

Сергей А. Лебедев



*Геофизический Центр,
Российская академия наук*



*Майкопский государственный
технологический университет*

Введение в дистанционные методы зондирования Земли



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

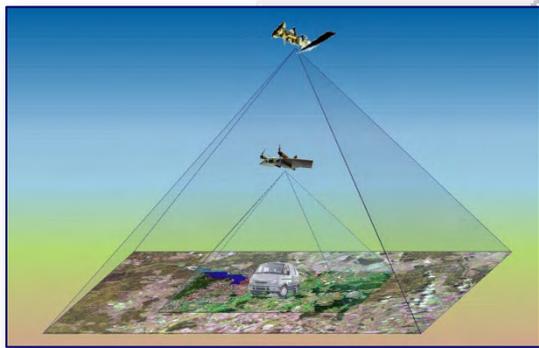
© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)



Термин «дистанционное зондирование» означает зондирование поверхности Земли из космоса с использованием свойств электромагнитных волн, излучаемых, отражаемых или рассеиваемых зондируемыми объектами, с целью лучшего распоряжения природными ресурсами, совершенствования землепользования и охраны окружающей среды.

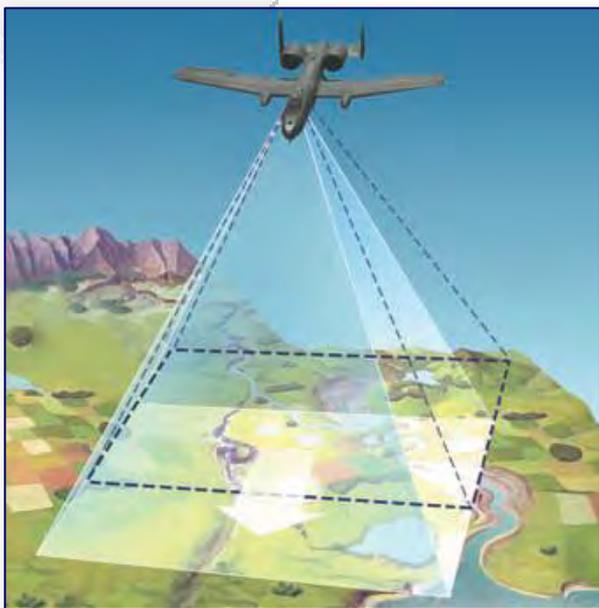


Принципы, касающиеся дистанционного зондирования Земли из космического пространства приняты резолюцией 41/65 Генеральной Ассамблеи ООН от 3 декабря 1986 года

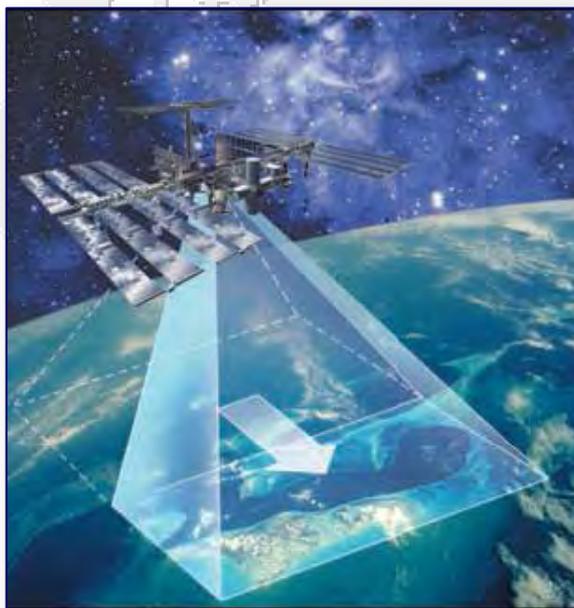


Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)

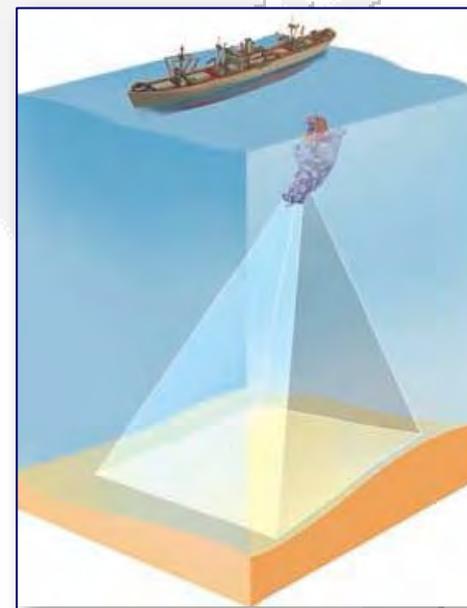
Дистанционное зондирование – перевод американского термина «*Remote Sensing*», который обозначает в общем, наиболее широком его смысле, изучение объектов на расстоянии, т. е. без непосредственного контакта приемных чувствительных элементов аппаратуры (датчиков или сенсоров) с поверхностью исследуемого объекта.



Аэрофотосъемка



Космическая съёмка



Подводная фотосъёмка





История развития



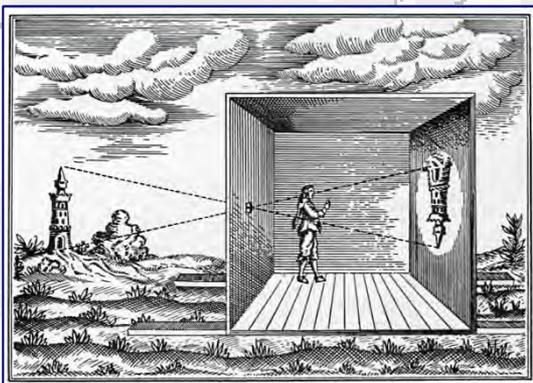
Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев

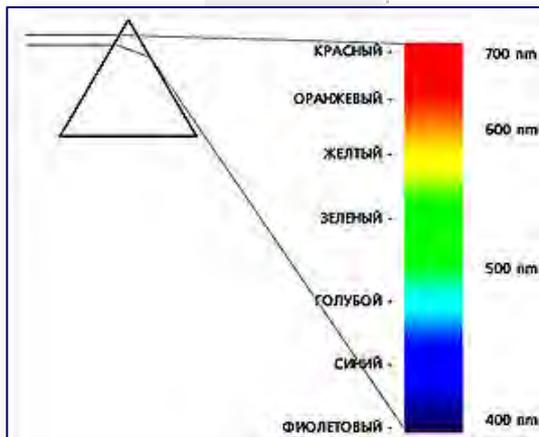


Хронология основополагающих научных открытий

Дистанционное зондирование (ДЗ) — получение информации об объекте по данным измерений, сделанных на расстоянии от объекта, т. е. без прямого контакта с объектом.

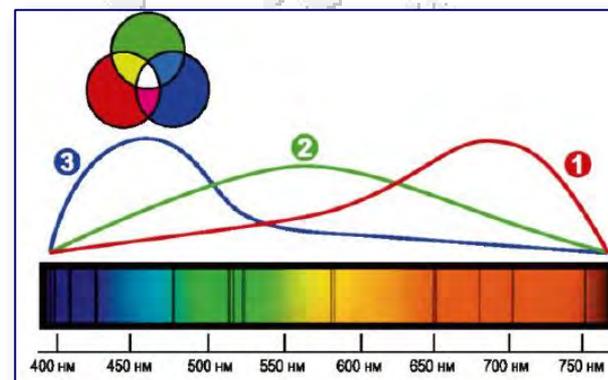
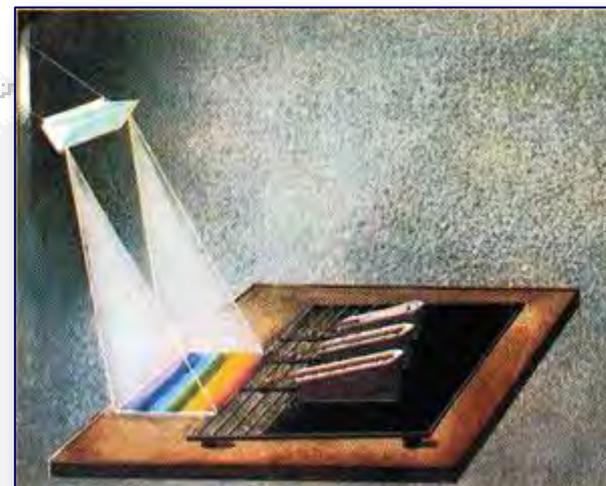


- Наиболее важным изобретением древних времен является камера-обскура, ее можно считать первым средством дистанционного зондирования. Принципиальным моментом в данном случае являлось то, что не было способа непосредственной записи изображения.
- 1614 г. Анджело Сала обнаружил, что соли серебра темнеют при воздействии солнечного света. Это открытие имеет принципиальное значение для последующего развития фотографии.
- 1666 г. Исаак Ньютон, экспериментировавший в то время с призмой, обнаружил, что с ее помощью свет может быть разложен на разноцветные составляющие. Возникает понятие о спектре.
- 1777 г. Карл Вильгельм Шееле обнаружил, что хромат серебра, темнеющий под воздействием солнечного света, может быть смыт аммиаком. При этом остаются темные неэкспонированные кристаллы хромата серебра, тем самым формируя «фиксированное» изображение, являющееся предшественником фотоматериалов.



Хронология основополагающих научных открытий

- ⇒ 1800 г. Уильям Гершель показал наличие инфракрасного излучения (ИК), поместив термометр сразу за красной полосой видимого спектра, полученного при помощи призмы.
- ⇒ 1802 г. Томас Юнг выдвинул основные положения концепции Юнга–Гельмгольца о теории цветного зрения на основе трех отдельных наборов колбочек в сетчатке глаза, «настроенных» на красный, синий и зеленый цвета.
- ⇒ 1841 г. Тальбот зарегистрировал патент на негативно-позитивный способ создания фотоснимков. Запатентованное изобретение Тальбота, по сути, является фотографическим процессом в его современном понимании. С точки зрения дистанционного зондирования это изобретение позволяло проводить автоматизированную запись информации об объектах, находящихся на расстоянии.
- ⇒ 1863 г. Джеймс К. Максвелл разработал теорию электромагнитного поля. В современном контексте дистанционного зондирования Земли уравнения Максвелла являются фундаментальными.



Хронология возникновения и развития аэро съемки Земли



*Первый аэрофотоснимок
(Г.Ф. Турнашон, 1858)*



Над Бостоном (Д.У. Блейк, 1860)

- ⇒ 1858 г. Гаспер-Феликс Турнашон (Надар) получает первый аэрофотоснимок Парижа с привязного аэростата с высоты более 350 м.
- ⇒ 1861 г. фотограф Томас Саттон вместе с Джеймсом Кларком Максвеллом продемонстрировали методы получения цветного изображения с использованием красного, синего, зеленого и лимонного светофильтров.
- ⇒ 1873 г. Герман Фогель обнаружил, что путем замачивания галогенидов серебра (чувствительных к синему свету) в различных красителях светочувствительность может быть смещена в сторону более длинных волн, что привело к открытию возможности получения снимков в ближней инфракрасной зоне электромагнитного спектра.
- ⇒ 1887 г. в Германии начали эксперименты по аэрофотосъемке и фотограмметрической обработке съемочных материалов для измерения метрических характеристик участков лесов.



Хронология возникновения и развития аэросъемки Земли

- ⇒ 1889 г. Артур Батут сделал первый аэрофотоснимок с использованием воздушного змея.
- ⇒ 1897 г. Альфредом Нобелем был получен первый аэрофотоснимок с использованием ракеты.
- ⇒ 1899 г. Джордж Истман выпустил нитроцеллюлозную пленку, которая позволяла без потери качества снимков заменить стеклянные пластины, используемые в то время в качестве подложки для фотоматериалов.
- ⇒ 1900 г. Макс Планк открыл математическое описание абсолютно черного тела, заложив основу для последующего развития квантовой механики и методов обработки данных дистанционного зондирования.
- ⇒ 1903 г. баварские военные использовали голубей для получения аэрофотоснимков, а Юлия Нейбронн запатентовала установку фотокамеры на груди у голубя.
- ⇒ 1903–1904 гг. состоялись знаменитые полеты Уилбура и Орвилла Райт (братьев Райт). Они впервые поднялись в воздух на самолете, используя горючее топливо.



Хронология возникновения и развития аэросъемки Земли

- ⇒ 1906 г. Альберт Мол получил аэрофотоснимок с высоты около 800 м с использованием реактивной ракеты, работающей на сжатом воздухе. Камера была возвращена на землю на парашюте.
- ⇒ 1906 г. Джордж Р. Лоуренс, экспериментировавший с камерами (некоторые из них весили сотни килограммов) производил аэрофотосъемку землетрясения в Сан-Франциско с высоты около 600 м.



Аэрофотосъемка Сан-Франциско после землетрясения в 1906 году (Джордж Р. Лоуренс, 1906)

- ⇒ 1907 г. Огюст и Луи Люмьер разработали простую систему цветной фотографии и реализовали ее в 35-миллиметровом стандарте.
- ⇒ 1909 г. Уилбур Райт получил первые аэрофотоснимки с использованием самолета.
- ⇒ 1915 г. лейтенантом-полковником Брабазоном в сотрудничестве с Thornton Pickard Ltd. были разработаны и изготовлены первые аэрофотоаппараты.



Хронология возникновения и развития аэросъемки Земли

- 1919 г. началась канадская программа картирования лесов с использованием аэросъемки.
- 1920 г. появились первые книги по дешифрированию аэроснимков.
- 1924 г. Маннес и Годоский запатентовали многослойную фотопленку.
- 1931 г. капитан Альберт В. Стивенс развил инфракрасную чувствительность фотопленки.
- 1936 г. Стивенс вместе с капитаном Андерсоном получил первые фотографии фактической кривизны Земли со свободно летящего воздушного шара с высоты 22 065 м.
- 1942 г. Kodak запатентовал первую псевдоцветную ИК-чувствительную пленку.

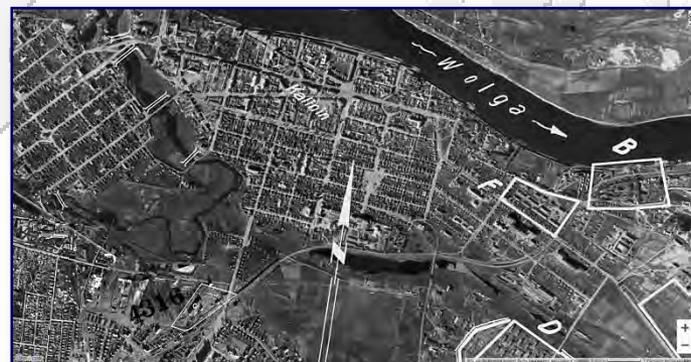


Хронология возникновения и развития аэрофотосъемки Земли



Севастополь, 1941 немецкая аэрофотосъемка

⇒ Вторая мировая война привела к резкому развитию аэрофотосъемки и методов интерпретации аэрофотоснимков. Германия впервые применила аэрофоторазведку для решения таких задач, как обнаружение и идентификация вражеской техники, оценка глубин для высадки морского десанта, оценка характеристик растительности и показателей проходимости территорий и др.



Калинин (Тверь), 1941 немецкая аэрофотосъемка



Хронология возникновения и развития космической съемки Земли

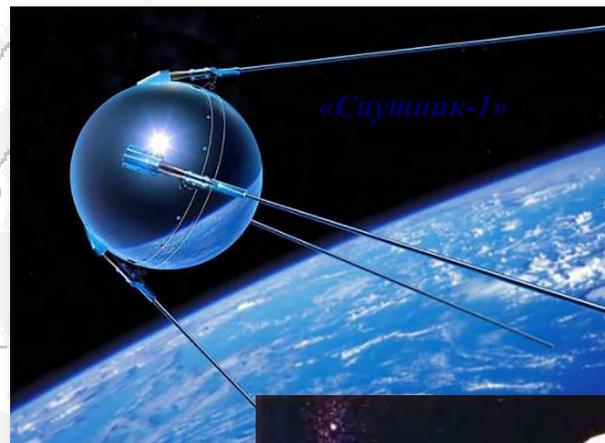
Развитие космической съемки Земли также тесно связано с изобретением и совершенствованием приемников излучения различного типа.

- ⇒ В 1911 г. берлинские ученые использовали фотодиоды для регистрации явления солнечного затмения, наблюдавшегося в Египте.
- ⇒ В конце 1950-х гг. были найдены и развиты технологии, которые обеспечивали низкую плотность дефектов и примесей в поверхностном слое полупроводника. Тем самым были заложены предпосылки для изобретения приборов с зарядовой связью (ПЗС).
- ⇒ В конце 1960-х гг. были созданы первые ПЗС, в которых технология твердотельных приемников проявилась особенно успешно.
- ⇒ Впервые устройство, способное сохранять и затем считывать электронные заряды, было разработано двумя сотрудниками известной телефонной корпорации Bell в конце 1960-х гг.
- ⇒ В 1972 г. группа американских ученых из Лаборатории реактивного движения NASA основала программу развития приемников электромагнитного излучения для астрономии и космических исследований. Три года спустя совместно с учеными университета Аризоны эта команда получила первое ПЗС-изображение астрономического объекта – Урана.
- ⇒ В 1954 г. в США был разработан первый радиолокатор бокового обзора, предназначенный для размещения на борту летательного аппарата



Хронология возникновения и развития космической съемки Земли

- ➔ До конца 1950-х гг. космическая съемка поверхности Земли осуществлялась с высот до 200 км исключительно с использованием аппаратуры, устанавливаемой на баллистических ракетах и зондах.
- ➔ 4 октября 1957 г. в СССР был запущен «Спутник-1» — первый в мире искусственный спутник Земли (ИСЗ). США запустили свой первый спутник в январе 1958 г.
- ➔ 1 апреля 1960 г. был произведен запуск первого оперативного метеорологического спутника Tiros-1 (США).
- ➔ 12 апреля 1961 г. Ю. А. Гагарин стал первым человеком, совершившим космический полет.



Хронология возникновения и развития космической съемки Земли



- ➔ В августе 1961 г., с борта корабля «Восток-2» летчик-космонавт СССР Г. С. Титов впервые выполнил «ручное» фотографирование Земли из космоса
- ➔ В 1964 г. в США было положено начало развертыванию системы метеорологических ИСЗ Nimbus.
- ➔ 25 июня 1966 г. в СССР был запущен первый оперативный метеорологический ИСЗ.
- ➔ В июне 1970 г. летчики-космонавты СССР А. Г. Николаев и В. И. Севастьянов выполнили космические фотосъемки с борта космического корабля «Союз-9». В период их полета впервые проведены подспутниковые эксперименты с целью отработки методики дешифрирования космических снимков. По снимкам с «Союз-9» были составлены космические фотокарты масштаба 1:1 000 000.

*Снимок Земли, сделанный Г.С. Титовым с борта космического корабля «Восток-2». Вид горизонта на освещенной стороне Земли. 6 августа 1961 г.
РГАНТД. Ф. 24. Оп. 1. Д. 3. Л. 18.*

Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.





Основные преимущества использования ДЗЗ



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Основные преимущества использования ДЗЗ

В современных условиях следующие характеристики определяют востребованность космических снимков (КС):

- **Объективность** - каждый КС является документом, объективно отражающим состояние местности на момент съемки. Подделать КС практически невозможно, так как съемку ведут различные компании-операторы и попытки изменения данных могут быть легко обнаружены.
- **Актуальность** - материалы космической съемки можно получить на различные даты, включая съемку на заказ, которая осуществляется, как правило, в течение нескольких недель.
- **Масштабность** - современные приборы ДЗЗ позволяют одновременно снять значительные по площади территории с довольно высокой степенью детализации.
- **Экстерриториальность** - участки съемки никак не привязаны к государственным и территориальным границам и для проведения съемки не требуется разрешение.
- **Доступность** - в настоящее время данные ДЗЗ с пространственным разрешением 2 м и ниже являются открытыми. Процедура заказа и получения снимков достаточно проста.

Данные ДЗЗ, особенно полученные с космических спутников, зачастую нельзя получить никаким другим способом. Современная служба погоды в значительной мере основана на наблюдениях со спутников. Следует отметить, что чем больше территория государства, тем более эффективно применение дистанционных методов.





Электромагнитное излучение



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

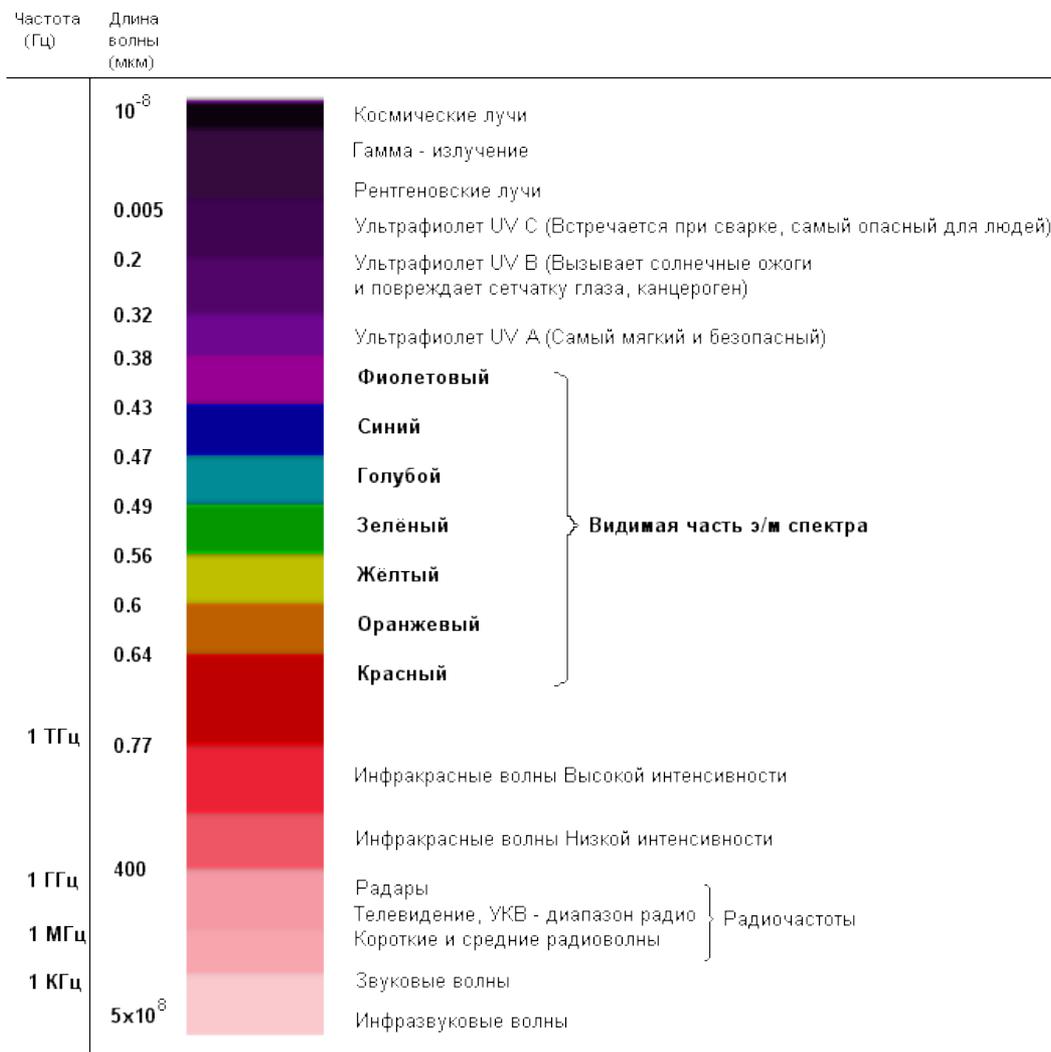
© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Электромагнитное излучение

Электромагнитное излучение проявляется разными способами: и как свет, который мы видим, и как тепло, которое мы ощущаем, и как радиоволны. С физической точки зрения излучение – это электромагнитные колебания различной частоты, распространяющиеся со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с в вакууме и с несколько меньшей скоростью в различных средах.

Шкала электромагнитного излучения



Длина волны: 1 мкм (1т) = 1/1000 мм
Частота: 1 Гц = число колебаний волны за секунду



Радиоволны

Радиоволны могут значительно различаться по длине — от нескольких сантиметров до сотен и даже тысяч километров, что сопоставимо с радиусом Земного шара.

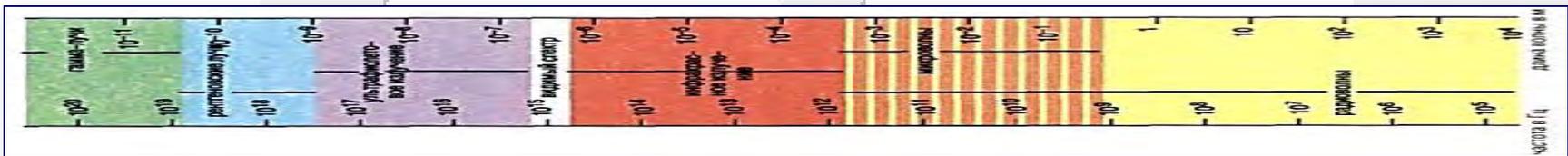
Волны всех радиодиапазонов широко используются в технике — дециметровые и ультракороткие метровые волны применяются для телевидения и радиовещания в диапазоне ультракоротких волн с частотной модуляцией (УКВ/FM), обеспечивая высокое качество приема сигнала в пределах зоны прямого распространения волн.

Радиоволны метрового и километрового диапазона применяются для радиовещания и радиосвязи на больших расстояниях с использованием амплитудной модуляции, которая в ущерб качеству сигнала обеспечивает его передачу на сколь угодно большие расстояния в пределах Земли

Диапазон	Частоты	Длина волны
P	< 300 МГц	> 1 м
L	1–2 ГГц	15–30 см
S	2–4 ГГц	7,50–15 см
C	4–8 ГГц	3,75–7,5 см
X	8–12 ГГц	2,50–3,75 см
Ku	12–18 ГГц	1,67–2,50 см
K	18–27 ГГц	1,11–1,67 см
Ka	27–40 ГГц	0,75–1,11 см
V	40–75 ГГц	4,0–7,5 мм
W	75–100 ГГц	2,7–4,0 мм

благодаря отражению волн от ионосферы планеты.

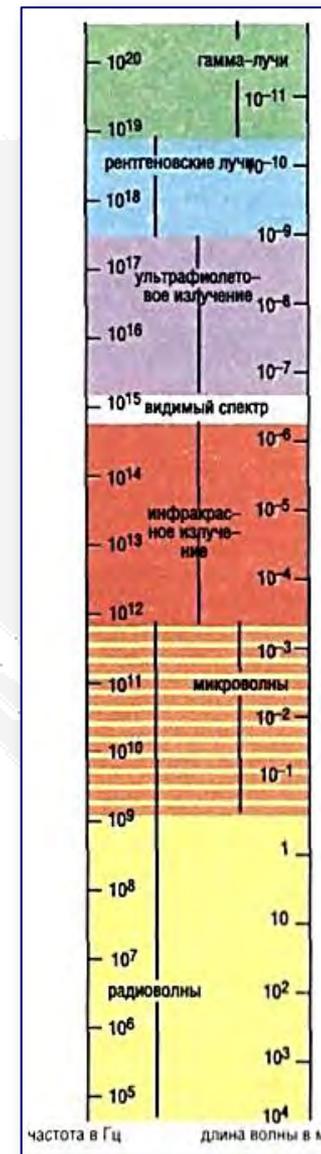
Волны дециметрового диапазона не могут огибать земной горизонт подобно метровым волнам, что ограничивает зону приема областью прямого распространения, которая, в зависимости от высоты антенны и мощности передатчика, составляет от нескольких до нескольких десятков километров.



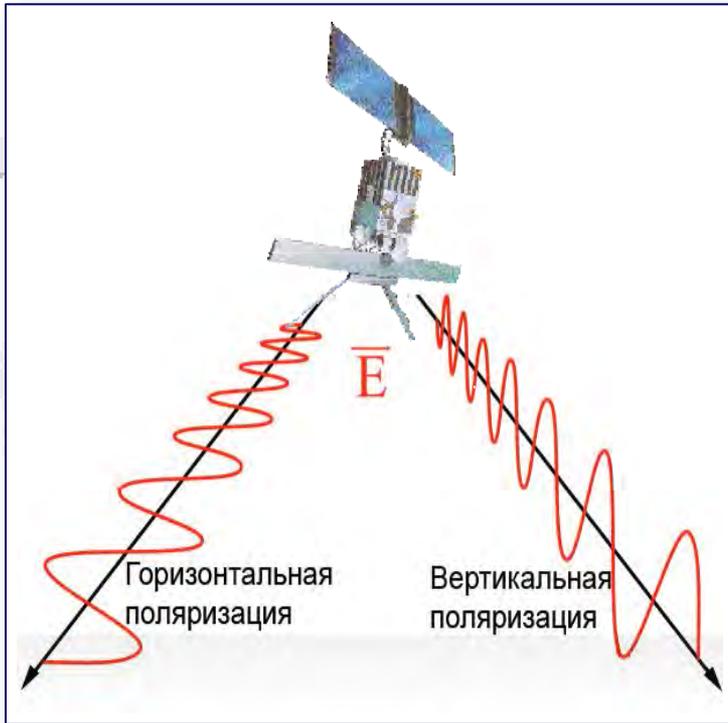
Микроволны

Микроволны и радиоволны диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) имеют длину от 300 мм до 1 мм. Сантиметровые волны, подобно дециметровым и метровым радиоволнам, практически не поглощаются атмосферой и поэтому широко используются в спутниковой и сотовой связи и других телекоммуникационных системах. Размер типовой спутниковой тарелки как раз равен нескольким длинам таких волн.

Более короткие СВЧ-волны также находят множество применений в промышленности и в быту. Достаточно упомянуть про микроволновые печи, которыми сегодня оснащены и промышленные хлебопекарни, и домашние кухни. Действие микроволновой печи основано на быстром вращении электронов в устройстве, которое называется клистрон. В результате электроны излучают электромагнитные СВЧ-волны определенной частоты, при которой они легко поглощаются молекулами воды. Когда вы помещаете еду в микроволновую печь, молекулы воды, содержащиеся в еде, поглощают энергию микроволн, движутся быстрее и таким образом разогревают еду. Иными словами, в отличие от обычной духовки или печи, где еда разогревается снаружи, микроволновая печь разогревает ее изнутри.

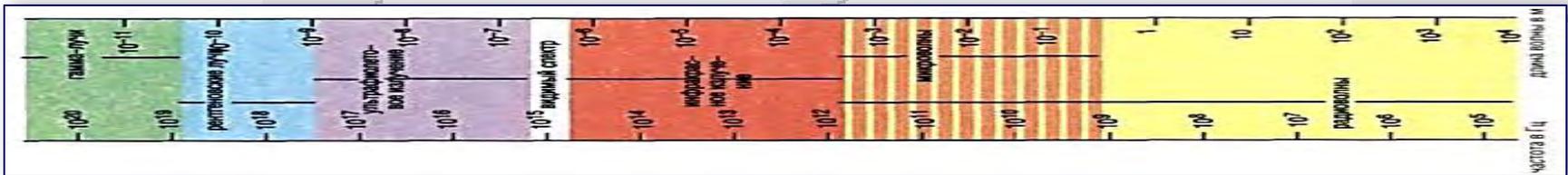


Поляризация вектора электрического поля

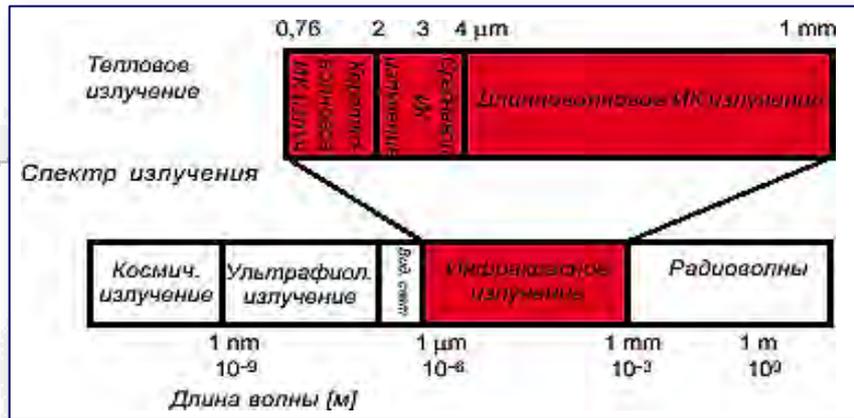


В практике дистанционного зондирования Земли используются электромагнитные волны с различной поляризацией (горизонтальной или вертикальной). Плоскость, проходящая через направление распространения электромагнитной волны и направление вектора электрического поля, называется плоскостью поляризации. Если плоскость поляризации в данной точке пространства сохраняет фиксированное положение, то волну называют плоско или линейно поляризованной. Поляризация излучения определяется ориентацией вектора электрического поля E в плоскости, перпендикулярной направлению

распространения радиоволны. При горизонтальной поляризации излучения вектор электрического поля E_H параллелен подстилающей поверхности. При вертикальной поляризации вектор излучения E_V направлен под углом падения к местной вертикали.



Инфракрасный диапазон



Спектральный диапазон от 0.7 до 1000 мкм называется инфракрасным (ИК). Его разделяют на два поддиапазона в зависимости от радиационных свойств излучения каждого из них.

В первом поддиапазоне - *ближнем 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, как и видимое излучение, подверженное тем же искажениям в атмосфере.

Участок 3.0 – 5.0 мкм часто называют *средним ИК* диапазоном.

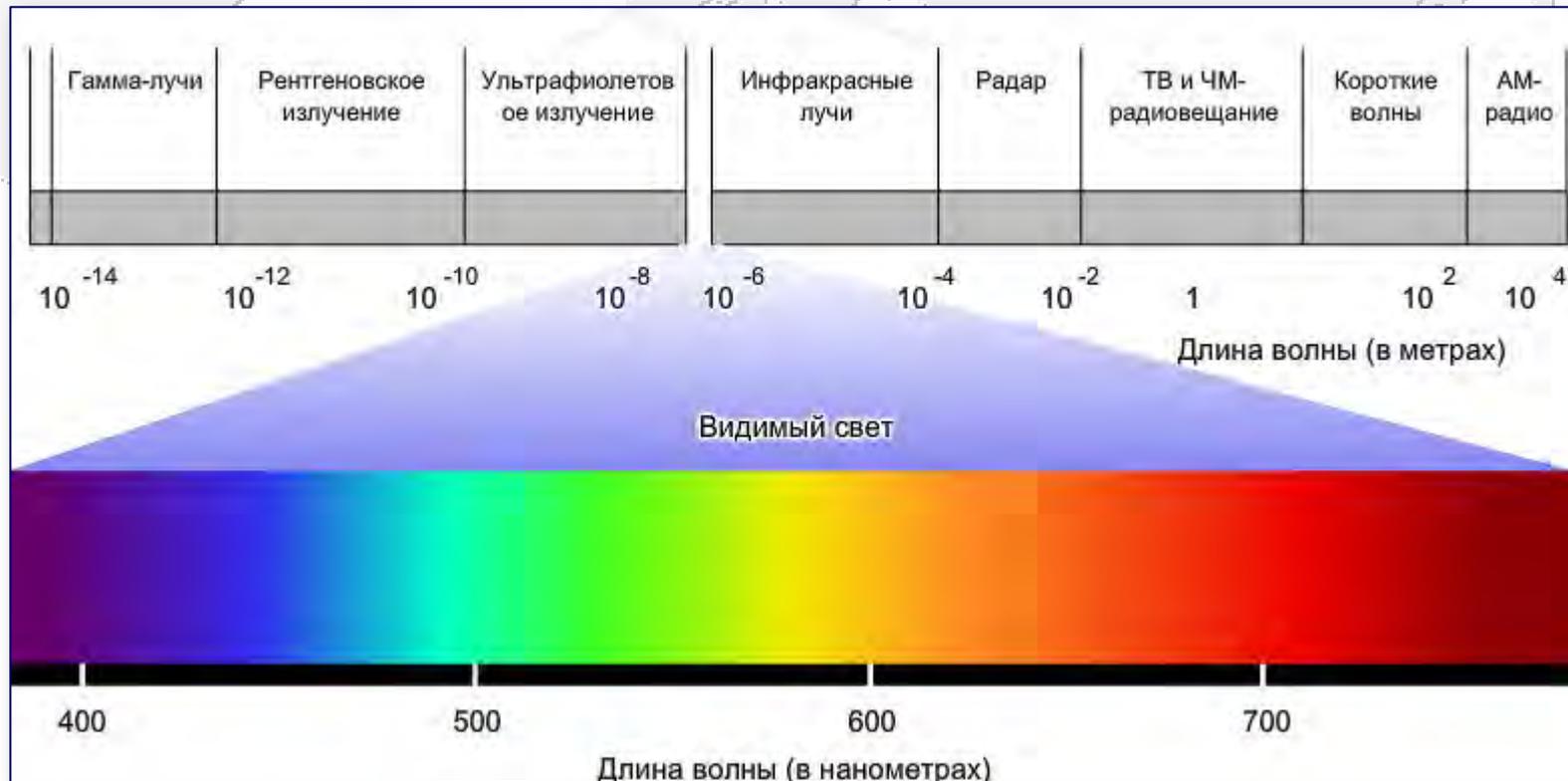
В поддиапазоне от 5.0 до 1000 мкм, который называется *дальним* или *тепловым ИК* диапазоном, преобладающим источником излучения является поверхность Земли, которая излучает электромагнитную энергию в виде тепла.

Если излучение ближнего ИК диапазона при прохождении через атмосферу подвержено как рассеянию, так и поглощению, то излучение дальнего ИК диапазона практически лишь поглощается в атмосфере.



Видимый диапазон

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 видимой части электромагнитного спектра воспринимаются как красный свет, а наиболее короткие - как фиолетовый. То, что мы видим окружающие нас предметы окрашенными в разные цвета, обусловлено различными коэффициентами поглощения и отражения этих предметов для излучения различных длин волн.

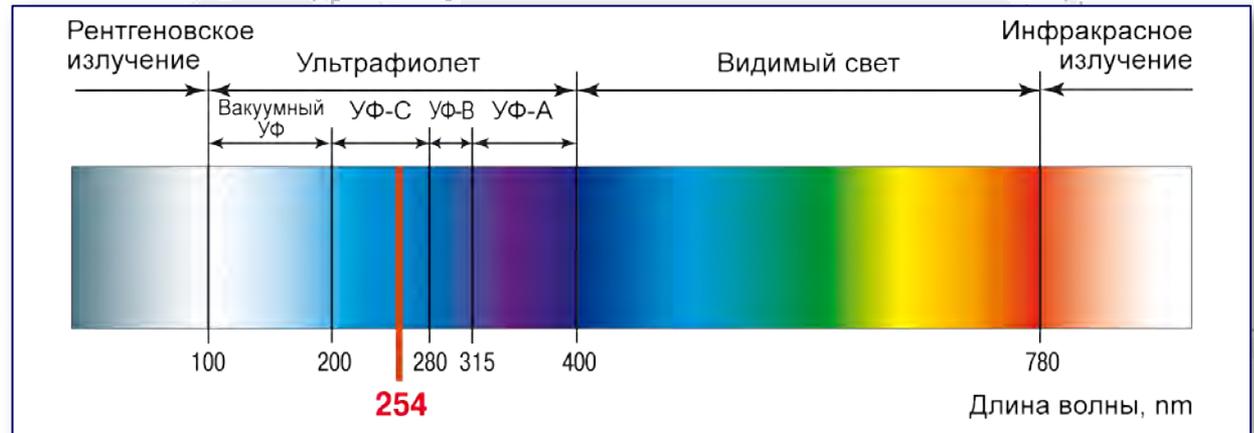


Ультрафиолетовый диапазон

Ультрафиолетовая часть спектра включает наиболее короткие длины волн, используемые в дистанционном зондировании. Ультрафиолетовое излучение генерируется Солнцем, и это излучение оказалось бы губительным для живых существ, если бы большая его часть не поглощалась компонентами земной атмосферы – кислородом и озоном.

В ультрафиолетовом диапазоне спектра традиционно выделяют 3 поддиапазона (А, В и С): А – от 320 до 400 нм, В – от 295 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 поддиапазона В поглощается озоном и то, какая его часть достигнет поверхности, зависит от содержания озона в атмосфере. Ультрафиолетовое излучение с длинами волн, принадлежащими поддиапазону С, поглощается и озоном, и кислородом атмосферы, так что поверхности Земли достигает лишь малая его часть.

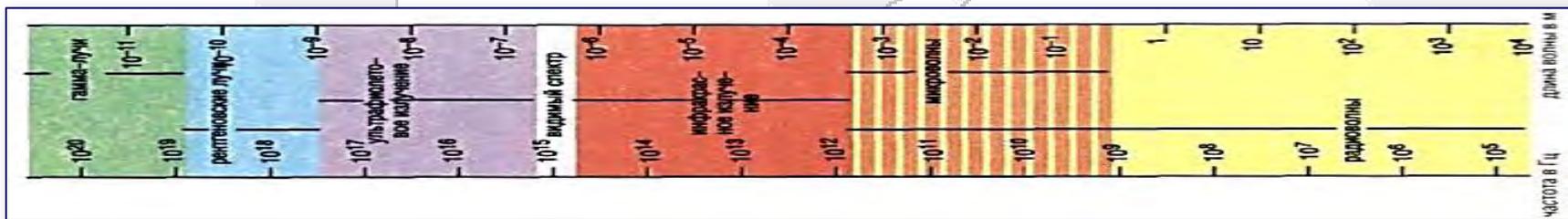


Рентгеновские лучи

Излучение в диапазоне длин волн от нескольких атомных диаметров до нескольких сот диаметров атомного ядра называется рентгеновским. Рентгеновские лучи проникают сквозь мягкие ткани организма и поэтому незаменимы в медицинской диагностике. Как и в случае с радиоволнами временной разрыв между их открытием в 1895 году и началом практического применения, ознаменовавшимся получением в одной из парижских больниц первого рентгеновского снимка, составил считанные годы.

Гамма-лучи

Самые короткие по длине волны и самые высокие по частоте и энергии лучи в электромагнитном спектре — это γ -лучи (гамма-лучи). Они состоят из фотонов сверхвысоких энергий и используются сегодня в онкологии для лечения раковых опухолей (а точнее, для умерщвления раковых клеток). Однако их влияние на живые клетки столь губительно, что при этом приходится соблюдать крайнюю осторожность, чтобы не причинить вреда окружающим здоровым тканям и органам.





Взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой

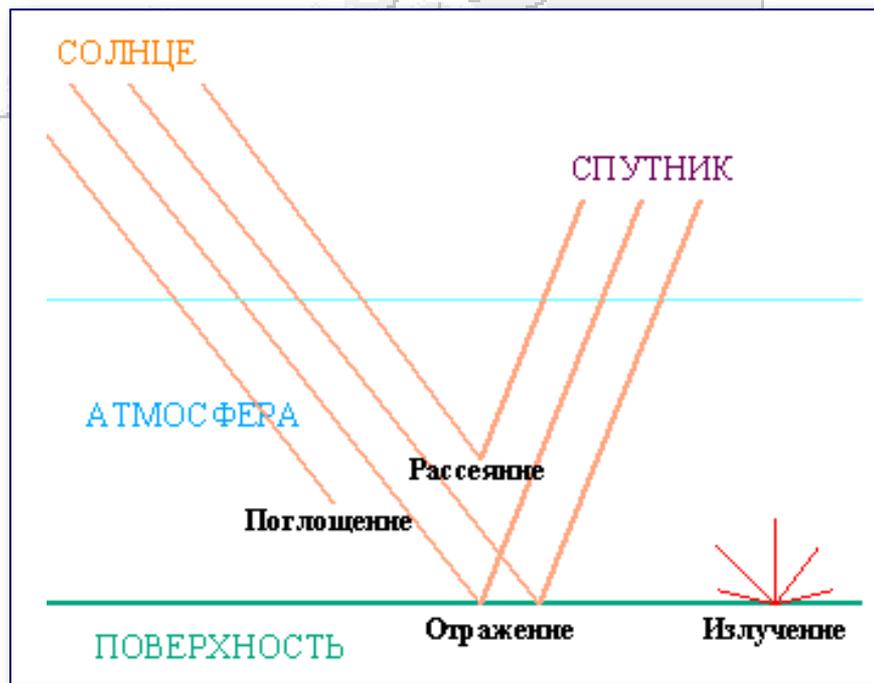


Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой



Излучение, регистрируемое приборами дистанционного зондирования, проходит путь от объекта до измеряющего устройства через атмосферу Земли. Компоненты атмосферы – атомы, молекулы, частицы и др., могут взаимодействовать с электромагнитным излучением, когда оно распространяется в атмосфере.

Основные процессы, происходящие при этом, – это рассеяние и поглощение излучения. Вероятность рассеяния или поглощения зависит с одной стороны от длины волны излучения, а с другой стороны от вида и размера атома, молекулы или другой вовлеченной в процесс взаимодействия частицы.

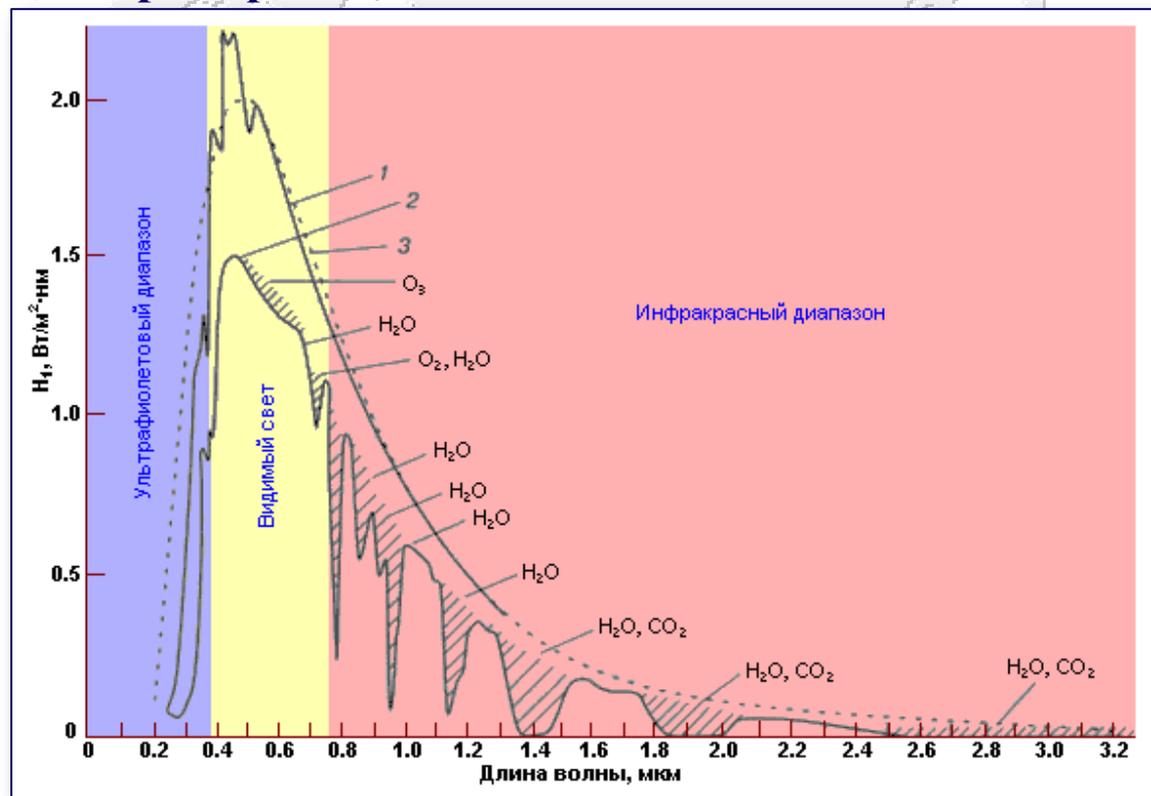


Поглощение

Поглощение - другой основной механизм взаимодействия электромагнитного излучения с атмосферой. В отличие от рассеяния, поглощение полностью обусловлено присутствием в атмосфере молекул, способных поглощать энергию в различных диапазонах спектра. В некоторых случаях, поглощающие молекулы остаются практически неизменными после взаимодействия с излучением, но в других случаях молекулы меняются, теряя, например, часть своих атомов.

Интенсивность падающего на Землю солнечного излучения в зависимости от длины волны. Заштрихованные области соответствуют участкам спектра, ненаблюдаемым на уровне моря из-за их поглощения указанными компонентами атмосферы.

- 1** — солнечное излучение за границей атмосферы,
- 2** — солнечное излучение на уровне моря,
- 3** — излучение абсолютно черного тела при 5900 К.



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.





Взаимодействие излучения с подстилающей поверхностью



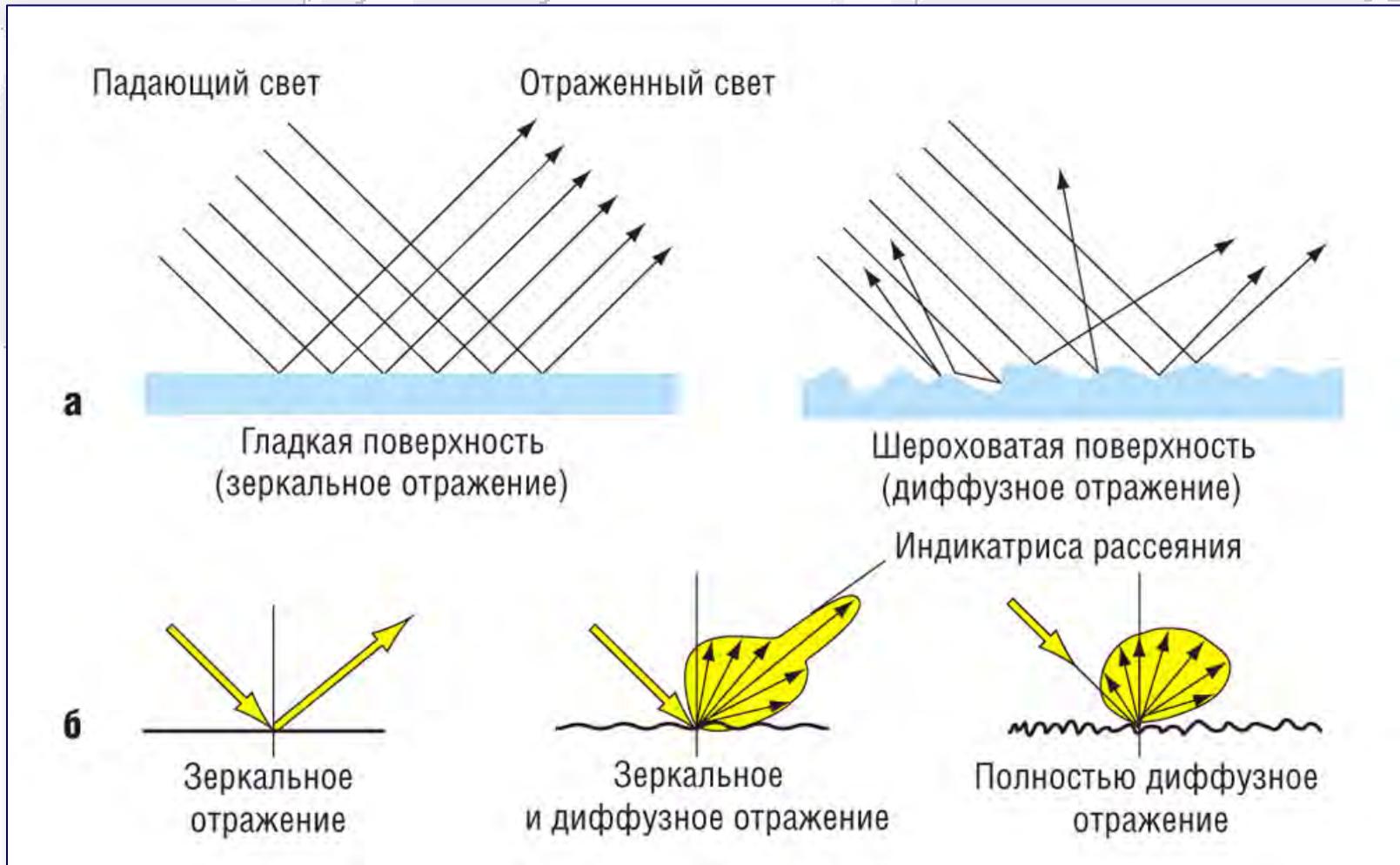
Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Взаимодействие излучения с подстилающей поверхностью

Основные процессы, происходящие при взаимодействии солнечного излучения с подстилающей поверхностью – это поглощение и отражение радиации.

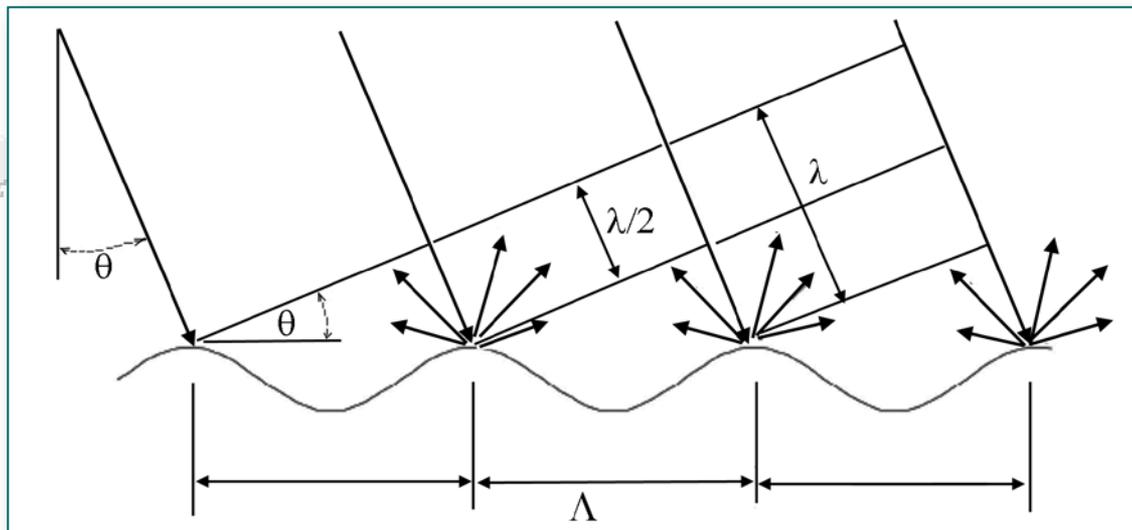


Взаимодействие излучения с подстилающей поверхностью

Отраженное излучение может иметь самые разные направления. Два крайних случая – это когда все излучение отражается зеркально (*зеркальное отражение*) и когда излучение отражается равномерно по всем направлениям (*диффузное отражение*). Реальная картина углового распределения отраженного излучения, как правило, представляет собою что-то среднее между двумя описанными случаями. Будет ли картина отражения ближе к одному из описанных крайних случаев, зависит от степени шероховатости поверхности и длины волны излучения. Если длина волны много меньше масштаба шероховатости поверхности или размера частиц, образующих поверхность, отражение излучения на поверхности будет ближе к диффузному. Если же поверхность является гладкой для излучения определенной длины волны, отражение излучения будет происходить преимущественно в зеркальном направлении.



Резонансный (Брегговский) механизм рассеяния



Механизм формирования резонансного рассеяния радиолокационного сигнала на взволнованной морской поверхности, где λ - длина зондирующей волны, Λ - длина резонансной компоненты спектра поверхностного волнения, θ - угол между направлением зондирования и надиром

Соотношение Брегга определяет резонансную длину волны возмущения, которая селективно преобразует первичную волну, падающую под углом θ , в рассеянную волну, идущую в обратном направлении

$$\Lambda_{res} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

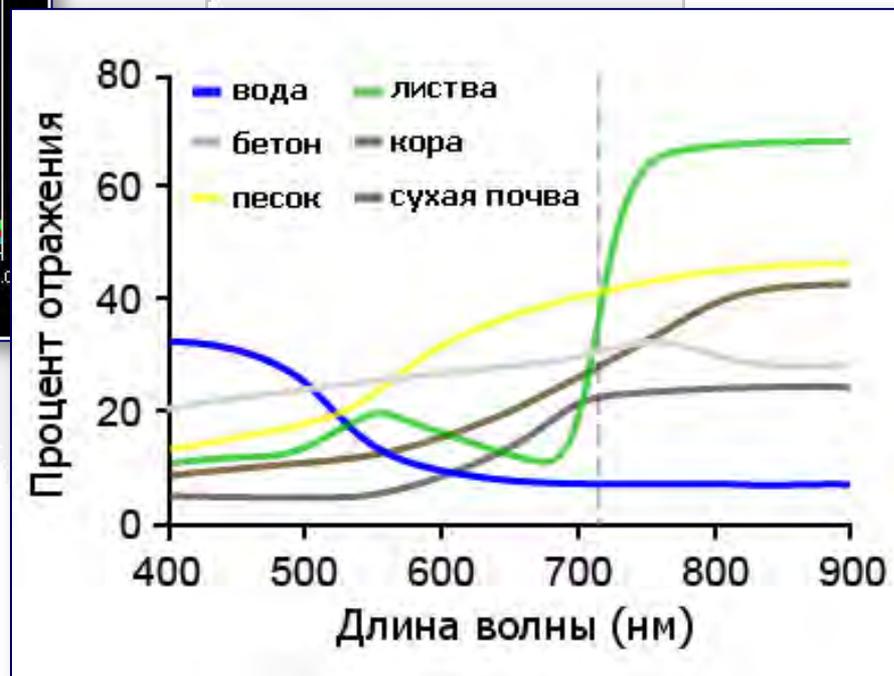
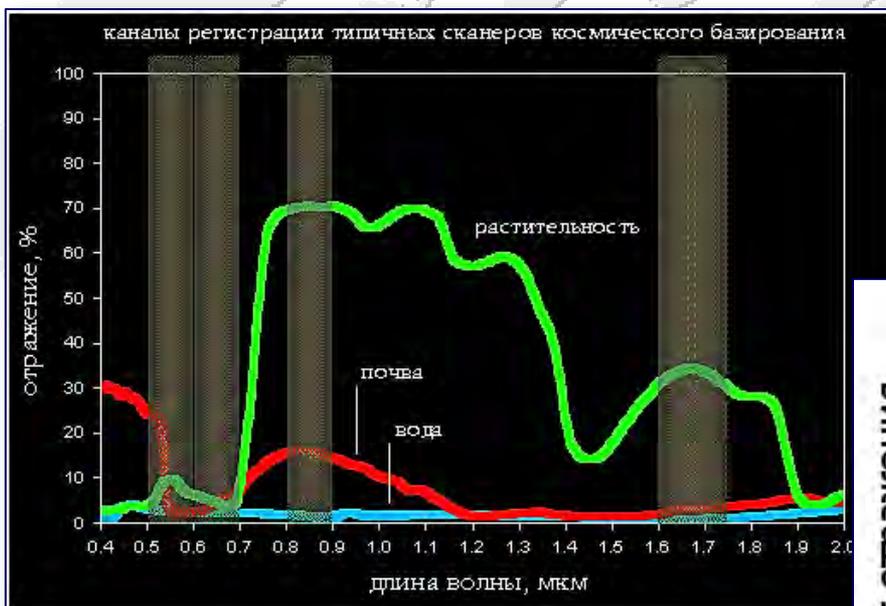
Для углов зондирования $20^\circ - 26^\circ$ длины резонансной компоненты поверхностного волнения для наиболее распространенных частотных диапазонов:

- для зондирующей волны 3 см — $3,9 \pm 0,5$ см;
- для зондирующей волны 5,7 см — 7 ± 1 см;
- для зондирующей волны 23 см — 30 ± 4 см.



Зависимость отражения от подстилающей поверхности

Возможность идентификации и классификации объектов по информации ДЗЗ основывается на том, что объекты разных типов - горные породы, почвы, вода, растительность и т.д. - по-разному отражают и поглощают электромагнитное излучение в том или ином диапазоне длин волн.





Радиоволны в атмосфере



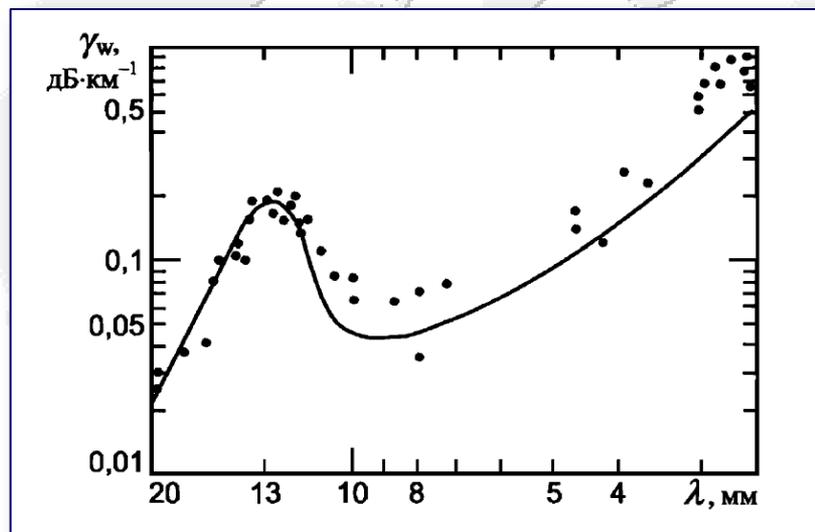
Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев

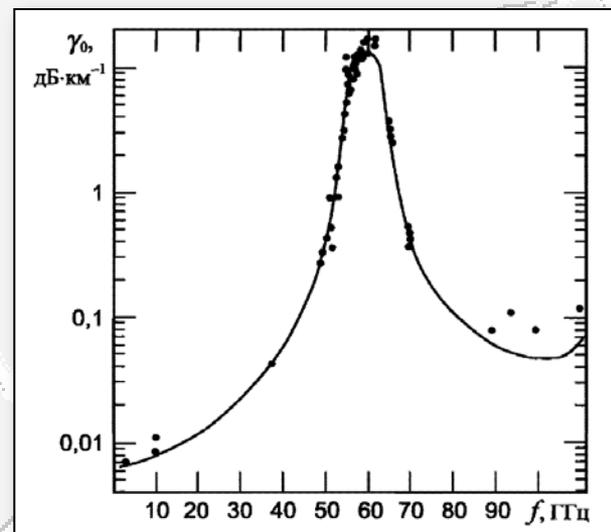


Ослабление радиоволн в атмосфере и ионосфере

Молекула паров воды имеет постоянный электрический момент, взаимодействие которого с электромагнитным полем обуславливает ослабление волн и приводит к появлению трех линий поглощения с резонансными частотами, равными 22,3 ГГц, 183,4 ГГц и 323,8 ГГц.



Зависимость коэффициента поглощения парам и воды от длины волны при нормальных условиях $P_a = 1$ атм., $T_a = 293^\circ\text{К}$, $e_a = 7,5$ гр. м^{-3} .

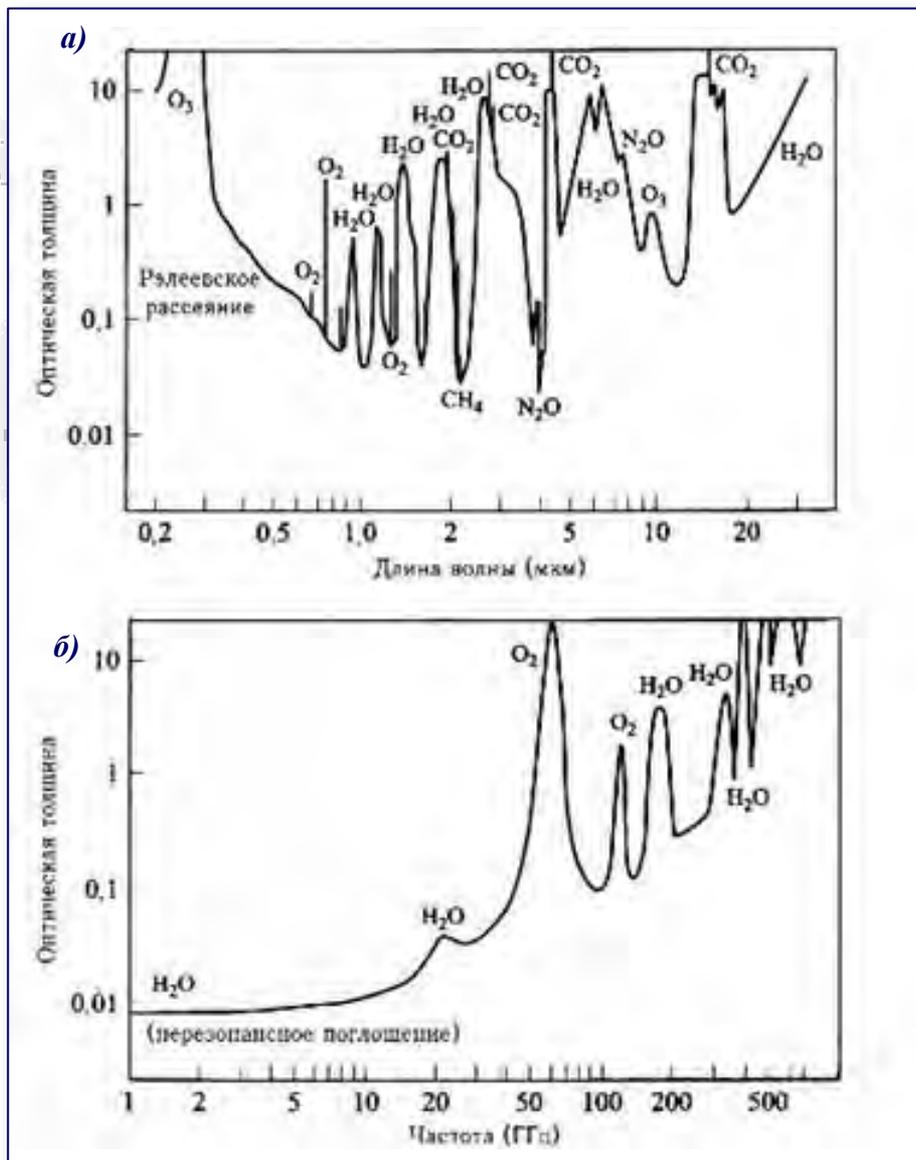


Коэффициент поглощения кислородом в миллиметровом диапазоне волн при нормальных условиях $P_a = 1$ атм., $T_a = 293^\circ\text{К}$.

Молекула кислорода имеет дипольный магнитный момент, что обуславливает появление одиночной линии поглощения на частоте 119 ГГц и комплекса линий вблизи частоты 60 ГГц. При давлении около одной атмосферы линии вблизи частоты 60 ГГц не разрешаются и воспринимаются как одна размытая линия. Разрешение этих линий наступает на высотах, больших 15 км, но общее ослабление при этом оказывается малым.



Ослабление радиоволн в атмосфере и ионосфере



Полная оптическая толщина стандартной атмосферы в зените:

а- ультрафиолетовая, оптическая и инфракрасная области;

б- микроволновая область





Основные характеристики спутников

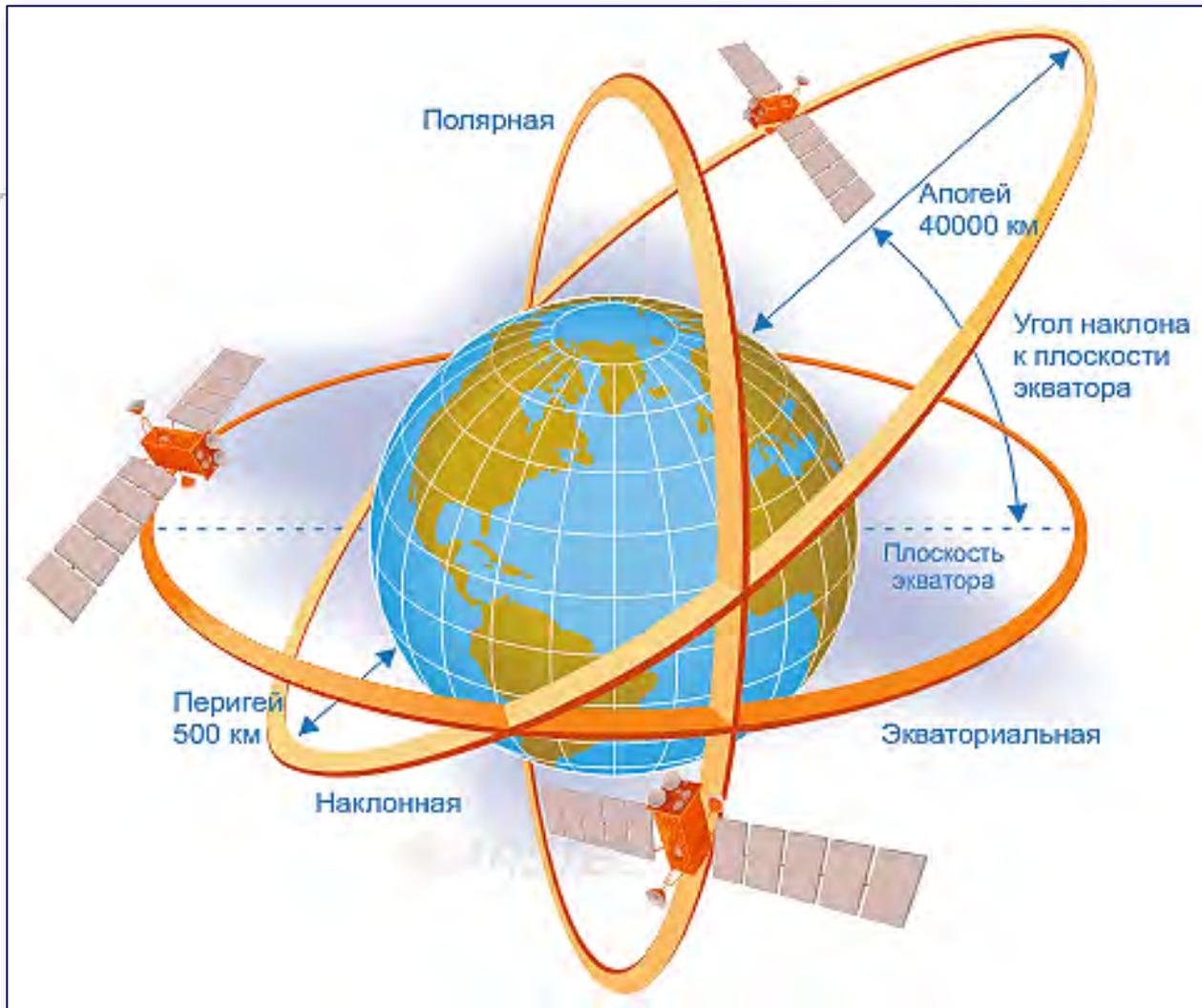


Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Спутниковые орбиты



Спутниковые орбиты (траектории, по которым двигаются спутники, когда они вращаются вокруг Земли) выбираются исходя из возможностей и назначения приборов, которые размещены на спутнике.

Орбиты различаются по высоте над поверхностью Земли и по ориентации плоскости вращения спутника относительно Земли.

Двумя наиболее распространенными типами орбит являются геостационарные (geostationary) орбиты и полярные (near-polar) орбиты.



Геостационарные орбиты

Геостационарные орбиты это круговые орбиты, которые ориентированы в плоскости экватора Земли на высоте 35,786 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 из Земли, чтобы одновременно получить высокое пространственное разрешение и обеспечить высокоточные количественные наблюдения.

Кроме того приборы, установленные на таких спутниках вообще не видят полюсы и обеспечивают хорошие условия наблюдения только в экваториальные области, при условии одновременного размещения на орбите 5-6 спутников. Геостационарные орбиты имеют обычно метеорологические спутники и спутники связи.



Полярные орбиты

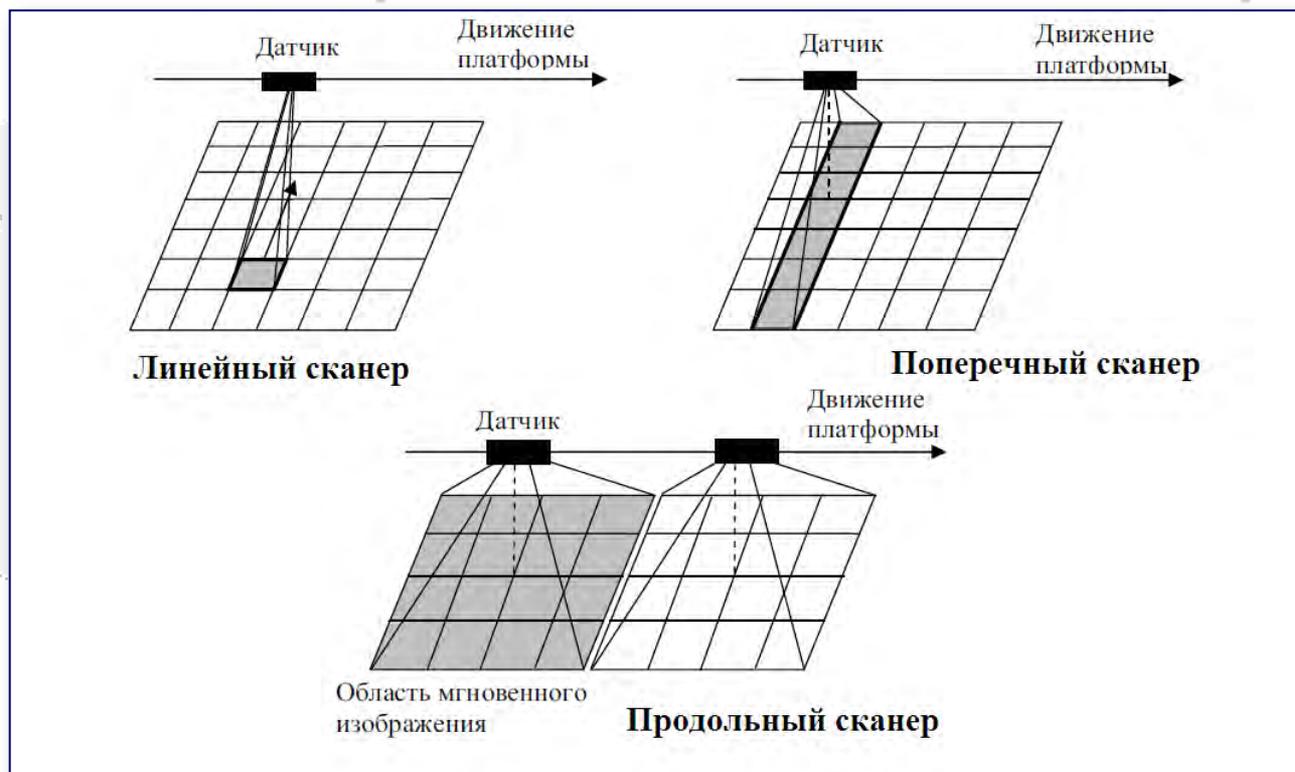
Большинство спутников дистанционного зондирования в настоящее время летает по полярным орбитам. Это означает, что спутник летит к северу на одной стороне Земли, пролетает вблизи полюса, а затем летит к югу на второй половине орбиты. Многие из таких спутниковых орбит являются также солнечно-синхронизированными (sun-synchronous) так, что спутники пролетают над выбранным местом в одно и то же время. 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 размещаемые на полярноорбитальных носителях обеспечивают лучшее пространственное разрешение и позволяют получать высококачественные данные дистанционного зондирования..



Схема сканирования многоканального радиометра

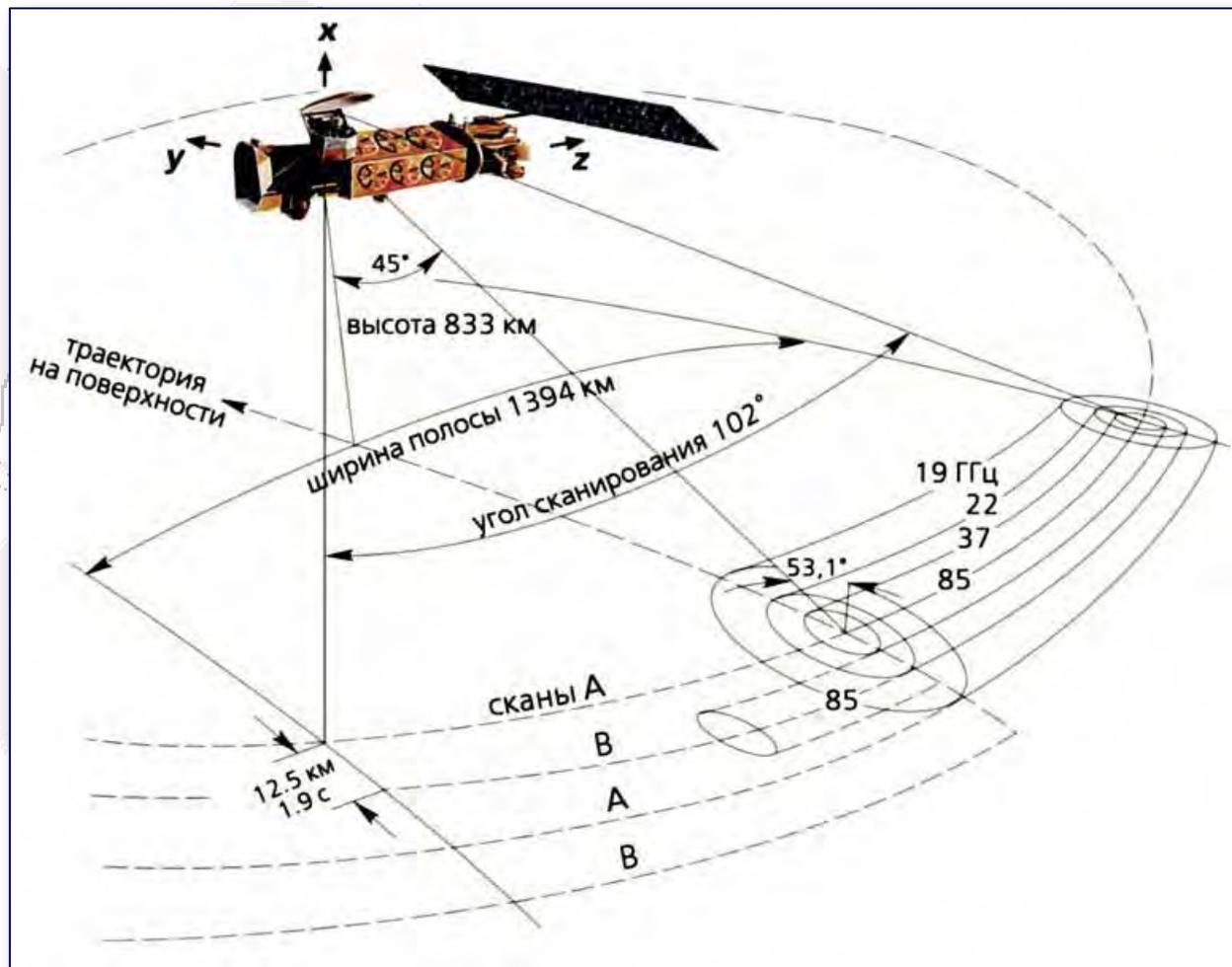


- **Линейный сканер** (пример — ИК-радиометр AVHRR) — самый простой, он оснащен только одним детекторным элементом.

- **Поперечный сканер** (GOES, MODIS, TM) — использует для сканирования линейку детекторов, расположенных вдоль маршрута съемки. Параллельное сканирование Земли осуществляется при каждом цикле движения зеркала.
- **Продольные сканеры** (IKONOS, QuickBird, SPOT) имеют тысячи детекторов в ПЗС-линейке, следовательно, параллельное сканирование осуществляется просто за счет движения платформы по орбите.



Схема полосы сканирования многоканального радиометра

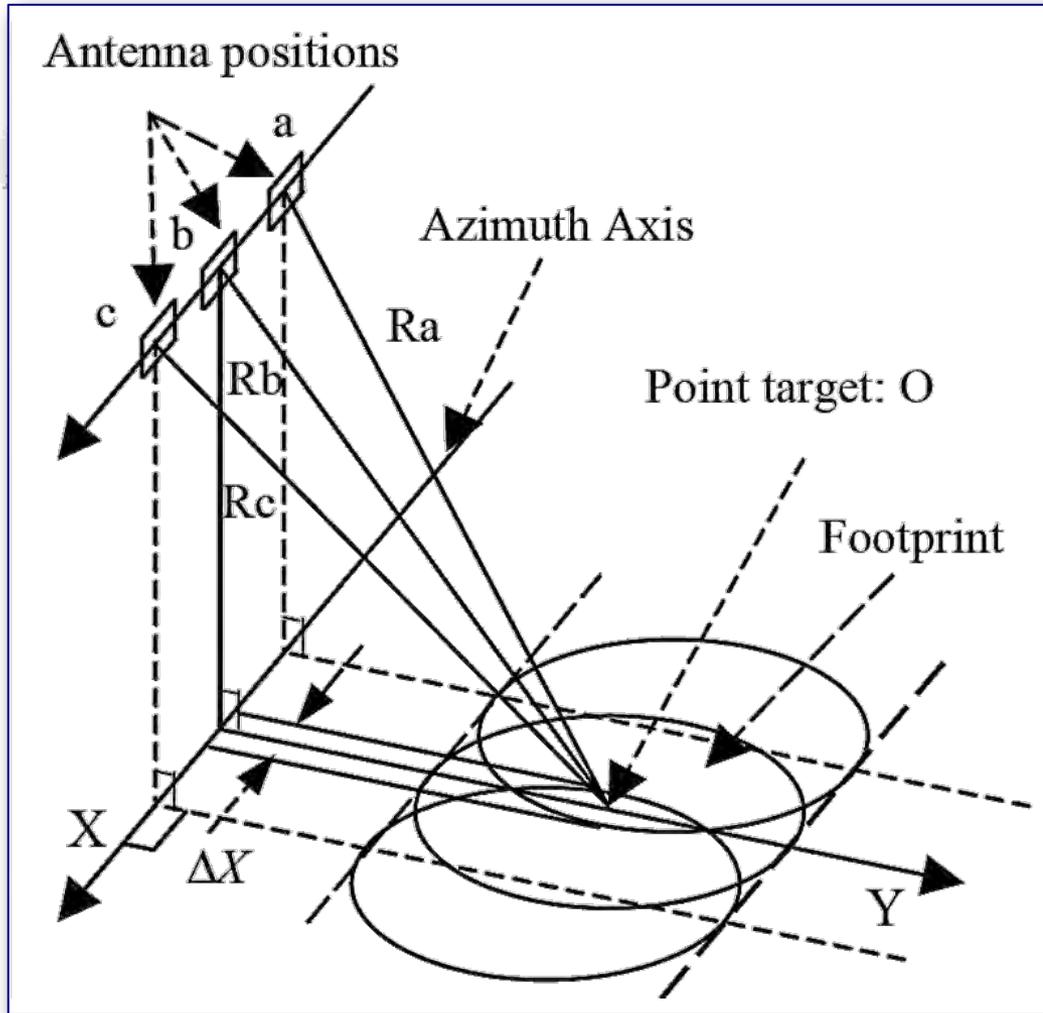


Подробная схема полосы сканирования многоканального СВЧ-радиометра SSM/I, установленного на спутниках серии DMSP

Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.



Синтезирование апертуры



Синтезирование апертуры (СА) - метод обработки сигналов, позволяющий существенно повысить поперечную линейную разрешающую способность радиолокатора относительно направления диаграммы направленности антенны (ДНА).



Синтезирование апертуры

Пусть линейная фазированная антенная решётка (ФАР) размером (апертурой) L состоит из $N+1$ излучателей. Суммируя принятые облучателями сигналы, можно в каждый момент времени получать диаграмму ФАР с шириной

$$\varphi_a = \frac{\lambda}{L}$$

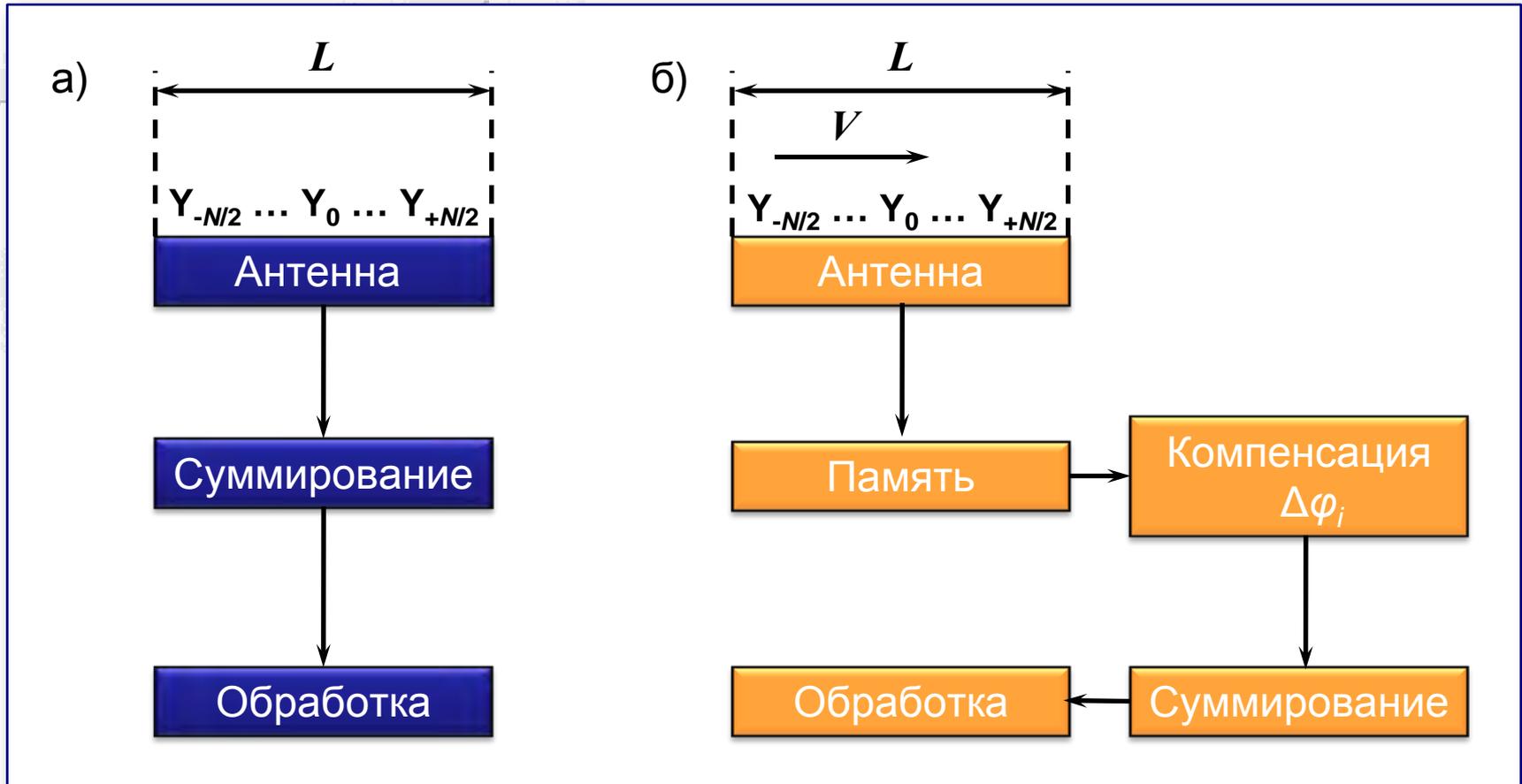
где λ – длина волны зондирующего импульса. Если для обеспечения заданной диаграммы ФАР φ_a требуется $L > l$ (l – продольный размер летательного аппарата), то можно синтезировать ФАР, последовательно перемещая один единственный излучатель (антенну) вдоль этой апертуры с некоторой скоростью V , принимая отраженные от цели сигналы, запоминая их, а затем совместно обрабатывая. При этом синтезируется апертура линейной антенны с эффективным размером L_c и диаграммой направленности антенны (ДНА) шириной

$$\varphi_c = \frac{\lambda}{L_c}$$

где $L_c = V \cdot t_c$, t_c – время синтезирования



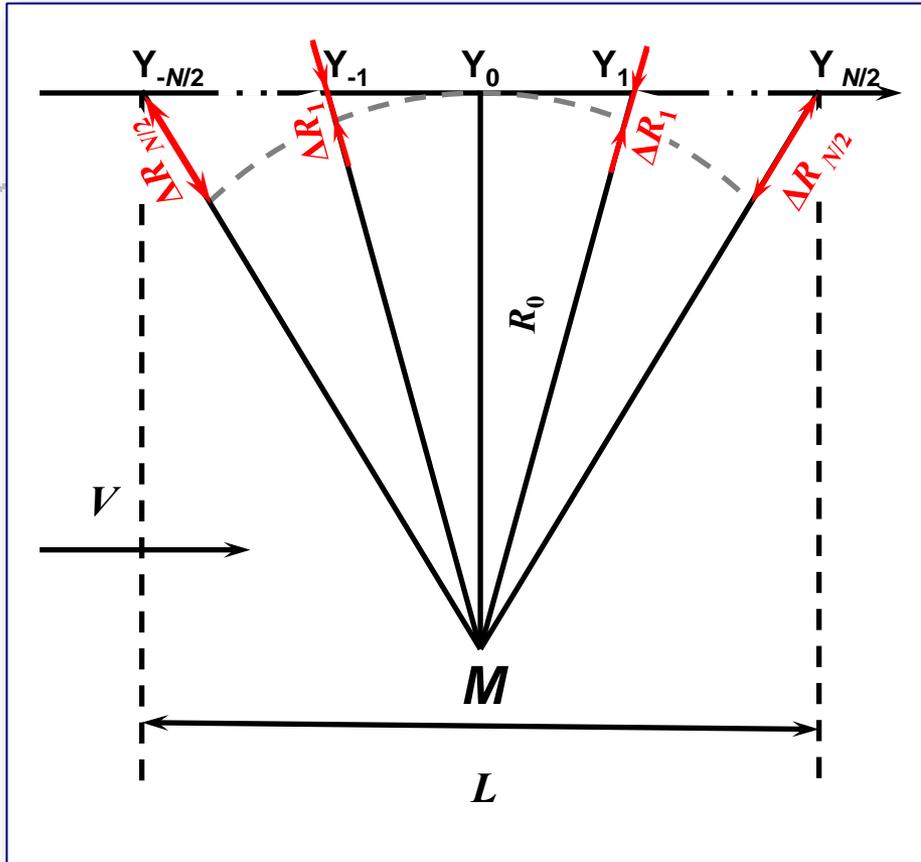
Синтезирование апертуры



Фазированная антенная решетка (а) и схема синтезирования апертуры при перемещении излучателя (б)



Синтезирование апертуры



При различных положениях антенны ($Y_{-N/2} \dots Y_{-1}, Y_0, Y_1 \dots Y_{N/2}$) отраженные сигналы от одной и той же точки проходят разные расстояния: $R_0 + \Delta R_{N/2} \dots R_0 + \Delta R_1, R_0, R_0 + \Delta R_1 \dots R_0 + \Delta R_{N/2}$, что приводит к возникновению фазовых сдвигов $\Delta\varphi_i$ этих сигналов, вызываемых разностью хода сигналов ΔR_i .

$$\Delta\varphi_i = \omega t_{\Delta R_i} = 2\pi f_0 \left(\frac{2\Delta R_i}{c} \right) = \frac{4\pi\Delta R_i}{\lambda}$$

где ω_0 – несущая частота радиолокатора, f_0 – рабочая частота радиолокатора.

В зависимости от того, компенсируются или нет при суммировании сигналов фазовые сдвиги $\Delta\varphi_i$, различают фокусированные и нефокусированные радары с синтезированной апертурой РСА.

Появление фазовых сдвигов в процессе прямолинейного движения летательного аппарата при синтезировании апертуры





ТИПЫ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Типы методов дистанционного зондирования



Методы дистанционного зондирования подразделяют на три типа: пассивные, полуактивные и активные.

- ➔ Пассивные методы основаны на регистрации теплового излучения (ИК и СВЧ) и естественного гамма-излучения с поверхности моря.
- ➔ Полуактивные методы основаны на облучении естественными и искусственными источниками электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне и в анализе сопоставления изменения спектрального состава отраженного сигнала.
- ➔ При использовании активных методов исследуемая водная поверхность облучается источниками излучения заданного спектрального состава с регистрацией или отраженного излучения, или флуоресценции, или комбинационного рассеяния.





Классификация космических снимков



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



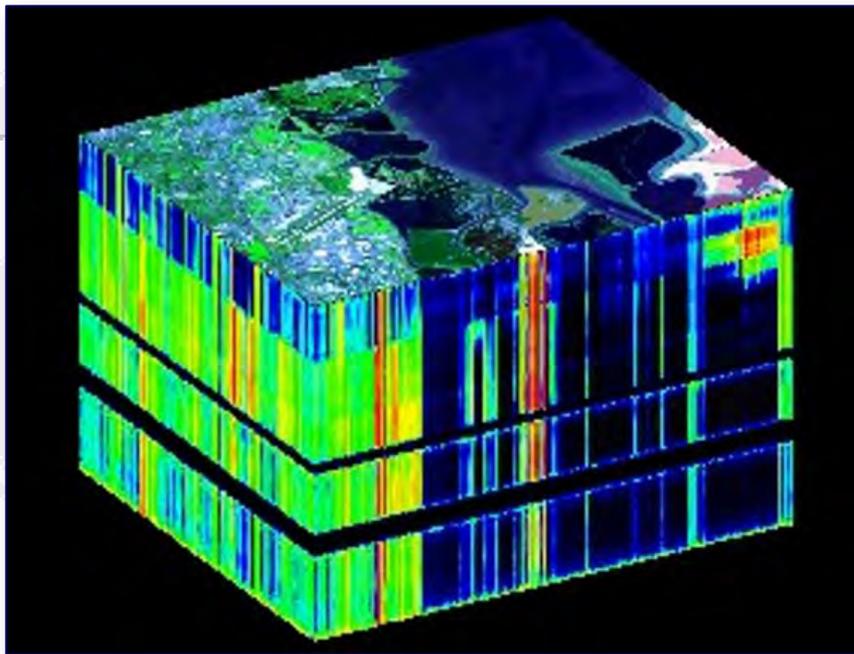
Классификация космических снимков

В зависимости от числа одновременно используемых при съёмке спектральных зон съёмочные системы могут быть:

- панхроматическими называют однозональные изображения, полученные сразу во всём видимом диапазоне спектра.
- многозональная съёмка – съёмка, основанная на разделении всего спектрального диапазона на зоны, в которых получают зональные изображения.
- съёмку с использованием большого числа (более 20) узких съёмочных зон называют гиперспектральной.
- получение мультиспектрального изображения происходит по типу цветной фотографии. Многоспектральный датчик может иметь много полос, охватывающих спектр от видимого до длинноволновой инфракрасной области спектра.



Гиперспектральный снимок



При использовании большого числа (до нескольких сотен) узких спектральных зон такую съемку называют гиперспектральной, а снимок – гиперспектральным. При гиперспектральной съемке увеличивается возможность выделения объектов, характеризующихся наличием полос поглощения, что характерно, например, для загрязнений.

Многозональная и гиперспектральная съемки позволяют более эффективно использовать различия в спектральной яркости объектов съемки для их дешифрирования. К этому виду снимков можно отнести также радиолокационные снимки, получаемые как при регистрации отраженных радиоволн разной длины, так и при разной их поляризации.



Мультиспектральные изображения

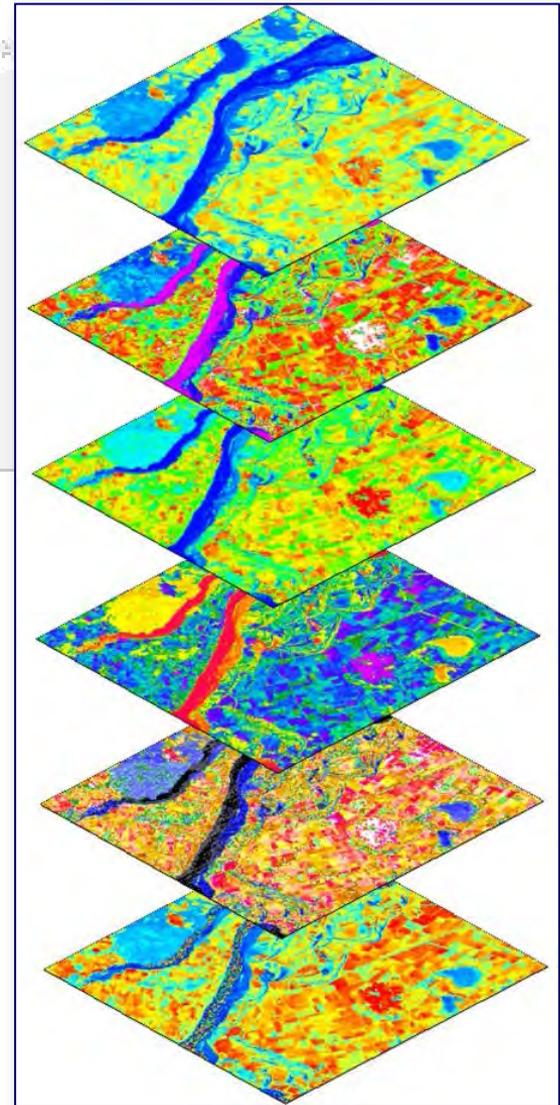
Различать гипер- и мультиспектральные изображения можно по числу спектральных полос или по типу измерения, которым получено изображение. При мультиспектральном способе получение изображений происходит дискретно и с созданием нескольких изображений.

Мультиспектральные изображения не воспроизводят «спектр» объекта. При гиперспектральной обработке происходит визуализация узких спектральных линий.

Так датчик с 20 полосами может быть гиперспектрального характера в том случае, если эти полосы, шириной 10 нм каждая, перекрывают диапазон от 500 до 700 нм.

В то же время датчик с 20 дискретными линиями покрытия в инфракрасном диапазоне будет рассматриваться как мультиспектральный.

Снимки радиометра ASTER спутника Terra в ИК диапазоне (8 – 14 мкм) по 6 каналам

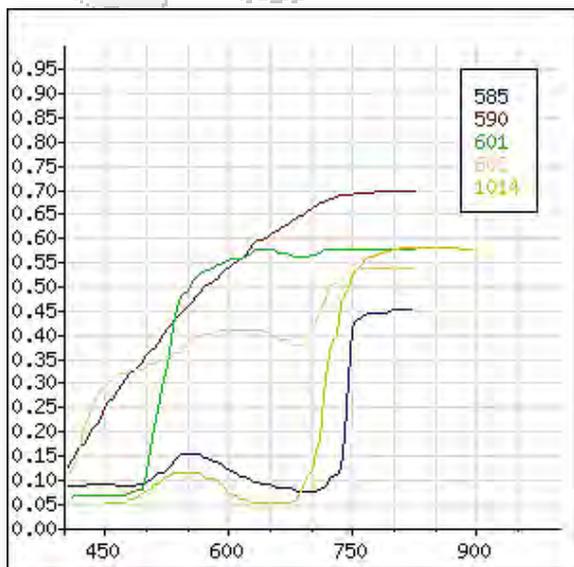


Многозональная съемка

Наиболее информативными для решения практически всех задач являются многозональные изображения.

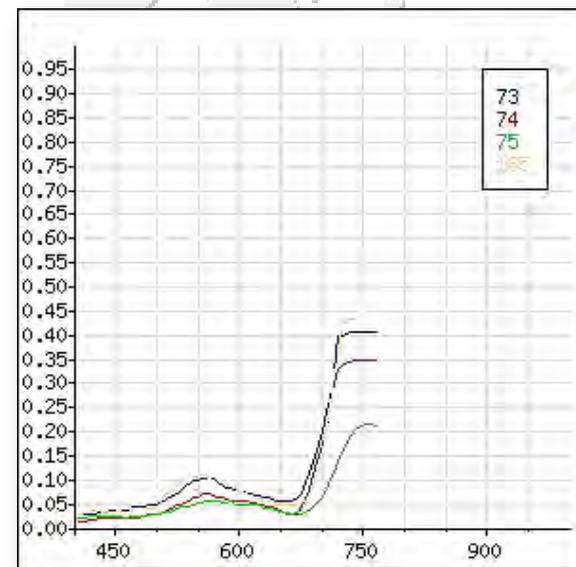
Одно из условий выбора спектральных зон для съёмки требует, чтобы объекты на полученных изображениях различались по оптической плотности (уровню видеосигнала). Кривые спектральной яркости снимаемых объектов в пределах выбранной зоны для этого по возможности не должны пересекаться.

В практике бывают случаи, когда выполнение этого условия одновременно для всех объектов оказывается невозможным. В результате некоторые объекты могут не отличаться на изображении по оптической плотности и, следовательно, окажутся отнесёнными по этому признаку к одному классу.



73 - Берёза
74 - Осина
75 - Сосна
185 - Дуб

585 - Зеленый лист кукурузы
590 - Слой стеблей созревшей пшеницы
601 - Подсолнечник (цветы)
603 - Гречиха (цветы)
1014 - Здоровые листья картофеля



Фотографические снимки

Фотографические снимки получают с помощью фотографических камер предназначены для решения не оперативных, а долговременных либо разведывательных задач.

Они характеризуются высокой детальностью и до середины 90-х гг. XX в. были лучшими снимками по разрешению и геометрическим свойствам.

На снимках находят отображение оптические характеристики объектов (интегральная или спектральная яркость). Космические фотоснимки обычно получают с низких околоземных орбит, с картографических (топографических) спутников в масштабах 1:200 000-1:1 000 000 с разрешением 2 - 30 м.

Благодаря высокой детальности и непрерывному изображению с ними работают, как правило, при значительном увеличений - в 5 -20 раз. При относительно небольшом (40 - 300 км) охвате снимков, имеющих центральную проекцию, искажения за кривизну Земли и рельеф невелики и устранимы.

Перекрытие обеспечивает получение стереоскопических снимков. Для работы на компьютере фотографические снимки переводят в цифровую форму.

Для топографического картографирования используют черно-белые панхроматические снимки, а для тематического - многозональные и спектрозональные, в основном цветные.



Фотографические снимки



*Фотографический
снимок плотины на
реке Кванза в Анголе,
28 апреля 2013.*



Сканерные ОМ-снимки

Сканерные ОМ-снимки получаются при оптико-механическом сканировании в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне и передаваемые по радиоканалам, как и фотографические, отображают оптические характеристики объектов, но такую съемку отличает оперативность, вплоть до получения изображений в реальном масштабе времени.

В отличие от фотографических сканерные снимки представляют дискретные изображения, детальность которых определяется размером пиксела. Пространственное разрешение сканерных снимков долгое время было существенно ниже, чем фотографических. В последние годы их получают с разрешением 15-30 м. Охват снимков варьирует от 180 км до 2-3 тыс. км.

Геометрическая коррекция снимков по орбитальным данным и по опорным точкам осуществляется с помощью компьютера. Сканерные снимки поступают с метеорологических и ресурсных спутников и используются для оперативных целей (прогноз погоды, гидрологические прогнозы) и тематического картографирования. Как правило, сканерные снимки - многозональные.



Сканерные ОМ-снимки



Сканерные ОМ-снимкиок с геостационарного спутника GOES-11 на 13 июля 2016 года



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Сканерные ОЭ-снимки

Сканерные ОЭ-снимки получают с помощью оптико-электронных сканеров и характеризуются высоким разрешением.

Как и фотографические снимки, они регистрируют оптические характеристики исследуемой территории. Благодаря центральной проекции по строке снимка его масштаб в центре и по краям одинаков и форма объектов не искажается, что является преимуществом этих снимков по сравнению с полученными при оптико-механическом сканировании.

Высокая чувствительность детекторов и их миниатюрные размеры вместе с использованием длиннофокусных объективов обеспечивают высокое разрешение, которое составляет от первых десятков метров (10-45 м) до метра и даже менее.

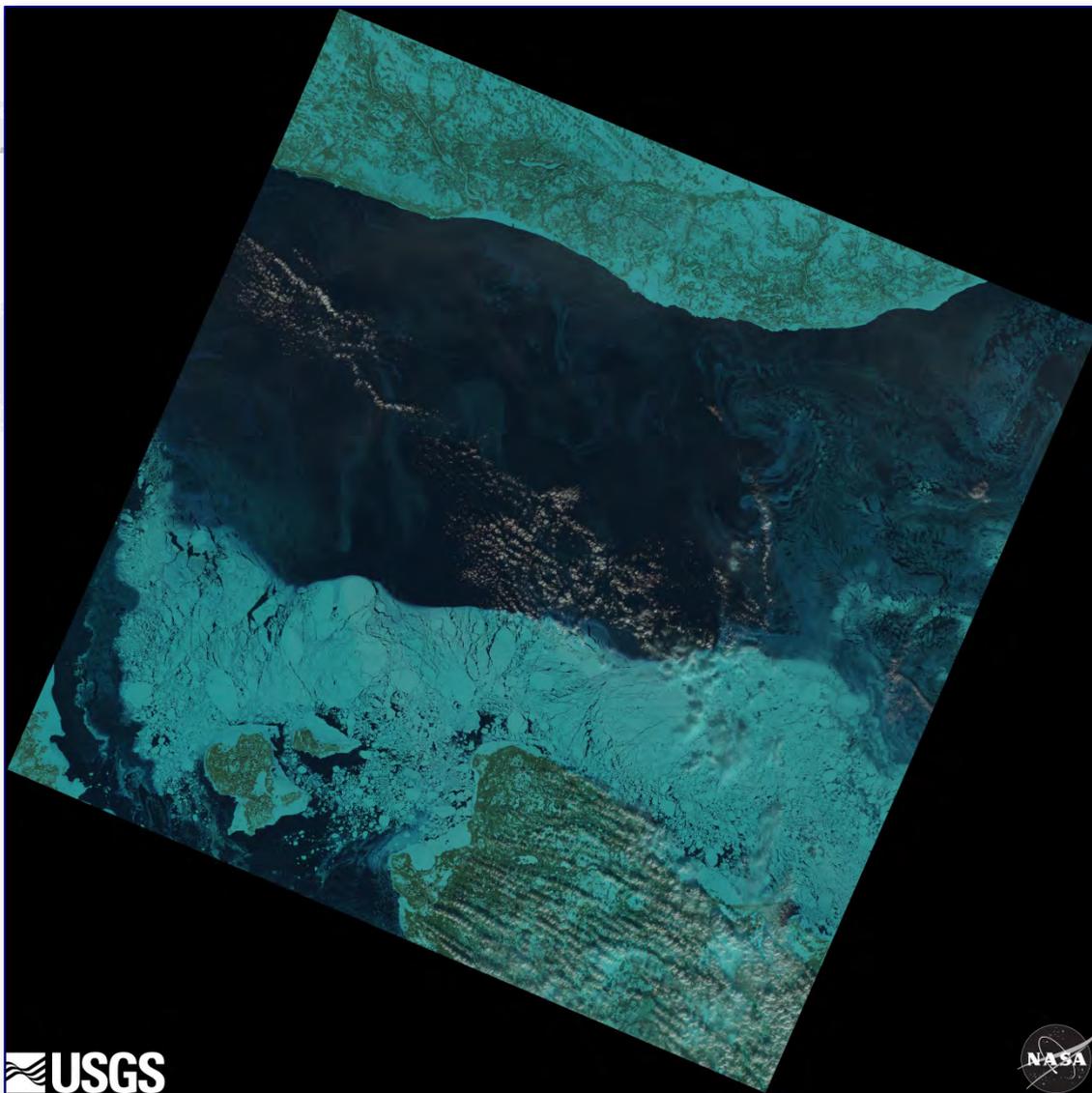
Таким образом, теперь эти снимки по разрешению достигли лучших фотографических снимков. Однако охват снимков невелик - 40-70 км, а у снимков наиболее высокого разрешения - всего 10-15 км.

Наилучшим разрешением отличаются панхроматические снимки, а разрешение многозональных снимков в 2 -4 раза хуже.

Снимки делают с ресурсно-картографических спутников и специализированных спутников для детальной съемки используют их для тематического и топографического картографирования.



Сканерные ОЭ-снимки



USGS



*Сканерный ОЭ-снимок
Белого моря со
спутника LadSat-8
21 марта 2016 г.*



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Тепловые инфракрасные снимки

Тепловые инфракрасные снимки получают в тепловом инфракрасном диапазоне и отображают температурные характеристики поверхности - холодные и теплые объекты изображаются на них разными тонами.

Можно получать снимки независимо от условий освещения, например полярной ночью, однако облачность является препятствием для съемки - на снимках отображается холодная верхняя поверхность облаков.

Тепловая съемка нередко выполняется теми же сканирующими радиометрами, что и съемка в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, дополненными тепловыми каналами.

Пространственное разрешение тепловых снимков, передаваемых с метеоспутников, такое же, как и снимков в видимом диапазоне, - 1 км, температурные различия регистрируются с точностью 0,1 - 0,2°С.

При значительном охвате 2-3 тыс. км и большом угле сканирования для них характерны те же геометрические искажения, что и для сканерных снимков в видимом диапазоне.

С ресурсных спутников передают тепловые снимки более высокого пространственного разрешения, достигающего 60 м при охвате 180 км.

Тепловые снимки поступают и в многозональном варианте съемки, а также при гиперспектральной съемке в узких зонах теплового диапазона.



Тепловые инфракрасные снимки



*Снимок северо-запада России
инфракрасного радиометра
AVHRR спутника NOAA-9 на
21 февраля 2009 г.*



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Микроволновые радиометрические снимки

Микроволновые радиометрические снимки регистрируют радиотепловое излучение Земли в микроволновом радиодиапазоне, которое зависит от электрических свойств поверхности и неодинаково у объектов с разным влагосодержанием, соленостью, различной кристаллической структурой.

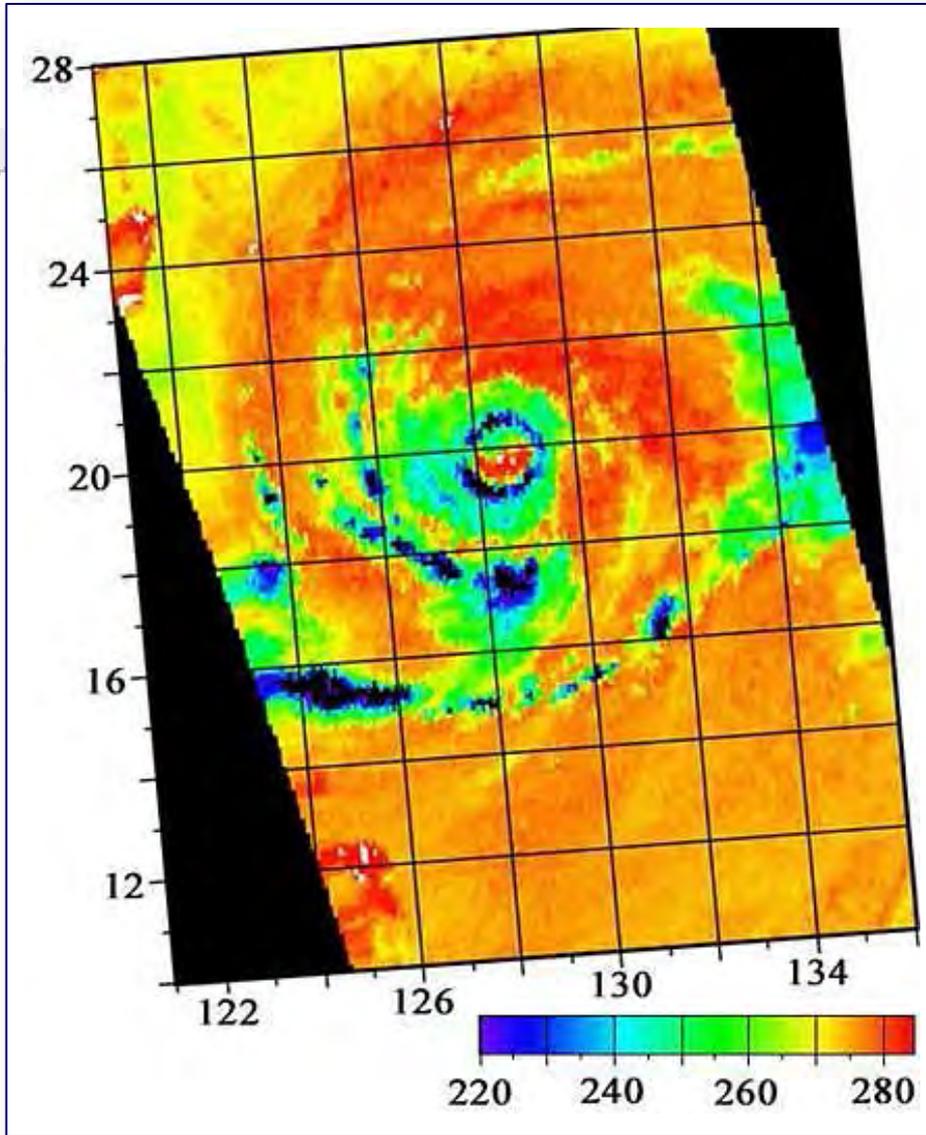
Снимки можно получать независимо от погодных условий и освещения. Разрешение микроволновых радиометрических снимков пока очень мало - 12 - 50 км, что не позволяет использовать их для изучения земной поверхности, но на них отображается возраст морских льдов, водосодержание снега.

Микроволновые снимки получают с некоторых метеоспутников.

Для широкого использования этих снимков с целью изучения влажности и солености почв, толщины и водозапаса снежного покрова необходимо повышение их пространственного разрешения.



Микроволновые радиометрические снимки



*Радиояркостное изображение
тайфуна Херб по данным
микроволнового радиометра SSM/I
на частоте 83 ГГц
на 29 июля 1996 г.*



Радиолокационные снимки

Радиолокационные снимки получают в радиодиапазоне, регистрируя отраженные земной поверхностью радиосигналы, посылаемые бортовым радиолокатором.

На радиолокационных снимках отображаются шероховатость и влажность поверхности, ее рельеф, особенности структуры и состав пород, слагающих поверхность, характер растительного покрова.

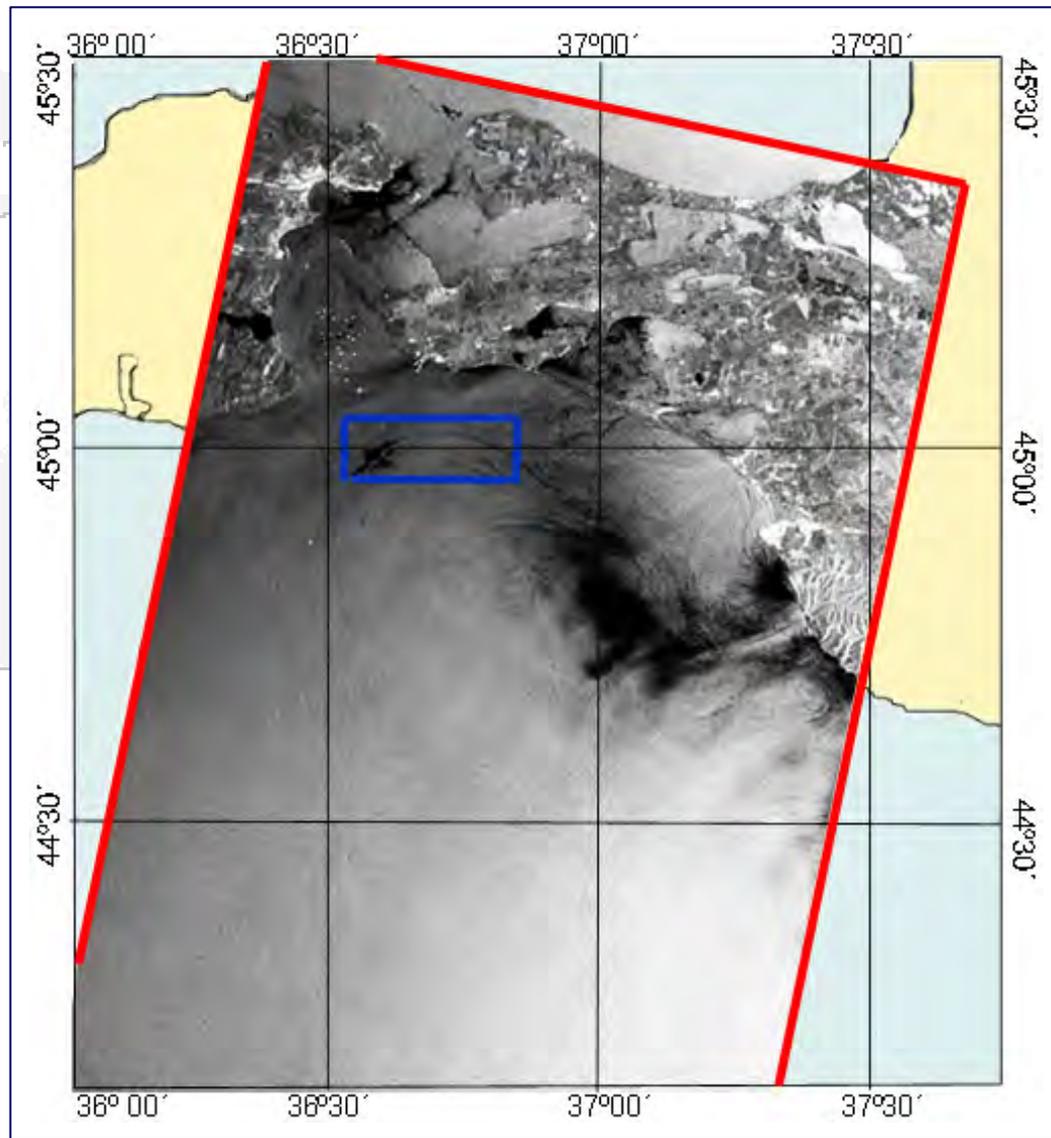
Возможность получения снимков не зависит от условий погоды и освещения - облачность на них не отображается. Пространственное разрешение радиолокационных снимков определяется прежде всего размером антенны. У снимков, сделанных радиолокатором бокового обзора с реальной антенной, оно составляет 1 - 2 км, но в большинстве случаев при использовании радиолокаторов с синтезированной длиной антенны получают снимки с разрешением 10 -30 м при ширине обзора около 100 км.

Специфику радиолокационного снимка составляет мелкая пятнистость изображения - технические спекл-шумы (от англ. speckle - крапчатость) и своеобразное отображение горного рельефа.

Принцип многозональной съемки в радиодиапазоне реализуется при съемке в разных зонах пространственных частот и при различной поляризации излучения. Радиолокационные снимки применяют их в широком спектре направлений исследований океана и суши, включая задачи топографического картографирования.



Радиолокационные снимки



*Радиолокационные
снимки со спутника
Envisat (80 км x 100 км),
полученные 10 августа
2007 года в 07:50 UTC с
разрешением 75 м*





Разрешающая способность систем дистанционного зондирования



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Разрешение

Разрешение – это общий термин, используемый для описания количества пикселей, которые могут быть одновременно просмотрены на дисплее, или участок на земле, которому соответствует пиксель на изображении. В более узком смысле в дистанционном зондировании используют четыре типа разрешения:

- ➔ **спектральное** – под ним понимают определённый интервал длин волн, в которых работает сенсор;
- ➔ **пространственное** – участок на земле, которому соответствует каждый пиксель на изображении (масштаб изображения);
- ➔ **радиометрическое** – число полутонов серого тона на изображении, т. е количество возможных значений данных файла в каждом спектральном канале (выражается числом битов в каждой записи);
- ➔ **временное** – максимальная частота получения изображения на одну и ту же территорию данным типом сенсоров.



Спектральное разрешение

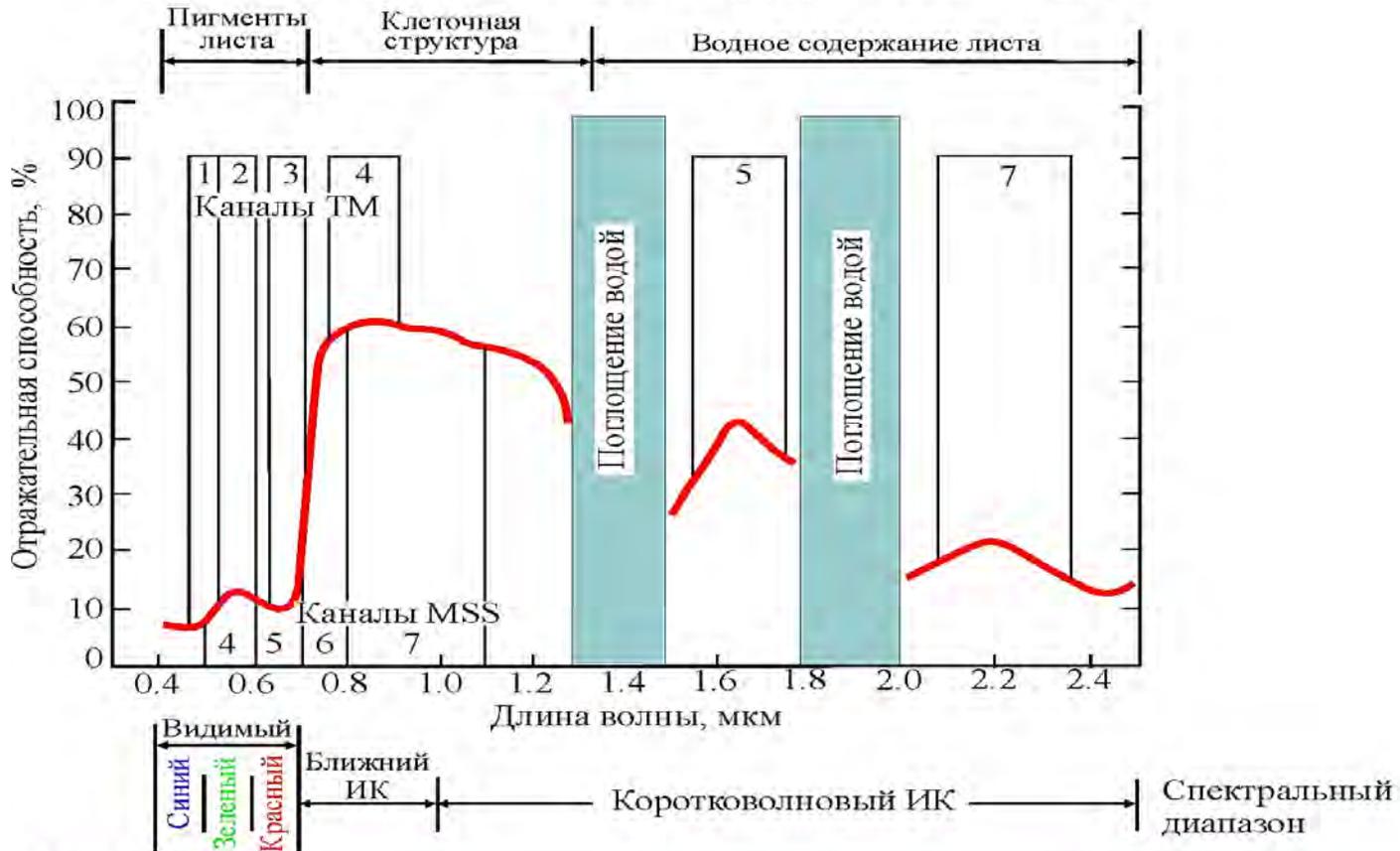
Спектральное разрешение характеризует способность системы дистанционного зондирования различать определенные интервалы длин волн. Чем выше спектральное разрешение, тем более узкий диапазон длин волн регистрируется определенным каналом. При оценке спектрального разрешения рассматривают две характеристики: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

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



Спектральное разрешение

Основные факторы, управляющие отражательной способностью листа



Landsat 7 ETM+	b8					
Номер канала	b1	b2	b3	b4	b5	b7
Границы, мкм	.450–.515	.525–.605	.630–.690	.775–.900	1.550–1.750	2.090–2.35

Характеристический спектр зеленого листа: показаны также полосы пропускания каналов латчиков систем MSS и TM MSS (Multi-Spectral Scanner), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)



Пространственное разрешение

Пространственное разрешение является аналогом резкости обычного фотоснимка.

Пространственное разрешение цифровых снимков, получаемых с помощью электронно-оптических сканирующих систем, определяется размером мгновенного поля обзора — линейной меры угловых величин, измеряемой в мили радианах. Факторами, которые влияют на пространственное разрешение, являются: высота расположения платформы, размер элементов сенсора и фокусное расстояние оптической системы. Для вычисления пространственного разрешения используют следующую формулу

$$A = H \times B$$

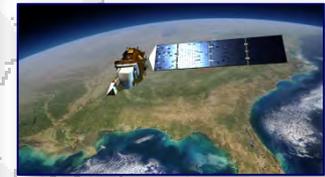
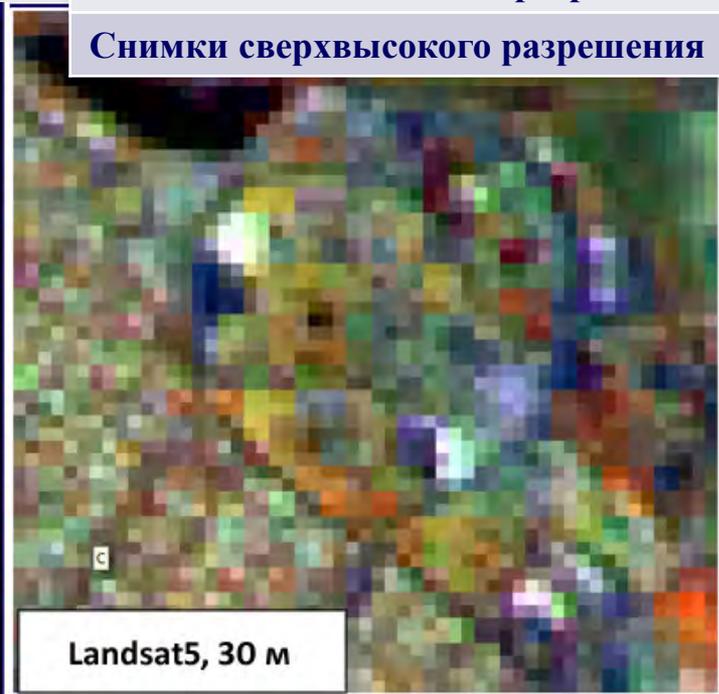
где A — размер проекции элементов сенсора на поверхность в метрах, H — высота расположения платформы в метрах, B — размер мгновенного поля обзора в мили радианах.



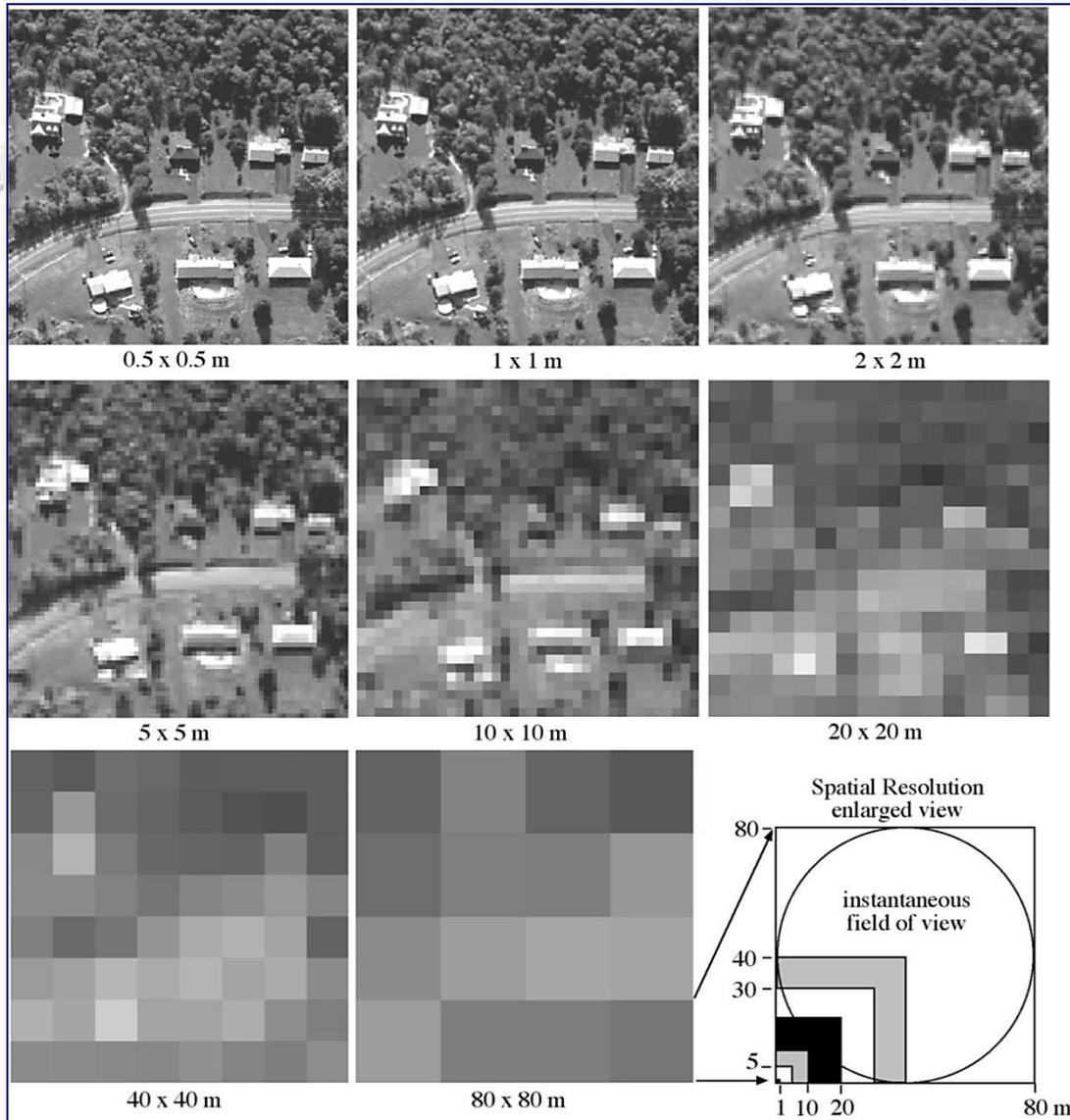
Пространственное разрешение



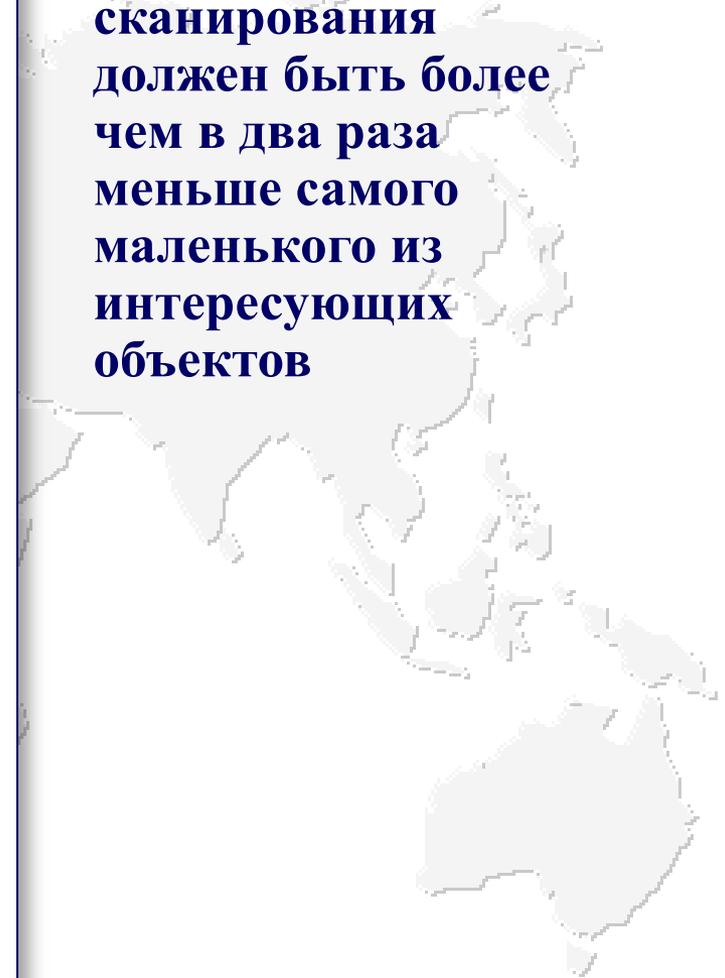
Тип снимка	Разрешение
Снимки низкого разрешения	>1000 м
Снимки среднего разрешения	100–1000 м
Снимки высокого разрешения	
• относительно высокого	30-100 м
• высокого	10-30 м
Снимки очень высокого разрешения	1-10 м
Снимки сверхвысокого разрешения	< 1 м



Пространственное разрешение



Размер элемента сканирования должен быть более чем в два раза меньше самого маленького из интересующих объектов



Пространственное разрешение

Размер элемента сканирования должен быть более чем в два раза меньше самого маленького из интересующих объектов



a. 0.5 x 0.5 m.



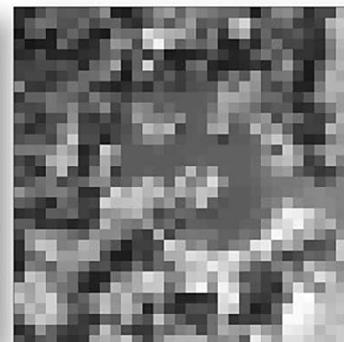
b. 1 x 1 m.



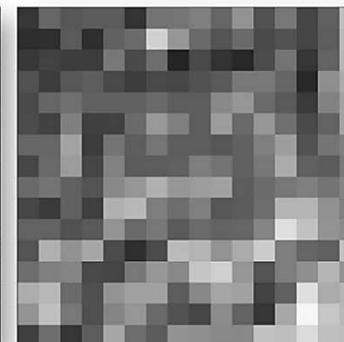
c. 2.5 x 2.5 m.



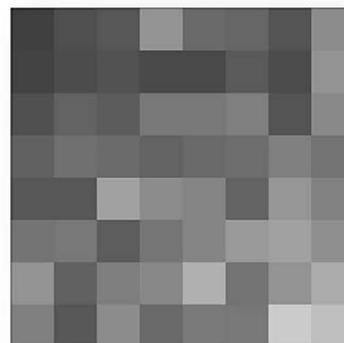
d. 5 x 5 m.



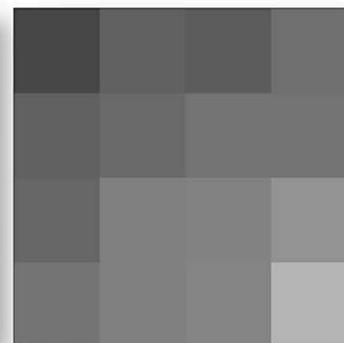
e. 10 x 10 m.



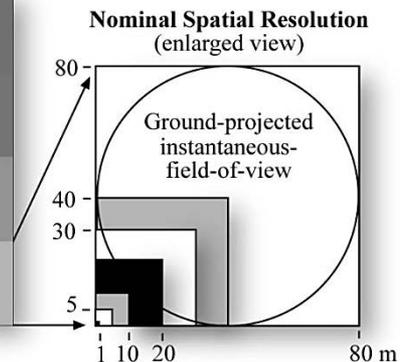
f. 20 x 20 m.



g. 40 x 40 m.



h. 80 x 80 m.



Пространственное разрешение

Возможности дешифрирования некоторых объектов при различном пространственном разрешении снимков, м

Объекты	Обнаружение	Детальное опознавание	Выявление характеристик
Населенные пункты	50	15	3
Аэродромы	6	2	0,3
Железнодорожные пути	30	6	1,5
Мосты	6	2	1,0
Самолеты	5	1,0	0,2
Автомшины	1,5	0,3	-
Корабли	8	0,6	0,3

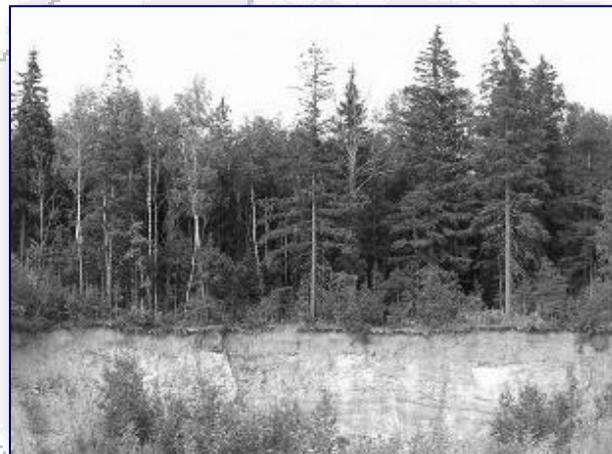


Радиометрическое разрешение

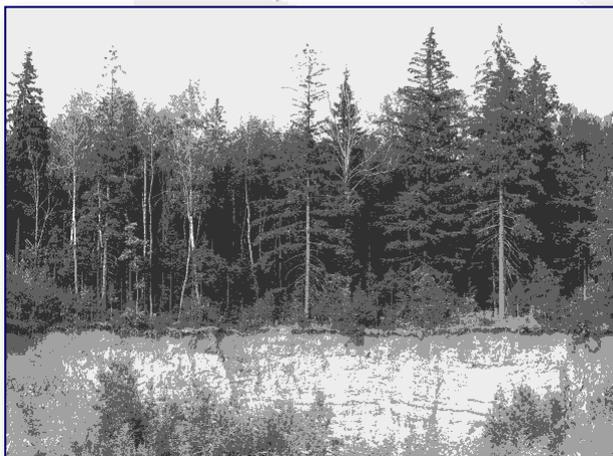
Радиометрическое разрешение – это число градаций на которое может быть разбит регистрируемый поток излучения



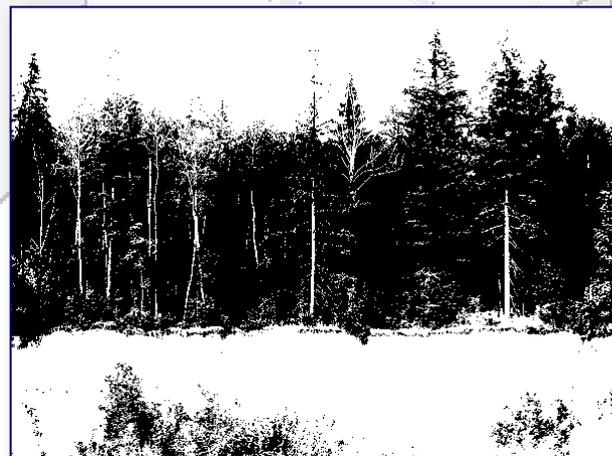
24 бит – 65536 градаций



8бит – 256 градаций



2 бит – 4 градаций



1 бит – 2 градаций



Радио-метрическое разрешение

Радиометрическое разрешение – это число градаций на которое может быть разбит регистрируемый поток излучения

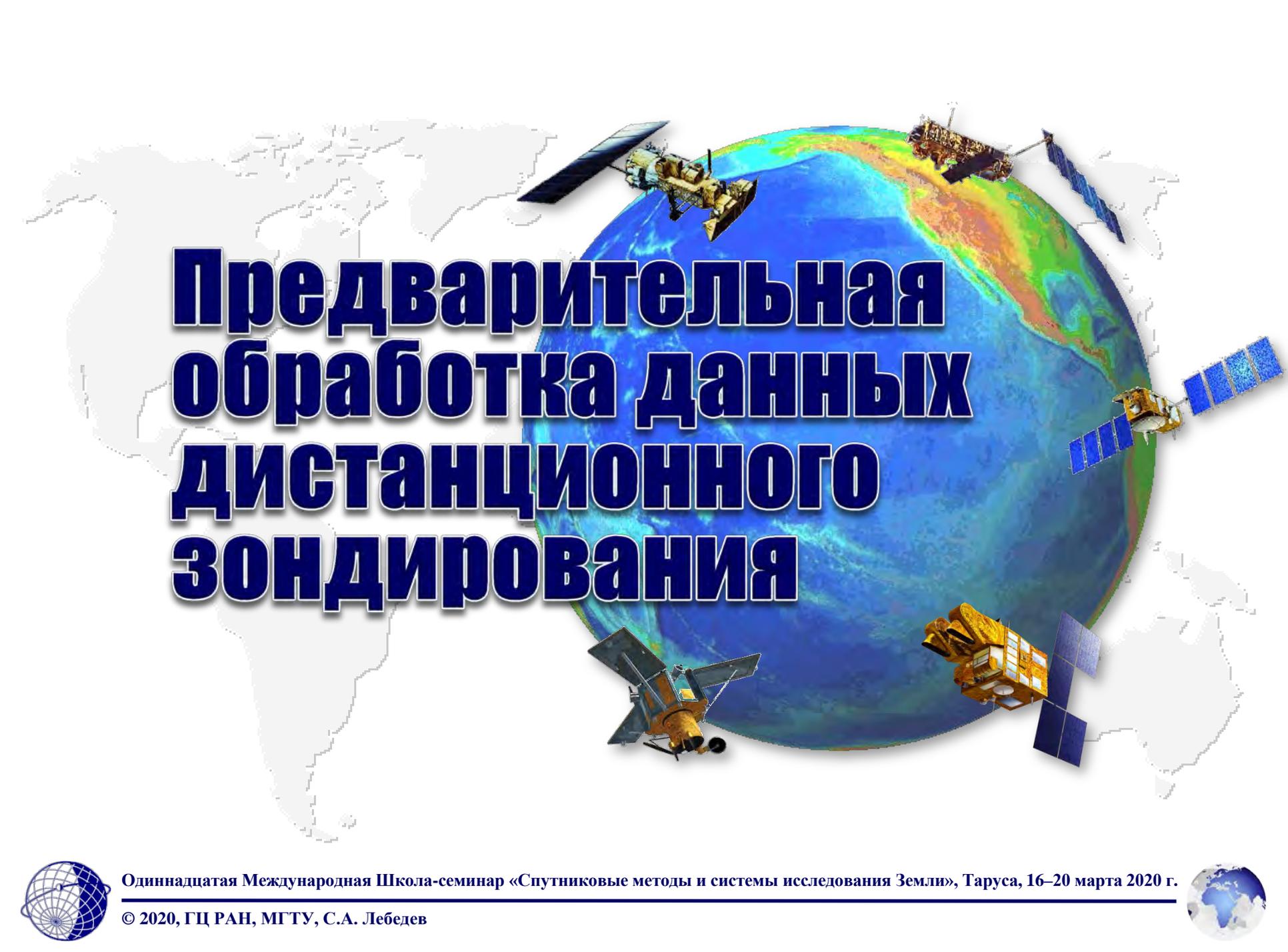


2 бит – 4 градаций



8 бит – 256 градаций





Предварительная обработка данных дистанционного зондирования



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Предварительная обработка снимков

Перед основной обработкой полученный снимок необходимо провести через этап предварительной обработки, который заключается в проведении геометрической, радиометрической и атмосферной коррекций.

Геометрическая коррекция устраняет геометрические искажения, связанные с тем, что снимок поверхности Земли аппаратом, направленным точно вниз, содержит неискаженную картинку только в центре снимка, при смещении к краям расстояния между точками на снимке и соответствующие расстояния на Земле всё более различаются. Исправление таких искажений производится в процессе фотограмметрии.

Радиометрическая коррекция включает в себя два вида коррекций:

- ➔ Радиометрическая коррекция искажений, возникающих по вине оптики сенсора
- ➔ Радиометрическая коррекция искажений, возникающих вследствие угла падения солнечных лучей и форм рельефа (устранения дефектов солнечных пятен и теней).

Атмосферная коррекция - устраняет различные искажения, внесенные наличием атмосферы.

Калибровочные коэффициенты, необходимые для проведения коррекций, поставляются вместе с исходным пакетом загружаемого снимка.



Геометрическая коррекция

Геометрическая коррекция исправляет искажения, определяемые съемочной системой, а также независимые от съемочной системы пространственные и масштабные ошибки, происходящие от изменения высоты, скорости полета или пространственного положения съемочной платформы.

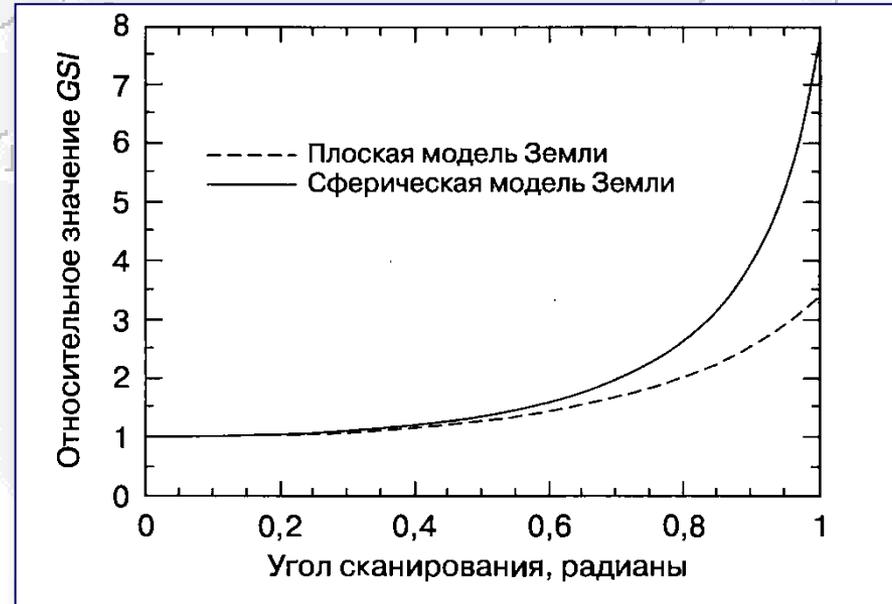
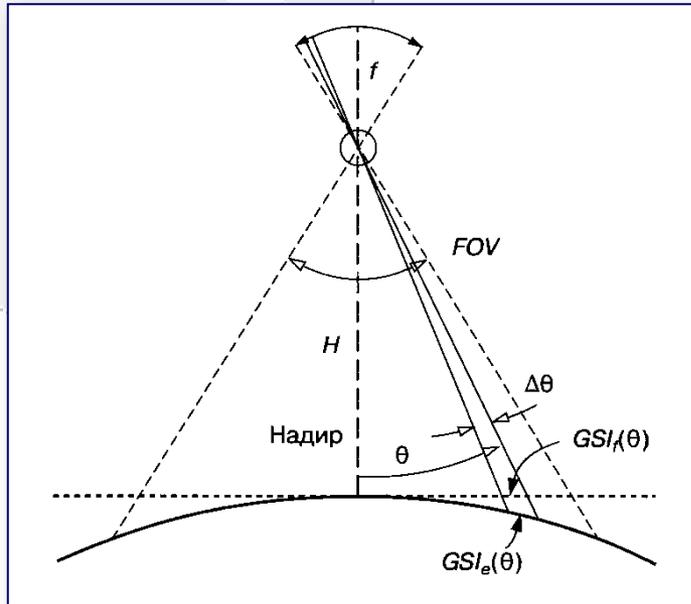
Ниже перечислены различные виды искажений и их причины.

- Искажения геометрических параметров сцены съемки, вызванные вращением Земли и ее формой.
- Искажения, обусловленные геометрией фокальной плоскости сенсора, положением оптической оси относительно ориентации космического аппарата, а также ошибки, связанные с многозональностью и многоэлементностью съемки, различиями в параметрах элементов камеры и отклонением оси съемки.
- Искажения, связанные с ориентацией снимка относительно направления движения спутника, ошибки, возникающие из-за изменения высоты орбиты, скорости сканирования и направления осей космического аппарата.
- Искажения, вызванные неправильной оценкой ориентации осей спутника, ошибками калибровки измерения высоты и угла отклонения оси съемки, а также ошибками синхронизации бортовой и наземной шкал времени.



Геометрическая коррекция

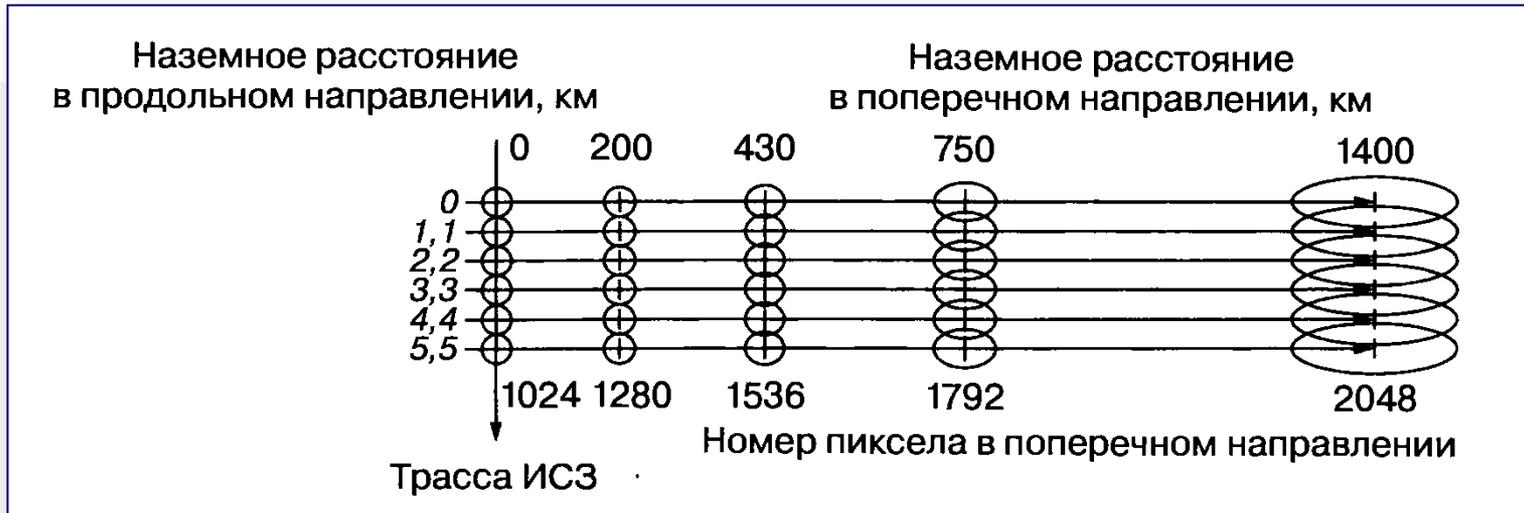
Для геометрической коррекции используют динамическую модель съемки, с помощью которой снимок трансформируется из собственной системы координат в систему координат наземной станции.



Систематические искажения устраняются на станциях приема данных ДЗЗ. Искажения в относительном позиционировании пикселей, причиной которых являются погрешности датчика, проявляются в виде полосчатости и выпадения значений отдельных строк в цифровой записи.



Геометрическая коррекция



Эффект нелинейного увеличения мгновенного поля обзора системы AVHRR, характерный для линейных сканирующих систем и поперечных ПЗС-сканеров. Аналогичные искажения возникают в широкоугольных панорамных фотокамерах. Горизонтальный и вертикальный масштабы расстояний на местности являются линейными. Эллипсы представляют собой область интегрирования функции пространственного отклика съемочной системы, а перекрестия — отдельные пикселы. Размеры мгновенного поля обзора (GIFOV) и величина наземного интервала дискретизации (GSI) существенно возрастают на большом удалении от трассы спутника — этот эффект хорошо заметен на приведенной схеме.



Радиометрическая коррекция

Радиометрическая коррекция - исправление на этапе предварительной подготовки снимков аппаратных радиометрических искажений, обусловленных характеристиками используемого съемочного прибора.

Для сканерных съемочных приборов такие дефекты наблюдаются визуально как модуляция изображения (полосы) в направлениях параллельно или перпендикулярно оси изображения.

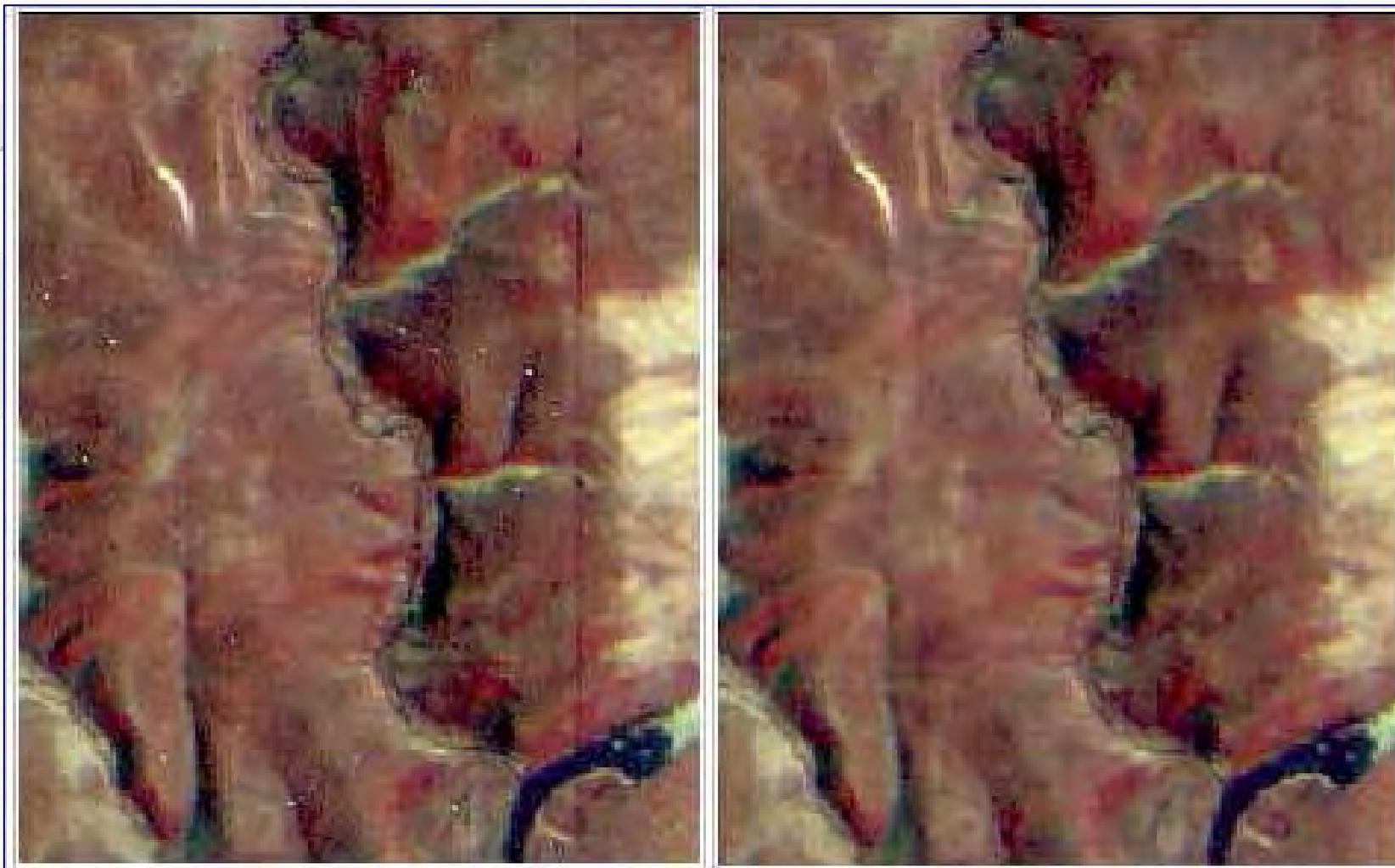
Выделяют следующие причины появления радиометрических искажений:

- Неоднородность отклика детекторов и их различных элементов.
- Неисправность элементов детектора.
- Потеря данных при их передаче, архивировании или извлечении из архива.
- Узкий динамический диапазон.
- Непостоянство параметров съемки от снимка к снимку.

При радиометрической коррекции отклики всех элементов сенсора нормализуются с помощью специальной таблицы соответствия (LUT, Look-Up Table), при построении которой опорным значением служит наименьшая интенсивность сигнала на снимке. Это же значение можно использовать и для обратного преобразования нормализованных данных в исходные абсолютные единицы.



Радиометрическая коррекция



*Удаление сбойных пикселей и вертикальных полос
(статистический метод) в изображении спектрорадиометра ASTER
(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer).*

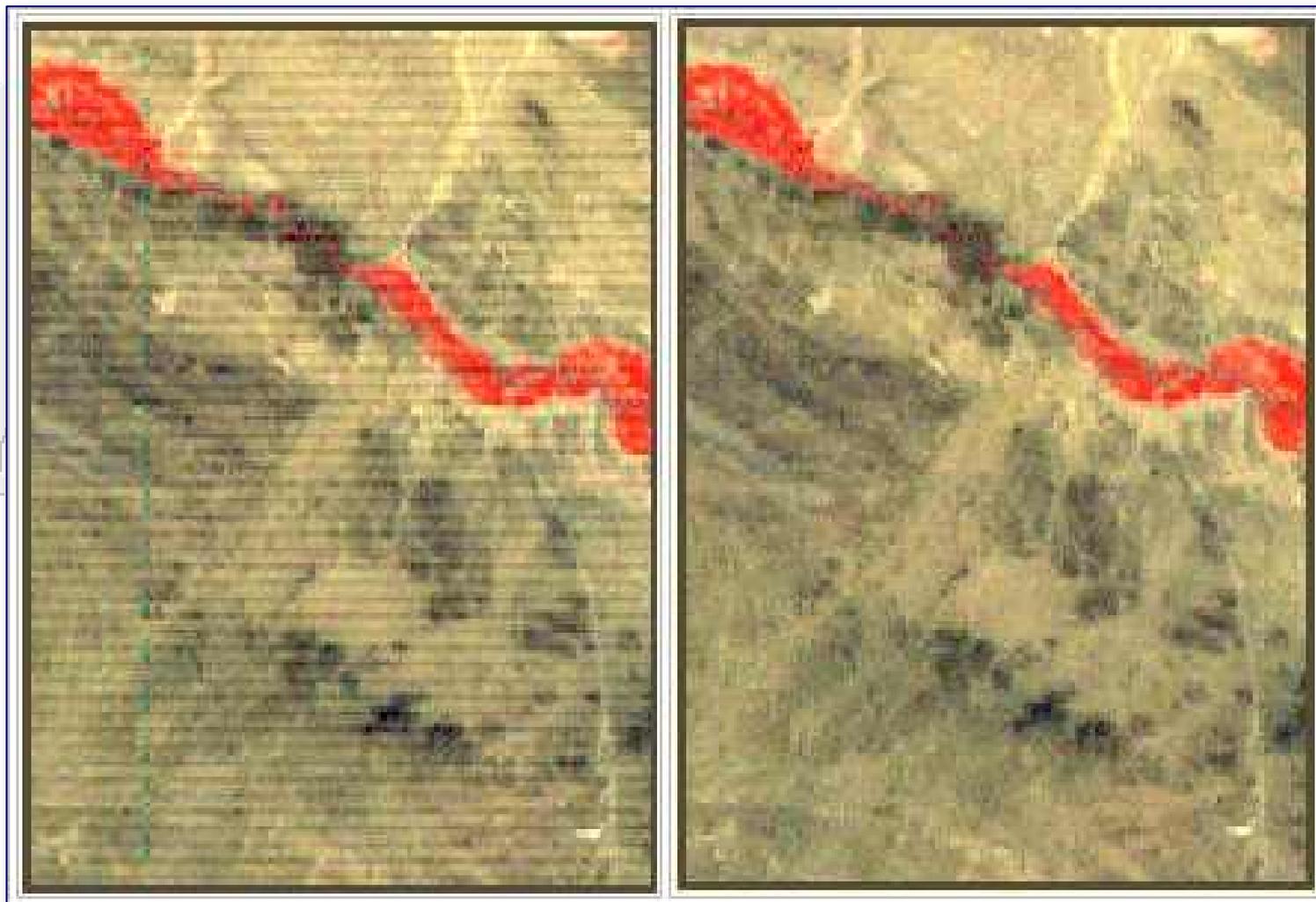


Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Радиометрическая коррекция



*Удаление горизонтальных полос (статистический метод)
в изображении спектрорадиометра ASTER (Advanced Spaceborne
Thermal Emission and Reflection Radiometer).*



Радиометрическая коррекция

Радиометрическая коррекция данных ДЗЗ выполняется, в основном, двумя методами:

- ➔ с использованием известных параметров и настроек съемочного прибора (корректировочных таблиц);
- ➔ статистически.

В первом случае необходимые корректировочные параметры определяются для съемочного прибора на основе длительных наземных и полетных испытаний.

Коррекция статистическим методом выполняется путем выявления дефекта и его характеристик непосредственно из самого изображения, подлежащего коррекции.

Как следует из определения, качество коррекции в первом случае выше, чем при статистическом расчете, так как такой тип коррекции учитывает особенности системы которые такие данные производит.



Радиометрическая коррекция

Для радиометрической коррекции изображения ASTER в видимом и ближнем ИК (VNIR каналы) используется следующая формула:

$$L = A_v * V / G_v + D_v$$

где L – скорректированная величина; V – корректируемая величина; A_v , G_v , D_v – коэффициенты коррекции, рассчитываются разработчиками датчика.

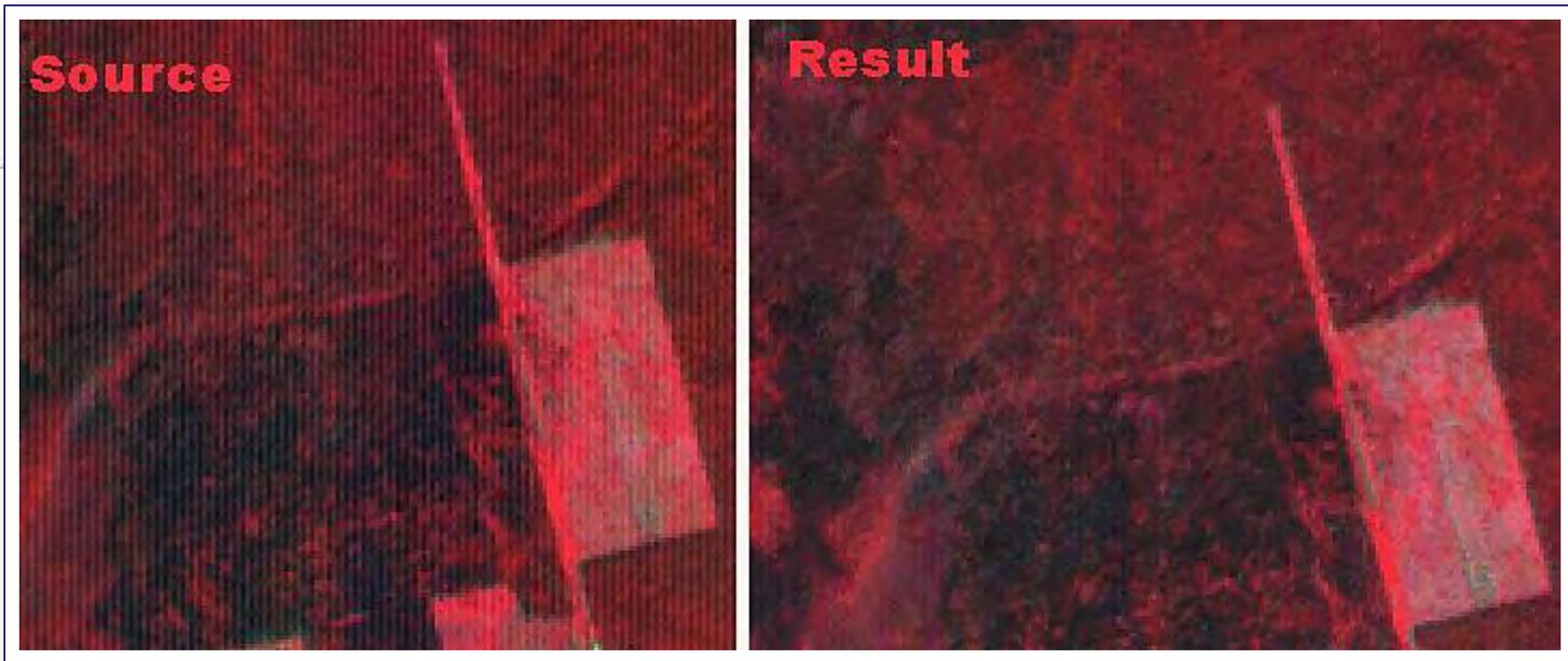
Пример пересчета значения пиксела:

$$L = 1.7965 * 57 / 2.472 + (-2.6339) = 38.7902504854$$

Как видно из результата, цифры, которые мы получаем уже не являются целочисленными, соответственно размер изображения существенно возрастает, кроме того, полученные значения это уже не масштабированные Digital Numbers (DN), а реальные (или почти реальные, без учета атмосферной коррекции) значения .



Радиометрическая коррекция



Успешно выполнив данный пересчет для всех пикселей изображения, получаем существенно лучшую картину.



Преобразование Фурье

$$F(x, y) = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} F(u, v) \exp\left(i 2\pi \left(\left(\frac{ux}{N} \right) + \left(\frac{vy}{M} \right) \right)\right)$$

где N, M – число пикселей в направлении x и y соответственно;

i – мнимая единица;

x, y – пространственные координаты;

u, v – пространственные частоты;

$F(x, y)$ – исходная функция яркости снимка в пространственной области;

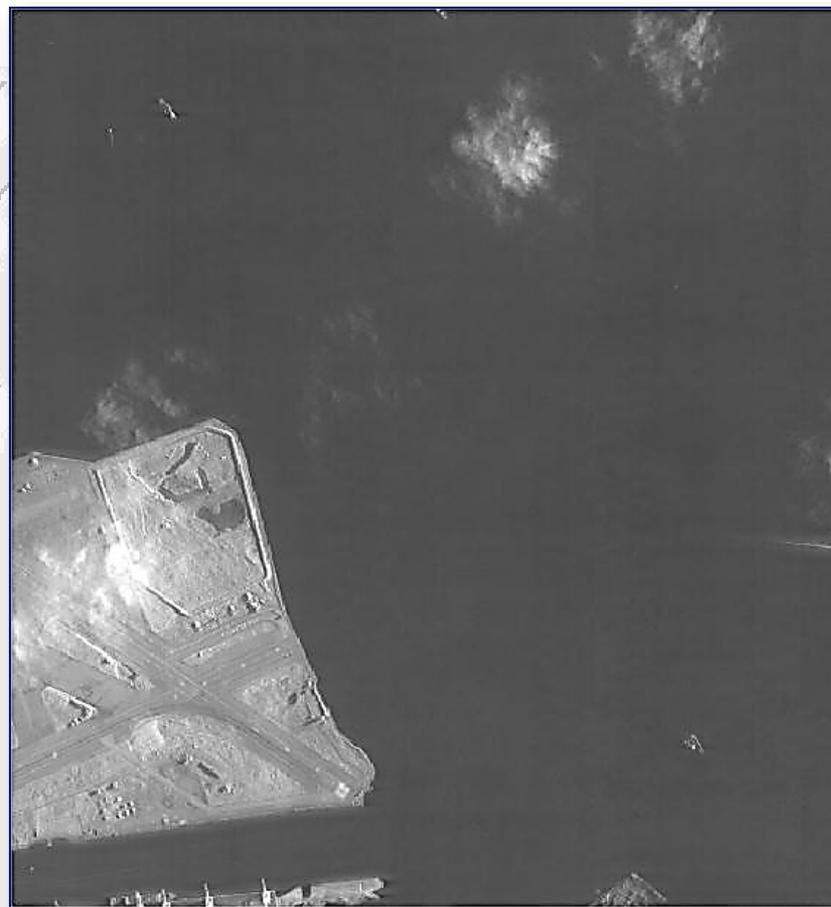
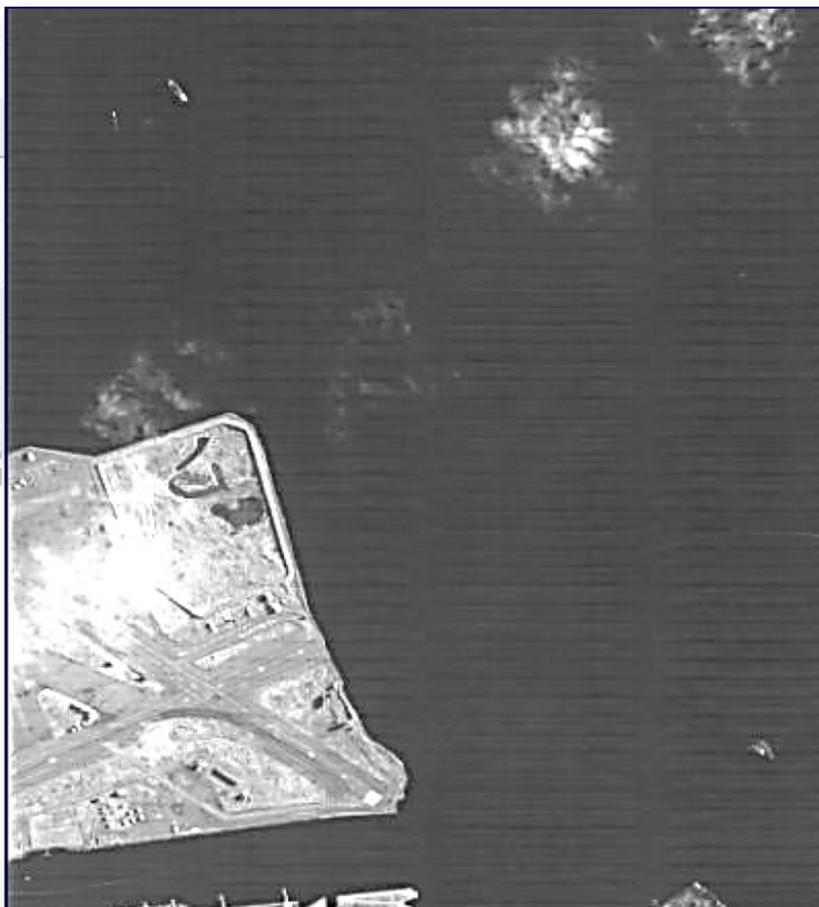
$F(u, v)$ – комплексная функция в частотной области

$$\exp(i z) = \cos(z) + i \sin(z) \quad z = 2\pi \left(\left(\frac{ux}{N} \right) + \left(\frac{vy}{M} \right) \right)$$

Преобразование Фурье обычно применяют для удаления шумов, таких как полосчатость, крапины или вибрация изображения, посредством выявления периодичности их проявления (областей высокой пространственной частоты). Горизонтальная полосчатость отображается на диаграмме магнитуд как вертикальные линии, и наоборот.



Преобразование Фурье



Исходное изображение (слева) и результаты обработки преобразованием Фурье (справа)



Атмосферная коррекция

Задача атмосферной коррекции является одной из самых сложных задач обработки данных ДЗЗ. Особенностью ДЗЗ из космоса является то, что излучение от земной поверхности должно пройти через атмосферу прежде, чем будет зафиксировано датчиками, установленными на спутнике. Поэтому данные ДЗЗ включают не только информацию о поверхности Земли, но и о состоянии атмосферы. Для тех, кто занимается количественным анализом поверхностного отражения, устранение влияния атмосферы является важным шагом предварительной обработки.

Для устранения влияния состояния атмосферы необходимо знать такие параметры, как количество водяного пара, распределения аэрозолей и видимость сцены. Поскольку прямое измерение этих атмосферных свойств доступно редко, разрабатываются методы их получения из спектральных значений данных. Полученные коэффициенты используются для создания высокоточных моделей атмосферной коррекции, чтобы получить истинные коэффициенты отражения.

Существуют различные алгоритмы выполнения атмосферной коррекции:

- стандартная абсолютная коррекция;
- стандартная относительная коррекция;
- исправления на основе заданных моделей.



Стандартная абсолютная атмосферная коррекция

Стандартная абсолютная коррекция может выполняться способами эмпирической коррекции линий или вычитания абсолютно темных объектов.

Эмпирическая коррекция линий предусматривает:

- ➔ вычисление спектральных характеристик объектов на выбранном участке;
- ➔ построение кривых спектрального образа для этих объектов;
- ➔ определение истинного значения коэффициента отражения для каждого пикселя.

Недостатком этого способа является отсутствие в большинстве случаев информации об истинных значениях коэффициентов отражения.



Стандартная абсолютная атмосферная коррекция

Способ вычитания абсолютно темных объектов включает следующие действия:

- ➔ нахождение по гистограммам на снимке абсолютно темных объектов (участки тени в видимой части ЭМ спектра, глубокие и чистые водоемы в ближней ИК части спектра);
- ➔ присвоение таким объектам значения коэффициента отражения равным нулю. Предполагается, что расхождение значений яркости пикселей темных объектов с нулем связано с влиянием атмосферы;
- ➔ вычитание полученной разности от значений яркости каждого пикселя снимка для получения скорректированных значений.

Недостатком способа является возможное появление переисправленных данных.



Стандартная относительная атмосферная коррекция

Стандартная относительная коррекция может выполняться с помощью калибровки по плоской области и внутреннего среднего относительного коэффициента отражения.

Для реализации способа калибровки по плоской области необходимо наличие на изображении плоских участков хода спектральной кривой. Участок спектральной кривой для такой области разбивается на отдельные значения яркости пикселей. Затем значения всех пикселей нормализуются в пределах плоского участка кривой. В результате получают относительные коэффициенты отражения. Недостатком этого способа является то, что он не выполним, если на сцене отсутствуют плоские участки спектральной кривой.

Во втором способе среднее значение отражения изображения делят на значения яркости отдельных пикселей. В результате получают относительные коэффициенты отражения. Недостатком способа является то, что присутствие растительности на изображении уменьшает точность относительных коэффициентов отражения.



Атмосферная коррекция на основе заданных моделей

Алгоритм исправления на основе заданных моделей позволяет получать более точную информацию из изображений. Для устранения влияния различных атмосферных явлений (водяного пара, кислорода, углекислого газа, метана, озона, рассеивания молекулами аэрозолей и частицами пыли) используется программа переноса излучений MODTRAN. В MODTRAN реализовано несколько моделей атмосферы (лето в средних широтах, зима в средних широтах) и состава аэрозолей (для сельской местности, города, морских территорий), по которым рассчитывается уникальное решение для каждого снимка.

Для термальных ИК радиометров, измеряющих яркостную температуру излучения, попадающего на датчик, погрешность определения температуры составляет 10 К и более из-за влияния атмосферы на распространение теплового ИК излучения. Для корректировки термального ИК изображения применяют три метода.

В качестве первого метода выступает математическое моделирование с использованием программных комплексов LOWTRAN и MODTRAN. Такие модели можно применять только после получения детальной характеристики атмосферы.



Атмосферная коррекция



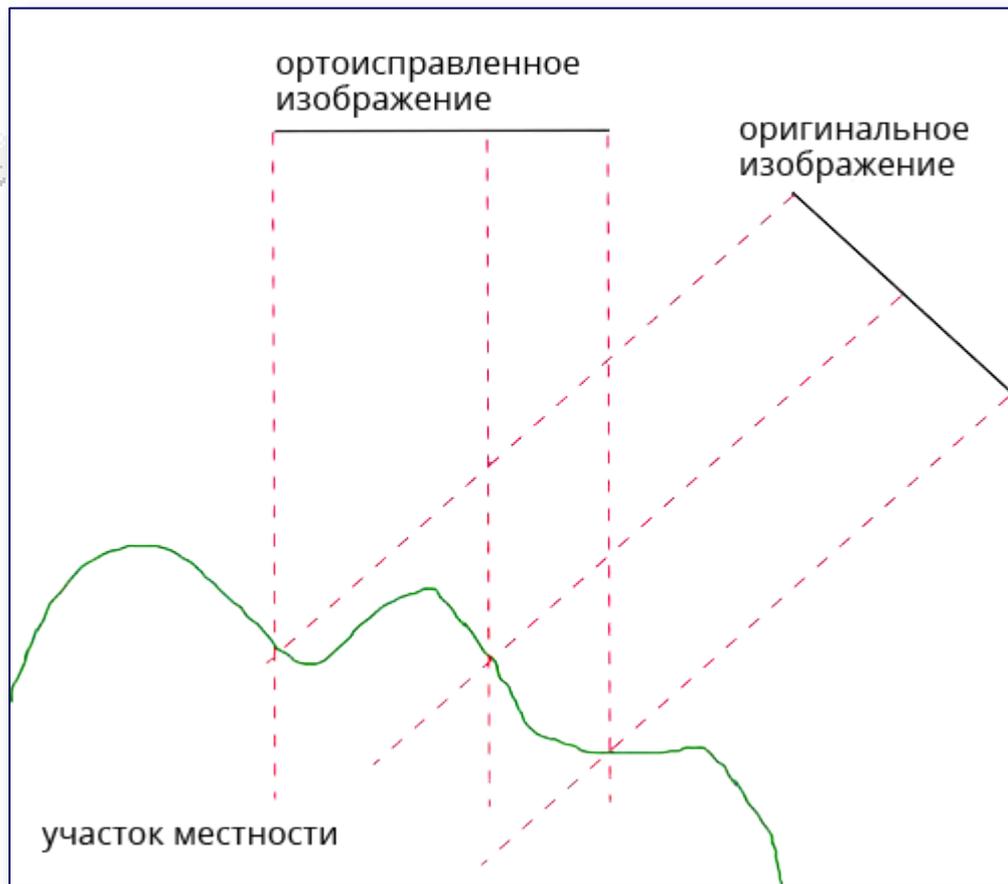
*Снимок спутника LandSat без
атмосферной коррекции*



*Снимок спутника LandSat с
атмосферной коррекции*



Орточтрансформирование снимка



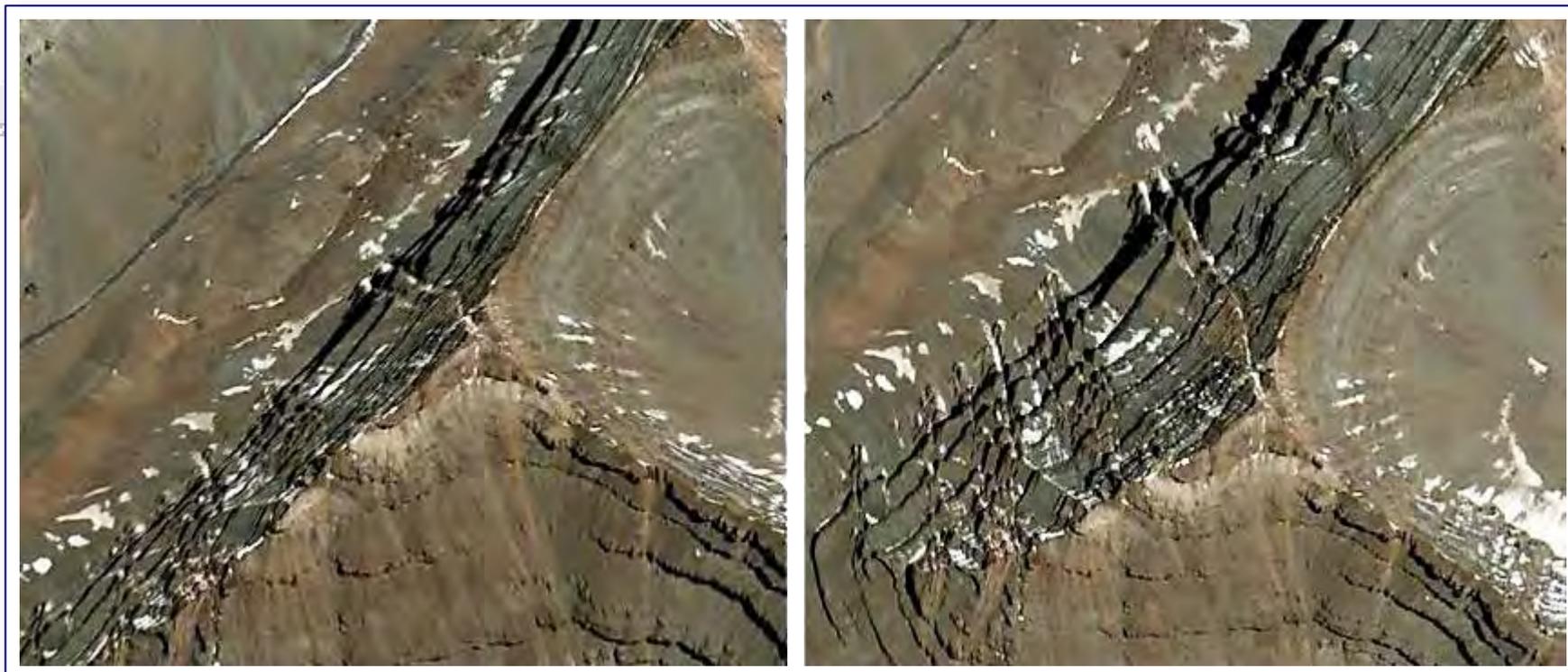
Перераспределение пикселей на изображении в результате орточтрансформирования

Орточтрансформирование (орточткоррекция) — математически строгое преобразование исходного изображения (снимка) в орточтгональную проекцию (при которой каждая точка местности наблюдается строго вертикально, в надир) и устранение всех геометрических искажений, вызванных рельефом, условиями съемки (перспективные искажения, развороты, разномасштабность) и типом камеры (дисторсией объектива).

Для выполнения орточттрансформирования нужна цифровая модель рельефа, так как нужно знать высоту местности для каждой точки (пикселя) снимка.



Орточансформирование снимка



Космический снимок до (слева) и после (справа) орточансформирования.





ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
0	<p>Абсолютно «сырые» данные, содержащие информацию с ПЗС-датчиков в процессе съемки, без каких либо преобразований.</p> <p>Информация может иметь сжатие.</p> <p>Данный уровень является базовым для формирования последующих уровней обработки.</p> <p>Как правило, агентства не распространяют данные этого уровня.</p> <p>Используется исключительно в целях изучения работы съемочных систем</p>	Не определен	Не определен



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
1A	<p>Включает только радиометрическую коррекцию искажений, вызванных разницей в чувствительности отдельных ПЗС-датчиков сканирующей системы.</p> <p>Никакие геометрические исправления для изображений этого уровня не выполняются, поэтому они остаются практически необработанными или «сырыми».</p> <p>Предоставляются коэффициенты абсолютной радиометрической калибровки.</p> <p>Материалы данного уровня рекомендованы для последующей фотограмметрической обработки строгими методами</p>	RAW, TIFF	CEOS, XML



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
1В	<p>Включает радиометрическую коррекцию, как и уровень обработки 1А, а также геометрическую коррекцию систематических ошибок ПЗС-датчиков сканирующей системы, в том числе панорамные искажения, искажения вызванные вращением и кривизной Земли, колебанием высоты орбиты спутника.</p> <p>Применена абсолютная радиометрическая калибровка. Изображения уровня 1В иногда называют «path-oriented».</p> <p>Дополнительно могут быть предоставлены файлы, содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения.</p> <p>Материалы могут быть использованы для фотограмметрической обработки как строгими методами, так и аппроксимационными</p>	RAW, TIFF	CEOS, XML, ASCII



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ



Космический снимок уровня 0 (слева) и уровня 1 (справа)



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
2A	<p>Изображения, как правило, приведены к стандартной картографической проекции без использования наземных опорных точек.</p> <p>Проецирование изображения выполняется на среднюю плоскость или используется глобальная цифровая модель рельефа (DEM) с шагом на местности 1 км.</p> <p>Могут быть предоставлены файлы, содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения</p>	GeoTIFF	XML, ASCII

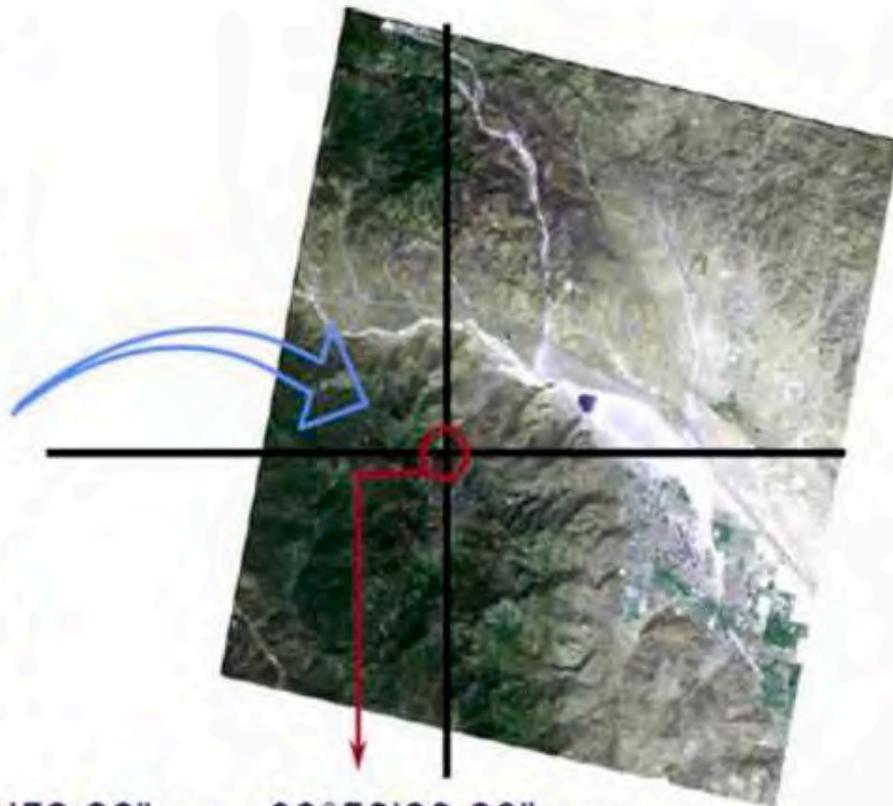


Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
2B	<p>Изображения уровня 2B приведены к стандартной картографической проекции с использованием наземных опорных точек.</p> <p>Проецирование изображения выполняется на среднюю плоскость или используется глобальная цифровая модель рельефа (DEM) с шагом на местности 1 км.</p> <p>Могут быть предоставлены файлы, содержащие коэффициенты рационального многочлена (RPC), аппроксимирующие геометрию изображения</p>	GeoTIFF	XML, ASCII



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ



$116^{\circ}41'52.20''$ з.д., $33^{\circ}50'03.23''$ с.ш.

географическая привязка

Космический снимок уровня 2



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
3A	<p>В отличие от уровня 2B, изображения уровня 3A проецируются в заданную картографическую проекцию путем ортотрансформирования с использованием модели снимка, опорных наземных точек и модели рельефа местности.</p> <p>Полученные изображения являются ортоскорректированными с определенной точностью.</p> <p>Изображения, как правило, нарезаются на стандартные картографические листы</p>	GeoTIFF	XML, ASCII



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ

Стандартный уровень	Описание	Формат изображения	Формат метаданных
3B	Уровень 3B подразумевает объединение изображений уровня 3A в единые бесшовные растровые мозаики, покрывающие большие территории	GeoTIFF	XML, ASCII



Международная классификация уровней обработки и представления данных ДЗЗ

Задача по определению универсального растрового формата и формата метаданных при формировании материалов космических съемок при их предоставлении пользователям превратилась в поиск «Священного Грааля». Основная трудность заключается в большом количестве различных приложений. В настоящее время программное обеспечение, работающее с растровыми изображениями, обычно поддерживает 50 различных форматов. Борьба с этими «джунглями» форматов сильно снижает совместимость приложений и требует больших технических знаний как поставщиков данных, так и их потребителей. За последнее десятилетие было приложено много усилий, направленных на нормализацию электронного обмена данными. Вот некоторые из форматов, представляющих непосредственный интерес: OpenGIS, GeoTIFF, JPEG2000, XML и XML-схемы.



Содержание метаданных

Накопленный опыт предоставления материалов космических съемок, собранный агентствами из сотен различных проектов, привел к разработке набора метаданных, ориентированных на описание параметров не только самих снимков. Так, например, XML-подобный формат метаданных DIMAP (Digital Image Map), разработанный компанией SPOT IMAGE, включает описание растрового изображения, наземной системы координат, спутниковые эфемериды траектории, положение спутника (угловые перемещения), параметры качества информации, конфигурацию съемочной системы, статистические данные, легенду, описание источников данных и т. д.

Основой для разработки формата DIMAP являлся существующий уже более 10 лет набор метаданных CEOS, включающий набор фиксированных записей, состоящих из смеси ASCII и бинарных записей. Основными недостатками этого набора метаданных являются сложность процесса извлечения информации для быстрого просмотра, полное отсутствие возможности дальнейшей модернизации и потребность в специализированных утилитах импорта метаданных.





Дистанционное зондирование поверхности океана



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Поля и явления Мирового океана исследуемые дистанционными методами зондирования

Поля и явления Мирового океана	Параметры и характеристики	Датчик
Температура поверхности океана	Температура	ИК-радиометр
		СВЧ-радиометр
		спектрорадиометр
Соленость поверхности океана	Соленость	СВЧ-радиометр-интерферометр
		поляриметрический СВЧ-радиометр
Уровень моря	Аномалии поля уровня, колебания уровня	альтиметр
Приводный ветер	Скорость и направление ветра	скаттерометр
		СВЧ-радиометр
		альтиметр
		радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА)
Морские льды	Распространение, положение кромки, толщина, возраст, сплоченность, скорость и направление дрейфа льдов и т.п.	ИК-радиометр
		СВЧ-радиометр
		РСА,
		альтиметр
Состояние поверхности моря, волнение	Длина, высота и направление распространения поверхностных волн	РСА,
		СВЧ-радиометр
		альтиметр
Цвет воды, биопродуктивность	Цвет воды, концентрация хлорофилла, фитопланктона, концентрация взвеси	спектрорадиометр
		фотокамеры



Поля и явления Мирового океана исследуемые дистанционными методами зондирования

Поля и явления Мирового океана	Параметры и характеристики	Датчик
Морские течения, динамика водных масс, фронтальные зоны	Скорость и направление течения, морфологическая структура, градиент температуры	ИК-радиометр
		спектрорадиометр
		РСА
		альтиметр
Мезо/мелкомасштабные явления на морской поверхности	Вихри, проявление внутренних волн,	ИК-радиометр
		спектрорадиометр
		РСА
Загрязнение нефтяными углеводородами и поверхностно активными веществами	Цвет воды, ослабление поверхностных капиллярных волн	ИК-радиометр
		РСА
Рельеф дна	Формы рельефа дна мелководного шельфа, морфология дна Мирового океана	альтиметр
Гравитационное поле	Глобальное поле силы тяжести и его временные вариации, вызванные перераспределениями атмосферных масс, океанической циркуляцией, изменениям уровня моря за счет таяния полярного льда и т.д.	акселерометр
		трехосный градиентометр





Спутниковая скаттерометрия



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Физические основы метода

Использование радиолокационных скаттерометров в космической океанологии основано на том, что статистические свойства отраженного радиосигнала, зависят от статистических свойств отражающей поверхности.

При облучении поверхности океана радиоволнами особенно интенсивно отражаются волны, для которых выполняется так называемое условие брегговского или резонансного рассеяния. При наклонном облучении океана резонансное рассеяние наблюдается на морских волнах, длина которых примерно равна половине длины волны зондирующего радиоимпульса.

Зависимость сечения обратного рассеивания от угла падения для скоростей приводного ветра 2,5 и 15 м/с. Сплошной линией показана зависимость для НН-поляризации зондирующего сигнала, штриховой линией — для VV-поляризации

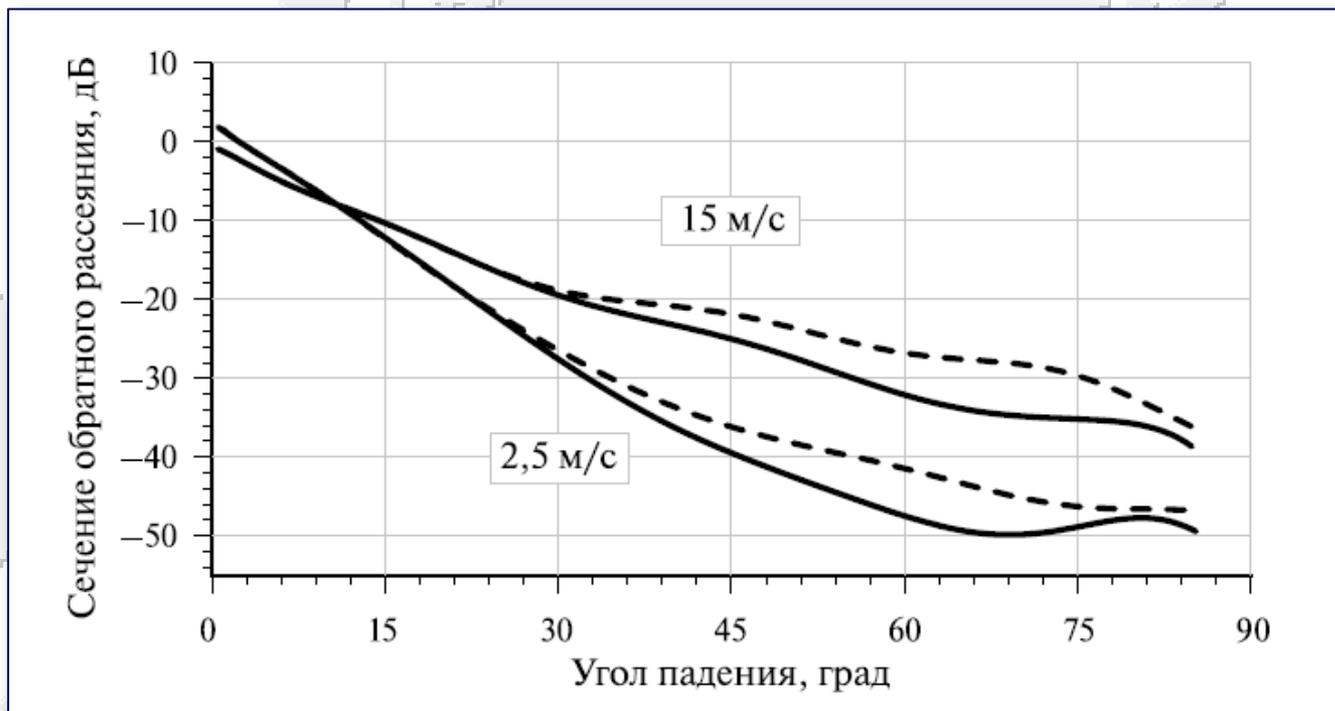
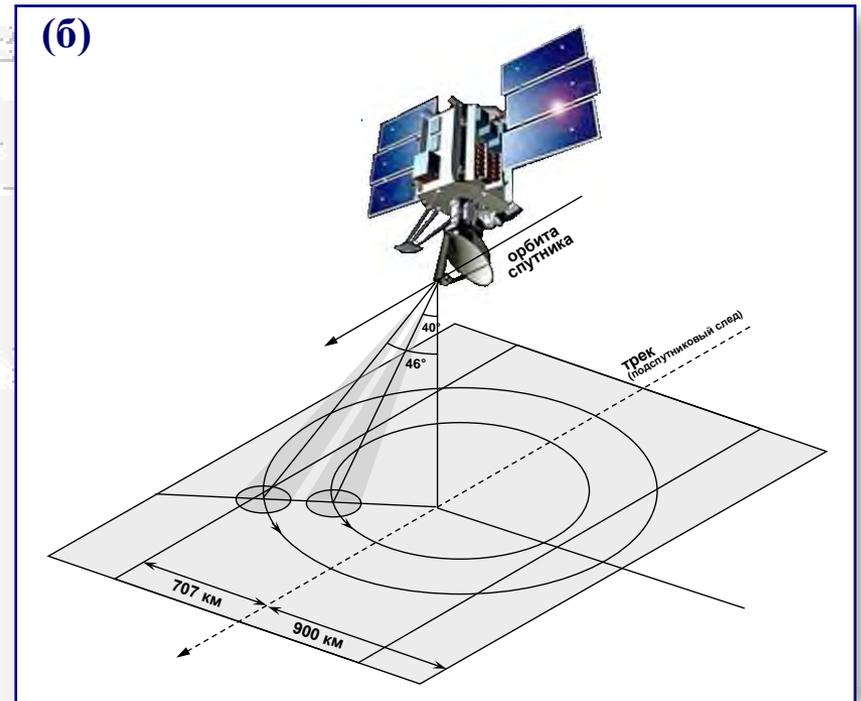
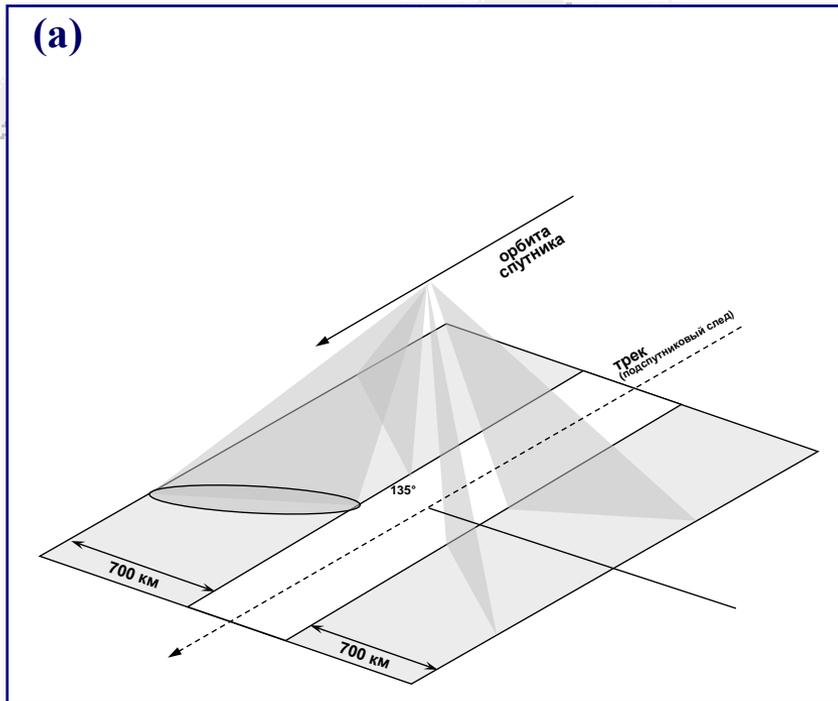


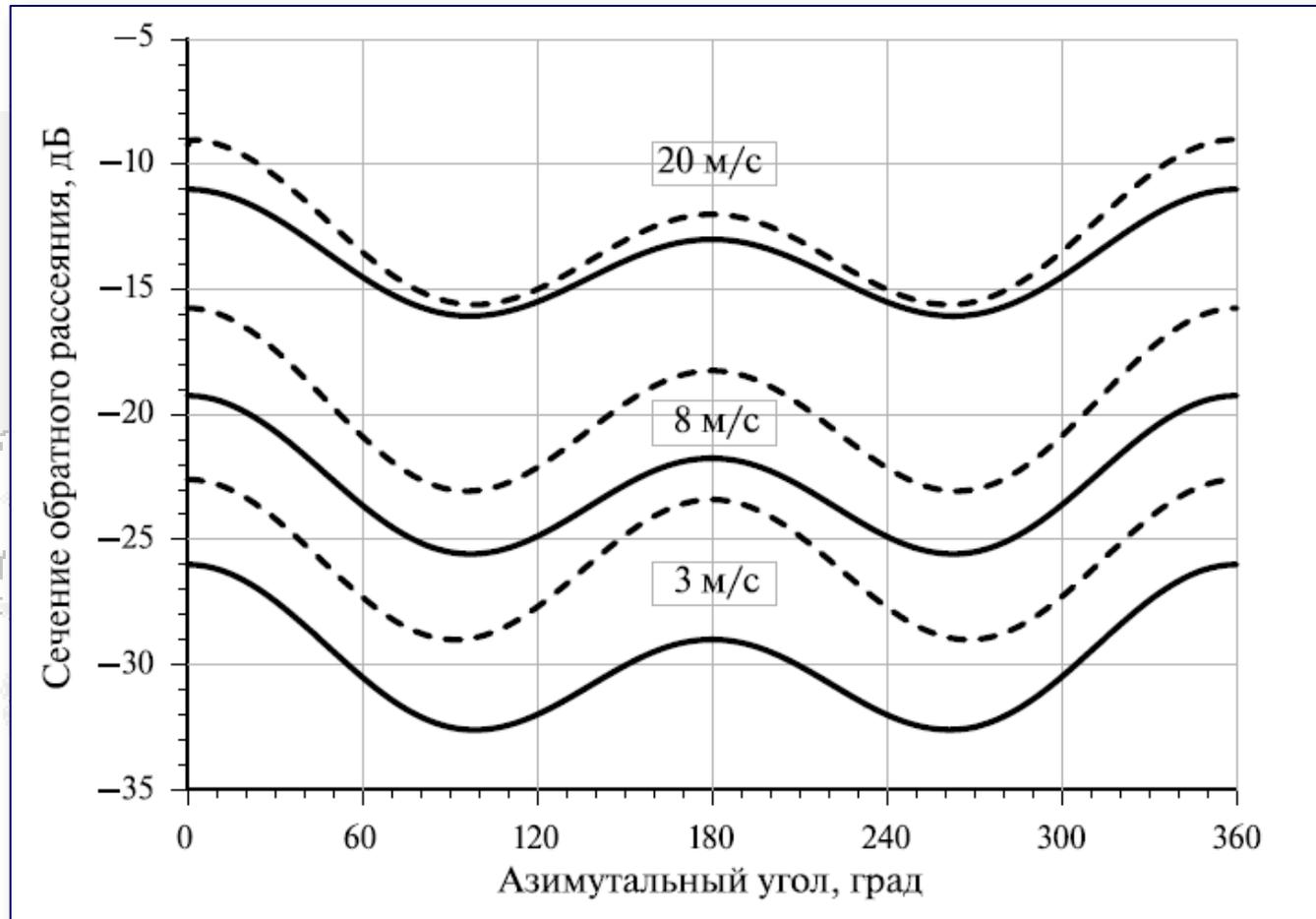
Схема полосы сканирования



Геометрия обзора: (а) – скктерометра SASS с фиксированным угловым положением антенн относительно направления движения спутника SEASAT и (б) – скктерометра SeaWinds спутников QuikSCAT и ADEOS-II, осуществляющего коническое сканирование двумя узкими лучами



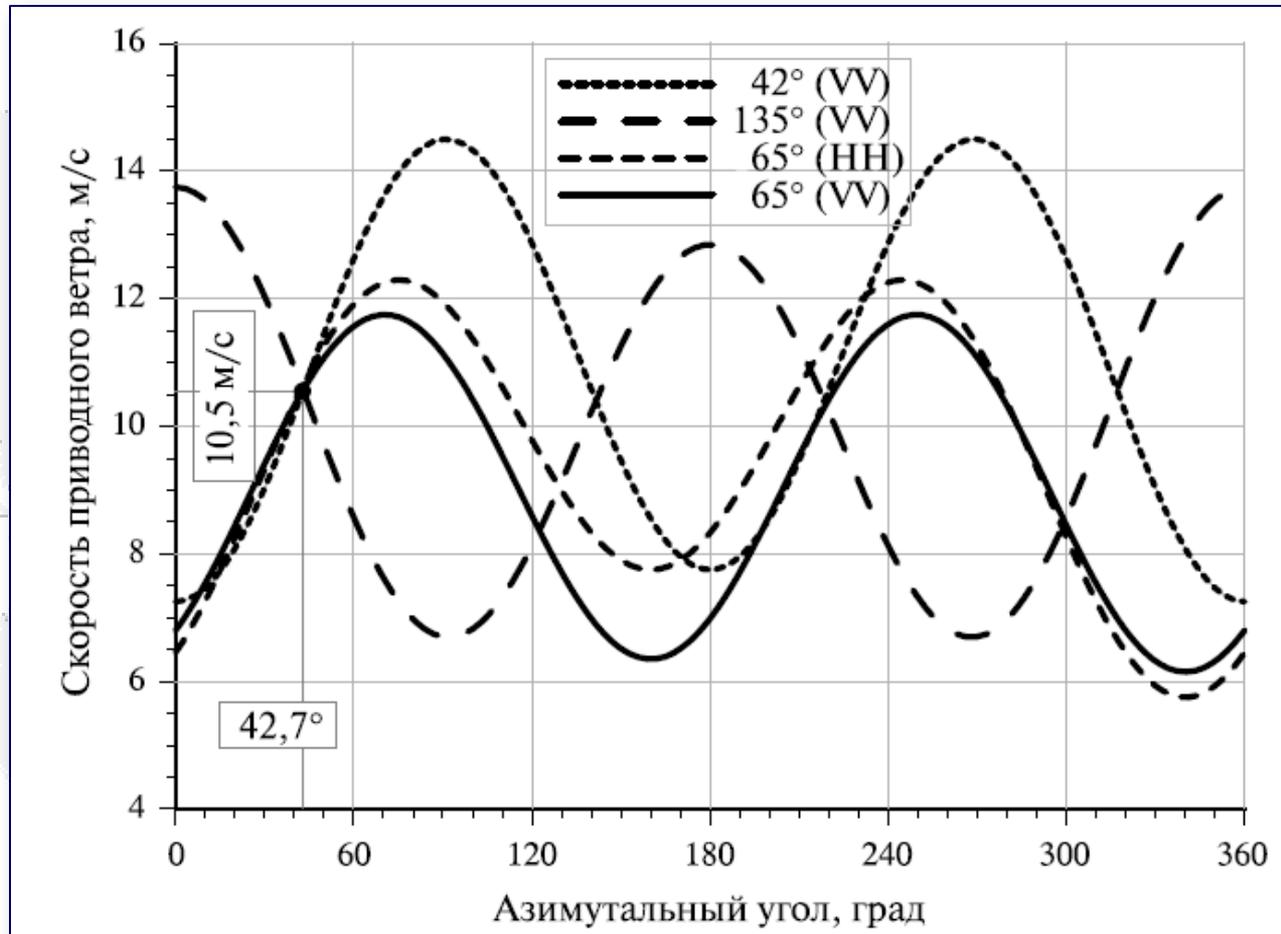
Физические основы метода



Зависимость сечения обратного рассеивания от азимутального угла для скоростей приводного ветра 3, 8 и 15 м/с, направленного против движения спутника, для угла падения 47° . Сплошной линией показана зависимость для HH-поляризации зондирующего сигнала, штриховой линией — для VV-поляризации



Физические основы метода



Определение скорости приводного ветра на основе четырех измерений скаттерометра на трех антеннах, направленных под соответствующими углами к направлению движения спутника, и различных поляризациях. Точка пересечения всех кривых соответствует скорости ветра $V = 10,5$ м/с и его направлению $\phi = 42,7^\circ$

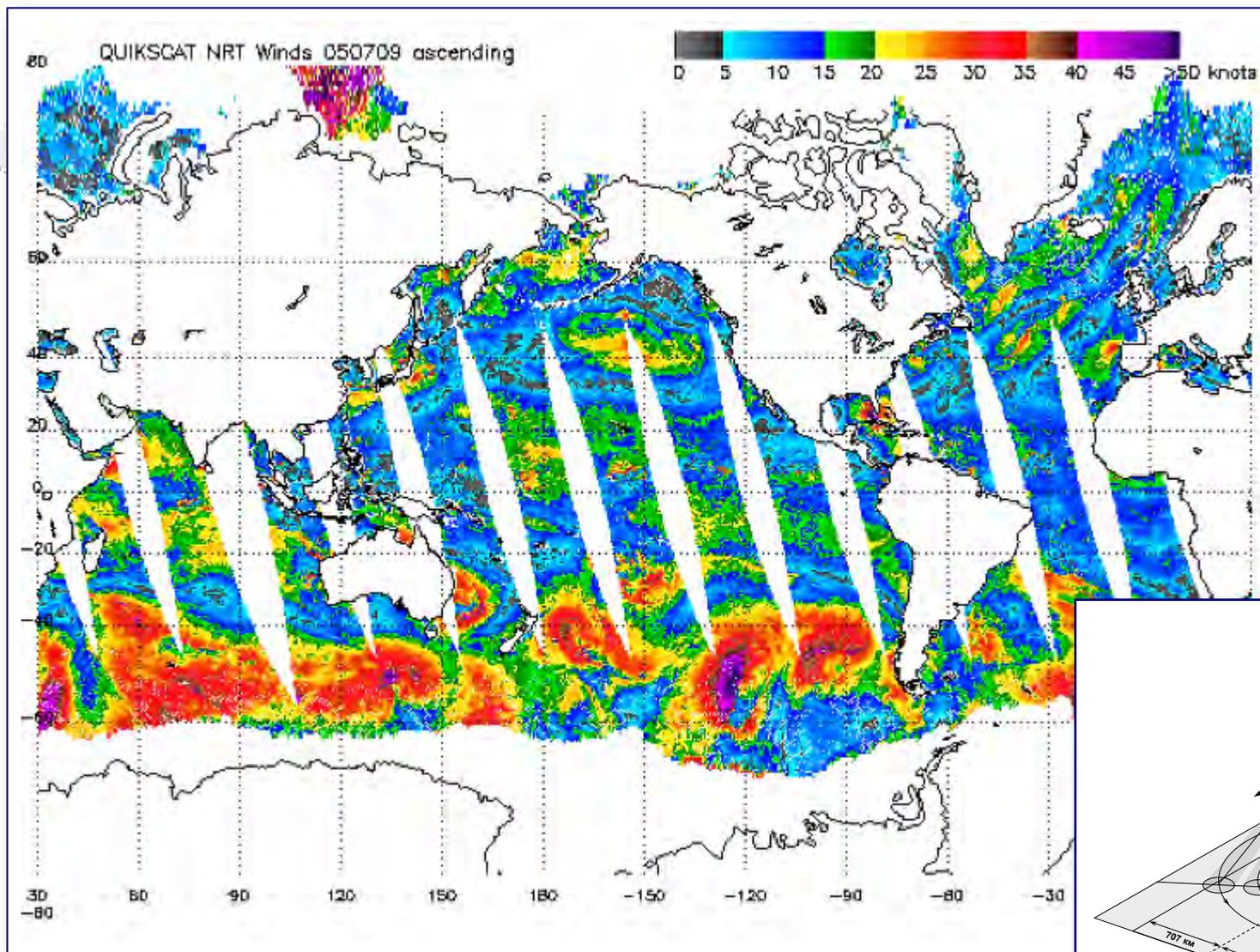


Основные программы спутниковой скаттерометрии и точности измерения параметров приводного ветра

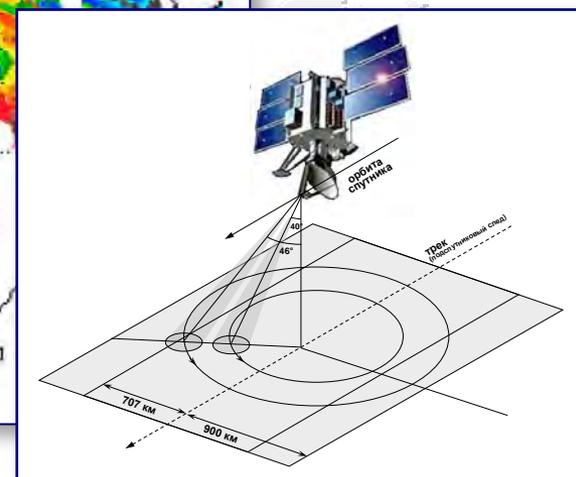
Датчик	Спутник носитель	Время активной работы, месяц/год	Полоса обзора	Пространственное разрешение	Точность			Покрывтие поверхности Земли за 24 часа, %
					Скорость ветра, м/с	Направление ветра	Диапазон измерений, м/с	
SASS	SEASAT	07/1978 – 10/1978	500 x 2	50 x 50	1,6	17	3...16	–
AMI	ERS-1	07/1991– 06/1996	475	50 x 50	1,5	20	1...14	< 41
	ERS-2	04/1995 – 06/2002						
NSCAT	ADEOS-I	10/1996 – 08/1997	600 x 2	25 x 25	1,3	17	3...30	78
SeaWinds	QuikSCAT	06/1999 – 11/2009	1800	12,5 x 25	1	20	3...20	90
	ADEOS-II	12/2002 – 10/2003						
ASCAT	MetOp-1	10/2006 – настоящее время	550 x 2	25 x 25	2	20	4...24	82



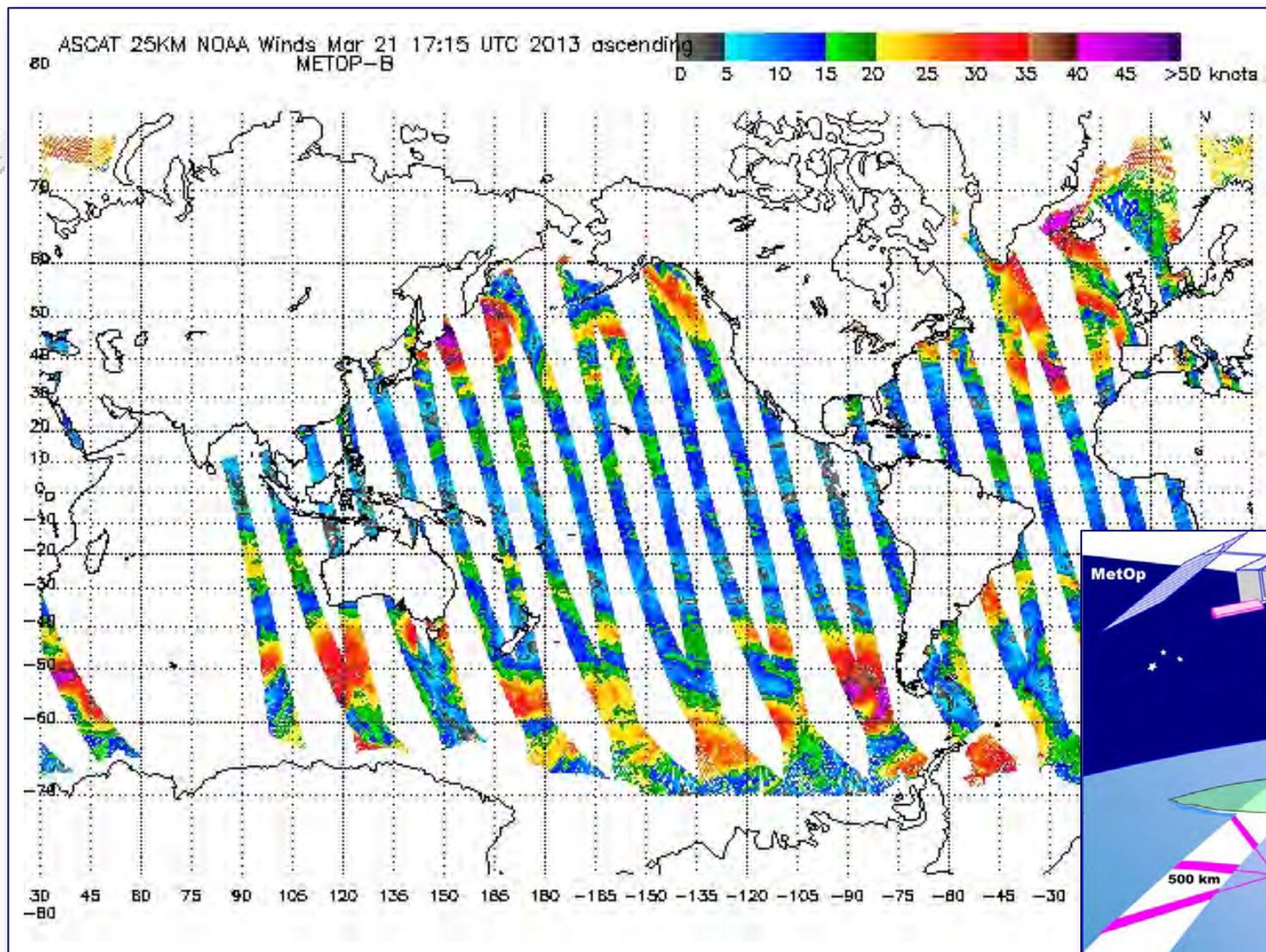
Поле приводного ветра



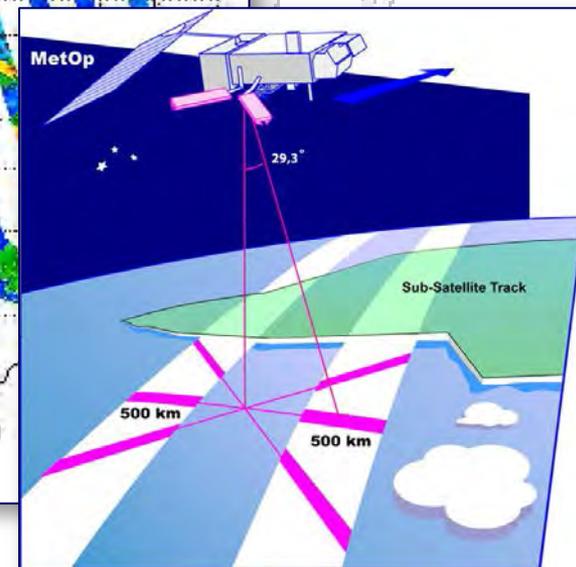
Скорость
приводного
ветра по данным
скаттерометра
SeaWind
спутника
QuikSCAT
на 5 июля 2009 г.



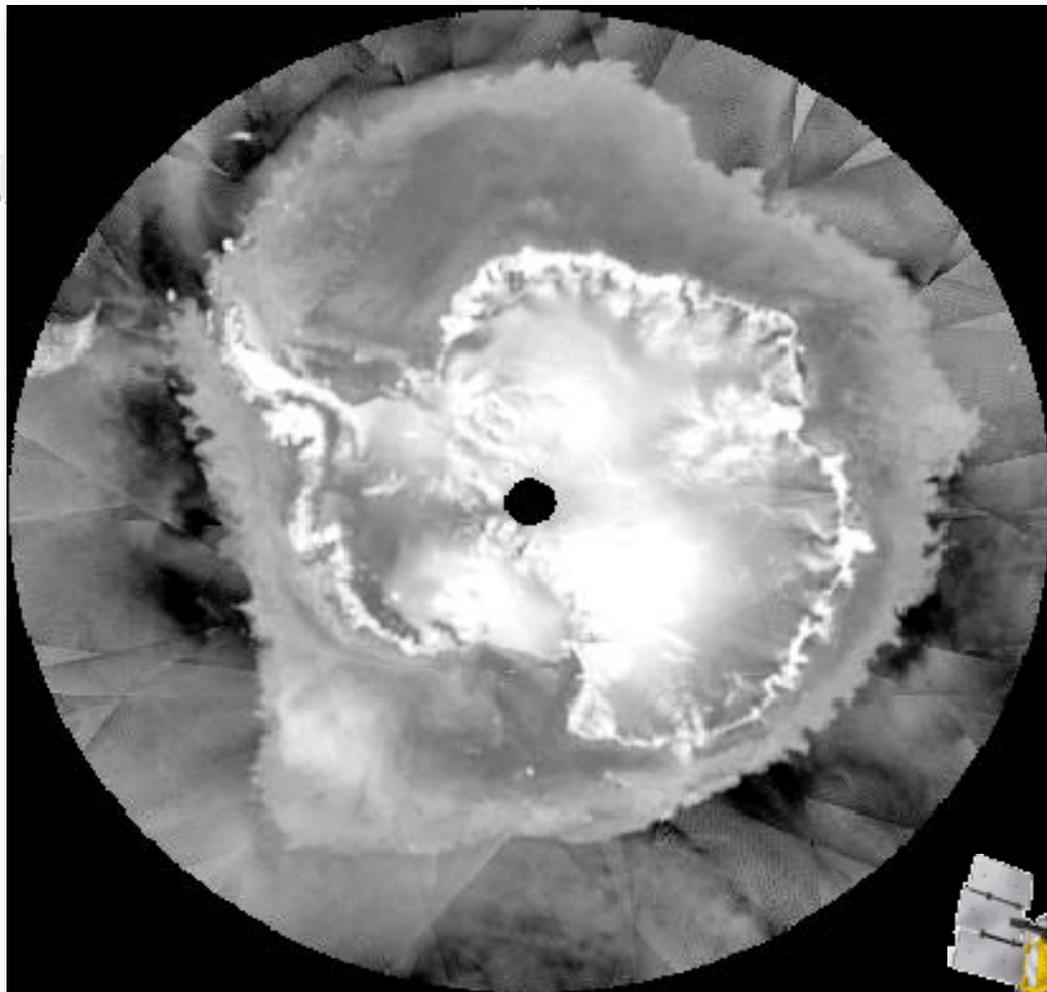
Поле приводного ветра



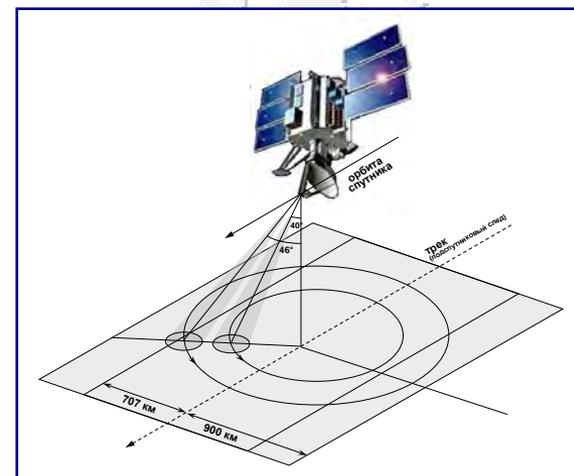
Скорость
приводного
ветра по данным
скаттерометра
ASCAT
спутника
MetOp
на 21 марта
2013 г.



Дистанционные измерения морского льда



Сплоченность морского льда
по данным скаттерометра
SeaWinds спутника
QuikSCAT в декабре 2003 г.





Литература



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев



Литература

Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А.,
Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.

Комплексный спутниковый мониторинг морей России.

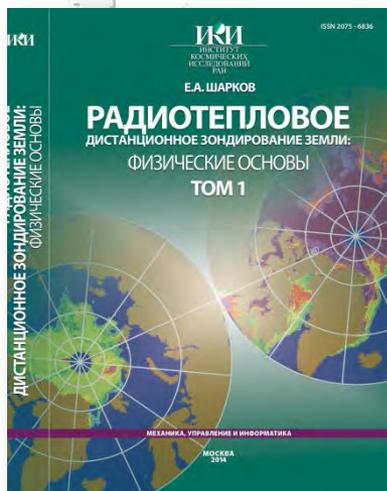
ИКИ РАН, Москва, 2011



Шарков Е.А.

Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1.

М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с



<http://www.iki.rssi.ru/print.htm>



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев

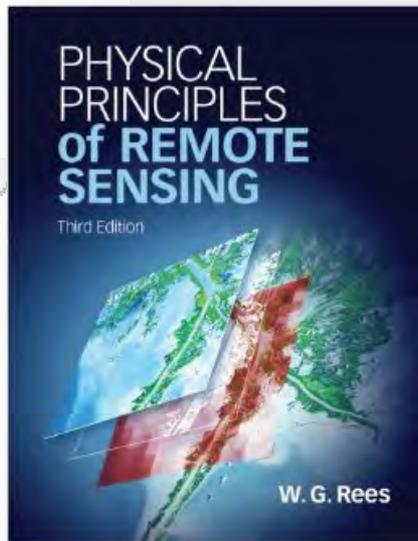
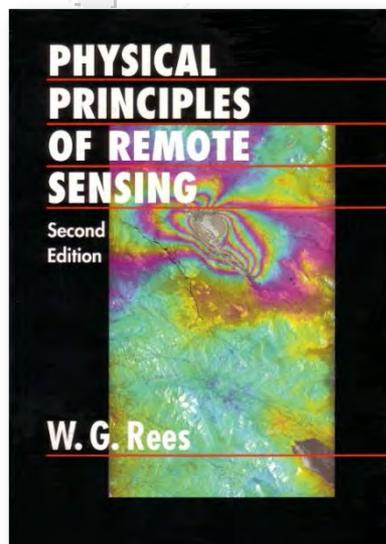


Литература

У.Г. Рис

Основы дистанционного зондирования.

Техносфера, 2006. - 336 с



Rees W.G.

Physical Principles of Remote Sensing

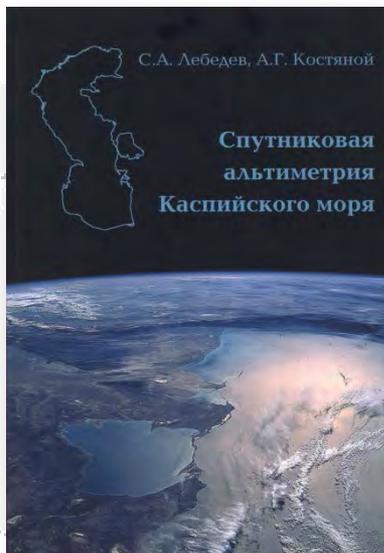


Литература

Лебедев С.А., Костяной А.Г.

Спутниковая альтиметрия Каспийского моря.

Москва, 2006. – 353 с.



Роберт А. Шовенгердт

Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений.

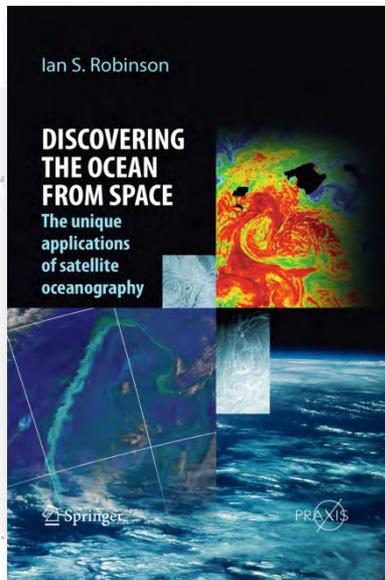
Техносфера, 2013. – 582 с.



Литература

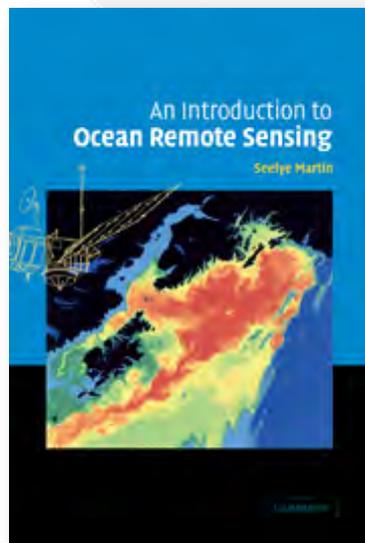
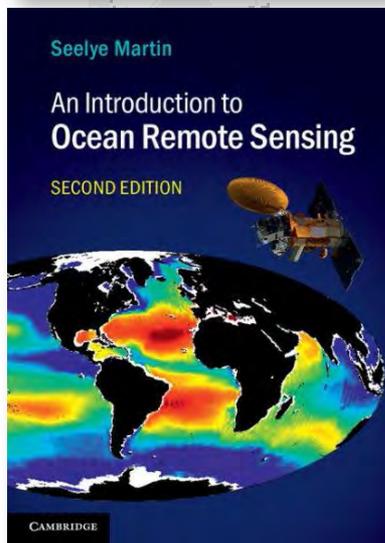
Ian S. Robinson

Discovering the Ocean from Space.
The Unique Applications of Satellite Oceanography.



Seelye Martin

An Introduction to Ocean Remote Sensing



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев





Спасибо за внимание



Одиннадцатая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 16–20 марта 2020 г.

© 2020, ГЦ РАН, МГТУ, С.А. Лебедев

