **аксон** – выходную связь данного нейрона, с которого сигнал может поступать на синапсы других нейронов.

Нейронная сеть описывается весами и передаточными функциями.

Входные сигналы X_n , взвешенные весовыми коэффициентами, складываются, проходят через передаточную функцию, генерируют результат и выводятся.

Дешифрирование на основе нейронных сетей

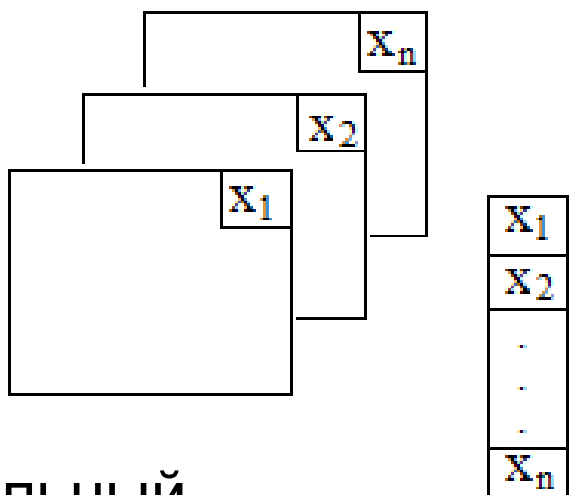
Построение

- Выбор типа нейронной сети (архитектуры: сети Кохонена, многослойный перцептрон и др.)
- Подбор весов – обучение нейронной сети

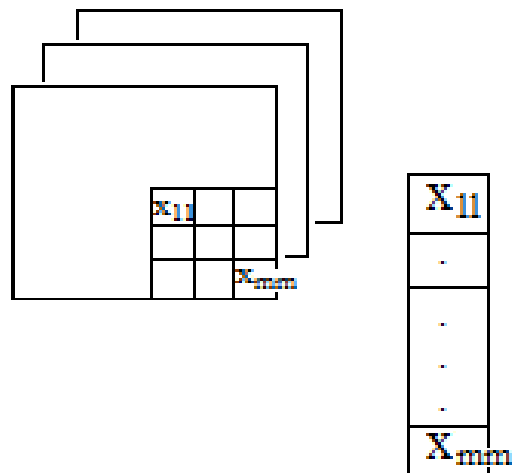
На первом этапе:

- определяют, какие нейроны будут использованы (число входов, передаточные функции);
- как их соединить между собой;
- что взять в качестве входов и выходов.

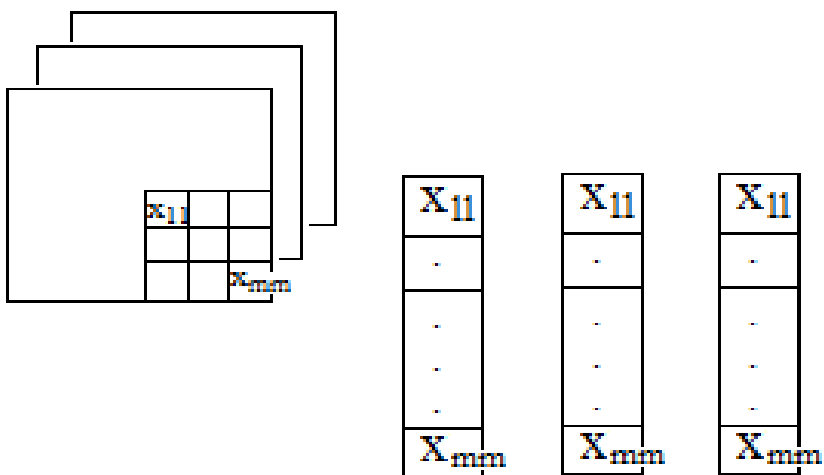
Формирование признакового пространства



спектральный



контекстный

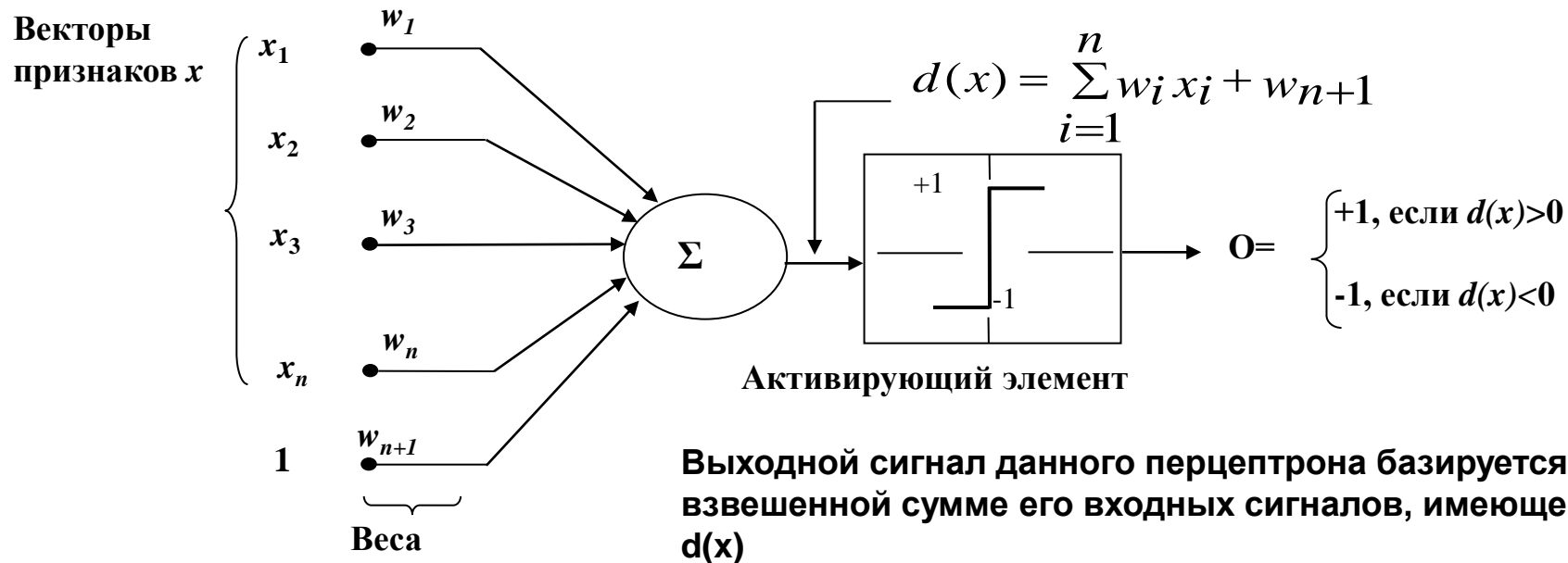


Контекстно -
спектральный

Дешифрирование на основе нейронных сетей

Модель перцептрона для двух классов образов

В самой простой форме при обучении перцептрона строится линейная дискриминантная функция, осуществляющая дихотомию двух линейно разделимых обучающих выборок



Веса — изменяют сигналы перед тем, как они суммируются и подаются на пороговое устройство

Активирующая функция — функция, которая отображает результат суммирования в конечный выходной сигнал

Используется единая дискриминантная функция для двух классов

Дешифрирование на основе нейронных сетей

Обучение. Правило постоянного коэффициента коррекции

Рассмотрим простой итерационный алгоритм получения весового вектора, являющегося решением для двух линейно разделимых обучающих выборок.

Пусть имеются две обучающие выборки расширенных векторов признаков объектов, принадлежащих классам ω_1 и ω_2 соответственно, и пусть $w(1)$ — начальный весовой вектор, который можно выбрать произвольно.

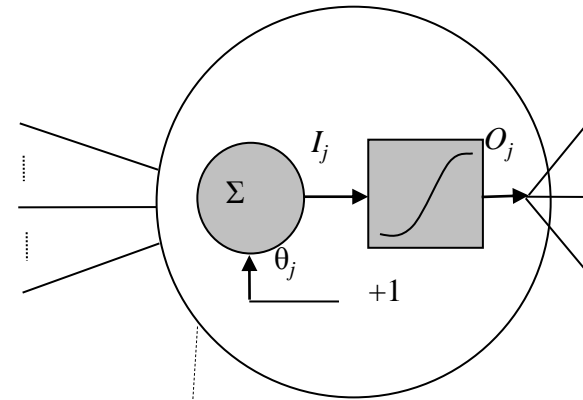
Тогда на k -ом шаге итерации, если $y(k)$ принадлежит ω_1 и $w^T(k)y(k) \leq 0$, заменяем $w(k)$ на $w(k+1) = w(k) + cy(k)$, где c — положительный коэффициент корреляции.

Если $y(k)$ принадлежит ω_2 и $w^T(k)y(k) \geq 0$, заменяем $w(k)$ на $w(k+1) = w(k) - cy(k)$.
В остальных случаях $w(k)$ оставляют неизменным: $w(k+1) = w(k)$.

Данный алгоритм вносит изменения в вектор w только в тех случаях, когда рассматриваемый на k -ом шаге обработки обучающей последовательности объект классифицируется ошибочно. Корректирующий коэффициент c считается положительным и в данном случае постоянным. Такой алгоритм иногда называют **правилом постоянного коэффициента коррекции**.

Сходимость алгоритма наступает, когда обучающие выборки обоих классов целиком проходят через машину без единой ошибки. Алгоритм с постоянным коэффициентом коррекции сходится за конечное число шагов, если две используемые обучающие выборки являются линейно разделимыми.

Многослойная сеть



Веса w_{ax}
 $a=1,2,\dots,N_A$
 $i=1,2,\dots,n$

Веса w_{ba}
 $b=1,2,\dots,N_B$
 $a=1,2,\dots,N_A$

Веса w_{jk}
 $j=1,2,\dots,N_J$
 $k=1,2,\dots,N_K$

Веса w_{pj}
 $p=1,2,\dots,N_P$
 $j=1,2,\dots,N_J$

Веса w_{qp}
 $q=1,2,\dots,N_Q$
 $p=1,2,\dots,N_P$

