

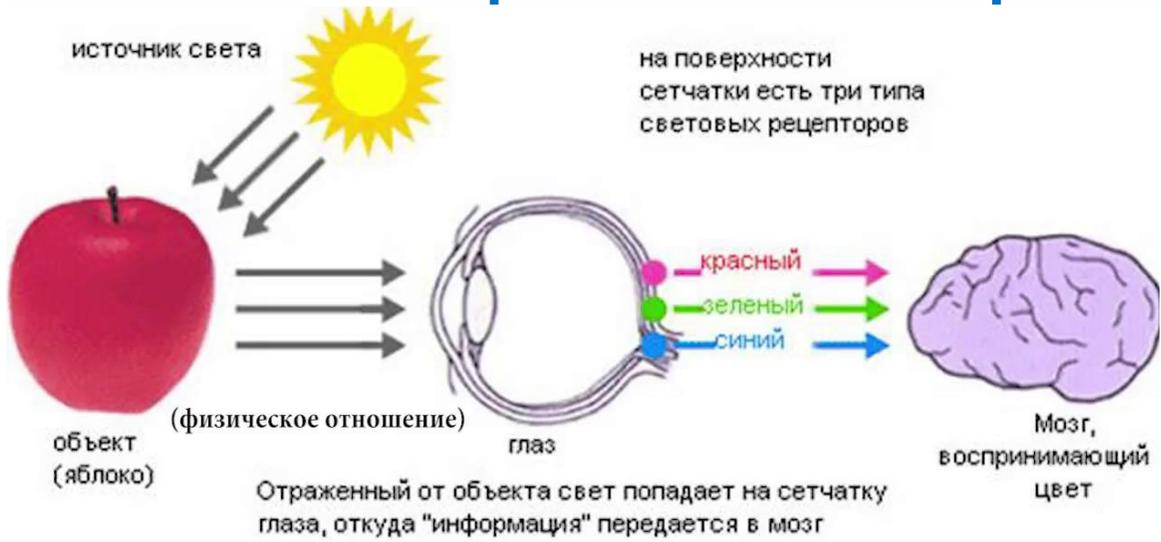


Спутниковые системы наблюдения и связи

Тема 1.

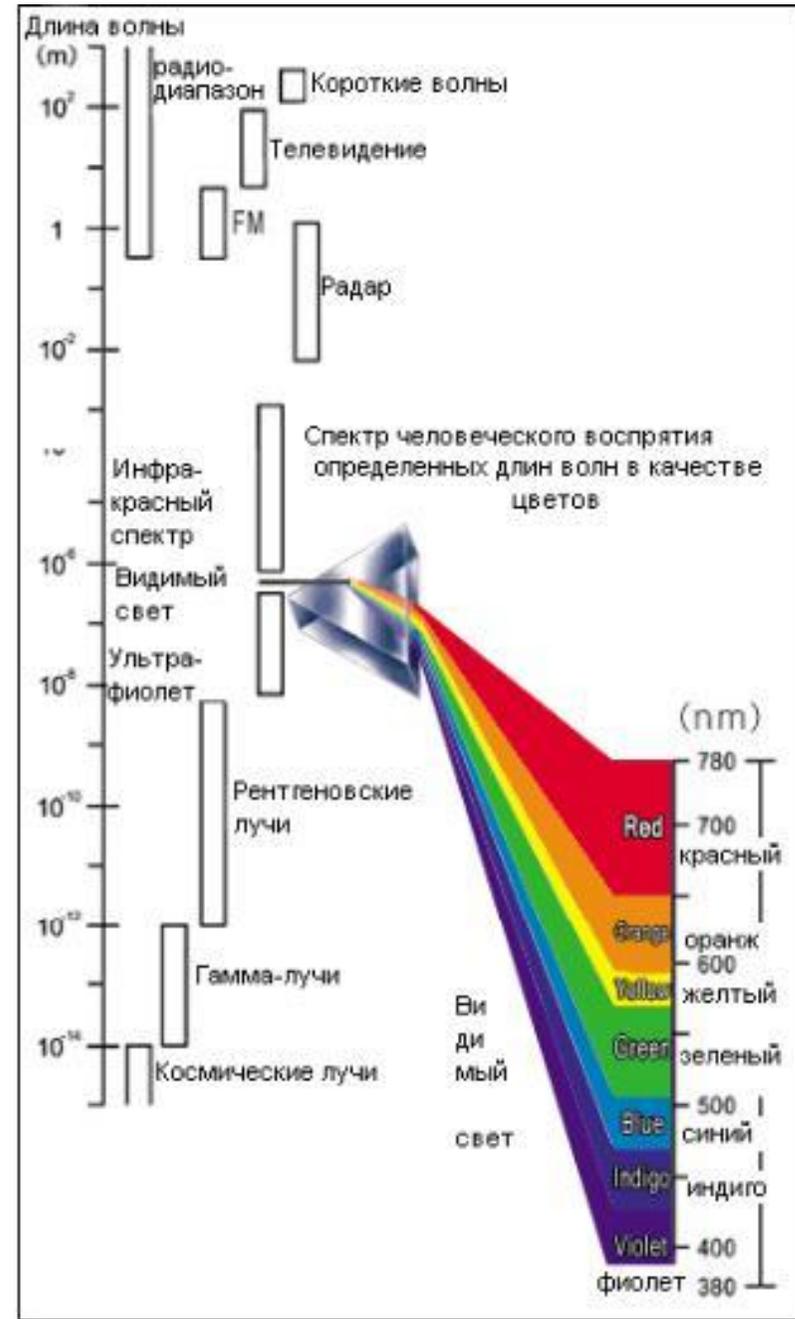
Теоретические основы дистанционного зондирования Земли из космоса

**д.тн, с.н.с Ключников В.Ю.
(ЦНИИ машиностроения)**



Человеческий глаз — пример системы дистанционного зондирования в самом общем смысле

В ситуации освещения объектов на Земле солнечным светом глаз осуществляет пассивное ДЗ отраженного объектом солнечного света. Если, например, в ночное время человек использует для подсветки электрический фонарь, глаз становится примером активной системы ДЗ.



Восприятие цвета

Цвет — это иллюзия, создаваемая мозгом при помощи глаз, путём преобразования электромагнитных волн.

Известно следующее предположение: то, что в вашем восприятии является зелёным цветом, в представлении другого человека может быть синим, однако он так же, как и вы, будет называть его зелёным.

И никто не заметит этой разницы, за исключением случая, если один из вас получит доступ к сознанию другого, что, разумеется, невозможно.

Несмотря на то, что данное предположение находится на стадии гипотезы и вряд ли в ближайшее время будет доказано или опровергнуто, оно даёт нам хороший пинок для осознания иллюзорности вселенной.



Зелёная трава для вас выглядит так



А мозг кого-то другого, например, решил показывать ему зелёный вот так

Электромагнитная волна как переносчик информации



Характеристики электромагнитного поля:

\vec{H} - напряжённость магнитного поля (А/м);
 \vec{B} - индукция магнитного поля (Тл = Вб/м² = кг·с⁻²·А⁻¹);
 \vec{E} - напряженность электрического поля (В/м);
 \vec{D} - электрическая индукция (вектор электрического смещения, Кл/м²);
 \vec{S} - вектор Пойнтинга (вектор плотности потока электромагнитной энергии), определяющий количество электромагнитной энергии, переносимой через единицу площади в единицу времени;
 $j_{см}$ - плотность тока смещения (Ток смещения в вакууме – это изменение электрического поля во времени, не сопровождающееся каким-либо движением электрических зарядов);

Характеристики индивидуальных свойств материальной среды, заполняющей пространство, в котором распространяется электромагнитная волна:

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость;
 $\epsilon_0 = 8,854\ 187\ 812\ 8(13) \cdot 10^{-12}$ - электрическая постоянная (Ф/м);
 μ - относительная магнитная проницаемость;
 $\mu_0 = 1,256\ 637\ 062\ (12) \cdot 10^{-6}$ - магнитная постоянная (Гн/м);
 σ - удельная проводимость среды (Ом⁻¹·м⁻¹);
 $c = 299\ 792\ 458$ м/с (точное значение) – скорость света.

Система материальных уравнений, которые характеризуют индивидуальные свойства заполняющей пространство материальной среды:

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}; \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}; \vec{J}_{пр} = \sigma \vec{E}.$$

Электромагнитные волны – распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля. Электромагнитные волны были открыты Г. Герцем в 1887 г.
Электромагнитное поле – фундаментальное физическое поле, взаимодействующее с электрически заряженными телами, а также с телами, имеющими собственные дипольные и мультипольные электрические и магнитные моменты. Представляет собой совокупность электрического и магнитного полей, которые могут, при определённых условиях, породить друг друга, а по сути, являются одной сущностью, формализуемой через тензор электромагнитного поля. Понятие поля ввел М. Фарадей. Электромагнитное поле (и его изменение со временем) описывается в электродинамике в классическом приближении посредством системы уравнений Максвелла:

Интегральная форма	Дифференциальная форма.	Физический смысл уравнения
$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = - \int_S \left(\frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{S} \right)$ <p>Циркуляция вектора напряженности электрического поля по произвольному замкнутому контуру прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную этим контуром.</p>	$\text{rot} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$ <p>При всяком изменении магнитного поля возникает вихревое электрическое поле, пропорциональное скорости изменения индукции магнитного поля.</p>	Всякое изменение магнитного поля во времени вызывает появление вихревого электрического поля.
$\oint_S (\vec{B} d\vec{S}) = 0$ <p>Поток индукции магнитного поля через произвольную замкнутую поверхность равен нулю. Это означает, что в природе нет магнитных зарядов.</p>	$\text{div} \vec{B} = 0$ <p>Поток силовых линий индукции магнитного поля из бесконечного элементарного объема равен нулю, так как поле вихревое.</p>	Источники магнитного поля в виде магнитных зарядов в природе отсутствуют.
$\oint_L (\vec{H} d\vec{l}) = \int_S (\vec{j} d\vec{S}) + \int_S \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S} \right)$ <p>Циркуляция вектора напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру прямо пропорциональна суммарному току, пересекающему поверхность, охватываемую этим контуром.</p>	$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ <p>Вокруг любого проводника с током и вокруг любого переменного электрического поля существует вихревое магнитное поле.</p>	Протекание тока проводимости по проводникам и изменения электрического поля во времени приводят к появлению вихревого магнитного поля.
$\oint_S (\vec{D} d\vec{S}) = \int_V \rho dV$ <p>Поток вектора электростатической индукции через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую заряды, прямо пропорционален суммарному заряду, расположенному внутри этой поверхности.</p>	$\text{div} \vec{D} = \rho$ <p>Поток вектора индукции электростатического поля из бесконечного элементарного объема прямо пропорционален суммарному заряду, находящемуся в этом объеме.</p>	Источником электрического поля является электрический заряд.

Из уравнений Максвелла вытекает существование электромагнитных волн, то есть такого электромагнитного поля, которое способно существовать самостоятельно, в отсутствие электрических зарядов и токов.

Энергетические величины светового излучения

Наименование	Обозначение	Определение	Единица физической величины
Энергия излучения	U	Энергия, переносимая электромагнитными волнами	Дж
Плотность энергии излучения	S	Энергия излучения на единицу объема	Дж · см ⁻³
Лучистый поток	P	Скорость передачи энергии излучения	Вт
Плотность излучения	W	Лучистый поток, излучаемый с единицы площади источника	Вт · см ⁻²
Плотность излучения фотонов	Q	Число фотонов, испускаемых в секунду с единицы площади	Фотон · с ⁻¹ · см ⁻²
Сила излучения	J	Лучистый поток в единичном телесном угле	Вт · стер ⁻¹
Лучистость (яркость)	N	Лучистый поток в единичном телесном угле с единицы площади	Вт · см ⁻² · стер ⁻¹
Облученность (освещенность)	H	Лучистый поток, падающий на единицу площади	Вт · см ⁻²
Коэффициент излучения (излучательная способность)	ε	Отношение плотности излучения источника к плотности излучения абсолютно черного тела при той же температуре	Безразмерная величина
Коэффициент поглощения (поглощательная способность)	α	Отношение поглощенного лучистого потока к падающему лучистому потоку	Безразмерная величина
Коэффициент отражения	ρ	Отношение отраженного лучистого потока к падающему лучистому потоку	Безразмерная величина
Коэффициент пропускания	τ	Отношение пропущенного лучистого потока к падающему лучистому потоку	Безразмерная величина

Для характеристики распределения по спектру величин P , J , N , H вводится понятие *спектральной плотности этих величин*.

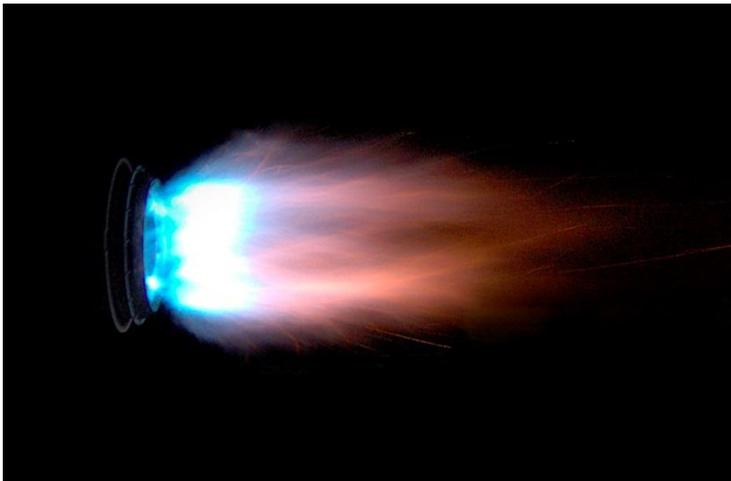
Точечные и протяженные источники излучения

При измерении энергетических физических величин важно понимать различие между точечными и протяженными источниками излучения.

Один и тот же источник в зависимости от расстояния, с которого производится наблюдение, может быть и точечным и протяженным. Например, факел двигателя реактивного самолета на расстоянии 10... 15 км может рассматриваться как точечный источник. Этот же факел с расстояния 3 м представляется наблюдателю протяженным источником. При использовании приемника излучения без оптики принято считать точечным источник, удаленный от приемника на расстояние более, чем в 5... 10 раз превышающее максимальный размер источника. При наличии оптики точечным считается источник, изображение которого меньше приемника. Иными словами, точечный источник не заполняет все поле зрения оптического прибора, протяженный же источник заполняет. Точечный источник характеризуют его силой излучения J , а протяженный — энергетической яркостью N .

Облученность от точечного источника на расстоянии d от него: $H = \frac{J}{d^2}$.

Если расстояние d не менее, чем в 5 раз превышает наибольший размер источника, ошибка при использовании формулы не превышает 1 %. Облученность от протяженного источника может быть вычислена интегрированием.



Отражение светового излучения от поверхности

При измерении коэффициента отражения от поверхности нужно учитывать свойства поверхности.

Если **поверхность зеркальная**, не составляет особого труда собрать и измерить весь отраженный поток.

Для рассеивающей поверхности эта задача может оказаться довольно сложной.

Рассеивающую поверхность называют полностью диффузной или подчиняющейся закону Ламберта, когда отраженный в данном направлении поток, отнесенный к единице телесного угла, пропорционален косинусу угла между рассматриваемым направлением и нормалью к поверхности.

Аналогично можно говорить о полностью **диффузном источнике**. Лучистость диффузного источника одинакова по всем направлениям.

Многие реальные поверхности достаточно точно следуют закону Ламберта. (Закон Ламберта — физический закон, согласно которому яркость поверхности одинакова во всех направлениях.).

$$W = \pi N = \frac{\pi J}{A},$$

$$J = \frac{WA}{\pi} = NA,$$

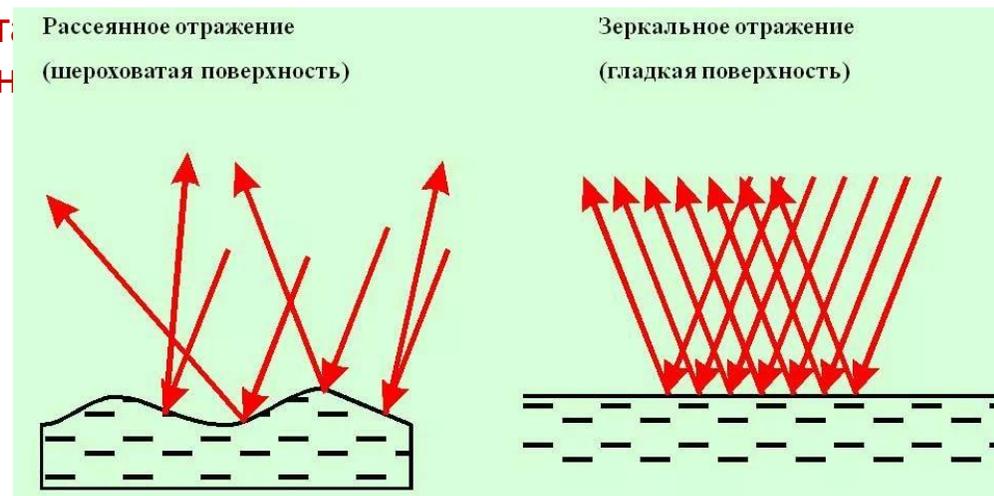
$$N = \frac{W}{\pi} = \frac{J}{A},$$

A — площадь излучателя.

Идеальным ламбертовским излучателем является абсолютно черное тело (АЧТ).

Типы источников излучения:

- тепловые (нагретые твердые и жидкие тела, - непрерывное распределение излучения);
- селективные (пламя или электрический разряд в газах, - излучение сконцентрировано в узких спектральных интервалах).



Тепловое излучение

Закон Планка описывает спектральное распределение энергии электромагнитного излучения, находящегося в тепловом равновесии с веществом при заданной температуре

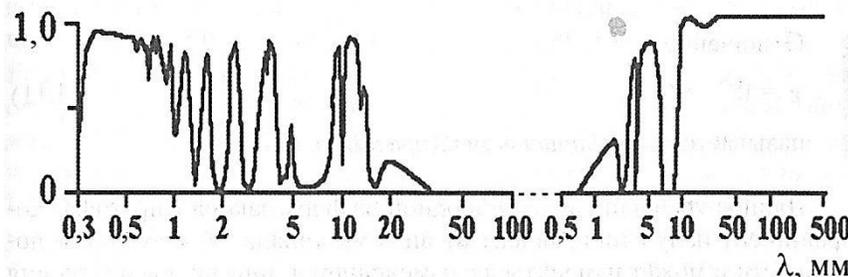
Закон Планка: $W_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/(\lambda kT)} - 1}$, или $W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$, - спектральное распределение излучения абсолютно черного

где W_λ — спектральная плотность излучения, Вт · см⁻² мкм⁻¹; λ — длина волны, мкм; h — $(6,6256 \pm 0,0005) \cdot 10^{-34}$ Вт · с² — постоянная Планка; T — термодинамическая температура, К; c — $(2,997925 \pm 0,000003) \cdot 10^{10}$ см · с⁻¹ — скорость света:

$C_1 = 2\pi^5 hc^2 = (3,7415 \pm 0,0003) \cdot 10^4$ Вт · см⁻² · мкм⁴;

$C_2 = ch/k = (1,43879 \pm 0,00019) \cdot 10^4$ мкм · К;

$k = (1,38054 \pm 0,00018) \cdot 10^{-23}$ Вт · с · К⁻¹ — постоянная Больцмана.



- спектральная плотность излучения абсолютно черного тела (АЧТ) в диапазоне температур 500—900 К. полный лучистый поток, излучаемый АЧТ и пропорциональный площади, ограниченной осью абсцисс и соответствующей кривой, быстро возрастает с ростом температуры.

Закон этого возрастания можно получить, проинтегрировав уравнение Планка:

$$W = \int_0^{\infty} W_\lambda d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4.$$

- **закон Стефана—Больцмана**, где $\sigma = (5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-12}$ Вт · см⁻² · К⁻⁴ - постоянная Стефана — Больцмана.

Продифференцировав уравнение Планка, получим **закон смещения** $\lambda_{max} T = a$,

где $a = 2897,8 \pm 0,4$ мкм · К; λ_{max} - длина волны, на которой наблюдается максимум распределения спектральной плотности излучения по длинам волн. В другой форме закон смещения Вина дает значения максимума спектральной плотности излучения в $3\varepsilon W_{\lambda_{max}} = bT$, и от температуры:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) W_\lambda d\lambda}{\int_0^{\infty} W_\lambda d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) W_\lambda d\lambda.$$

Соотношение для коэффициента излучени

Типы источников по характеру изменения спектрального коэффициента излучения

7

Абсолютно черное тело (полный излучатель), $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon = 1$.

Серые тела, $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon < 1$.

Селективные излучатели, для которых $\varepsilon(\lambda)$ изменяется с длиной волны.

В ограниченном спектральном интервале селективные излучатели могут иногда рассматриваться как серые. Когда энергия излучения падает на поверхность, часть α энергии может поглощаться, часть ρ — отражаться и часть τ — пропускаться. Сумма $\alpha + \rho + \tau$ равна единице. Коэффициент поглощения в АЧТ по определению равен единице. Из закона Кирхгофа следует, что при заданной температуре коэффициент излучения тела равен его коэффициенту поглощения:

$$\varepsilon = \alpha.$$

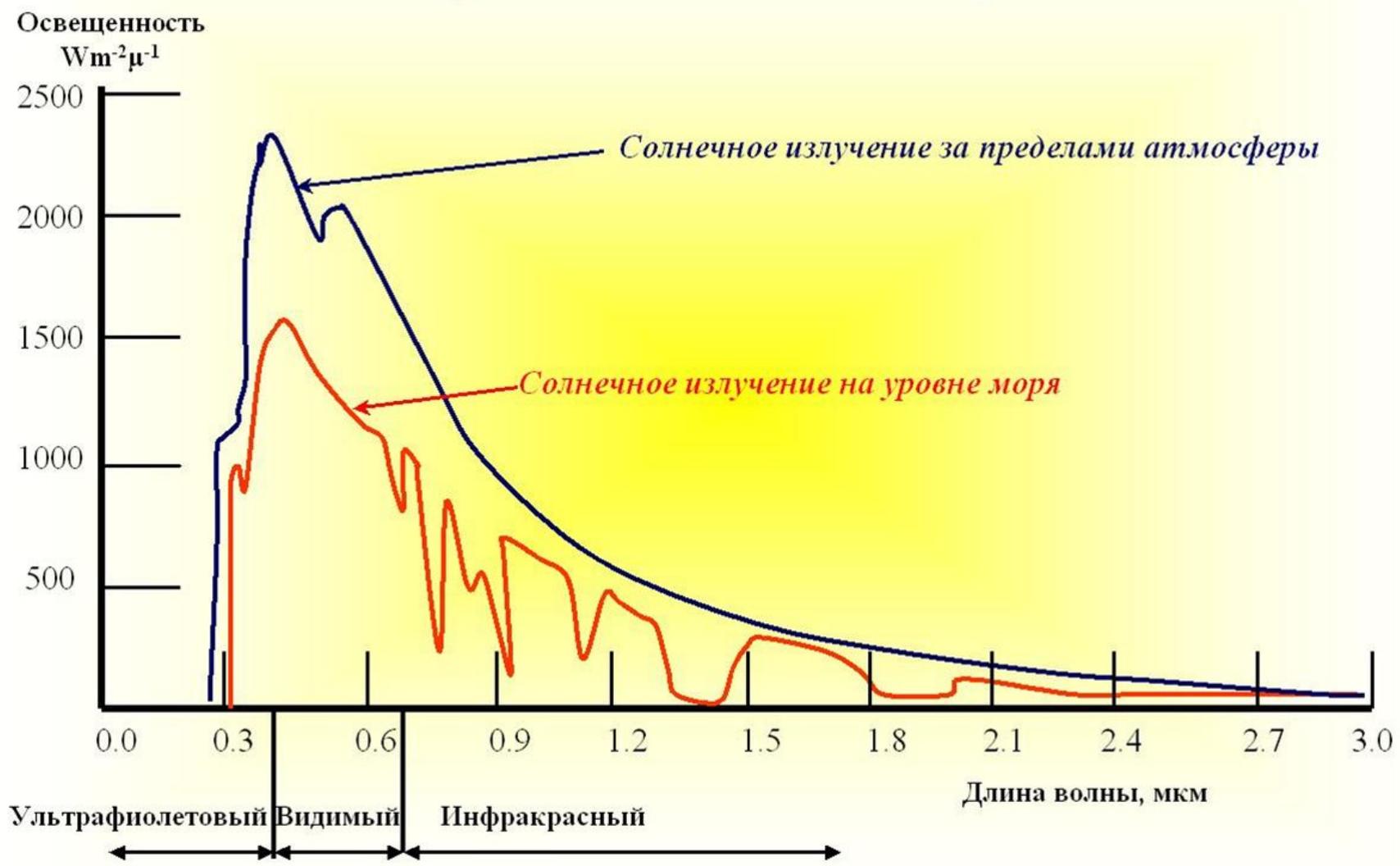
Для непрозрачных тел ($\tau = 0$):

$$\alpha = \varepsilon = 1 - \rho.$$

Измерить коэффициент отражения тела проще, чем коэффициент излучения, поэтому полученное выражение используют для вычисления ε по измеренной величине ρ .

Коэффициент излучения зависит от направления измерения, и соответственно можно ввести понятие о полусферическом коэффициенте излучения ε_h и коэффициенте излучения ε_Θ в направлении Θ . Если угол Θ между направлением измерения и нормалью к поверхности равен нулю, коэффициент излучения $\varepsilon_h = \varepsilon_{\Theta=0}$ называют нормальным.

Каждый тип коэффициента излучения может быть как полным (оцененным во всем диапазоне длин волн), так и спектральным. Большинство инфракрасных систем работает в небольших телесных углах, а наибольший интерес представляют коэффициенты излучения ε_Θ и ε_h .



Почти вся (99,9 %) пришедшая от Солнца на земную поверхность лучистая энергия приходится на спектральный интервал 0,3–4,0 мкм с преобладанием в видимой области спектра (максимум около 0,5 мкм). Земля, накопив солнечную энергию, сама становится источником излучения в интервале $\lambda = 4,0\text{--}40$ мкм с максимумом в пределах $\lambda = 8\text{--}12$ мкм. На земную поверхность попадает радиация, непосредственно идущая от Солнца в виде пучка практически параллельных лучей, а также рассеянная в атмосфере и отразившаяся от Земли.

График солнечной спектральной плотности энергетической освещённости Земли как функции длины волны

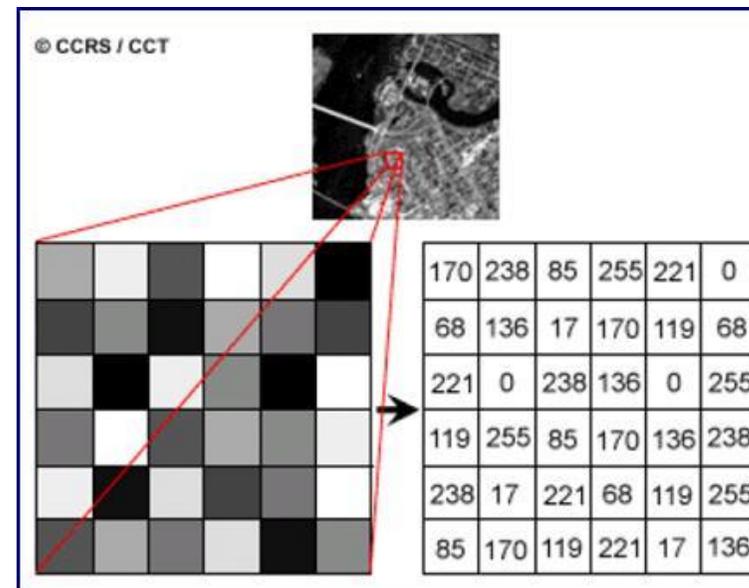
Спектральная яркость

Цифровое изображение характеризуется яркостью составляющих его точек (пикселей). Яркость это степень белизны изображения в данной точке.

Обычно значения яркости на мониторе компьютера изменяются в интервале от 0 - черный до 255 - белый.

На спутниковых снимках яркость пикселей означает отражательную способность, изображенных на снимке объектов.

Кривая спектральной яркости это график, по оси абсцисс которого отложены значения длин электромагнитных волн или диапазоны, в которых ведется съемка в каждом из спектральных каналов многоспектрального снимка, а по оси ординат значения яркости изучаемого пиксела в этих спектральных каналах.



Яркость и отражательная способность

Отражательную способность объектов местности принято характеризовать **коэффициентом интегральной яркости (альбедо)** r . Под альбедо понимается отношение яркости отражающей свет поверхности и яркости абсолютно белой матовой поверхности B_0 (эталона), одинаково освещенных:

$$r = \frac{B_1}{B_0}$$

За абсолютно белую поверхность принимают гипсовую пластинку, покрытую окисью магния, или белую бумагу, покрытую серноокислым барием. Они почти полностью (= 90%) отражают падающие на их поверхность световые лучи и во всех направлениях имеют почти одинаковую яркость. Отражательную способность их условно считают равной единице.

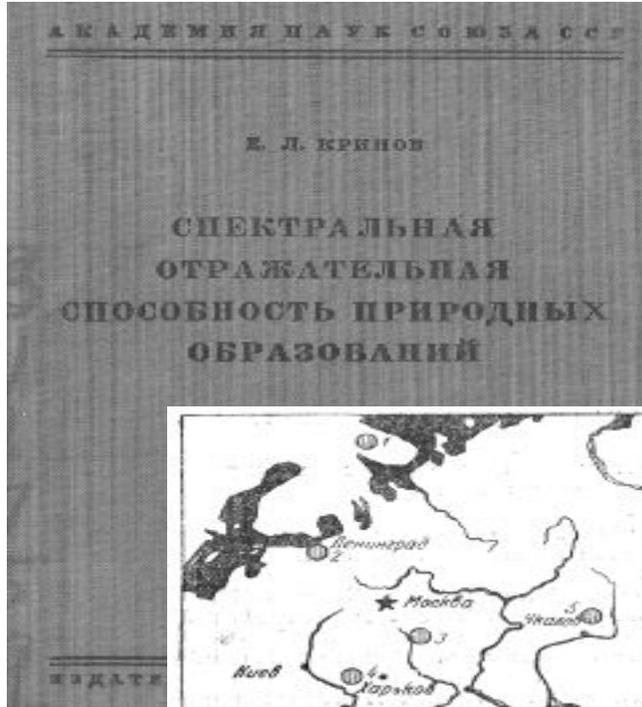
Объекты местности не являются серыми и оптически нейтральными с коэффициентами яркости, одинаковыми для всех лучей спектра. Большинство древесных пород и других объектов местности имеют разнообразную окраску, а следовательно, коэффициенты их яркости будут меняться в зависимости от длины световых волн. Их обозначают через r_λ , причем индекс λ характеризует соответствующую длину световой волны.

Спектральный коэффициент яркости определяется по формуле:

$$r_\lambda = \frac{B_{1\lambda}}{B_{0\lambda}}$$

Яркость объектов является функцией их освещенности, которая складывается из освещенности прямым солнечным светом, рассеянным светом небосвода, и светом, отраженным от соседних объектов. Каждому объекту соответствует определенный коэффициент интегральной яркости. Например, для снега свежеснеженного он составляет 1,0, для чернозема — 0,03, песка кварцевого — 0,20, луга суходольного — 0,07 и т. д., в пределах одного ландшафта и даже фации наблюдается существенное варьирование коэффициентов яркости. Но по мере продвижения с севера (от зоны тундры) на юг (до зоны пустынь) коэффициент яркости изменяется от 0,05 до 0,25. Среднее значение коэффициента интегральной яркости в целом принимают равным 0,15 (летом) и 0,50 (зимой).

Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.-Л. Изд-во АН СССР. 1947



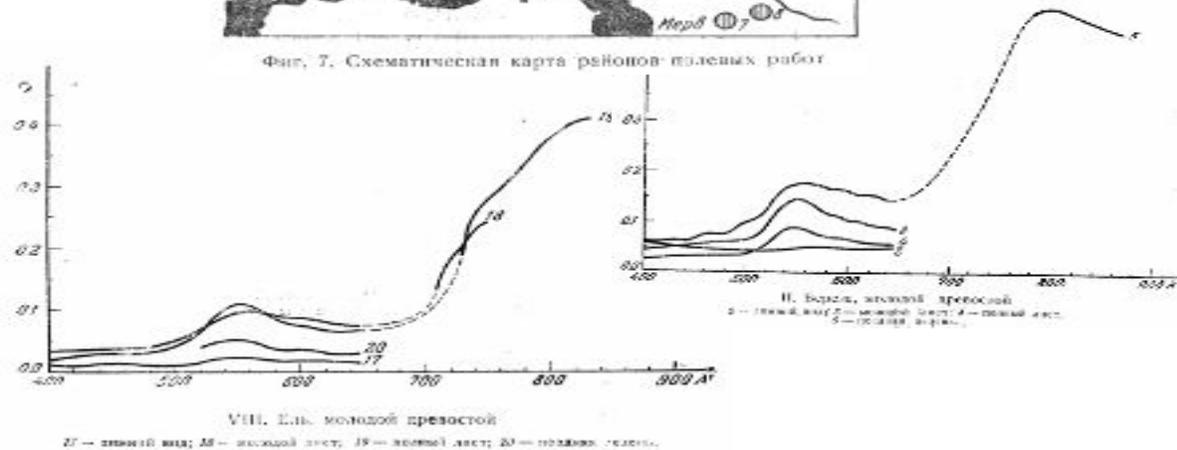
Евгений
Леонидович
Кринов

1906-1984

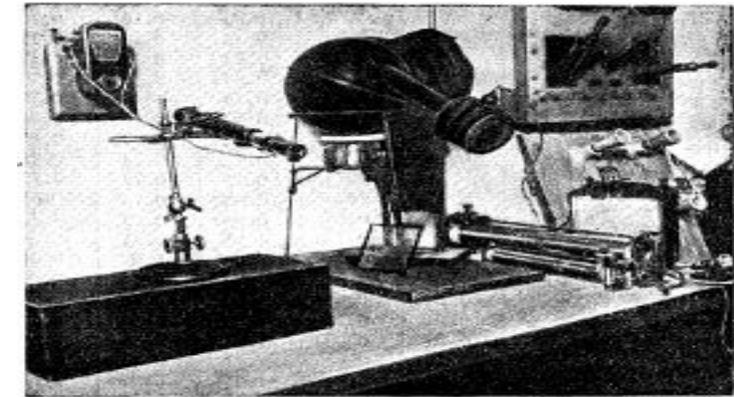
370
объектов



Фиг. 7. Схематическая карта районов полевых работ



Фиг. 11. Спектрографирование горизонтально расположенных образований



Фиг. 5. Установка с шаром Тейлора для измерений коэффициентов отражения

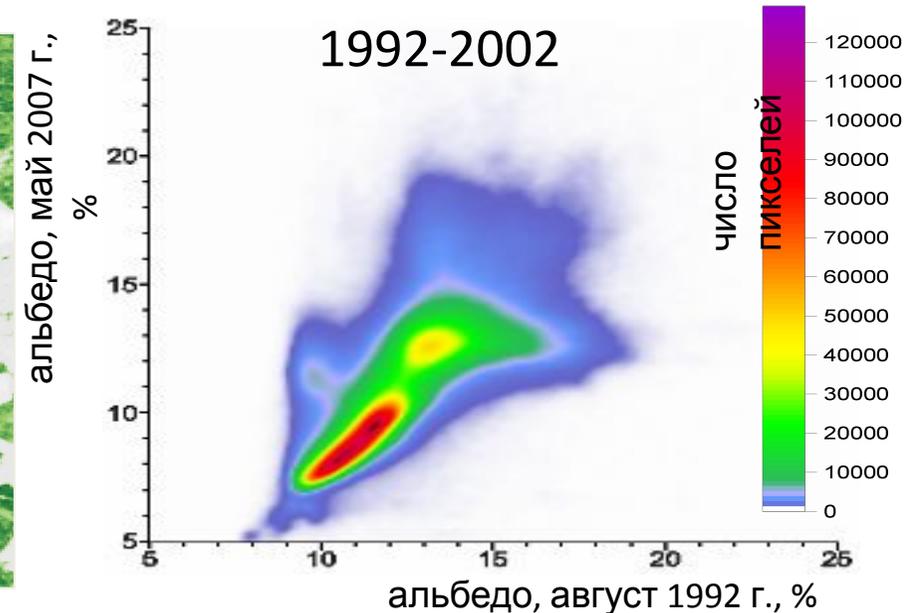
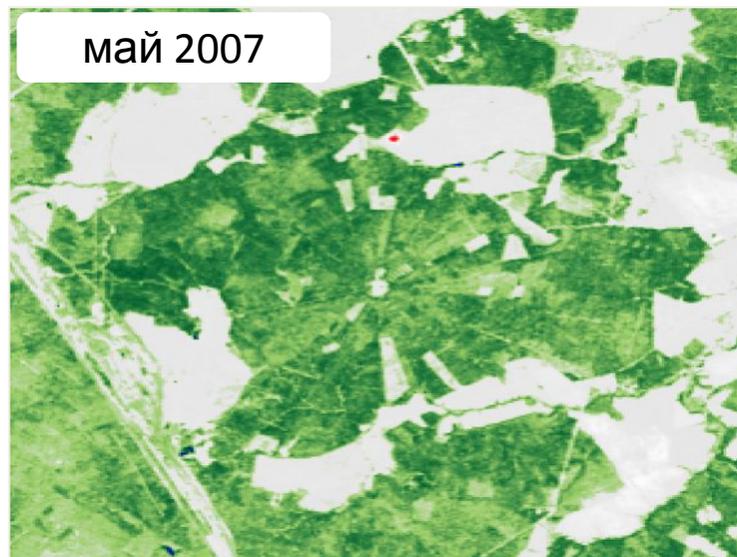
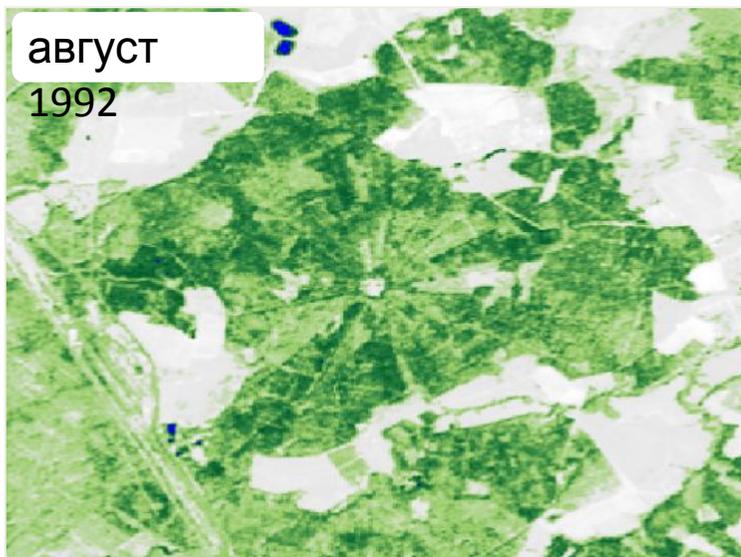
Толчельников Ю.С. Оптические свойства ландшафта применительно к аэросъемке. Ответственный редактор Ковда В.А.. Л. Изд-во Наука, 1971г. 252с

Коэффициент интегральной яркости или альбедо (лат. albus - белый)

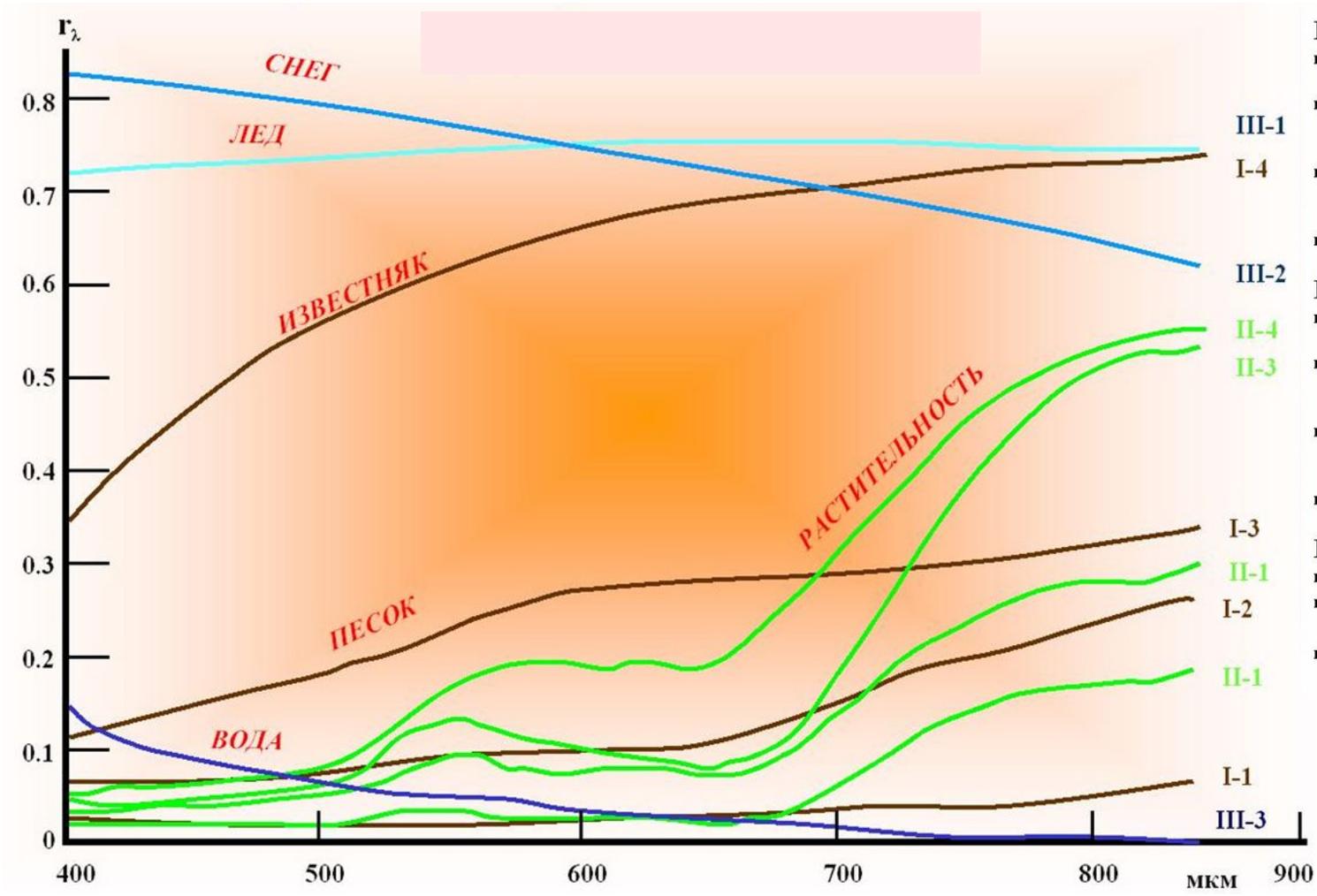
- относительная характеристика отражательной способности поверхности
- доля пришедшей радиации, отраженная поверхностью
- зависит от свойств облучаемой поверхности

$$r = \frac{B_1}{B_0}$$

ОБЪЕКТ	A	ОБЪЕКТ	A
Снег свежевypавший	1.00	Лес хвойный	0.05
Вода	0.03	Лес лиственный	0.07
Песок кварцевый	0.20	Дороги на суглинке и песке	0.20
Почва чернозем	0.03	Дороги на черноземе	0.08



Спектральная отражательная способность природных объектов

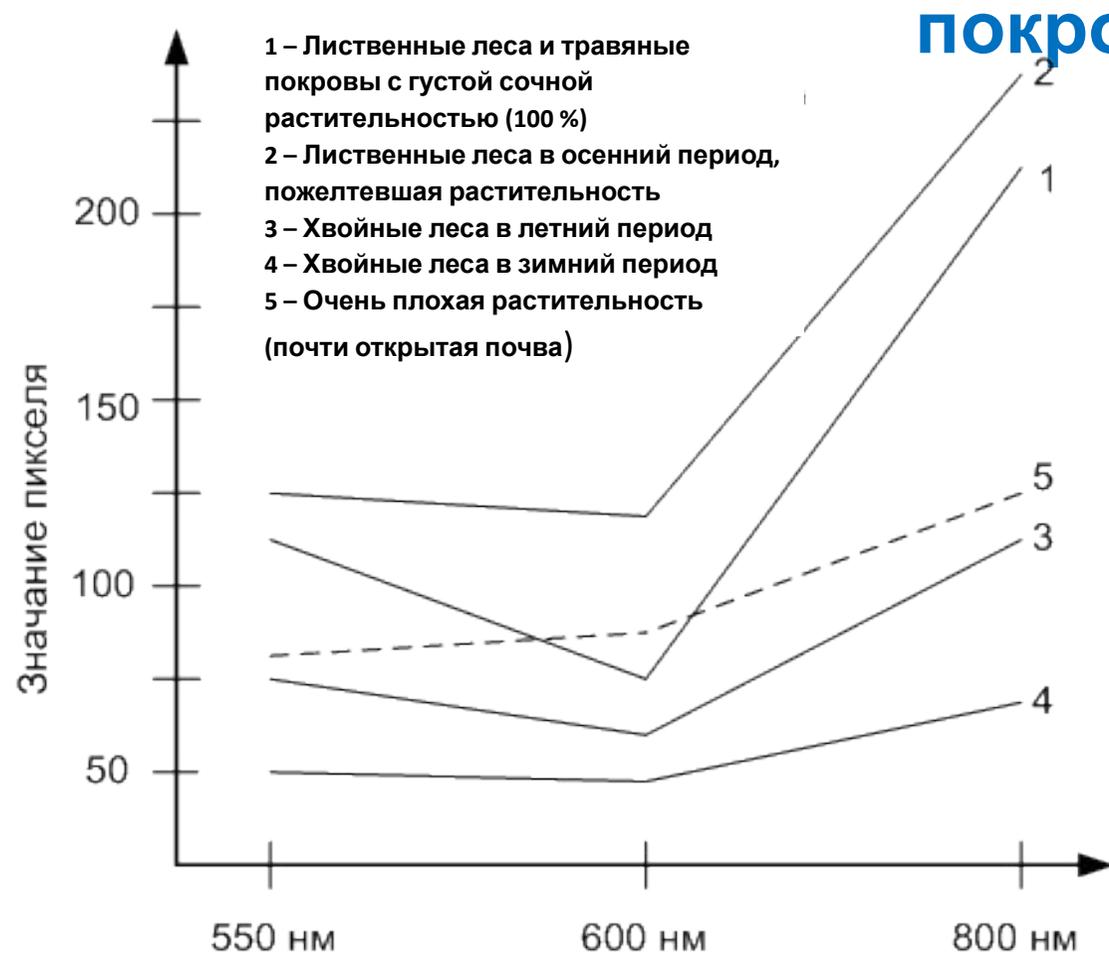


Класс I	Обнажения и почвы
кривая I-1	равномерно поднимается в направлении ближнего ИК участка спектра, соответствует черноземным почвам
кривая I-2	равномерно поднимается в видимой области спектра и имеет более крутой подъем в ближней ИК области спектра, расположена выше кривой первого типа, соответствует дерново-подзолистым почвам
кривая I-3	имеет более крутой подъем и выпуклость на участке спектра 550 – 650 нм, расположена выше кривых первого и второго типов, соответствует пескам, обнажениям пустыни, некоторым горным породам
кривая I-4	выпуклая с крутым подъемом, расположена значительно выше всех трех предыдущих типов, соответствует известняку, глине и другим светлым объектам.
Класс II	Растительность
кривая II-1	расположена очень низко, слабый максимум в видимой и незначительный подъем в ближней ИК области спектра, соответствует хвойным лесным породам в зимний период
кривая II-2	четкий максимум в видимой области спектра, расположена выше предыдущей кривой, заметно выше поднимается в ближней ИК области спектра, соответствует хвойным лесным породам в летний период
кривая II-3	резко выраженный максимум в желто-зеленом участке и очень высокий подъем в ближней ИК области спектра, соответствует лиственным лесам в летний период и травяным покровам с густой и сочной растительностью
кривая II-4	подъем во всем видимом диапазоне, высокий подъем в ближней ИК области спектра, соответствует лиственным лесам в осенний период, созревшим (пожелтевшим) полевым культурам
Класс III	Водные поверхности, водоемы и снежный покров
кривая III-1	нейтральная высоко расположенная кривая, соответствует снегу, покрытому ледяной коркой
кривая III-2	постепенное и равномерное падение к ближней ИК области спектра, расположена высоко, соответствует свежевыпавшему снегу
кривая III-3	сильное падение в видимой и очень пологое понижение в ближней ИК области спектра, соответствует водным поверхностям

Кривые спектральной яркости природных объектов

В инфракрасном (тепловом) диапазоне спектра, начиная с длины волны 3,5 мкм и до 15 мкм, регистрируют собственное излучение приповерхностных слоёв земной поверхности. Для любых тепловых излучателей справедлив закон, что, чем лучше тело поглощает энергию (т. е. меньше её отражает), тем лучше оно излучает

Спектральная отражательная способность растительного



Спектральные отражательные свойства растительного покрова определяются следующими основными физическими факторами: оптическими свойствами листа (количество хлорофилла, каротина и других пигментов), геометрией покрова и угловым распределением листьев, отражательной способностью почв, на которых она находится, проективным покрытием почвы растительностью, углом освещения и углом наблюдения, состоянием атмосферы

С ухудшением состояния растительности падает отражательная способность в диапазоне 500–600 нм, исчезает падение в красном диапазоне и резко уменьшается подъём в ближней ИК-области (кривые 3, 4), т. е. постепенно спектральная кривая растительности превращается в спектральную кривую почвы, на которой она растёт.

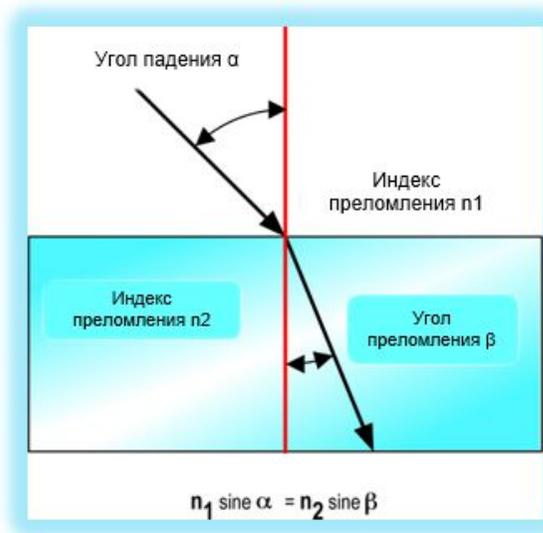
Влияние атмосферы

РЕФРАКЦИЯ (ПРЕЛОМЛЕНИЕ) – преломление излучения в различных слоях атмосферы, различающихся плотностью, температурой, влажностью

Закон Снеллена

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

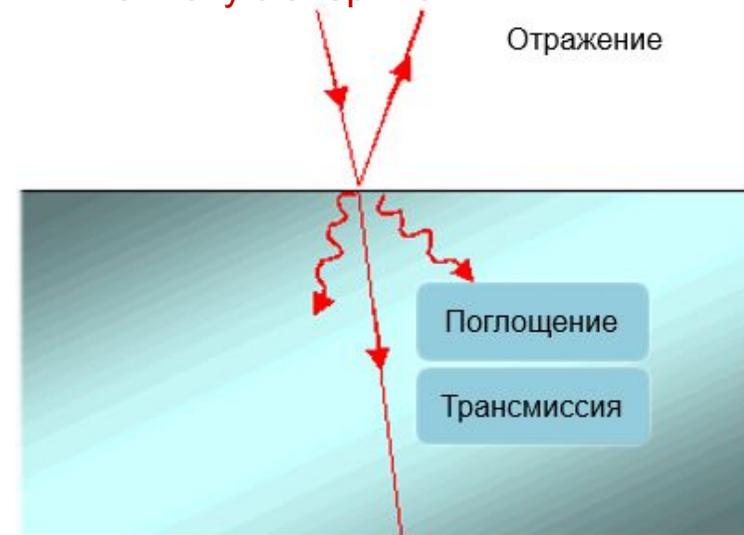
α_1 и α_2 угол падения/преломления света.
 n_1 и n_2 индексы преломления



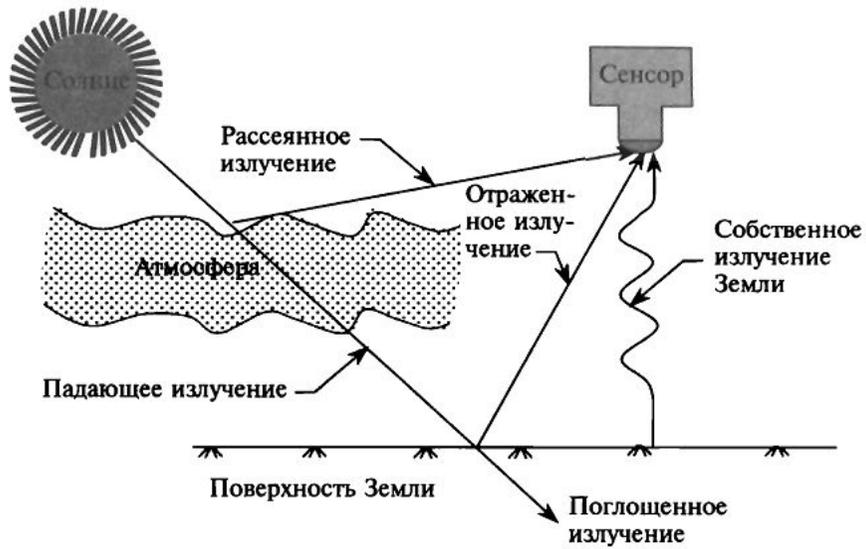
Световой луч является носителем энергии. Взаимодействуя с различными оптическими средами, свет испытывает изменения (теряет энергию). При прохождении электромагнитных волн через вещество, часть энергии волны затрачивается на возбуждение колебаний электронов в атомах и молекулах. Часть энергии переходит в другие формы энергии и, главным образом, – в тепловую энергию.

РАССЕЯНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ – отражение и поглощение излучения вещественным составом атмосферы

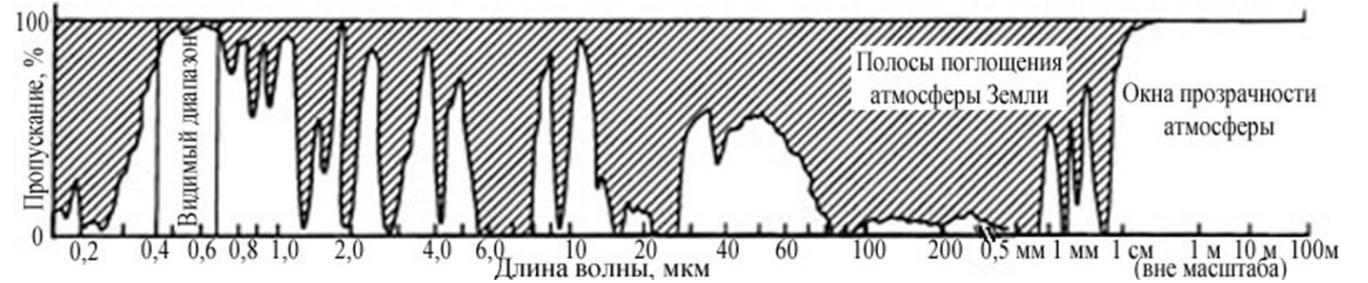
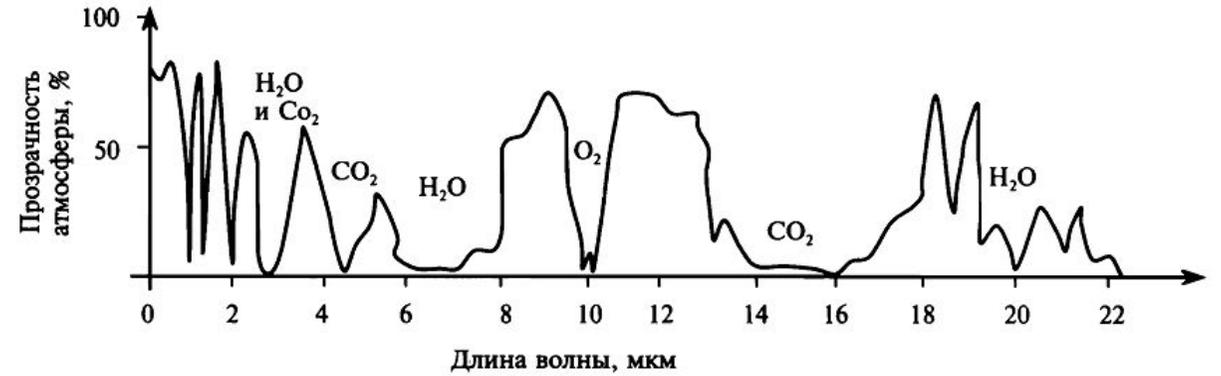
При **рефракции**, **световой луч** частично **поглощается** и частично **отражается** от поверхности. При отражении света появляются блики



Влияние атмосферы. Окна



Взаимодействие солнечного излучения с земной поверхностью и атмосферой



Для дистанционного зондирования используют только те диапазоны длин волн, которые лежат вне основных интервалов поглощения. Такие диапазоны называются **окнами прозрачности атмосферы**:

- 1) "большое окно": 0,3-1,3 мкм (видимый диапазон);
- 2) 1,5-1,8 мкм (инфракрасный диапазон);
- 3) 2,0-2,6 мкм (инфракрасный диапазон);
- 4) 7,0-15,0 мкм (тепловой инфракрасный диапазон);
- 5) 0,5 мм и более 10м (микроволновый и радиодиапазон - наибольшая прозрачность).

Атмосферная дымка (эффekt рассеивания лучей) наиболее сильно проявляется в синей, голубой зонах спектра (0,38 - 0,5 мкм). Она снижает контраст изображения, искажает цвет объектов.

Поэтому в современном дистанционном зондировании при съемки поверхности Земли голубой диапазон не используется.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) — наблюдение поверхности Земли наземными, авиационными и космическими средствами, оснащёнными различными видами съёмочной аппаратуры.

Рабочий диапазон длин волн, принимаемых съёмочной аппаратурой, составляет от долей микрометра (видимое оптическое излучение) до метров (радиоволны).

Методы зондирования могут быть пассивные, то есть использующие естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов на поверхности Земли, обусловленное солнечной активностью, и активные — использующие вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия.

Данные ДЗЗ, полученные с космического аппарата (КА), характеризуются большой степенью зависимости от прозрачности атмосферы. Поэтому на КА используется **многоканальное оборудование** пассивного и активного типов, регистрирующее электромагнитное излучение в различных диапазонах.

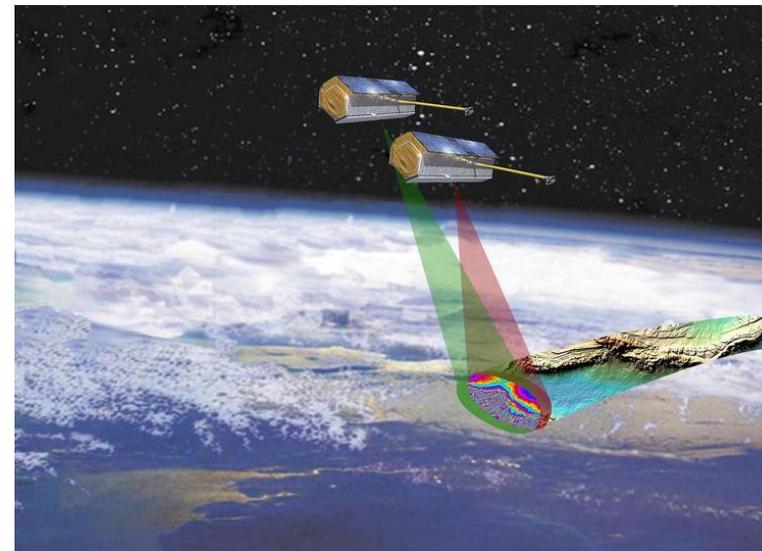
Дистанционное зондирование предоставляет возможность получать данные об опасных, труднодоступных и быстро движущихся объектах, а также позволяет проводить наблюдения на обширных участках местности. Примерами применения дистанционного зондирования может быть мониторинг вырубки лесов (например, в бассейне Амазонки), состояния ледников в Арктике и Антарктике, измерение глубины океана с помощью лота. Дистанционное зондирование также приходит на замену дорогостоящим и сравнительно медленным методам сбора информации с поверхности Земли, одновременно гарантируя невмешательство человека в природные процессы на наблюдаемых территориях или объектах.



Радиолокационная съёмка (РЛС) — особая разновидность космической съёмки, в которой для получения информации используется микроволновый диапазон — излучение с длинами волн от 1 см до 1 м (т.е. на частотах 40 ГГц- 300 МГц).

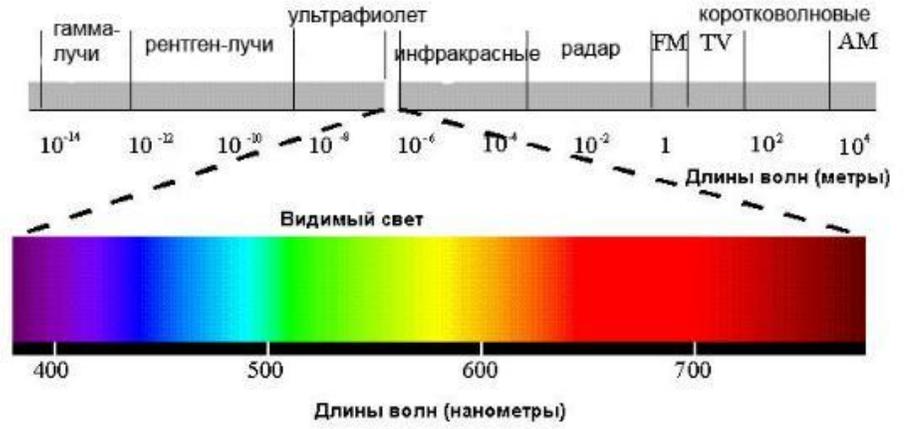
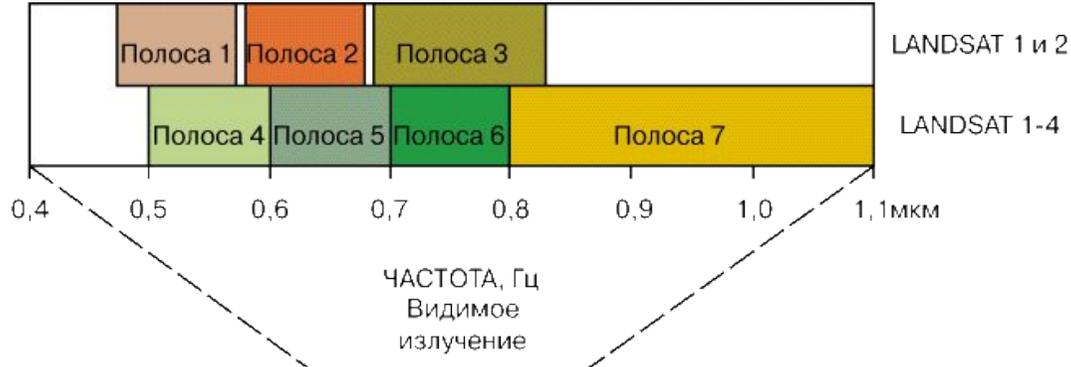
Радиолокационная съёмка обеспечивает получение изображений земной поверхности и объектов, расположенных на ней, независимо от погодных условий, в дневное и ночное время благодаря принципу активной радиолокации: отправление зондирующих сигналов излучающей антенной и прием отраженных сигналов с последующим преобразованием их в изображения или извлечением информации о разности фаз посланного и отраженного сигнала.

Характер изображения местности на радиолокационном снимке зависит от соотношения между длиной волны и размерами неровностей местности: поверхность может быть в разной степени шероховатой или гладкой, что проявляется в интенсивности обратного сигнала и, соответственно, яркости соответствующего участка на снимке.



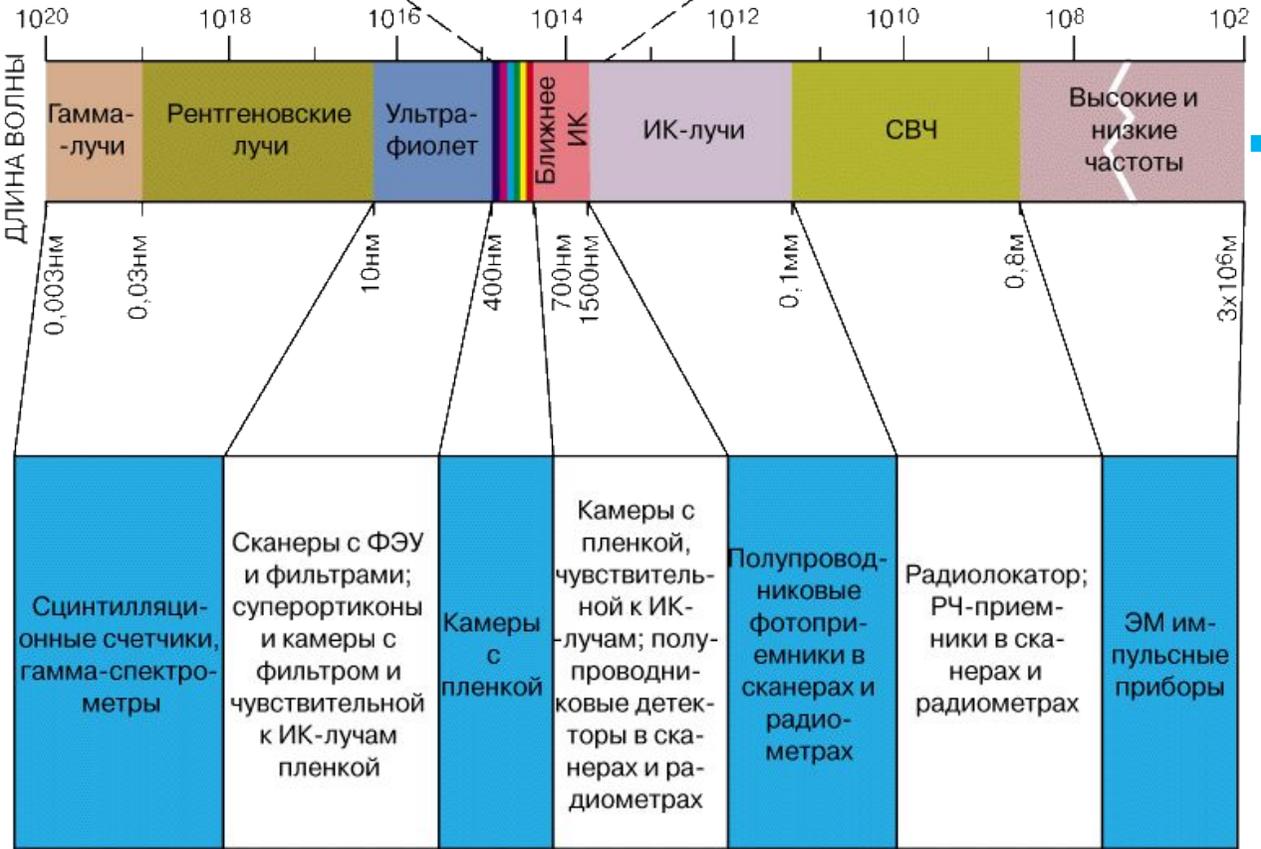
Радиолокационная интерферометрия – метод обработки данных радиолокации, основанный на выделении разности фаз сигналов, отраженных разными участками местности. Он позволяет вычислить путь, пройденный радиоволнами до поверхности Земли и, соответственно, получить высокоточную информацию как об абсолютных высотах местности, так и о смещениях поверхности, обусловленных разными факторами. Интерферометрия предполагает совместную обработку не менее двух результатов съёмки одного и того же участка земной поверхности, зафиксированных антенной при повторных наблюдениях (двухпроходная интерферометрия), или двумя антеннами, одновременно принимающими сигнал от одной точки под разными углами (однопроходная интерферометрия).

Электромагнитный спектр



Видимым диапазон

- Диапазон частоты электромагнитного излучения, на который реагирует чувствительная система глаза
- Обычно в видимый диапазон включают частоты от 380 до 780 нанометров (1 нм = 10⁻⁹м)



Полоса	Диапазон частот, ГГц	Суммарная ширина полосы, ГГц	Распространенные приложения
L	1-2	1	Мобильная спутниковая связь (MSS)
S	2-4	2	Службы MSS, NASA, исследование дальнего космоса
C	4-8	4	Спутники стационарной службы связи (FSS)
X	8-12,5	4,5	Военные службы FSS, исследования Земли и метеорологические спутники
Ku	12,5-18	5,5	Службы FSS, радиовещательные спутниковые службы (BSS)
K	18-26,5	8,5	Службы FSS и BSS
Ka	26,5-40	13,5	Службы FSS

Чем выше частота полосы, тем больше ее доступная ширина. Впрочем, полосы более высокой частоты сильнее подвержены искажениям передачи

Приемники электромагнитного излучения

Светочувствительность — способность вещества или материала изменять свои химические или физические свойства под действием света

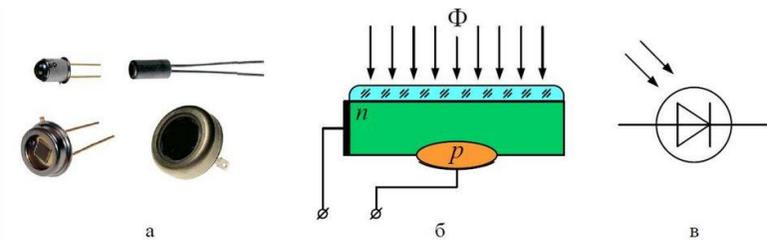
Приемники излучения разделяются на два основных класса – фотоэлектрические (фотонные) и тепловые.

Принцип действия фотоэлектрических ПИ основан на внешнем (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители и др.) или внутреннем (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и др.) фотоэффекте. Все фотоэлектрические приемники являются селективными, т.е. их чувствительность зависит от частоты (или длины волны) излучения, падающего на приемник.

В тепловых ПИ энергия оптического излучения сначала преобразуется в тепловую, а лишь затем происходят изменения свойств приемника: возникает термоЭДС (термоэлементы), изменяется проводимость (болометры) или диэлектрическая постоянная (пирозлектрические ПИ), формируется чувствительный слой (эвапорографы) и т.д. Тепловые приемники неселективны.

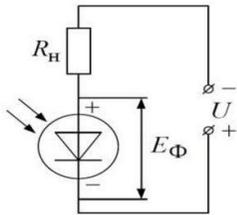
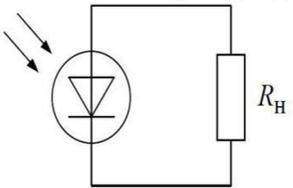
Отдельными видами ПИ являются: многоспектральные, работающие в двух или более диапазонах оптического спектра; многоэлементные ПИ; координатные (позиционно-чувствительные) ПИ, у которых выходной сигнал зависит от координат изображения на чувствительном слое, и ряд других. Классификация ПИ проводится также по области спектральной чувствительности, степени охлаждения чувствительного слоя, быстродействию, физическим принципам действия (лавинные, инжекционные, гетеродинные, иммерсионные и др. ПИ).

Фотодиод

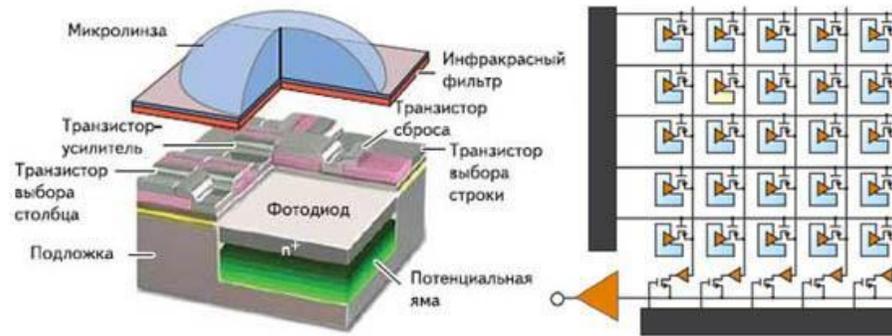


Фотогальваническое включение фотодиода

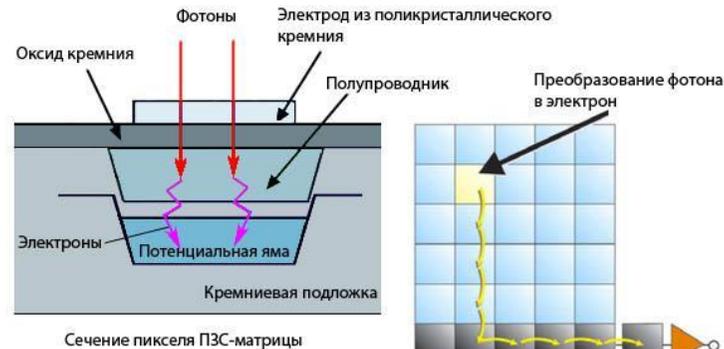
Фотодиодное включение



Пиксель КМОП-матрицы



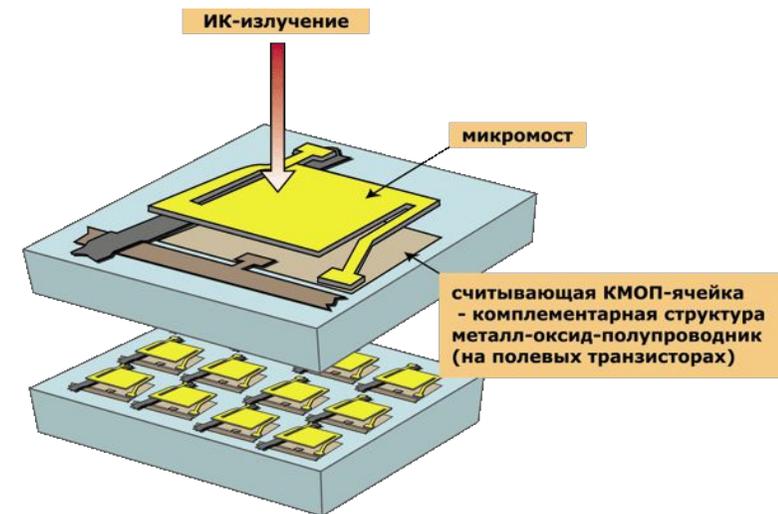
Пиксель ПЗС-матрицы



Сечение пикселя ПЗС-матрицы

Микроболометр

- устройство для измерения потока ИК- излучения, основанное на изменении физических параметров термочувствительного элемента (повышения сопротивления) в результате его нагрева при поглощении энергии измеряемого излучения. На сегодняшний день наиболее чувствительные болометры состоят из Ge:Ga.

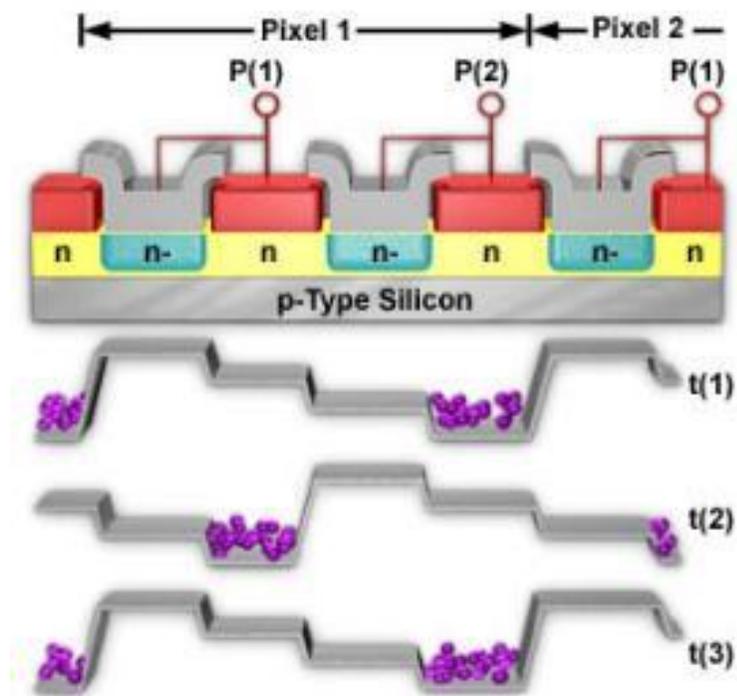
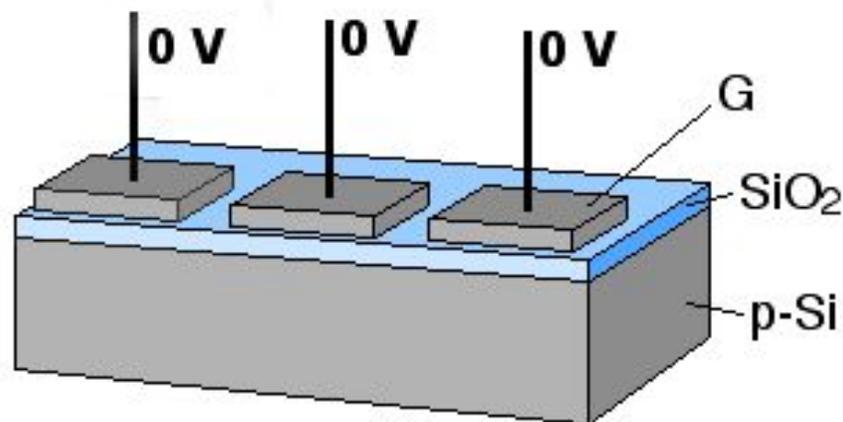


Принцип работы ПЗС-матрицы

ПЗС-матрица состоит из поликремния, отделенного от силиконовой подложки, в которой при подаче напряжения через поликремневые затворы изменяются электрические потенциалы вблизи электродов. Положительное напряжение на электродах создает потенциальную яму, куда устремляются электроны из валентной зоны, сгенерированные фотонами. В этой потенциальной яме заряд хранится до момента считывания. Чем интенсивнее световой поток в течение экспозиции, тем больше скапливается электронов в потенциальной яме и тем выше итоговый заряд данного пикселя. Считывание итогового заряда ПЗС состоит в том, чтобы заставить поликремневые затворы, помимо функции электродов, выполнить еще и роль сдвиговых регистров, таким образом, чтобы они образовали конвейерную цепочку вдоль одной оси. При этом если учесть, что обычно один пиксель формируется несколькими, например, четырьмя электродами, то попеременная подача на них высокого либо низкого напряжения по принципу $n+1$ (1-2, 2-3, 3-4 и т. д.) позволит накопленному заряду как бы перетекать по выбранной оси, не теряя своей величины. Это становится возможным благодаря тому, что, изменяя конфигурацию потенциального барьера, мы как бы сдвигаем потенциальную яму с накопленными в ней зарядами.

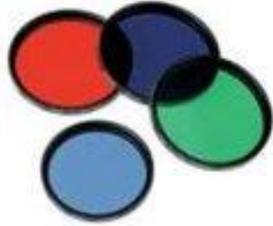
Причем описанный цикл повторяется до тех пор, пока все содержимое выбранных осей не «перетечет» к выпрявляющей полке, преобразующей поступивший заряд в определенный уровень напряжения.

Собственно, такой способ передачи заряда и дал название ПЗС - приборам с зарядовой связью фотосенсорам (матрицам) данного типа. Далее напряжение через усилитель и АЦП (аналого-цифровой преобразователь) подается уже в цифровом виде в оперативную память (буфер) и в процессор камеры, где интерполируется и преобразуется, а затем, в каком-либо стандартном формате изображения, например JPEG, поступает в устройство постоянного хранения, например Flash-карту SD.



Преобразование излучений оптическими средами

Если тело предназначено для преобразования характеристик излучения, его называют **оптической средой**.



светофильтры, объективы, зеркала, рассеивающие пленки и матовые стекла, призмы

Если тело используется для получения в нем полезного фотопревращения, оно является **приемником излучения**.

светочувствительный слой фотоформ, копировальный слой печатных форм

Взаимодействие оптического излучения с оптическими средами приводит к:

пространственным изменениям:

- отражение,
- преломление,
- дифракция,

структурным изменениям излучения:

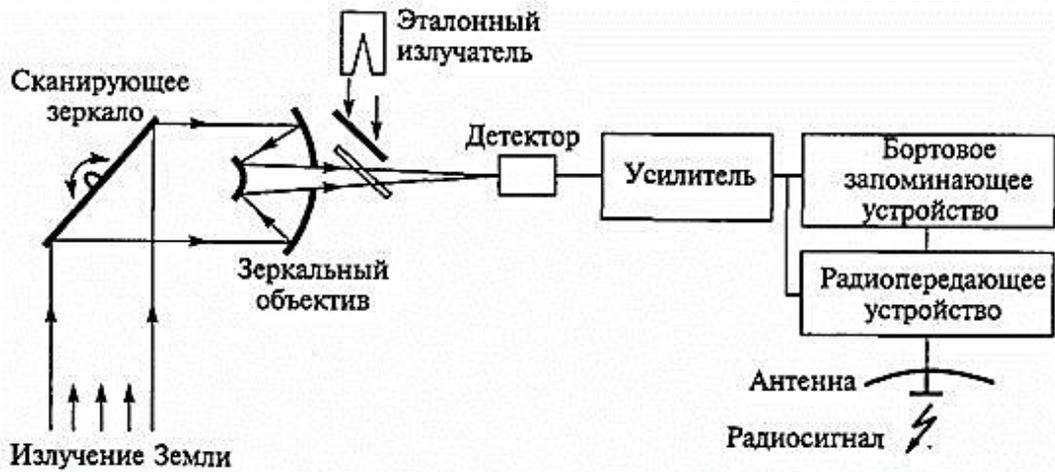
- поляризация,
- интерференция,
- дисперсия.

поглощению излучения:

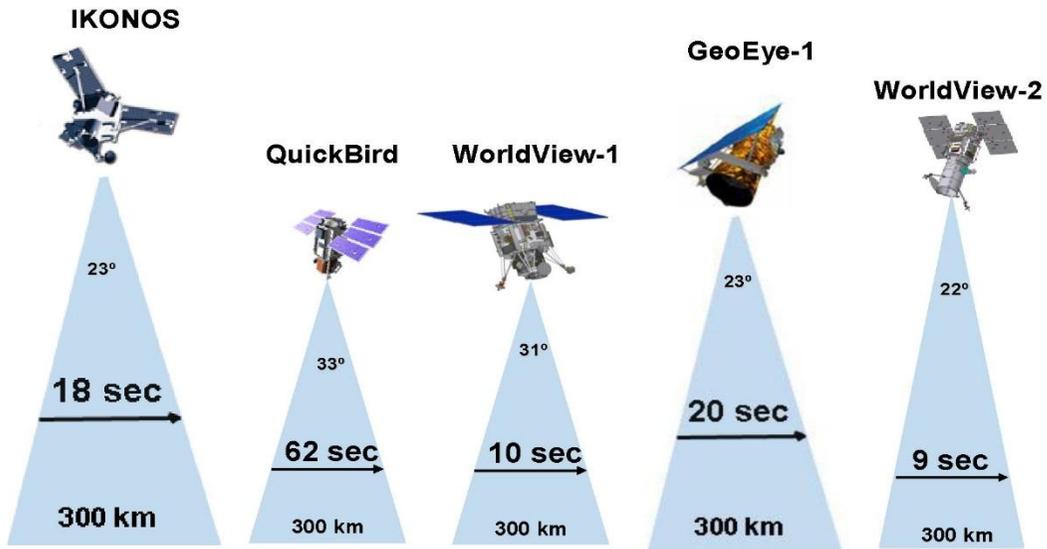
- спектрально-избирательному,
- спектрально-неизбирательному,

Целевая аппаратура космических систем дистанционного зондирования Земли.

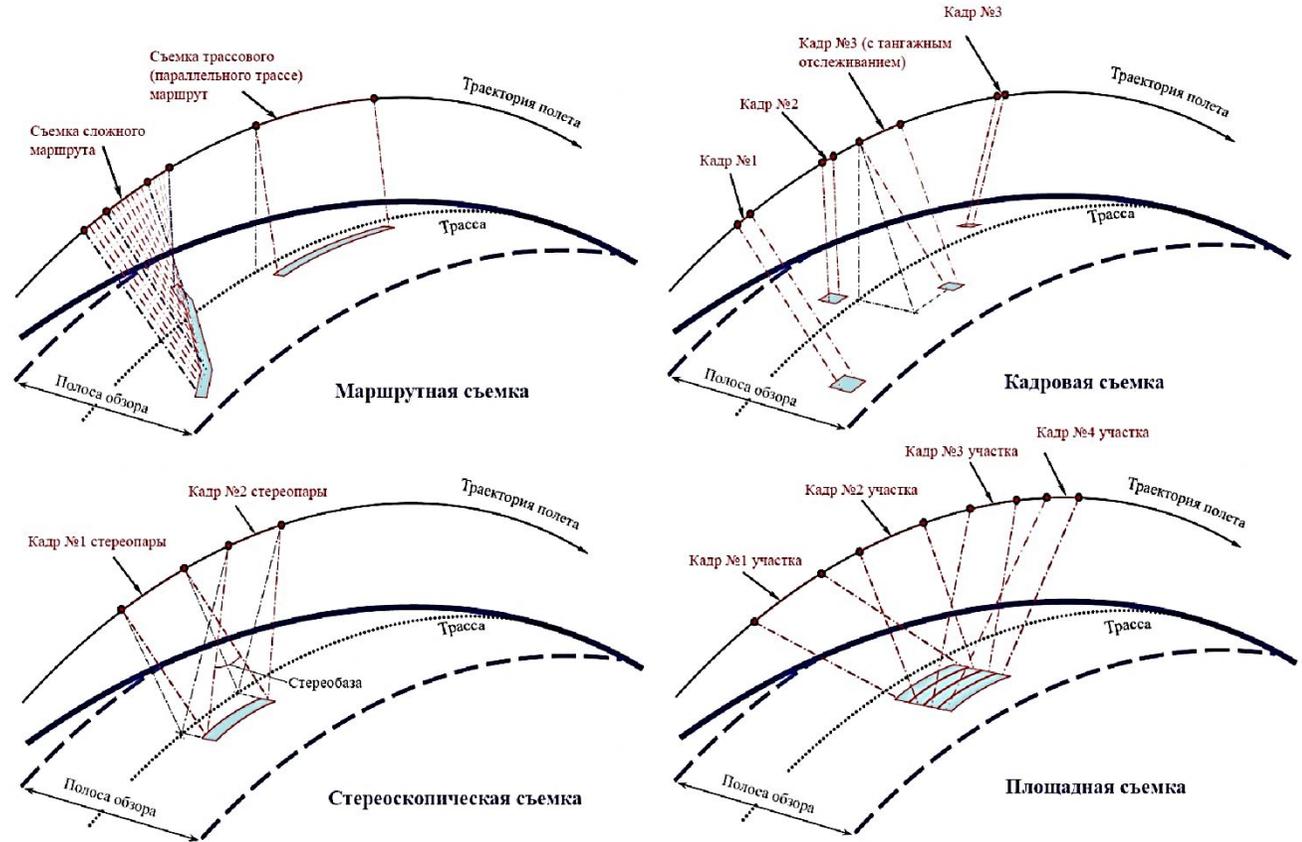
Оптический электронный сканер



Принцип действия опτικο-электронного сканера



Времена перенацеливания современных КА ДЗЗ в пределах единой полосы обзора 300 км



Режимы съемки КА ДЗЗ оптического электронного наблюдения

Характеристики дистанционных изображений Земли

Пространственное разрешение - размер на местности самой малой детали, воспроизведенной на снимке. Пространственное разрешение фотографических снимков зависит от высоты съемки, свойств объектива съемочной камеры, разрешающей способности негативной пленки и фотобумаги. Разрешение снимков, полученных оптико-электронными съемочными системами (сканерами), определяется размером элемента изображения, пиксела:

$$R = S\sqrt{2},$$

где S — размер пиксела в метрах.

Спектральное разрешение

Характеризует количество регистрируемых спектральных зон, их ширину и размещение по электромагнитному спектру. Так, данные КА ДЗЗ Landsat (США) включают семь полос, в том числе инфракрасного спектра, в пределах от 0.07 до 2.1 мкм. Сенсор Hyperion аппарата Earth Observing-1 способен регистрировать 220 спектральных полос от 0.4 до 2.5 мкм, со спектральным разрешением от 0.1 до 0.11 мкм.

Радиометрическое разрешение

Число уровней сигнала, которые может регистрировать сенсор. Обычно варьируется от 8 до 14 бит, что дает от 256 до 16 384 уровней. Эта характеристика также зависит от уровня шума в инструменте.

Временное разрешение

Характеризует периодичность съемки одного и того же участка земной поверхности.

Основные приборы дистанционного зондирования

Земли

Методы ДЗЗ могут быть **пассивные**, т. е. используется естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов на поверхности Земли, обусловленное солнечной активностью, и **активные**, т. е. используется вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия.

Для целей ДЗЗ используются следующие основные приборы:

- панхроматические и многоспектральные съемочные системы видимого и ближнего инфракрасного (БИК) диапазонов (свыше 50 % решаемых задач ДЗЗ),
- ИК-радиометры (около 20 % задач),
- радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) - примерно 15 % задач,
- гипер- и видеоспектрометры (~ 5 % задач),
- Фурье-спектрометры и спектрорадиометры ИК-области (~ 3 % задач),
- микроволновые радиометры (~ 5 % задач),
- ряд приборов для радиационных и гелиогеофизических и других измерений за обстановкой в околоземном космосе (~ 2 % задач),
- ряд дополнительных приборов для надирных, лимбовых, затменных и других научных исследований атмосферы Земли (~ 1 % задач).

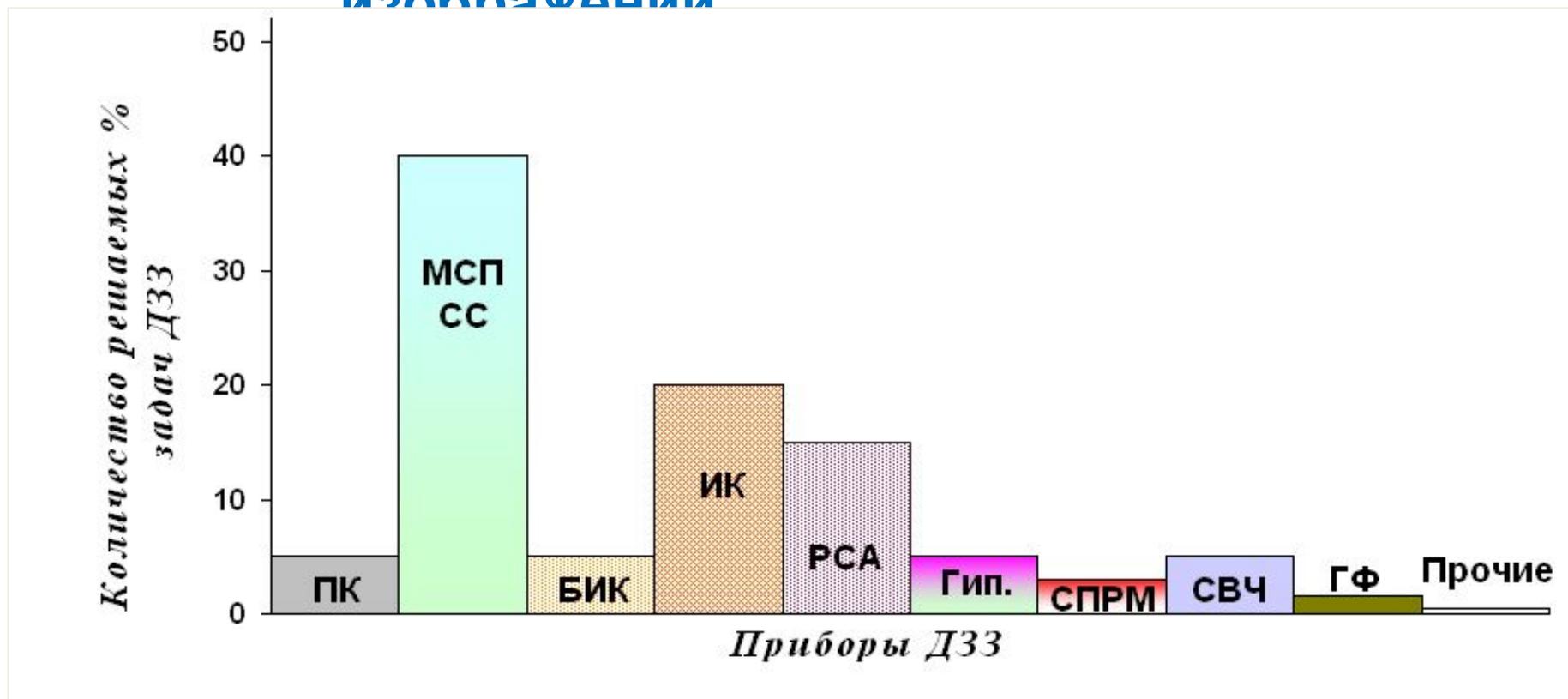
По разрешению на местности для различных задач ДЗЗ необходимо обеспечивать от 0,5 м до десятков км.

По периодичности обзора диапазон требований простирается от 0,1 часа (почти реального масштаба времени (РМВ), т. е. почти непрерывного повторения наблюдений) до нескольких лет.

По радиометрическому разрешению: для более, чем 70 % задач, решаемых приборами видимой и БИК-области спектра, - 0,1-0,5 %; для почти 80 % задач, решаемых ИК-радиометрами, - 0,1-0,2 К; для 90 % задач РСА - 0,1-1 дБ.

Существуют *три основных способа* аэрокосмической съемки:

- фотографический;
- оптико-электронный;
- радиолокационный.



ПК	-	панхроматические съемочные камеры,
МСП СС	-	многоспектральные съемочные системы,
БИК	-	съемочные приборы БИК-диапазонов,
ИК	-	инфракрасные радиометры среднего и дальнего ИК-диапазонов,
РСА	-	радиолокаторы с синтезированной апертурой,
Гип.		гипер- и видеоспектрометры,
СПРМ	-	инфракрасные спектрометрические и фурье-спектрометры,
СВЧ	-	микроволновые (СВЧ) радиометры и спектрометры,
ГФ	-	приборы для гелиогеофизических измерений

Относительная важность основных классов приборов ДЗЗ в решении задач ДЗЗ

Белорусская космическая система дистанционного зондирования

Земли



БКА (Беларусь)
(перспектива)



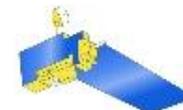
Ресурс-ДК (Россия)
(перспектива)



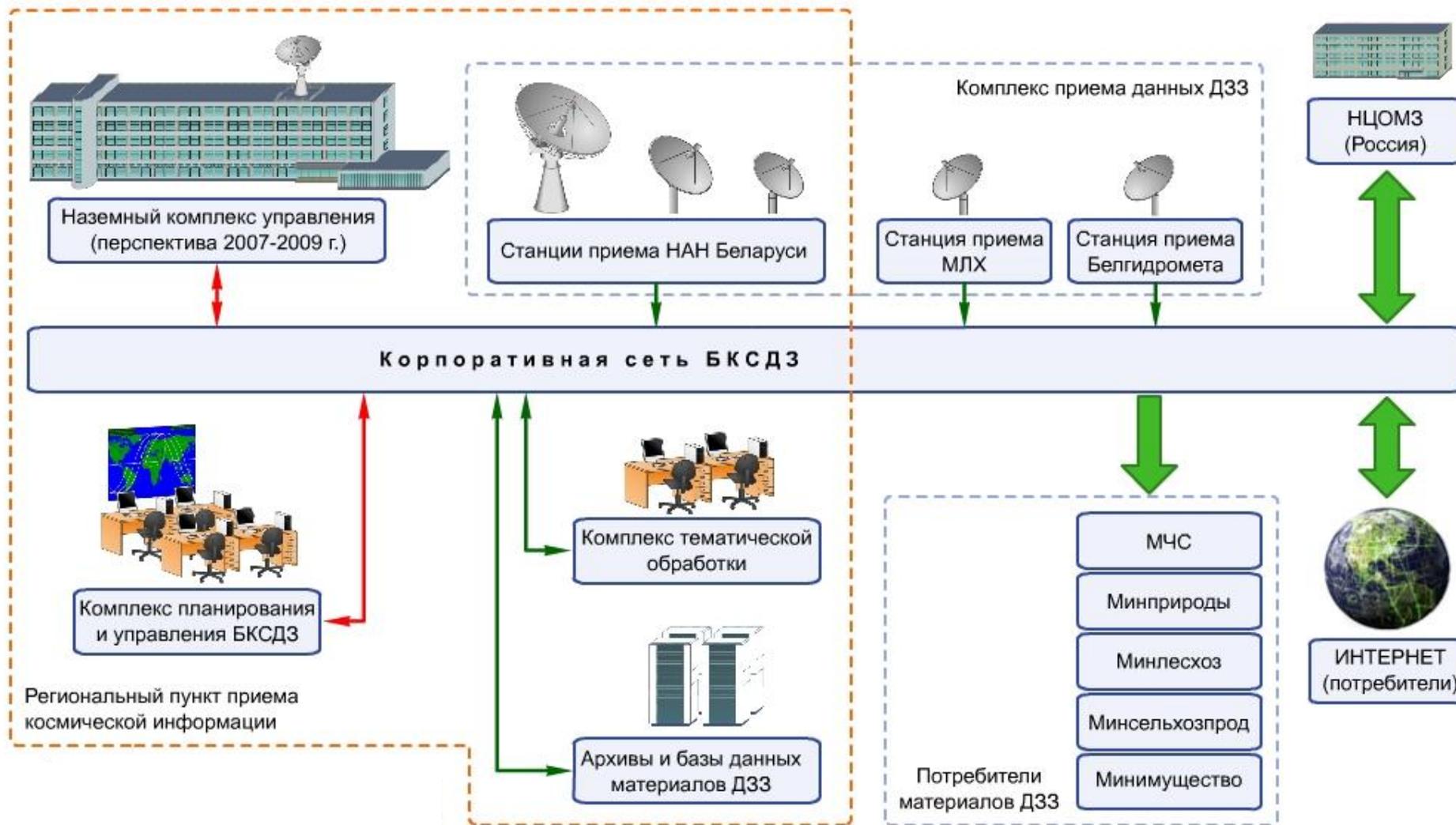
Монитор-Э (Россия)



NOAA (США)



EOS-Terra (США)





Спасибо за внимание!



ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСКОСМОС»

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

 ЦНИИМАШ
TSNIIMASH

 РОСКОСМОС

**КЛЮШНИКОВ
Валерий Юрьевич**

Главный научный сотрудник
доктор технических наук
старший научный сотрудник

141070, г. Королев,
Московская область
ул. Пионерская, д. 4

Тел. раб.: +7(495) 513-44-44
Тел. моб.: +7(903)185-24-91
E-mail: wklj59@yandex.ru

Темы лекционных занятий по курсу «Спутниковые системы наблюдения и связи»:

1. Теоретические основы дистанционного зондирования Земли из космоса (2 ч).
2. Сенсоры и платформы дистанционного зондирования Земли из космоса (2 ч).
3. Получение и первичная обработка космических снимков (2 ч).
4. Понятие о геоинформационных системах. Тематическая обработка космических снимков (2 ч).
5. Теоретические основы спутниковой связи (2 ч).
6. Классификация и принципы построения спутниковых систем связи (2 ч).
7. Существующие спутниковые системы связи (2 ч).
8. Многоспутниковые негеостационарные системы связи. Лазерные космические системы связи (2 ч).