

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа аэрокосмических технологий
Кафедра систем, устройств и методов геокосмической физики

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Факультетский курс ФАКИ ФАКТ МФТИ в рамках направления подготовки бакалавров (7 и 8 семестры) «Прикладные математика и физика» для базовых предприятий: РКК «Энергия» (управленцы), РКС, «Комета», СУМГФ, ЦНИИХМ, ВНИИФТРИ и др.

Преподаватель: лектор – профессор кафедры СУМГФ, д.ф.м.-н. Кондранин Тимофей Владимирович (tvk494@yandex.ru).

Структура курса:

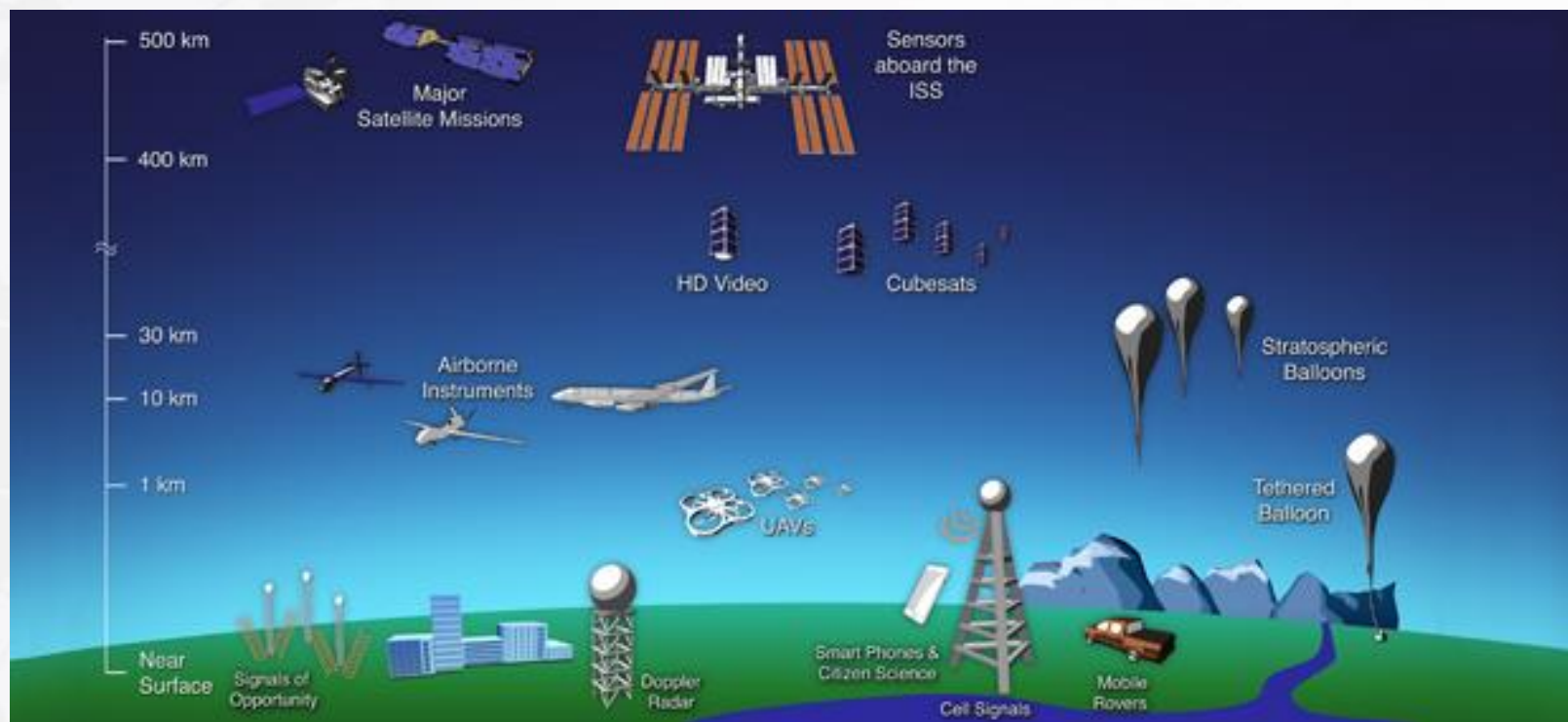
VII семестр 2024-2025 учебного года: 2/2/0. Отчетность: **простой зачет**

VIII семестр 2024-2025: 2/1/0. Отчетность: **экзамен**.

- *The most fruitful areas for growth of the sciences are those between established fields.*
- *Science has been increasingly the task of specialists, in fields which show a tendency to grow progressively narrower.*
- *Important work is delayed by the unavailability in one field of results that may have already become classical in the next field.*
- *It is these boundary regions of science that offer the richest opportunities to the qualified investigator.*
- **EDUCATION IS AN ADMIRABLE THING, BUT IT IS WELL TO REMEMBER FROM TIME TO TIME THAT NOTHING IS WORTH KNOWING CAN BE TAUGHT.**

Дистанционное зондирование (Remote Sensing) – метод получения информации об объекте или явлении путем анализа данных, собранных без контакта с изучаемым объектом. Технологии ДЗЗ – совокупность методов и средств, определяемых конкретной задачей. Преимущества и недостатки технологий ДЗЗ (гражданский сегмент) см. (Exploring the Pros and Cons: Advantages and Disadvantages of Remote Sensing April 20, 2023).

Pros and cons _За и против



«Этажерка»: космический, авиационный (в т.ч. БПЛА), аэростатный и наземный сегменты систем ДЗ.

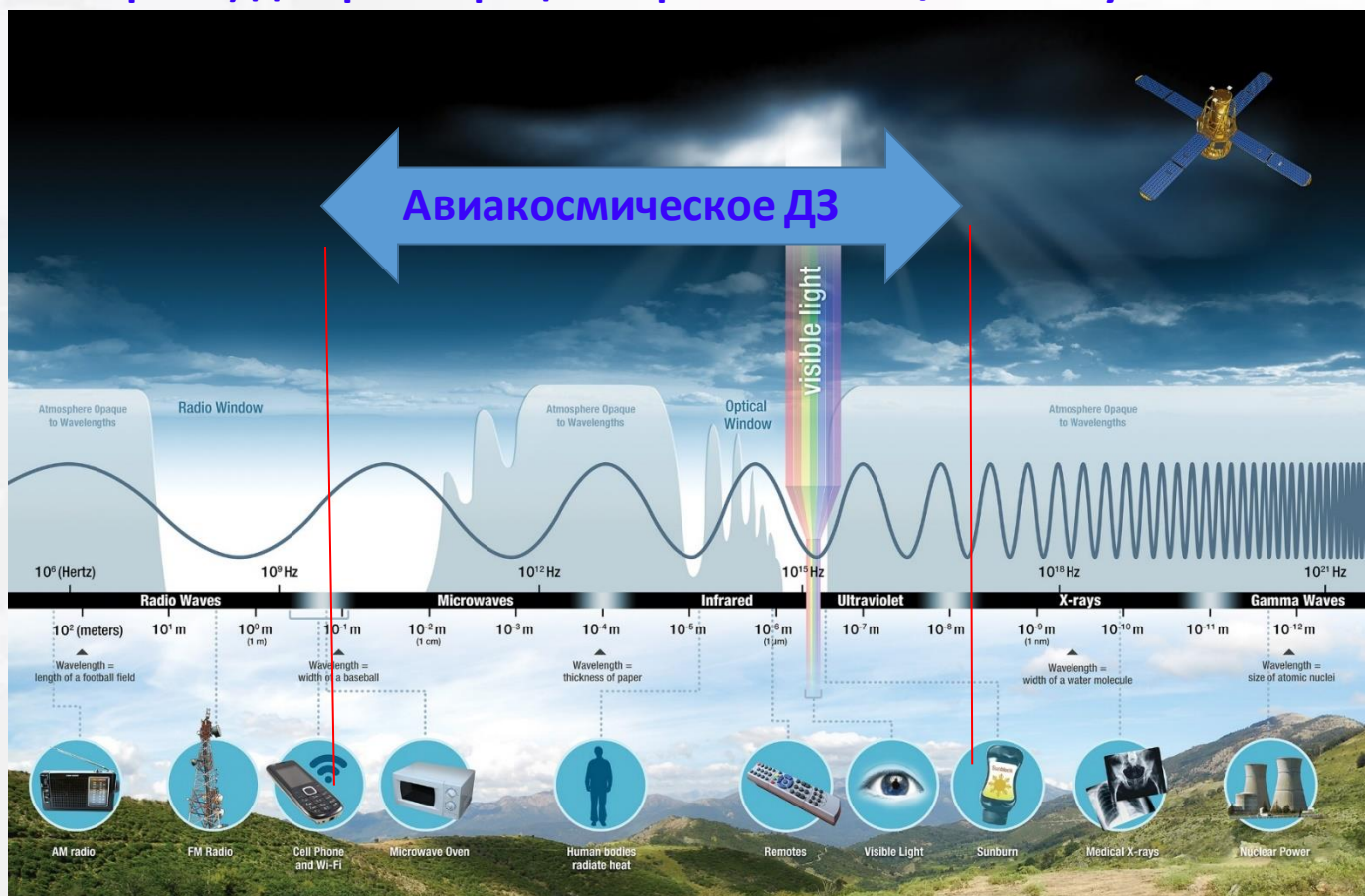
05.09.2024

	Pros:	Cons:
 Satellite	<ul style="list-style-type: none"> Massive coverage Multi-spectral resolution Regular revisit 	<ul style="list-style-type: none"> Low spatial resolution Image acquisition timing Cloud sensitivity Cost increases with the increase of spatial resolution
 Aircraft	<ul style="list-style-type: none"> Large coverage for each time High-spatial resolution Multi-spectral resolution 	<ul style="list-style-type: none"> Very low cost performance Image acquisition timing Weather-dependent Cloud sensitivity Regional restrictions
 Fixed wing UAV	<ul style="list-style-type: none"> Cost-effective and easy to use High to very high resolution Real-time access Not affected by the cloud 	<ul style="list-style-type: none"> Small coverage Regional restrictions Weather-dependent
 Multi-rotor UAV		

Что такое дистанционное зондирование?

What is Remote Sensing?

Дистанционное зондирование - технология получения информации о состоянии объекта путем анализа данных, собранных с помощью специальных приборов, которые физически не соприкасаются с исследуемым объектом. Методы и средства ДЗ предполагают использование **«изображений»**, получаемых специальными устройствами (датчики/сенсоры), в том числе, устанавливаемые на платформах (летательные или космические аппараты) для регистрации отраженного и/или испускаемого **электромагнитного излучения**.



Авиакосмические системы ДЗ зондируют поверхность или атмосферу Земли, других планет с помощью специальной аппаратуры (датчики) на спутниках и ЛА, которые регистрируют отраженную или излучаемую энергию. Системы ДЗ обеспечивают глобальную перспективу и огромное количество данных о наблюдаемых объектах, позволяют принимать решения на их основе.

В целом проблематика авиакосмического ДЗ включает в себя комплекс взаимосвязанных разделов науки и техники, ключевыми которыми являются: 1) Баллистика КА (орбиты КА) и траектории ЛА. 2) **Получение информации с помощью электромагнитного спектра**. 3) Аппаратура ДЗ (датчик/сенсор) на борту платформы. 4) Обеспечение условий «съемки» для получения максимальной информации. 5) Получение, обработка, интерпретация и анализ данных. 6) Поисковые системы данных ДЗ.

<https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>

Важнейшие приложения ДЗ

Eyes on the Earth <https://eyes.jpl.nasa.gov/eyes-on-the-earth.html>

Military Remote Sensing Missions. MRSM include reconnaissance (including broad area search, combat intelligence, indications and warning of war, and arms control verification); mapping, charting, and geodesy; and meteorology.

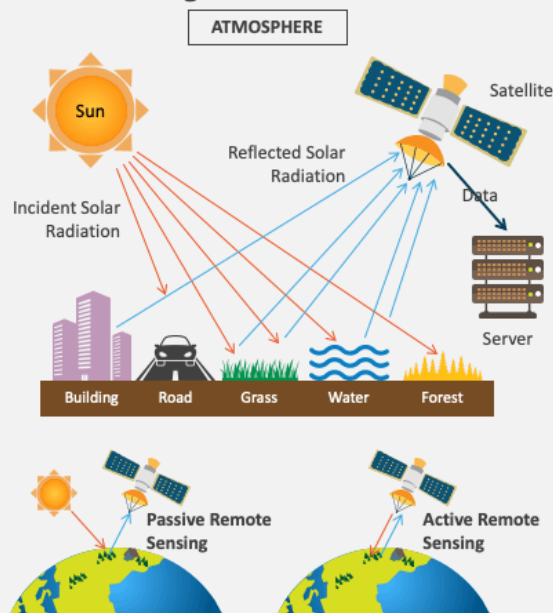
<https://innoter.com/en/articles/us-military-space-satellites> What Is Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance (ISR)?

Application of Remote Sensing In Environmental Monitoring- Enhancing Sustainability

<https://www.spatialpost.com/remote-sensing-environmental-monitoring>

REMOTE SENSING

What is Remote Sensing?



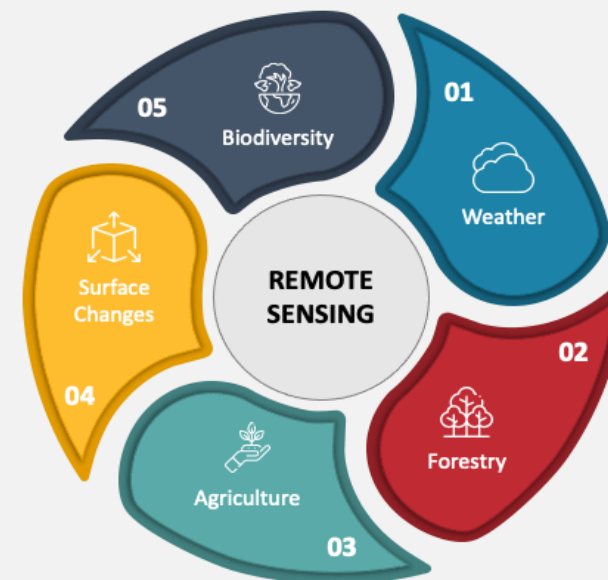
REMOTE SENSING

Remote sensing is the acquisition of information about an object or phenomenon without making physical contact with the object, in contrast to in situ or on-site observation. The term is applied especially to acquiring information about Earth and other planets. Remote sensing is used in numerous fields, including geophysics, geography, land surveying, and most Earth science disciplines.

(E.g. exploration geophysics, hydrology, ecology, meteorology, oceanography, glaciology, geology)

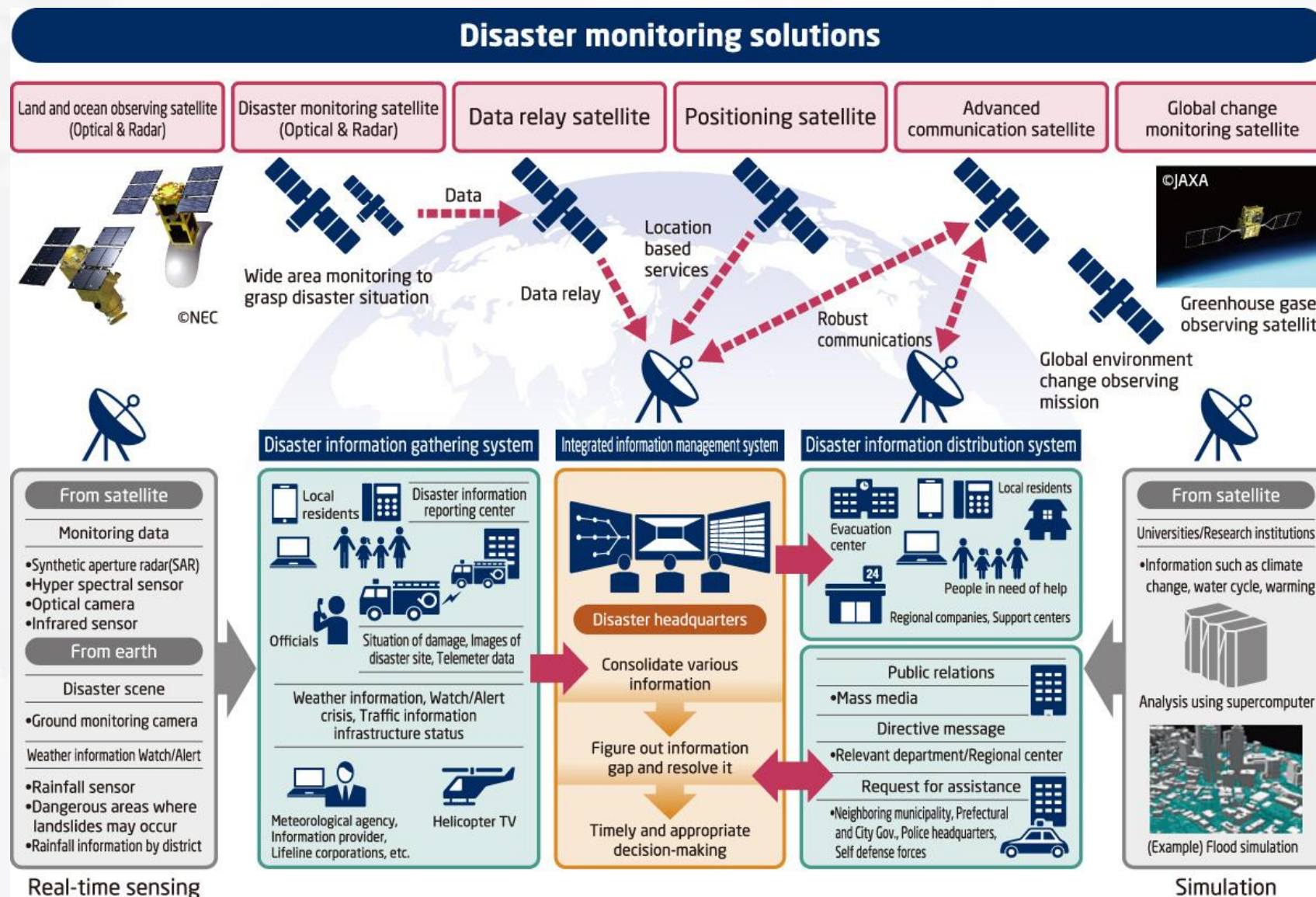
REMOTE SENSING

Fields Where Remote Sensing be used

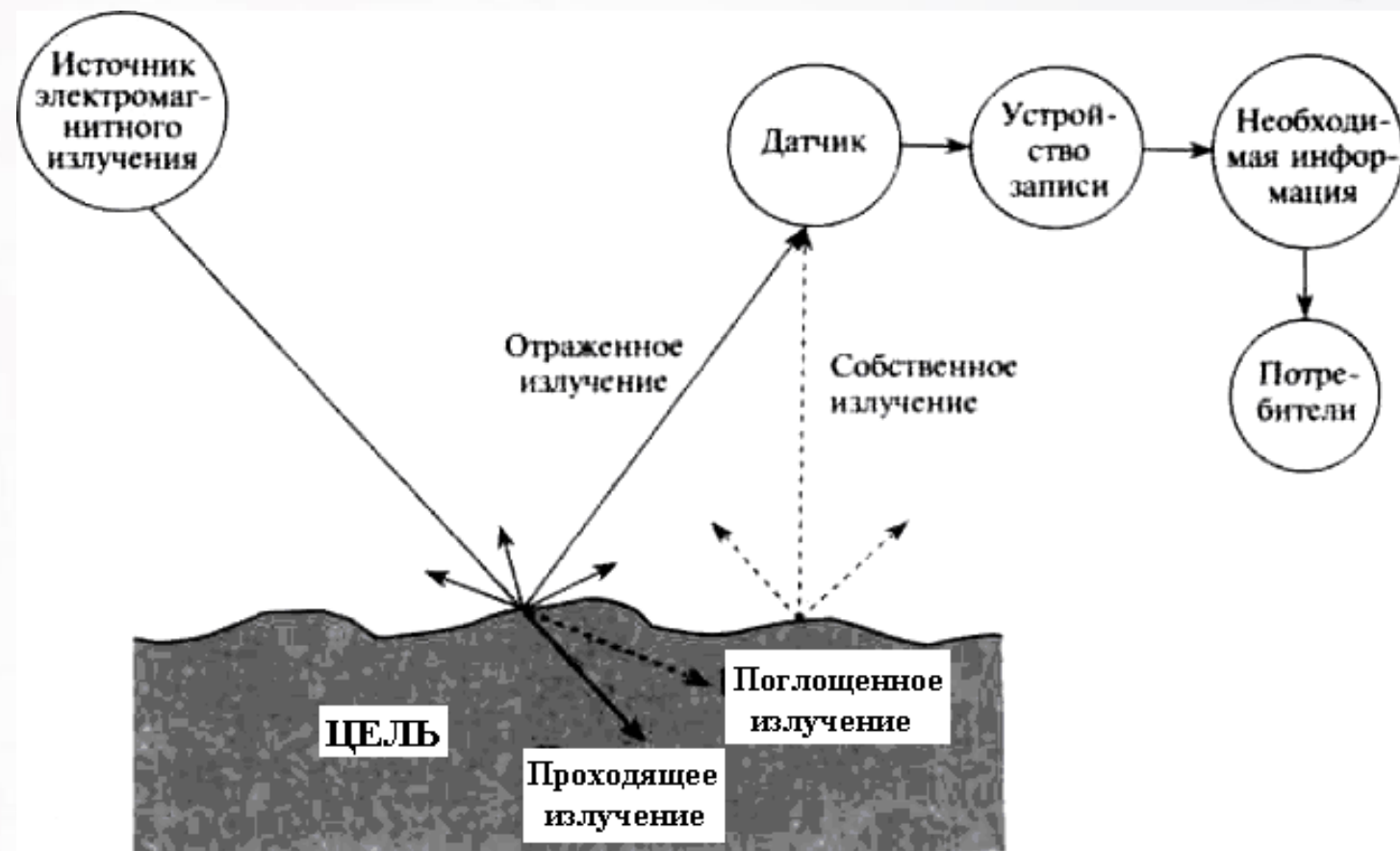
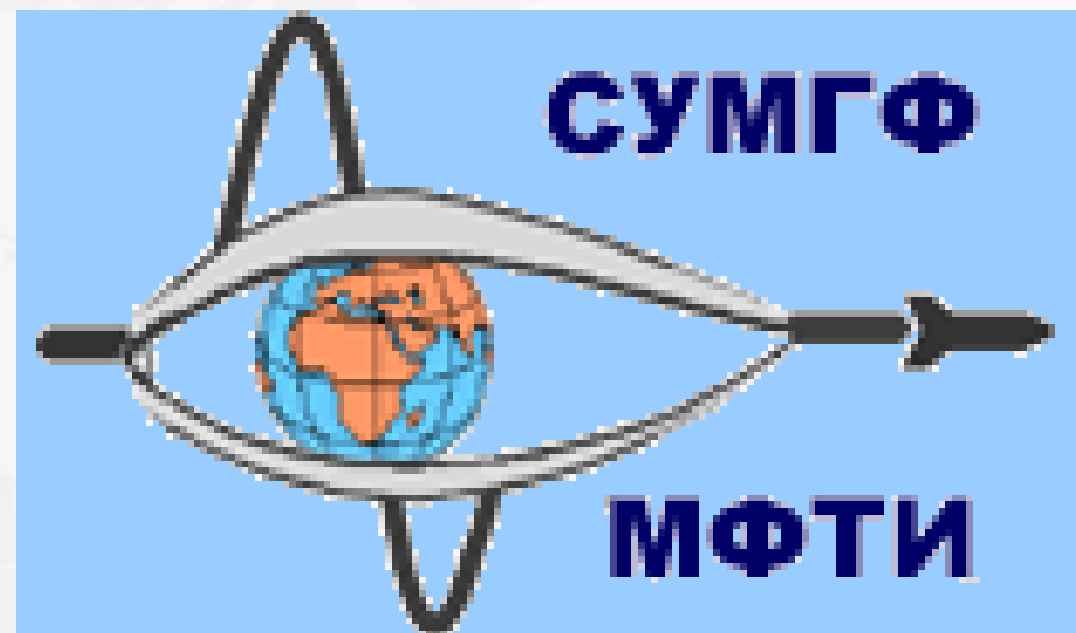


Важнейшие приложения ДЗ

https://www.nec.com/en/global/solutions/space/remote_sensing/index.html



<http://www.geo.mipt.ru>



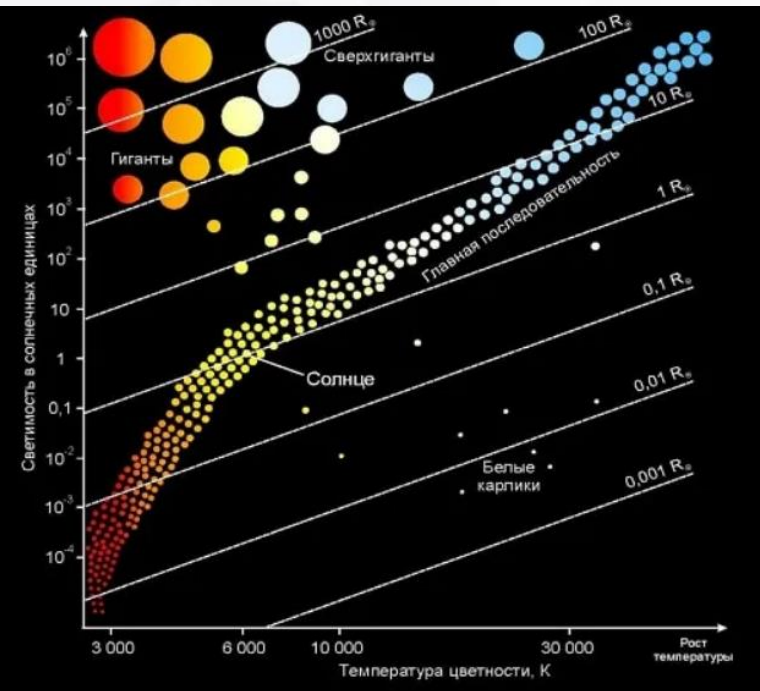
Энергетический баланс в системе «Солнце-планета Земля». Простейшие модели парникового эффекта.

- 1.1. Оценка равновесной поверхностной температуры планеты Земля (без учёта влияния атмосферы)
- 1.2. Упрощенная модель парникового эффекта

Семинар №1

Near-real-time solar images at <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>

Диаграмма Герцшпрунга — Рассела



Протон-протонный цикл - совокупность термоядерных реакций (термоядерная реакция — разновидность ядерной реакции, при которой лёгкие атомные ядра объединяются в более тяжёлые за счёт кинетической энергии их теплового движения), в ходе которых водород превращается в гелий в **звёздах массой порядка массы Солнца или меньше**, находящихся на **главной звёздной последовательности (ГСП)**; ПП (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/astro/astro12.htm>) - основная альтернатива **CNO-циклу** (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e181.htm>)

CNO-цикл — термоядерная реакция превращения водорода в гелий, в которой углерод, кислород и азот выступают как катализаторы. CNO –цикл- основной процесс термоядерного синтеза в **массивных звёздах ГСП**.

Диаметр Солнца = 1 390 600 км (109 D Земли). Объем Солнца = 1,41018 км³ (1 303 800 V З). Масса Солнца = 1,989 1033 г (333 434 М З). Ср. плотность = 1,4 г/см³ (0,256 р З). Плотность в центре Солнца 160 г/см³. Ускорение силы тяжести на поверхности Солнца = 2,7398 104 см/сек² (27,9g). Расстояние Солнце-Земля – 1 а.е.

На ПП цикл приходится до 98 % выделяемой энергии, излучаемой с «поверхности» (фотосфера), которая уходит в окружающее пространство. Часть энергии попадает на планеты системы, в том числе и на Землю. Именно эта энергия и формирует все макроскопические явления и процессы, протекающие во внешних геофизических оболочках планеты (атмосфера, подстилающая поверхность, океан, моря и т. п.). Наиболее известными являются климат и погода. В последние десятилетия в связи с развитием космических исследований, в особенности, приборной базы, оказалось возможным осуществлять регулярные и высокоточные наблюдения солнечного излучения с использованием специализированных ИСЗ ДЗ, среди которых особое место занимают аппараты

НАСА серии **SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment)**

Масса спутника	290 кг
Потребляемая мощность	348 Вт
Связь	Приёмопередатчик S-диапазона
Inertial pointing	Slew Rate > 1°/sec Knowledge < 60 arcsec
Solar Arrays	Fixed GaAs
Redundancy	Nearly fully redundant
Orbit	645km, 40° inclination
Срок службы	5 лет (ресурс – 6 лет)

Орбита КА – круговая H=645 км



SORCE, запущенный 25.01. 2003 года, был рассчитан на 5 лет. После завершения номинальной миссии НАСА расширила миссию, чтобы обеспечить непрерывность данных. Через 8 лет износ батареи SORCE начал сказываться на работе. Через 10 лет миссия изменила концепцию и перешла на работу только в дневное время в феврале 2014 года. SORCE проработал еще 6 лет, что позволило создать и запустить новый прибор и непрерывность данных по Солнцу.

<https://eosps.nasa.gov/missions/solar-radiation-and-climate-experiment>

Redundancy: existence of more than one means for performing a given function with the intention of increasing reliability

	2. SIM	3. SOLSTICE A & B	1. TIM	4. XPS
Spectral Range	310-2400 nm	115-310 nm	TSI (full solar spectrum)	1-27 nm
Spectral Resolution	1-27 nm	1 nm	N/A	1-10 nm
Absolute Accuracy (1 σ)	2%	1.2-6 %	350 ppm	12-24 %
(Requirement)	2%	0.5-10 %	150 ppm	30%
Precision (1 σ)	< 150 ppm	< 0.5 %	< 4 ppm	< 2%
Relative Accuracy (Stability) (1 σ)	.03%/yr	0.5%/yr	10 ppm/yr	< 1%/yr
(Requirement)	.03%/yr	0.5 %	10 ppm/yr	10%/yr
Detector	Diodes, ESR	Photomultiplier tubes	ESR	Diodes
Optical Channel	spectrometer	spectrometer	Radiometer	Filter Photometer



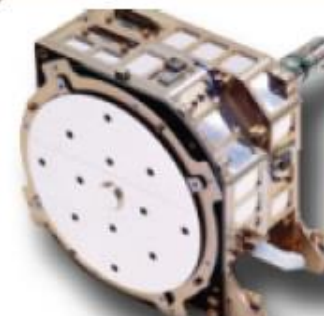
SIM instrument



SOLSTICE instrument

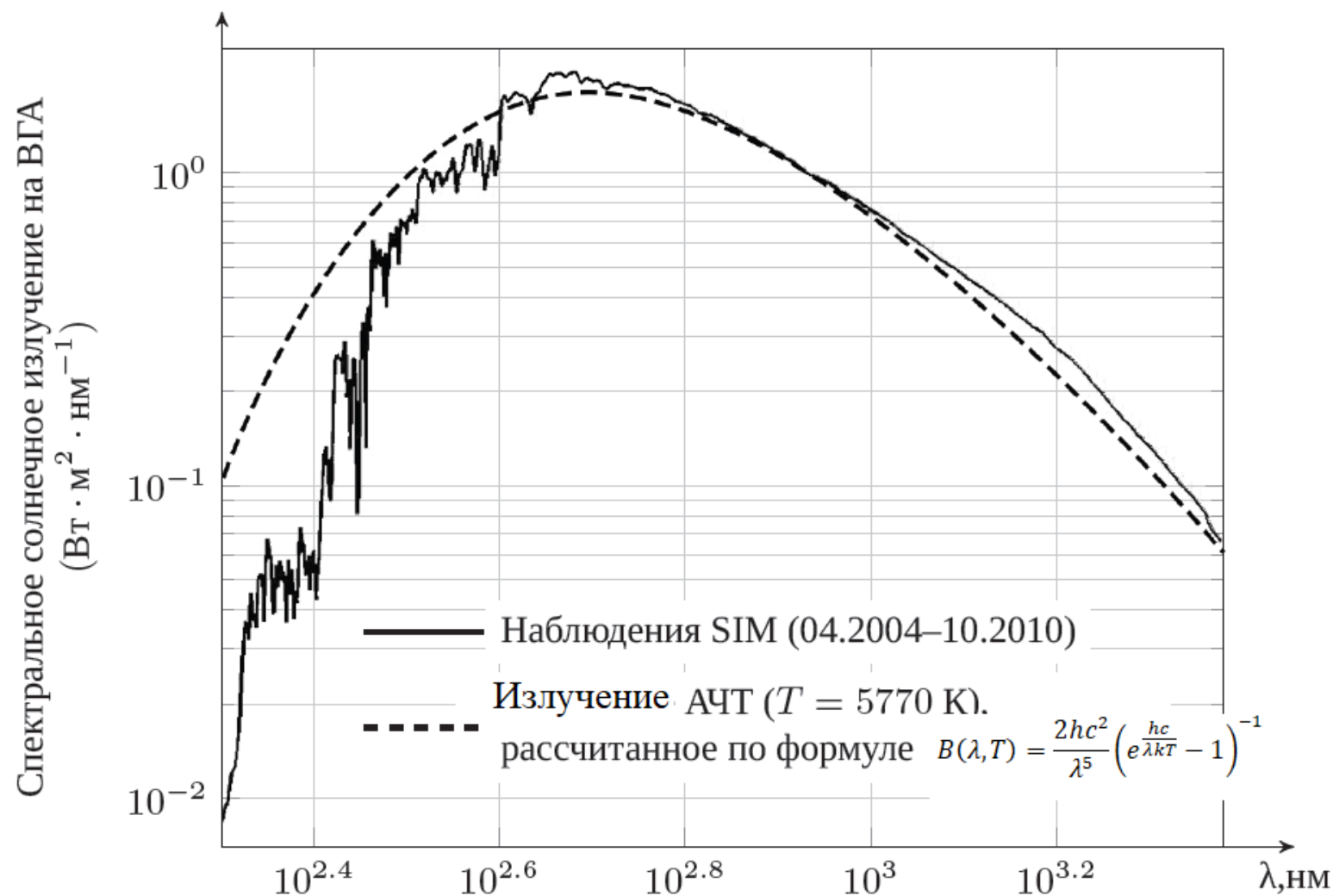


TIM instrument



XPS instrument

1. Монитор полной интенсивности падающего излучения TIM (Total Irradiance Monitor).
2. Монитор спектральной интенсивности падающего излучения SIM (Spectral Irradiance Monitor).
3. Аппаратура для сравнения интенсивности падающего солнечного и звездного излучений Solstice (Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment).
4. Фотометр крайней ультрафиолетовой области XPS (Extreme Ultraviolet Photometer System)



Сравнение экспериментальной зависимости излучения Солнца с теоретической кривой излучения АЧТ

Закон Стефана-Больцмана

$$\pi \int_0^\infty B(\lambda, T = 5770 \text{ K}) d\lambda = \sigma T^4 (5770 \text{ K})$$

Площади под обеими кривыми практически совпадают !!!

Рассмотрим далее следующую задачу (см. рис. П1.2): Солнце — сфера радиусом $R_{\odot} \cong 7 \cdot 10^8$ м представляет собой АЧТ при $T_{\odot} \cong 5770$ К. Полная энергия, излучаемая этим АЧТ вокруг себя равна

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4 \simeq 3,83 \cdot 10^{26} \text{ Вт.} \quad (\text{П1.1})$$

Планета Земля находится от Солнца на расстоянии одной астрономической единицы $a_{\odot\oplus} \cong 1,49 \cdot 10^{11}$ м.

На поверхность Земли, как на диск $R_{\oplus} \simeq 6,4 \cdot 10^6$ м ($R_{\oplus} \ll R_{\odot} \ll a_{\oplus\odot}$) попадает часть энергии L_{\odot} , равная

$$P = L_{\odot} \Delta\Omega_{\oplus} = L_{\odot} \frac{\pi R_{\oplus}^2}{4\pi a_{\odot\oplus}^2} = \frac{L_{\odot}}{4} \left(\frac{R_{\oplus}}{a_{\odot\oplus}} \right)^2 \approx 1,75 \cdot 10^{17} \text{ Вт.} \quad (\text{П1.2})$$

Очевидно, что аналогично можно записать выражение и для спектральной энергии излучения:

$$P(\lambda) d\lambda = L_{\odot}(\lambda) \frac{1}{4} \left(\frac{R_{\oplus}}{a_{\odot\oplus}} \right)^2 d\lambda. \quad (\text{П1.3})$$



Рис. П1.2. Упрощённая геометрия системы «Солнце – Земля»

Энергетический баланс без учета влияния атмосферы

$$E_{\oplus}^{\downarrow} = E_{\oplus}^{\uparrow}. \quad (\text{П1.4})$$

$$P \cong P \cdot A + Q_R^{\uparrow} + Q_C^{\uparrow}. \quad (\text{П1.5})$$

В правой части: $P \cdot A$ — отражённое от поверхности излучение; Q_R^{\uparrow} — энергия, излучаемая в окружающий космос; Q_C^{\uparrow} — дополнительная энергия, подводимая к поверхности Земли за счёт тепловых источников, находящихся в её недрах.

A — интегральное визуальное альbedo планеты

$$Q_R^{\uparrow} = L_{\oplus}$$

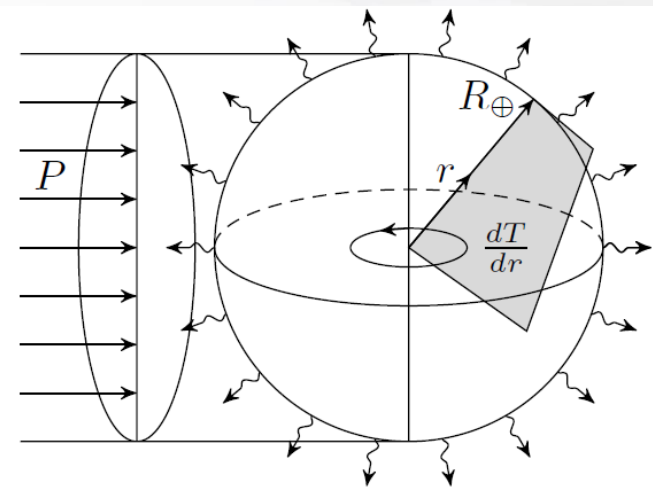
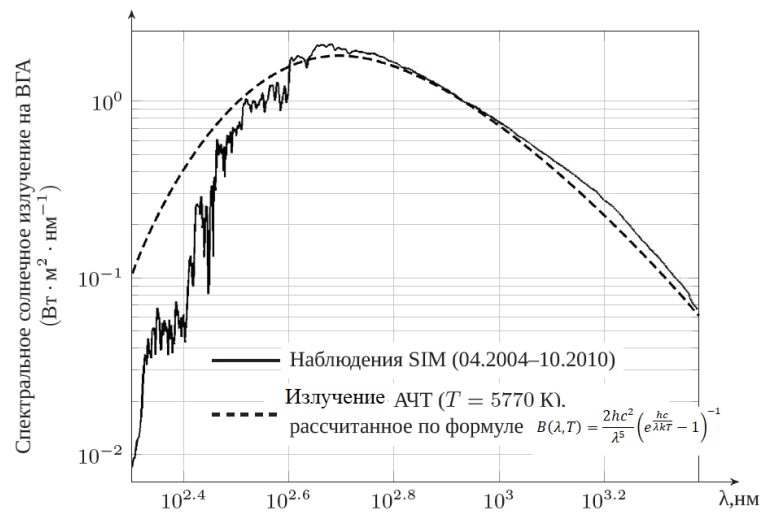


Рис. П1.3. Упрощённая модель взаимодействия солнечного излучения P и планетой Земля

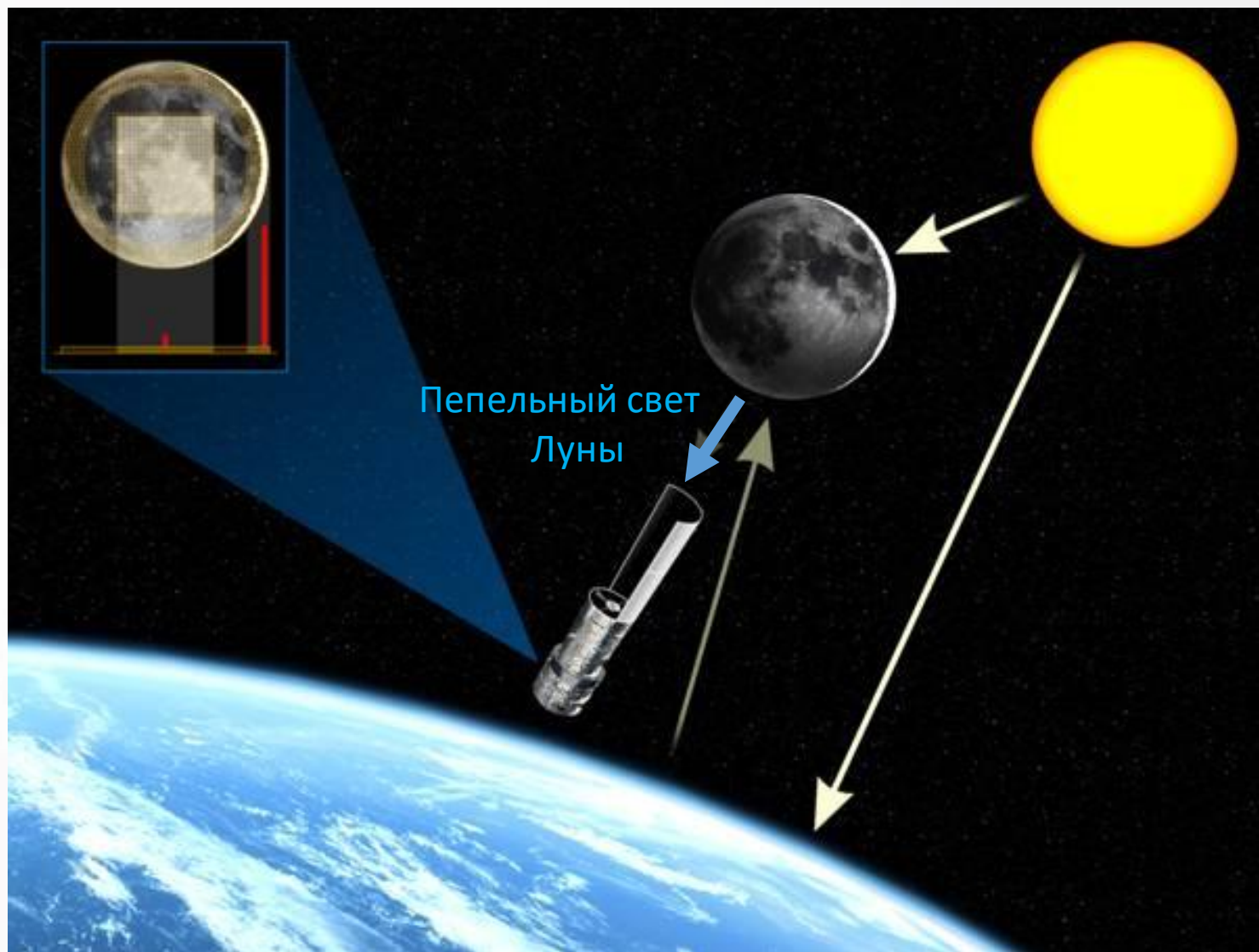
Определение интегрального визуального сферического альbedo планеты Земля (альbedo Бонда) A

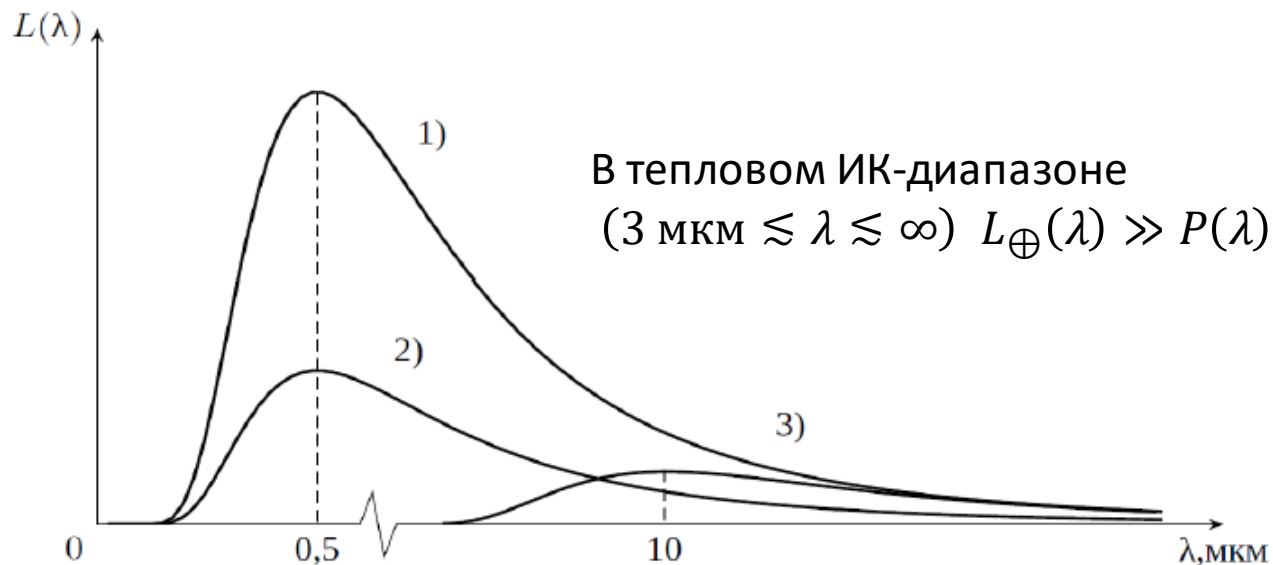
«Пепельный свет» Луны - излучение Солнца в **коротковолновой части спектра ($\lambda \leq 2.5$ мкм)** отражённое земной поверхностью и затем переотражённое Луной. По разным источникам значение A лежит в диапазоне **0,25 – 0,45**; спутниковые измерения в отсутствие облачности дали значение $\sim 0,3$.



Сравнение экспериментальной зависимости излучения Солнца с теоретической кривой излучения АЧТ

05.09.2024





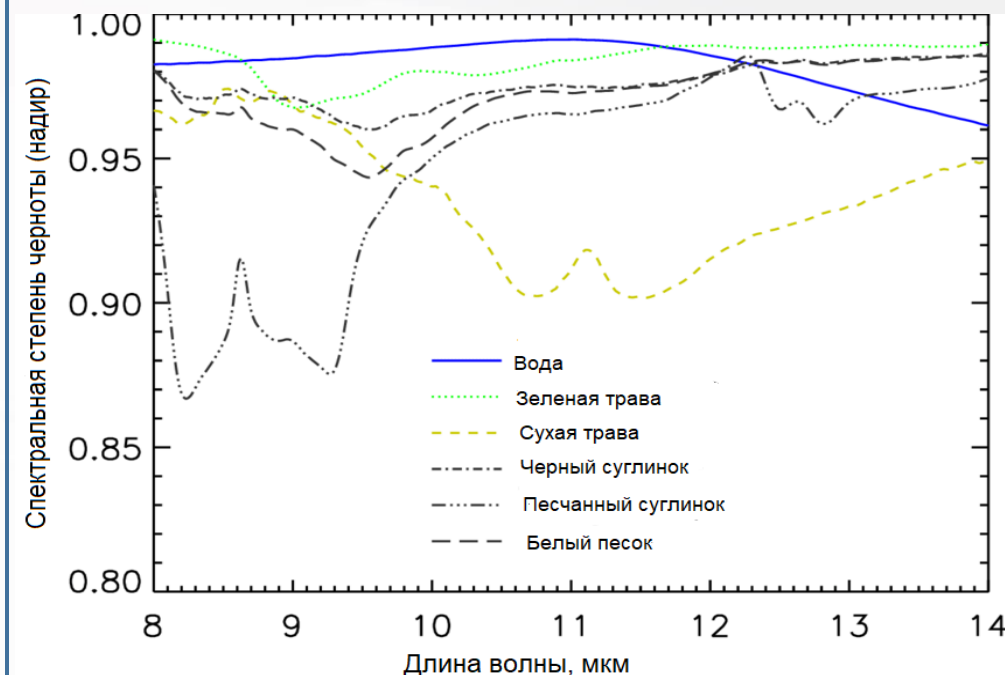
В тепловом ИК-диапазоне
($3 \text{ мкм} \lesssim \lambda \lesssim \infty$) $L_{\oplus}(\lambda) \gg P(\lambda)$

Сравнение спектрального излучения двух сфер АЧТ (Солнце - кривая 1) и (Земля - кривая 3) и излучения, падающего от Солнца на диск Земли (кривая 2)

$$L_{\odot}(\lambda) = 4\pi R_{\odot}^2 \pi B(\lambda, T_{\odot} \approx 5770K) - (1)$$

$$P(\lambda) = L_{\odot}(\lambda) \frac{1}{4} \left(\frac{R_{\oplus}}{a_{\oplus\odot}} \right)^2 - (2)$$

$$L_{\oplus}(\lambda) = 4\pi R_{\oplus}^2 \pi B(\lambda, T_{\oplus} \approx 300K) - (3) \quad L_{\oplus} = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4$$



Спектральная зависимость степени черноты некоторых природных образований в ИК-диапазоне спектра.

$$Q_R^{\uparrow} \approx E \cdot L_{\oplus} \approx 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4$$

E — интегральная по спектру степень черноты поверхности планеты Земля в ИК-диапазоне спектра ($E \approx 1!!!$)

Оценим теперь величину потока тепла, поступающего к поверхности Земли «изнутри» — Q_C^\uparrow . Действительно, известно, что температура в недрах Земли намного выше, чем у поверхности. Об этом свидетельствуют также такие явления, как извержения вулканов, геотермальные источники и пр. Более или менее достоверные данные о количественном значении градиента температуры dT/dr (рис. П1.3) дают измерения со сверхглубоких геофизических скважин. Одна из глубочайших в мире скважин (достигнутая глубина — 12262 м) находится в Мурманской области РФ. Для грубой оценки можно принять $(dT/dr) \approx 0,03 \text{ К/м}$. Обычно в качестве модели подповерхностной структуры Земли используют минерал типа базальта, коэффициент теплопроводности которого $\lambda_6 \approx 2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Тогда

$$Q_C^\uparrow \approx 4\pi R_\oplus^2 \cdot \lambda_6 \left(\frac{dT}{dr} \right) \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ Вт.} \quad (\text{П1.7})$$

$$P = L_{\odot} \Delta \Omega_{\oplus} = L_{\odot} \frac{\pi R_{\oplus}^2}{4\pi a_{\odot\oplus}^2} = \frac{L_{\odot}}{4} \left(\frac{R_{\oplus}}{a_{\odot\oplus}} \right)^2 \approx 1,75 \cdot 10^{17} \text{ Вт.} \quad (\text{П1.2})$$

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4 \simeq 3,83 \cdot 10^{26} \text{ Вт.} \quad (\text{П1.1})$$

$$P \cong P \cdot A + Q_R^{\uparrow} + \cancel{Q_C^{\uparrow}}.$$

Так как $Q_C^{\uparrow} \ll P \sim P \cdot A$, уравнение (П1.5) можно представить в виде:

$$P(1 - A) = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4, \quad (\text{П1.8})$$

и (П.1.1)

откуда, с учётом (П1.2), получаем формулу для равновесной глобальной температуры поверхности планеты Земля:

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt{\frac{R_{\odot}}{2a_{\odot\oplus}}} (1 - A)^{1/4}. \quad (\text{П1.9})$$

Подставляя в (П1.9) необходимые константы, получим $T_{\oplus} \approx 257 \text{ К } (-16^{\circ}\text{C})$.

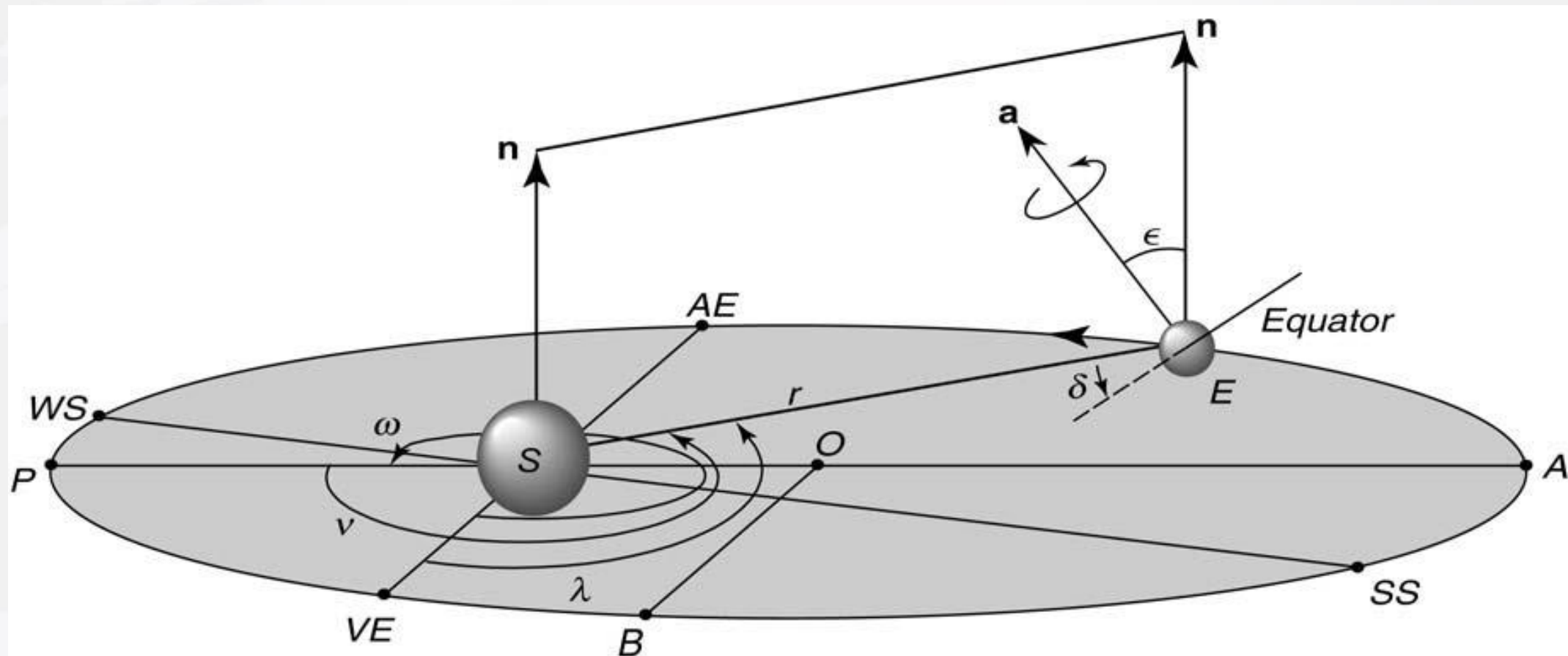


Рис. S положение солнца, E положение земли, ES (а.е.) расстояние между Землей и Солнцем. Точки: P - перигелий, A - афелий, AE - осеннее равноденствие, VE - весеннее равноденствие, WS - зимнее солнцестояние и SS - летнее солнцестояние. Векторы: n – нормаль к плоскости эклиптики; a – направление земной оси, δ - склонение Солнца по отношению к плоскости земного экватора, ϵ - наклонный угол земной оси, ω - долгота перигелия относительно точки весеннего равноденствия, v - истинная аномалия Земли в данное время, λ - истинная долгота Земли, O центр эллипса, OA (или OP) большая полуось, OB малая полуось,