

«... легче измерить, чем понять что измеряется»

Д.И.Тейлор

сэр Джеффри Инграм Тейлор (Taylor G.I., 1886-1975),
английский физик и метеоролог, внес значительный
вклад в понимание явлений турбулентности и диффузии

Инструментальные методы ландшафтных исследований

Сысуев В.В.

Экспериментальные измерения в ландшафтоведении

- 1. Методы и приборы исследования микроклимата**
 - Радиационный режим**
 - Бесконтактный контроль температуры и влажности**
- 2. Приборы гидрологических исследований**
 - Гидрометрические методы**
 - Гидравлический метод**
- 3. Приборы и оборудование исследования почв**
 - Гидрофизические свойства почв**
 - Механические свойства**
- 4. Литолого-гидрогеологические исследования**
 - Буровые и скважинные методы**
 - Методы подповерхностного зондирования**
- 5. Топографо-геодезическое оборудование**
 - Нивелирование, электронный тахеометр**
 - GPS-методы**
- 6. Лабораторные методы контроля содержания компонентов**
 - Гранулометрический и минералогический анализ**
 - Спектроскопические, электрохимические, хроматографические, радиометрические методы анализа**

Измерение параметров радиационного режима атмосферы, земной поверхности и объектов окружающей среды

- Солнечная радиация
- Единицы измерения потока радиации
- Спектральный состав солнечной радиации
- Ослабление солнечной радиации в атмосфере
- Метеорологические методы и приборы измерения солнечной радиации
- Измерение освещенности, спектра излучения, цветности, спектральной температуры

- **Солнечная радиация** - прежде всего **электромагнитное излучение**
- **Электромагнитная** составляющая солнечной радиации распространяется со скоростью света и проникает в земную атмосферу.
Земля получает от Солнца менее одной двухмиллиардной его излучения
- энергетический вклад *корпускулярной составляющей* солнечной радиации в её общую интенсивность невелик по сравнению с электромагнитной (это протоны, движущихся со скоростями 300—1500 км/с, так называемый «Солнечный ветер»), однако её экологическая роль может быть ощутимой
- **Солнечная радиация — главный источник энергии для всех физических процессов, происходящих на земной поверхности, в ландшафтах и в атмосфере.**
Без солнечной радиации невозможен фотосинтез
- **Поэтому лучистую энергию Солнца, поступающую в атмосферу и на поверхность Земли, изучают не только метеорологи.**

Единицы измерения радиации: (Вт/м²)

- Единица поверхностной плотности потока радиации (интенсивности радиации) в Международной системе единиц (СИ)- это поверхностная плотность потока радиации, при которой через поверхность площадью 1 м² проходит поток излучения, равный 1 Вт.
Т.е. за время 1 секунду переносится через эту поверхность энергия, равная 1 Дж.
- Применяется также к **потокам тепла** и **звуковой энергии**.

Солнечная постоянная

- это интенсивность солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы.

По данным прямых измерений (в т. ч. с космических аппаратов) солнечная постоянная составляет **1367 Вт/м², или 1,959 кал / (см² *мин)**

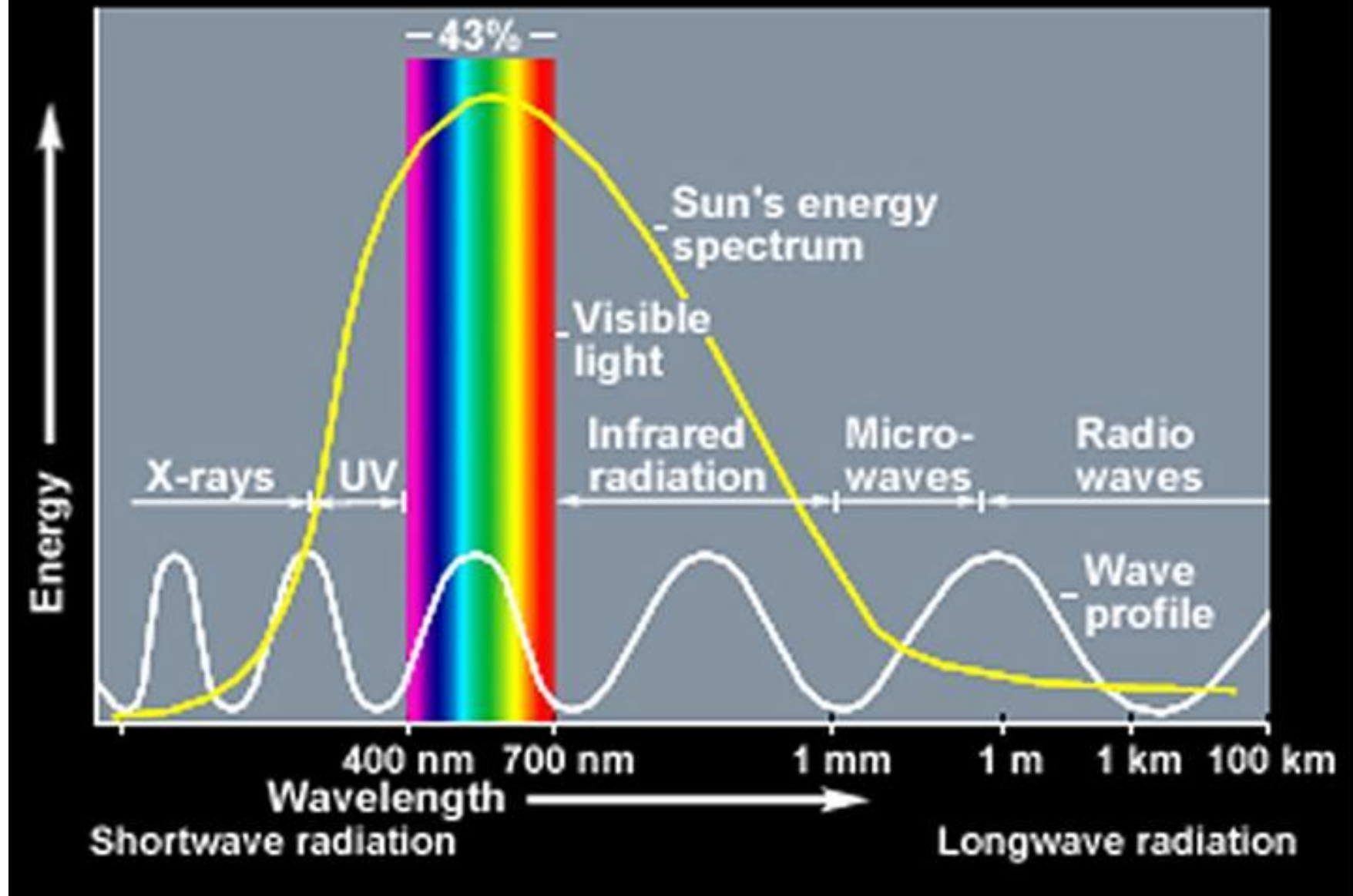
Солнечная постоянная не является неизменной во времени величиной, известно, что на её величину влияет солнечная активность за счет изменения числа и суммарной площади солнечных пятен.

Прямые измерения солнечной постоянной показали, что её изменения на протяжении 11-летнего цикла солнечной активности, не превышают $\sim 10^{-3}$.

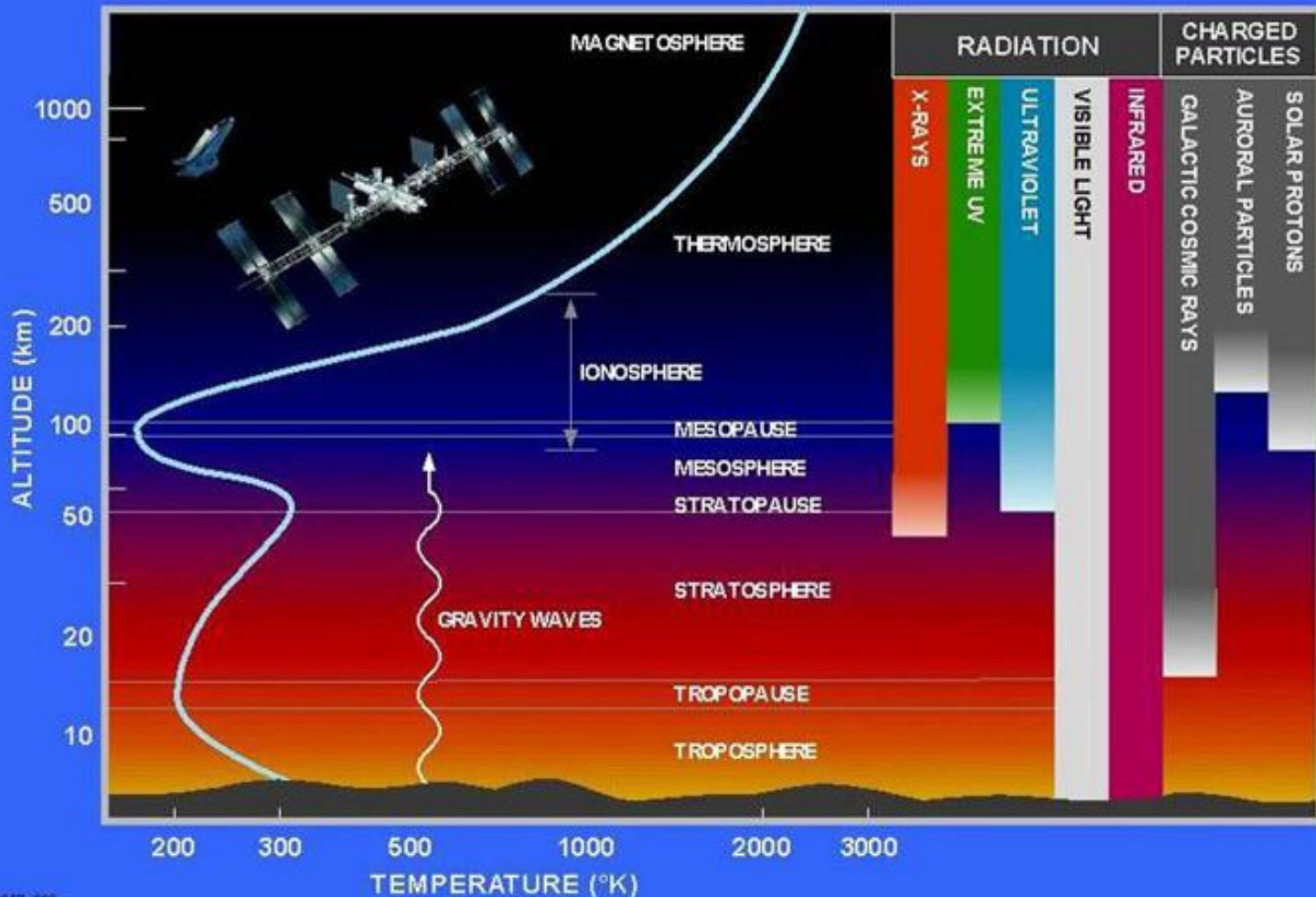
Спектральный диапазон электромагнитного излучения Солнца

В зависимости от длины электромагнитных волн спектр солнечной радиации делится на три области:

- ✓ УФР с длиной волны от 0,01 до 0,39 мкм
- ✓ Видимая часть спектра - от 0,391 до 0,76 мкм
- ✓ ИКР – от 0,761 до 3000 мкм
- 1 микрометр (мкм, μm) = 10^{-6} м = 1000 нанометров (нм, nm)
- ✓ Рентгеновское излучение с длиной волн от 0,00001 до 0,01 мкм
- ✓ Радиоволны - от 3 мм до километров
- ✓ Максимум интенсивности приходится на видимую (жёлто-зелёную) часть спектра.

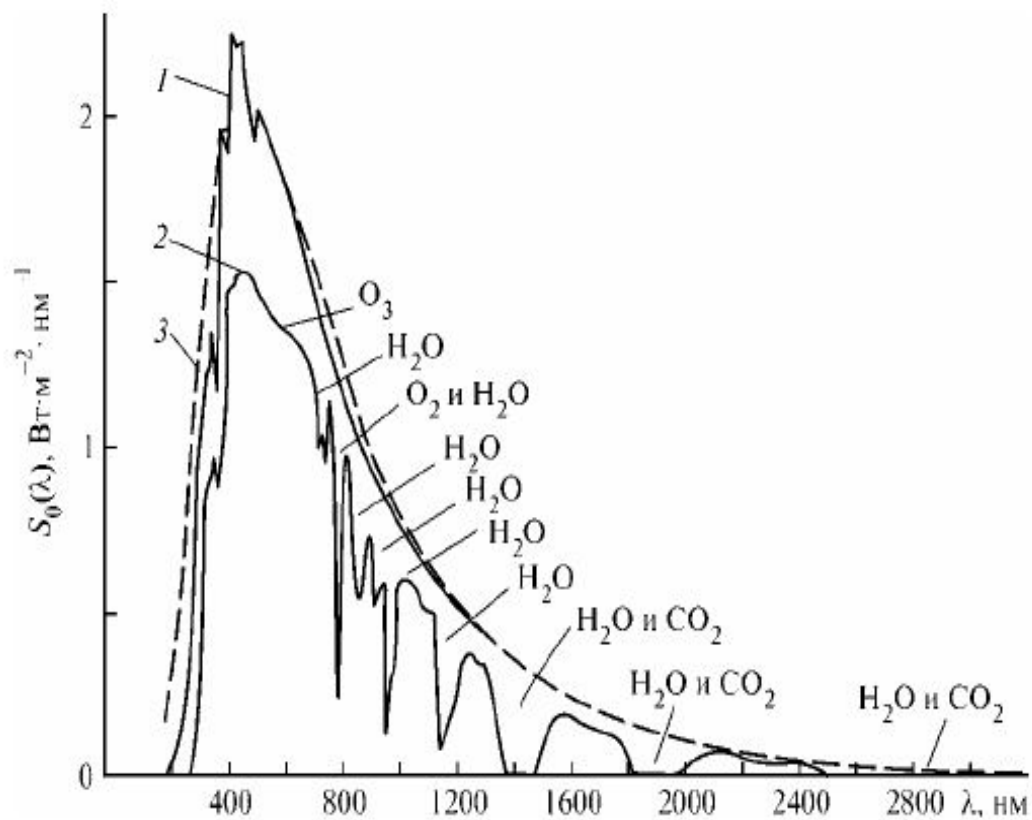
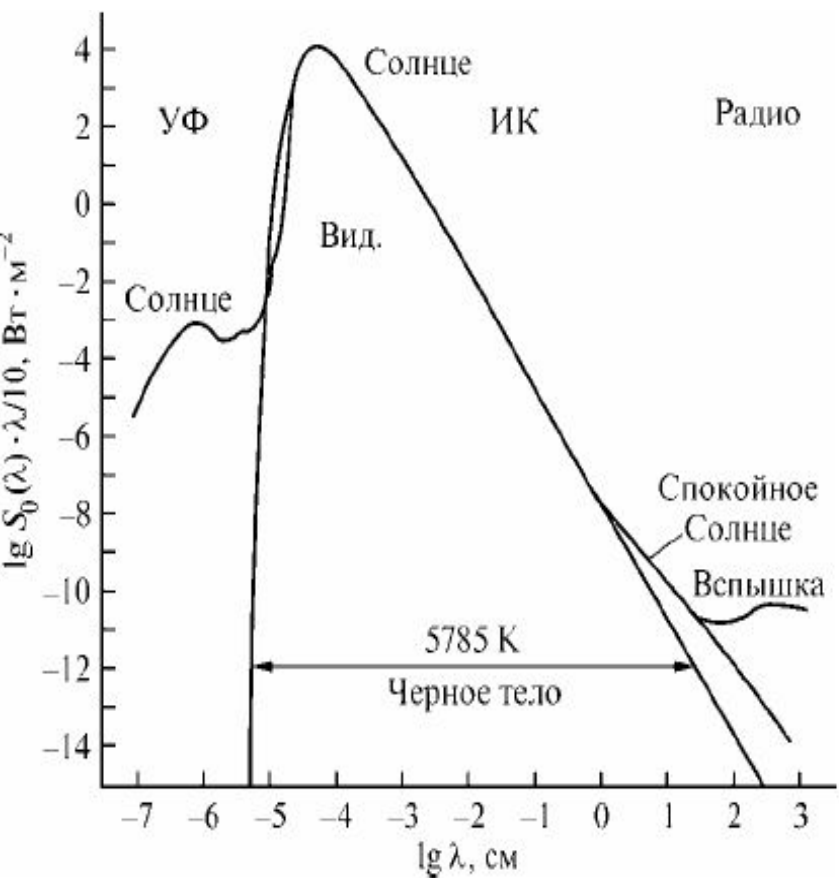


✓ Максимум интенсивности приходится на видимую (жёлто-зелёную) часть спектра.



✓ Лучи с длиной волны менее 0,29 мкм (ультрафиолетовая часть спектра) до земной поверхности не доходят, т.к. поглощаются озоновым слоем в верхних слоях атмосферы.

В атмосфере солнечная радиация поглощается: водяным паром, углекислым газом, озоном, аэрозолями – 15-20% от приходящей на верхнюю границу атмосферы.



Стандартный спектр Солнца с грубым спектральным разрешением.

Спектры солнечного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы и на поверхность Земли

В метеорологии выделяют коротковолновую и длинноволновую радиацию

- Коротковолновая радиация - от 0,1 до 4 мкм: включает видимый свет, ближняя УФР и ближняя ИКР.
- Солнечная радиация на 99% является коротковолновой радиацией.
- длинноволновая радиация – от 4 до 120 мкм.

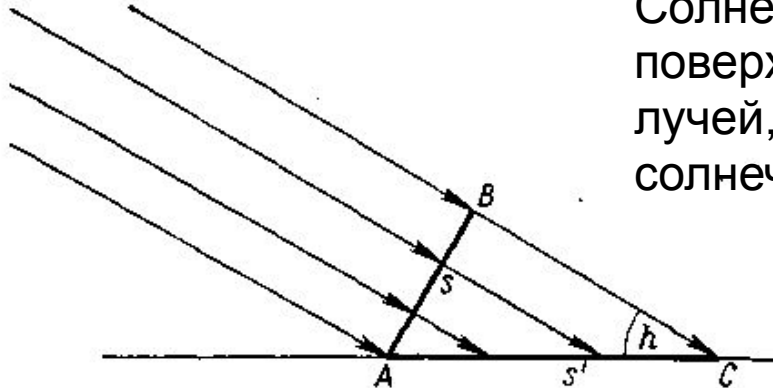
**К земной поверхности солнечная радиация
доходит в виде прямой и рассеянной радиации**

Суммарная радиация

- Совокупность прямой S' и рассеянной солнечной радиации D , поступающей в естественных условиях на горизонтальную земную поверхность.
- $$Q = S' + D$$
- где S' — интенсивность прямой радиации на горизонтальную поверхность, D — интенсивность рассеянной радиации.

Прямая солнечная радиация

Солнечная радиация, доходящая до земной поверхности в виде пучка параллельных лучей, исходящих непосредственно от солнечного диска.



Приток солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную к лучам (AB), и на горизонтальную поверхность (AC);

где h — высота солнца

- единица площади, расположенной перпендикулярно к солнечным лучам, получит максимально возможное количество радиации. На единицу горизонтальной площади придется меньшее количество лучистой энергии
- на горизонтальную площадку s' приходится количество радиации $I's'$, равное количеству радиации Is , приходящему на перпендикулярную к лучам площадку s :
- Но площадь s относится к площади s' , как AB к AC , $s=s'\sin h$; отсюда $I' = I$ только тогда, когда Солнце в зените, а во всех остальных случаях I' меньше I .
- Приток прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность называют инсоляцией.

Рассеяние солнечной радиации:

- Рассеяние радиации происходит молекулами атмосферных газов и аэрозольными частицами.
- При рассеянии солнечная радиация не поглощается воздухом и аэрозолями и не переходит в тепловую энергию, но она отклоняется от прямолинейного пути и рассеивается во все стороны.
- Около 25% энергии общего потока солнечной радиации превращается в атмосфере в рассеянную радиацию. Значительная доля рассеянной радиации (60%) приходит к земной поверхности со всего небесного свода - это особый вид радиации, существенно отличный от прямой радиации.

- При безоблачном небе суммарная радиация имеет суточный ход с максимумом около полудня и годовой ход с максимумом летом.
- Суточный и годовой ход Q пропорционален высоте солнца.
- Полуденные значения суммарной радиации в летние месяцы под Москвой при безоблачном небе в среднем $0,6-0,9$ кВт/м².
- В среднем облачность уменьшает суммарную радиацию на 20-30%.

Отражение и поглощение солнечной радиации.

Падая на земную поверхность суммарная радиация частично отражается.

Величина **отраженной солнечной радиации (R)** земной поверхностью зависит от характера этой поверхности. Отношение количества отраженной радиации к общему количеству радиации, падающей на данную поверхность, называется альбедо поверхности. Это отношение выражается в процентах

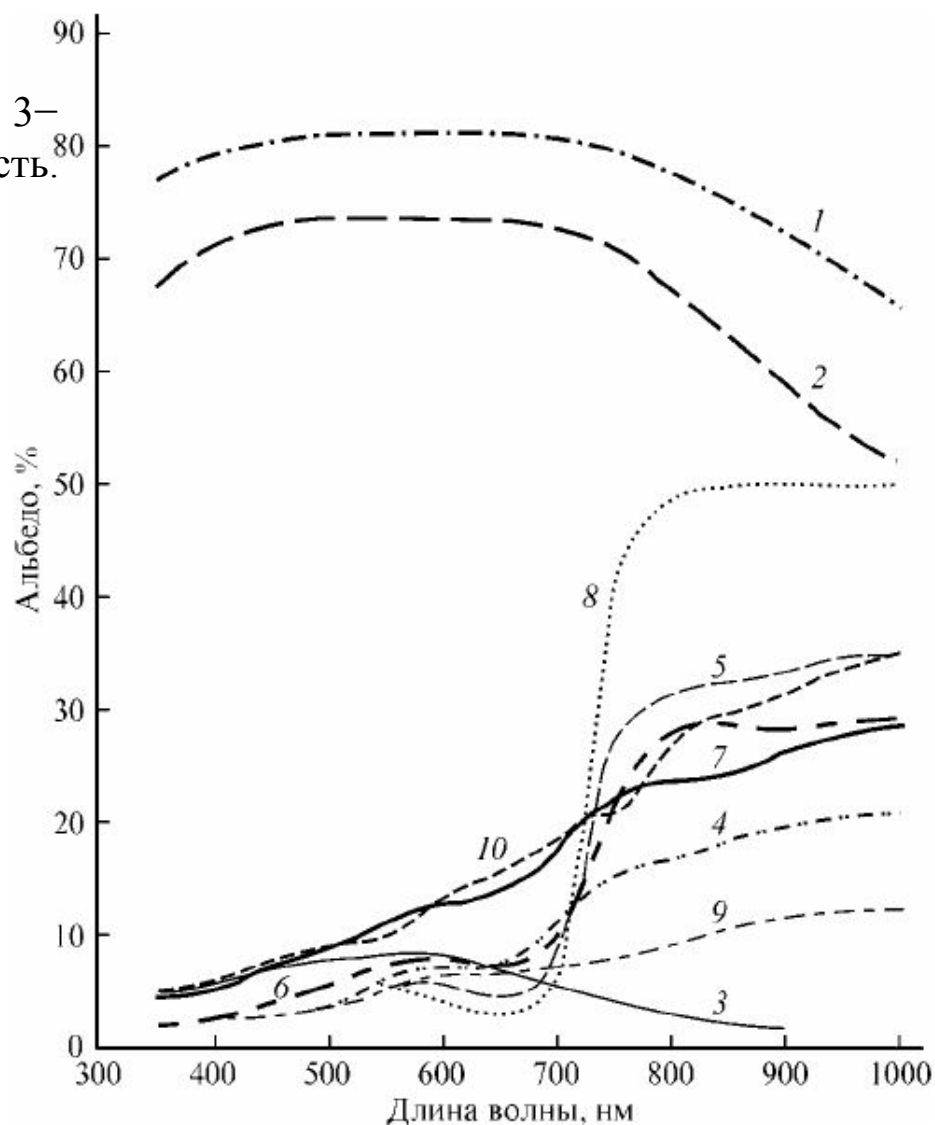
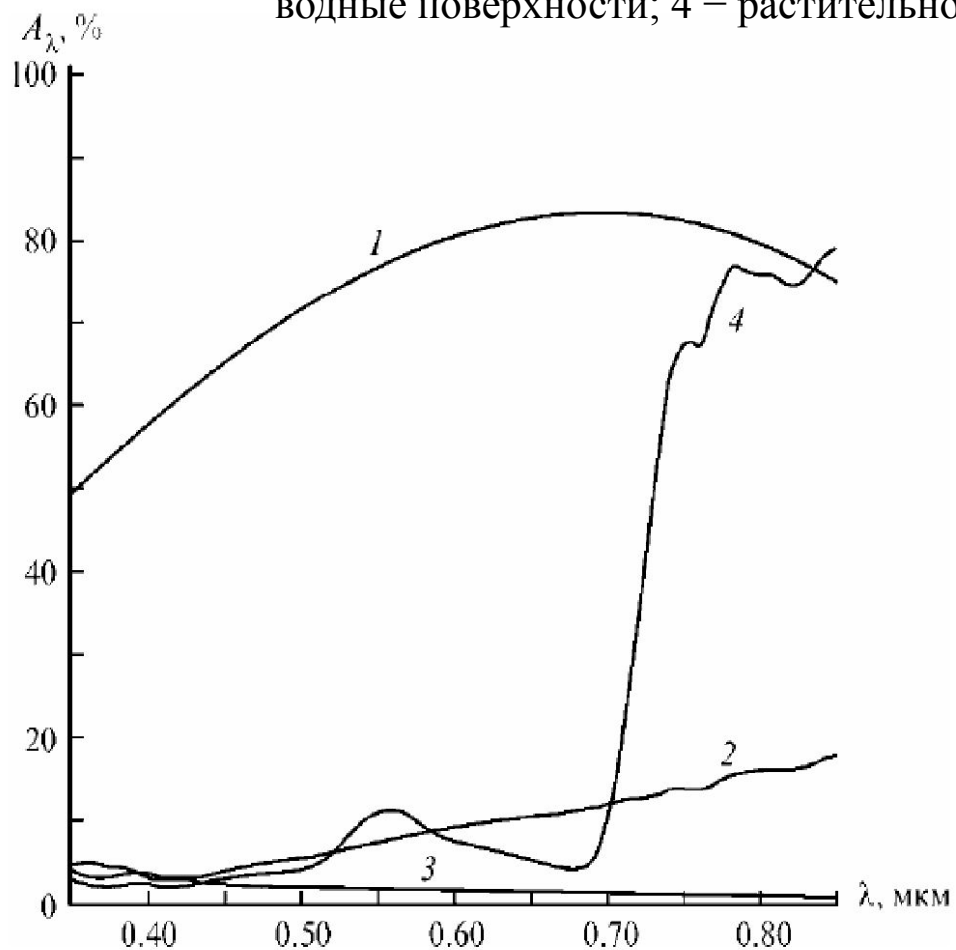
$$A=R/Q$$

Большая части падающей на земную поверхность суммарной радиации **поглощается** в верхнем тонком слое почвы или воды и переходит в тепло,

$$=Q (1- A)$$

Альbedo разных поверхностей

1 – снег и облака; 2 – почвы, песок, горные породы; 3 – водные поверхности; 4 – растительность.



Спектральная зависимость альbedo различных поверхностей

1 – снег, высота Солнца 38°; 2 – влажный снег, высота Солнца 27°; 3 – вода озера, высота Солнца 56°; 4 – почва после таяния снега, высота Солнца 24°30'; 5 – пшеница после силосования, высота Солнца 54°; 6 – высокая зеленая пшеница, высота Солнца 56°; 7 – желтая пшеница, высота Солнца 46°; 8 – суданская трава, высота Солнца 52°; 9 – чернозем, высота Солнца 40°; 10 – жнивье хлебных злаков, высота Солнца 35°.

Длинноволновое излучение земной поверхности

Верхние слои почвы и воды, снежный покров и растительность, поглощая радиацию, нагреваются, а затем сами излучают длинноволновую радиацию - собственное излучение земной поверхности E_s

Встречное длинноволновое излучение

Атмосферную радиацию, приходящую к земной поверхности, называют встречным излучением – E_a , - оно направлено навстречу собственному излучению земной поверхности.

Земная поверхность поглощает это встречное излучение атмосферы почти целиком (на 90-99%).

Оно является для земной поверхности важным источником тепла в дополнение к поглощенной солнечной радиации

Эффективное излучение

- Встречное излучение E_a всегда несколько меньше собственного земного излучения E_z
- Поэтому ночью, когда солнечной радиации нет и к земной поверхности приходит только *встречное* излучение, земная поверхность теряет тепло за счет положительной разности между собственным и встречным излучением.
- Эту разность между собственным излучением земной поверхности и встречным излучением атмосферы называют *эффективным* излучением или **длинноволновым балансом радиации**

$$E_{эф} = E_z - E_a$$

Радиационный баланс земной поверхности

Это разность между поглощенной радиацией (суммарная радиация минус отраженная) и эффективным излучением (излучение земной поверхности минус встречное излучение)

$$B = S' + D - R + E_a - E_z$$
$$B = Q(1 - A) - E_{эф}$$

Ночью коротковолновый баланс = 0

Поэтому

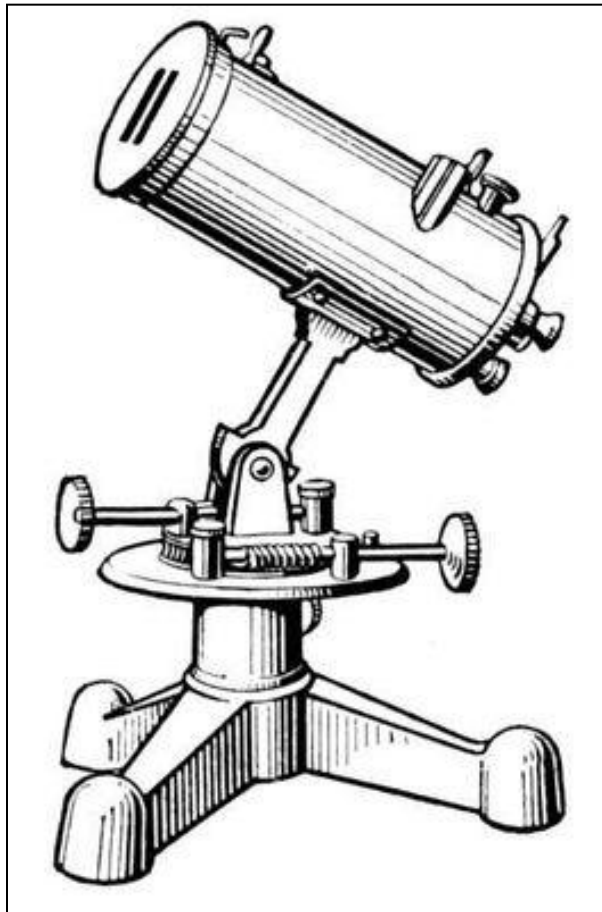
$$B = - E_{эф}$$

Методы измерения радиации

- Для измерения интенсивности прямой и рассеянной солнечной радиации и эффективного излучения (а также альбедо, освещенности и пр.) существует много приборов как с визуальными отсчетами, так и с автоматической регистрацией.
- Приборы для измерения:
- **прямой солнечной радиации - пиргелиометры и актинометры**
- **рассеянной радиации — пиранометры,**
- **отраженной радиации – альбедометры,**
- **радиационного баланса — балансомеры.**

Названия самопишущих приборов оканчиваются на «граф» (актинограф, пиранограф). Современные приборы, как правило, имеют цифровой выход, внутреннюю память и разъемы подключения компьютера или флешпамяти

Впервые метод измерения солнечной энергии использовал Пулье в 1837 г. В его приборе находилась вода, температуру которой измерял обычный термометр. Под действием солнечных лучей температура воды возрастала. Такой прибор называется **пиргелиометром**.



- Общий вид компенсационного пиргелиометра Онгстрёма. Абсолютный прибор предназначен для измерений прямой солнечной радиации, падающей на перпендикулярную к солнечным лучам поверхность.



Общий вид современного пиргелиометра SHP1 (фирма Kipp & Zonen)



Пиранометр Янишевского воспринимает рассеянную радиацию со всего небесного свода, от прямой солнечной радиации он затенен, от встречного излучения атмосферы защищен стеклянным колпаком. Приемная часть - батарея термоэлементов, например из манганина и константана, с зачерненными и белыми спаями. Под действием рассеянной радиации черные и белые спаи нагреваются неодинаково и возникает термоэлектрический ток, по силе которого определяют интенсивность радиации. При измерениях суммарной радиации пиранометр не затеняют от прямых солнечных лучей



Современные **пиранометры** (Kipp & Zonen) соответствуют международным стандартам ISO 9060 и стандартам ВМО. Надежные, простые в обращении, приборы всепогодного исполнения с цифровым выходом, не требующие источников питания, снабженные калибровочными сертификатами в соответствии со Всемирным радиометрическим эталоном (WRR).

Альбедометры - это сдвоенные в одном инструменте пиранометры, которые измеряют как **суммарную проходящую**, так и **отраженную (уходящую) солнечную радиацию**. Альбедометры подходят для измерения глобального проходящего излучения и/или альбедо для различных типов подстилающей поверхности.



Общий вид современного альбедометра SMA 11 (Kipp & Zonen). Верхний пиранометр измеряет суммарную проходящую солнечную радиацию, а нижний датчик измеряет солнечную радиацию, отраженную от подстилающей поверхности. Из этих двух измерений вычисляется альбедо.

В **пиргеометрах** используется тот факт, что эффективное излучение блестящих (никелированных) металлических пластинок очень мало по сравнению с излучением зачерненных пластинок. Когда прибор выставляют ночью под открытым небом, зачерненные пластинки в нем принимают более низкую температуру, чем блестящие. По этой разности температур (по силе возбужденного ею термоэлектрического тока или же компенсационным методом, как в пиргелиометре Онгстрема) определяют эффективное излучение черных пластинок, которое отождествляют с эффективным излучением земной поверхности $E_{эф}$.



Современные **пиргеометры** измеряют непосредственно инфракрасное излучение за счет специально разработанного кремневого окна, на внутренней части которого установлен светопоглощающий фильтр, не пропускающий солнечное коротковолновое излучение. Радиационный обмен измеряется в пределах целого полушария. Защитное покрытие снижает влияние температуры на чувствительность инструмента. Формируемый выходной сигнал пропорционален суммарной интенсивности проходящей ИК радиации. Интенсивность падающего инфракрасного излучения получается в дальнейшем путем небольших расчетов с учетом температурного датчика.

Радиационный баланс измеряется **балансомером**, в котором в принципе одна зачерненная приемная пластинка направлена вверх, к небу, а другая – вниз, к земной поверхности. Разница в нагревании пластинок позволяет определить величину радиационного баланса. Ночью она равна величине эффективного излучения.

Современные **балансомеры** позволяют измерить приходящие и уходящие коротковолновые (0.3 до 3 мкм) и длинноволновые (от 4.5 до 40 мкм) радиационные потоки. Приборы разработаны для использования в полевых условиях, имеют линейный мВ выход, и не требуют питания. Они имеют небольшой вес, поставляются с монтажным стержнем, пузырьковым уровнем, сертификатом о калибровке, и соответствуют требованиям ВМО



Балансомер CNR 4 (Kipp & Zonen) состоит из пары пиранометров, один направлен вверх, другой обращен вниз, и пары пиргеометров в аналогичной конфигурация. Пиранометры измеряют коротковолновое излучение, а пиргеометры измеряют длинноволновое излучение. Верхний датчик длинноволновой радиации имеет выпуклый защитный купол. Это гарантирует скатывание капель воды с принимающей поверхности пиргеометра и увеличивает поле зрения прибора до 180° по сравнению с 150° для плоского окна пиргеометра, направленного вниз. Все 4 датчика собраны в единый корпус прибора. Установленные датчики температуры используются для расчета длинноволновых (инфракрасных) потоков.

Измерители освещенности, спектрорадиометры, пирометры

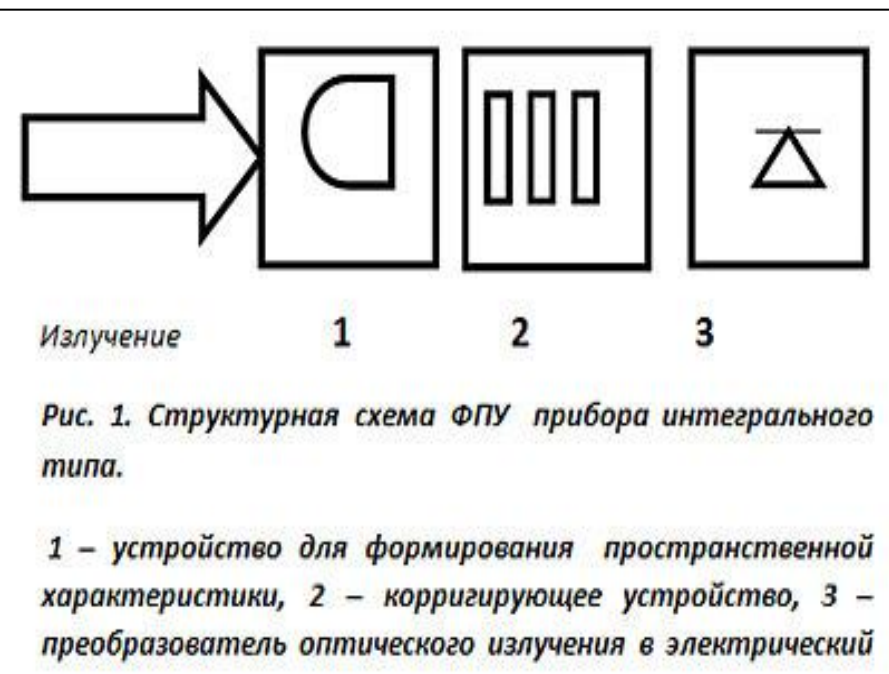
Измерения световых параметров в видимой области спектра, таких как:

координаты цветности, коррелированной цветовой температуры, яркости, освещенности, коэффициента пульсации и облученности в УФ области спектра, температуры

- необходимы при исследованиях ландшафтно-экологических проблем, связанных с энергомассопереносом. Освещенность, фотосинтез и перенос радиации в пологе растительности, спектральная температура и количественное определение координат цветности природных объектов, в т. ч., почвенных горизонтов, листьев при повреждении атмосферными загрязняющими веществами

Люксметры

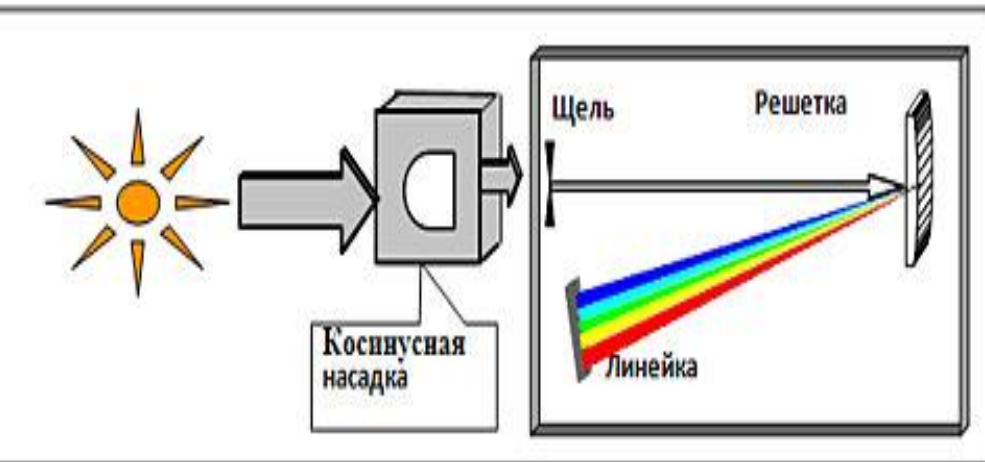
Приборы измерения освещенности измеряют сигнал от фотоэлектрических преобразователей (полупроводниковых фотоэлементов), прямо преобразующих энергию излучения в постоянный электрический ток. Фотоприемные устройства (ФПУ) являются основной частью прибора интегрального типа для измерения оптического излучения. Фотоприемное устройство содержит три части.



Устройство для формирования пространственной характеристики может быть выполнено в виде «косинусной насадки» или объектива, формирующего заданный угол зрения. Преобразователь оптического излучения в электрический сигнал может состоять из одного или нескольких фотоприемников, спектральные характеристики которых корригированы под решение заданной задачи. Для люксметра, пульсметра и яркомера используется один фотоприемник.

Спектрофотоколориметры, спектрорадиометры

В колориметрах используются фотоприемники, спектральные характеристики которых с помощью светофильтров могут быть приведены к виду удельных координат $x(l)$, $y(l)$, $z(l)$ стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г. (RGB).



Излучение, пройдя устройство формирования пространственной характеристики, попадает в диспергирующее устройство - полихроматор на дифракционной решетке с регистрацией разложенного излучения фотодиодной линейкой либо ПЗС-матрицей. Рабочий спектральный диапазон обусловлен моделью прибора и характером задач.



Люксметры (например, ТКА-ПКМ-31) компактные отечественные приборы с метрологическими характеристиками на уровне лучших мировых рабочих средств измерения. Диапазон измерения освещенности в диапазоне 10 – 200000 лк .

Спектрофотоколориметр «ТКА -ВД»

предназначен для определения спектрального состава источника оптического излучения с вычислением цветовых координат. Оптическая схема прибора представляет собой полихроматор на дифракционной решетке с регистрацией разложенного излучения фотодиодной линейкой. Рабочий спектральный диапазон прибора (380 – 760) нм. Диапазон линейности сигналов достигает шести порядков. Спектральное разрешение прибора 3 нм.



Спектрорадиометр ТКА-ВД/УФ

позволяет получить интегральные значения УФИ в любой заданной спектральной области, а также выполнить расчет приведения к функции любой эффективной величины



Бесконтактные измерители температуры (пирометры)

Бесконтактные инфракрасные радиационные измерители температуры

Оптическое тепловое инфракрасное излучение преобразуется в электрический сигнал и выдаётся информацию на дисплей и автоматически регистрируется.

Диапазон бесконтактного измерения температуры может быть различным от: -32°C ... $+1760^{\circ}\text{C}$ и выше с максимальным разрешением $0,1^{\circ}\text{C}$. Для наведения на объект применяется одноточечная лазерная указка, которая обозначает центр окружности (пятна) в соответствии с оптическим разрешением, изменяющееся от 6:1 до 50:1. Оптическое разрешение 6:1 означает, например, что при расстоянии до плоскости измеряемого объекта 120 мм диаметр измеряемого пятна будет 20 мм. Диаметр измеряемого объекта должен быть больше измеряемого пятна.

Некоторые модели имеют функцию измерения объектов и поверхностей с неизвестными свойствами и характеристиками ИК эмиссии и имеют встроенный канал для контактного измерения температуры с помощью термопары. Для этого к поверхности прикладывается зонд термопары и нажимается курок для замера ИК излучения. С помощью встроенной программы происходит уточнение значения реальной эмиссии, которое сохраняется в памяти для последующих замеров. Пирометры имеют интерфейс USB для сохранения данных на внешний Flash-носитель, наличие внутренней памяти создаёт дополнительные удобства. Приборы отличает компактность и простота использования - навел прибор на цель, нажал курок-кнопку и считай на дисплее значение температуры на поверхности объекта, и запиши в память.

Современные пирометры выпускают российские фирмы АКИП, ТЕМПУС ПЛЮС, и др

Портативный автономный соляриметр KIMO SL 200

- может измерять инсоляцию в полевых условиях. Прибор прост в обращении, позволяет выбрать и определить тепловые или фотоэлектрические особенности источников энергии. Прибор способен анализировать солнечную активность в течение, как короткого, так и продолжительного временного периода.

Функции KIMO SL 200:

- Спектральная чувствительность от 400 до 1100 nm
- Измерение мощности излучения.
- Измерение и контроль солнечной энергии в Вт/м²: мгновенное, среднее.
- Отображение минимальных, максимальных значений.
- Функция удержания, запись времени.
- Расчет энергетического воздействия в Вт-т/м² во время процедуры измерений, регулируемых по времени.
- Хранение и запись средних значений: мощности и обновления расчетов энергетического воздействия каждую минуту.
- Записанные данные могут быть прочитаны на дисплее, а графическая функция позволяет проводить быструю интерпретацию измерений.
- Считывание и графическая аппроксимация данных за 24 часа, с помощью программного обеспечения передачи данных.

Фотосинтетически активная радиация (ФАР)

- Лучистая энергия ФАР - часть потока суммарной радиации Q , которая может использоваться зелеными растениями в процессе фотосинтеза, источник всех фотохимических процессов в растениях при фотосинтезе и фитофизиологических процессов.

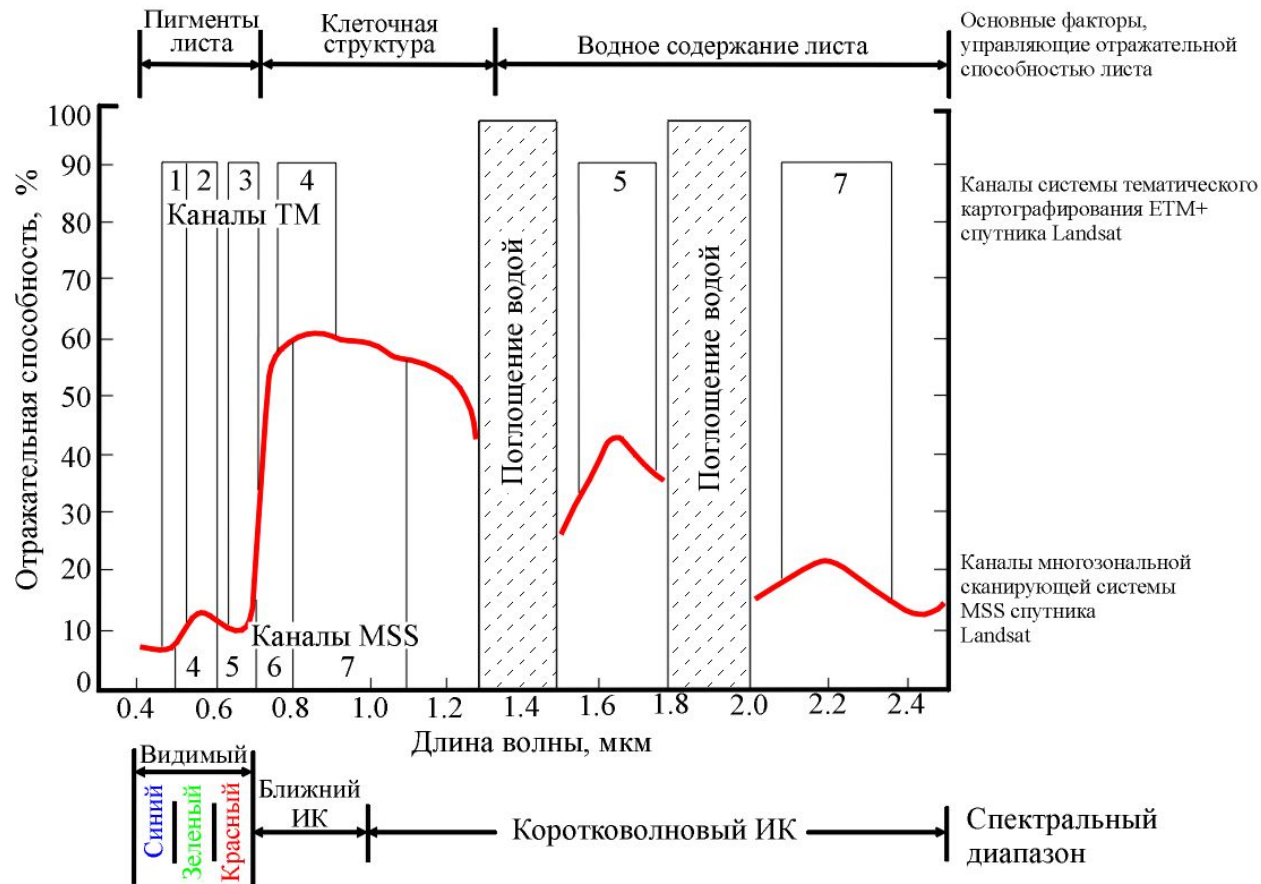
ФАР составляет:

- 50% от суммарной радиации Q
- 60% от рассеянной радиации
- 40% от прямой радиации

Поток ФАР

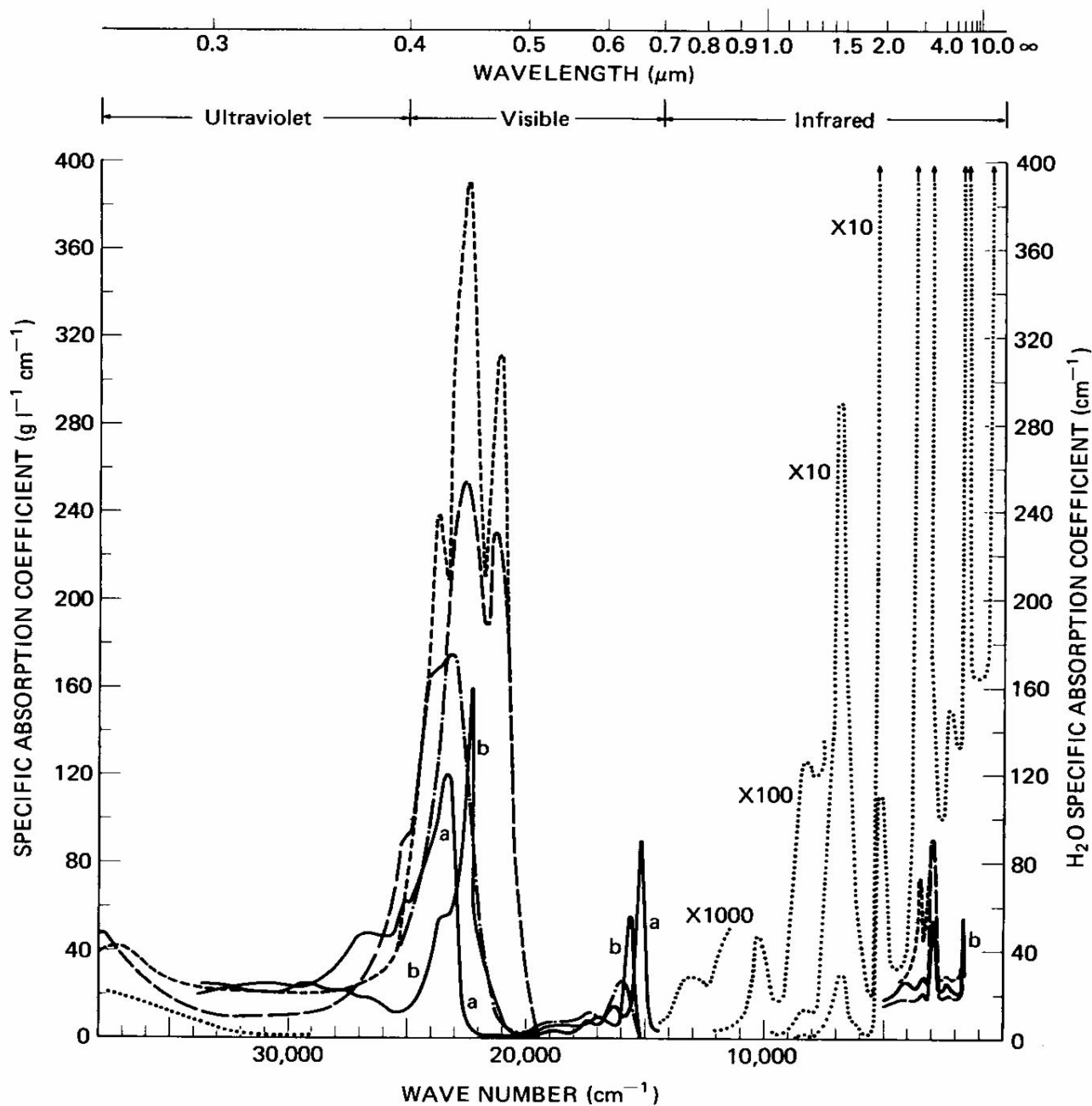
1. Частично поглощается листьями растений – 80% энергии идет на нагревание листьев (превращается в тепло) и расходуется на испарение и транспирацию, и теплообмен
2. Отражается от листовой поверхности и проходит насквозь – до 12%.
3. На фотосинтез используется несколько процентов лучистой энергии(1-4%)
КПД растительности: отношение ФАР, использованной в фотосинтезе ко всему потоку ФАР:
 - КПД обычно мал: 1-2%,
 - для агроценозов 1-3%
 - Для лесов 2-4%

Характеристический спектр зеленого листа (отражение+излучение); показаны полосы пропускания каналов датчиков систем MSS (ETM+ Landsat) [Гоутц, идр, 1985]



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
Разрешение, м/пиксел	30	30	30	30	30	30
Название канала	голубой	зеленый	красный	ближний инфракрасный	коротковолновый инфракрасный	коротко-средневолновый инфракрасный

Спектральные коэффициенты поглощения растительных пигментов



- хлорофилл;
- · - · - · протохлорофилл
- - - каротин
- — — лютеин
- жидкая вода