

19.02.20

Лекция 3

Энергия солнечной радиации и распределение в атмосфере и на земной поверхности

3.1 Солнечная радиация

Самым важным внешним источником энергии для нас является солнечная радиация и не только существующая, но и ископаемая, аккумулированная в залежах углеводородов. Ландшафт – дитя Солнца это далеко не метафора. Чтобы убедиться в этом, попытаемся проследить весь путь поступления солнечной энергии к Земле, а он не просто длинный, а ещё и достаточно сложный.

Все физические тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля, испускают **радиацию** - электромагнитные волны.

Некоторые вещества в особом состоянии излучают радиацию в большем количестве и в другом диапазоне длин волн, чем это определяется их температурой. Возможно, например, испускание видимого света при таких низких температурах, при которых вещество обычно не светится. Эта радиация, не подчиняющаяся законам теплового излучения, называется люминесцентной. Люминесценция может возникнуть, если вещество предварительно поглотив определенное количество энергии, пришло в так называемое возбужденное состояние, более богатое энергией, чем нормальное состояние при той же температуре вещества. При обратном переходе вещества — из возбужденного состояния в нормальное — и возникает люминесценция. Люминесценцией объясняются полярные сияния и свечение ночного неба.

Как и всякие волны, электромагнитные характеризуются длиной волны и частотой колебаний. **Энергия волны** обратно пропорциональна её длине и соответственно прямо пропорциональна её частоте. Видимый нами свет лишь определенная часть диапазона этих волн, к радиации относятся также и не воспринимаемые глазом гамма-лучи, рентгеновские лучи, ультрафиолетовая и инфракрасная радиация.(табл.)

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

<i>Длина, м</i>	<i>Частота, Гц</i>	<i>Наименование</i>
$10^6 - 10^4$	$3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^4$	Сверхдлинные
$10^4 - 10^3$	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	Длинные (радиоволны)
$10^3 - 10^2$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	Средние (радиоволны)
$10^2 - 10^1$	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	Короткие (радиоволны)
$10^1 - 10^{-1}$	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^9$	Ультракороткие
$10^{-1} - 10^{-2}$	$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$	Телевидение (СВЧ)
$10^{-2} - 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	Радиолокация (СВЧ)
$10^{-3} - 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{14}$	Инфракрасное излучение
$10^{-6} - 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$	Видимый свет
$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{17}$	Ультрафиолетовое излучение
$10^{-9} - 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{20}$	Рентгеновское излучение (мягкое)
$10^{-12} - 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{22}$	Гамма-излучение (жёсткое)
$\leq 10^{-14}$	$\geq 3 \cdot 10^{22}$	Космические лучи

Данные таблицы показывают, что мы живем в разнообразном по своей энергии мире электромагнитных волн. Самое жесткое - космическое излучение, но ведь живем! Важна не величина энергии, а её мощность, а это её количество, приходящее на единицу площади за единицу времени. Соответственно, количественной мерой солнечной радиации, поступающей на некоторую поверхность, служит энергетическая освещенность, или плотность потока радиации, т.е. количество лучистой энергии, падающей на единицу площади в единицу времени. Измеряется и как мощность потока в Вт/м² или в кал/см²·мин

Энергетическая освещенность изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Как известно, Земля вращается вокруг Солнца по мало растянутому эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце. В начале января Земля наиболее близка к Солнцу ($147 \cdot 10^6$ км), в начале июля — наиболее далека от него ($152 \cdot 10^6$ км). Представление о величине энергии этого излучения дает «солнечная постоянная» - суммарная мощность энергии солнечного излучения, проходящего через единичную площадь, ориентированную перпендикулярно потоку, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца в вакууме. По данным внеатмосферных измерений солнечная постоянная составляет 1367 Вт/м², или 1,959 кал/см²·мин.

3.2. Спектральный состав солнечной радиации

В спектре солнечной радиации на интервал длин волн между 0,1 и 4 мкм приходится 99% всей энергии солнечного излучения. Всего 1% остается на радиацию с меньшими и большими длинами волн, вплоть до рентгеновских лучей и радиоволн.

Благодаря измерениям со спутников, распределение энергии в спектре солнечной радиации до поступления ее в атмосферу в настоящее время известно достаточно хорошо. Видимый свет занимает узкий интервал длин волн. На инфракрасное излучение приходится 44%, а на ультрафиолетовое — 9% всей лучистой энергии Солнца.

Если рассматривать температурные условия на Земле за длительные многолетние промежутки времени, то можно принять, что Земля находится в тепловом равновесии: приход тепла от Солнца уравнивается его потерей в космическое пространство и в аккумулированную энергию осадочных горных пород. Поток тепла из глубин Земли к поверхности в 5000 раз меньше тепла, получаемого от Солнца. Часть солнечной радиации представляет собой видимый свет. Тем самым Солнце является для Земли источником не только тепла, но и света, важного для жизни на нашей планете.

3.3. Прямая солнечная радиация и её преобразования

Радиацию, приходящую к земной поверхности непосредственно от диска Солнца, не рассеянную облаками, называют **прямой** солнечной радиацией. Солнечная радиация распространяется от Солнца по всем направлениям. Но расстояние от Земли до Солнца так велико, что прямая радиация падает на любую поверхность на Земле в виде пучка параллельных лучей. Легко понять, что максимально возможное в данных условиях количество радиации получает единица площади, расположенная перпендикулярно к солнечным лучам. На верхнюю границу атмосферы солнечная радиация приходит в виде прямой радиации. При этом около 30% падающей на Землю прямой солнечной радиации сразу отражается назад в космическое пространство. Остальные 70% поступают в атмосферу.

Нерассеянная и непоглощенная в атмосфере прямая солнечная радиация достигает земной поверхности. Небольшая ее доля отражается от нее, а большая часть радиации поглощается земной поверхностью, в результате чего земная поверхность нагревается.

В результате поглощения и рассеяния радиации в атмосфере прямая радиация, дошедшая до земной поверхности, отличается от той, которая пришла на границу атмосферы. Величина потока солнечной радиации уменьшается, и спектральный состав ее изменяется, так как лучи разных

длин волн поглощаются и рассеиваются в атмосфере по-разному и в зависимости от её плотности. Поэтому, например, днем небо голубое, а на закате или восходе багровое.

Сильно поглощает радиацию в инфракрасной области спектра диоксид углерода (углекислый газ), но его содержание в атмосфере пока мало, поэтому поглощение им прямой солнечной радиации в общем невелико.

Прямая солнечная радиация на пути сквозь атмосферу ослабляется не только поглощением, но и путем рассеяния (отражения), причем ослабляется более значительно. Рассеяние — это фундаментальное физическое явление взаимодействия света с веществом. Оно может происходить на всех длинах волн электромагнитного спектра в зависимости от отношения размера рассеивающих частиц к длине волны падающего излучения. При рассеянии частица, находящаяся на пути распространения электромагнитной волны, непрерывно «извлекает» энергию из падающей волны и переизлучает ее по всем направлениям. Таким образом, частицу можно рассматривать как точечный источник рассеянной энергии.

Рассеяние солнечной радиации в атмосфере имеет огромное практическое значение, так как создает рассеянный свет в дневное время. В отсутствие атмосферы на Земле было бы светло только там, куда попадали бы только прямые солнечные лучи или отраженные предметами. Вследствие рассеянного света вся атмосфера днем служит источником освещения, и даже тогда, когда солнце скрыто облаками.

В рассеянную радиацию в атмосфере превращается около 26% энергии общего потока солнечной радиации. Около $\frac{2}{3}$ рассеянной радиации приходит затем к земной поверхности. Но это будет уже особый вид радиации, существенно отличный от прямой. Во-первых, рассеянная радиация приходит к земной поверхности не от солнечного диска, а от всего небесного свода. Во-вторых, отлична от прямой по спектральному составу, так как лучи различных длин волн рассеиваются в разной степени. Рассеяния оказываются существенно различными в зависимости от соотношения длины волны солнечного излучения и размера рассеивающих частиц. Сильным поглотителем солнечной радиации является озон. Он поглощает ультрафиолетовую и видимую солнечную радиацию. Несмотря на то, что его содержание в воздухе очень мало, он настолько сильно поглощает ультрафиолетовую радиацию в верхних слоях атмосферы, что в солнечном спектре у земной поверхности волны короче 0,29 мкм вообще не наблюдаются.

Все ослабление радиации путем поглощения и рассеяния можно разделить на две части: ослабление постоянными газами (идеальной атмосферой) и

ослабление водяным паром и аэрозольными примесями. Летом запыление возрастает, а также увеличивается содержание водяного пара в атмосфере, что уменьшает радиацию.

Альбедо

Падая на земную поверхность, суммарная радиация в большей своей части поглощается в верхнем тонком слое почвы или в более толстом слое воды и переходит в тепло, а частично отражается. Величина отражения солнечной радиации 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. Поверхность выглядит светлой – значит она отражает больше чем поглощает, чем темнее тем больше поглощает. Поэтому летом ходят в светлой одежде. Абсолютно черное тело ничего не отражает. Черная дыра в астрофизике потому и получила такое название.

Суммарная радиация

Всю солнечную радиацию, приходящую к земной поверхности — прямую и рассеянную — называют суммарной радиацией. Облачность уменьшает суммарную радиацию. Поэтому летом приход суммарной радиации в дополуденные часы в среднем больше, чем в послеполуденные. По той же причине в первую половину года он больше, чем во вторую.

Парниковый эффект

Солнечные лучи отдают атмосфере до 20 % своей энергии, которая распределяется по всей толще воздуха, и потому вызываемое ими нагревание воздуха относительно невелико. Солнце нагревает поверхность Земли, которая передает тепло атмосферному воздуху за счет **конвекции** (от лат. **convectio** - доставка), т. е. вертикального перемещения нагретого у земной поверхности воздуха, на место которого опускается более холодный воздух. Именно так атмосфера получает большую часть тепла — в среднем в три раза больше, чем непосредственно от Солнца.

Присутствие в **составе атмосферы** углекислого газа и водяного пара не позволяет теплу, отраженному от земной поверхности, беспрепятственно уходить в космическое пространство. Они создают **парниковый эффект**, благодаря которому перепад температуры на Земле в течение суток не превышает 15 °С. При отсутствии в атмосфере углекислого газа земная поверхность остывала бы за ночь на 40-50 °С.

В результате роста масштабов хозяйственной деятельности человека — сжигания угля и нефти на ТЭС, выбросов промышленными предприятиями, увеличения автомобильных выбросов — содержание углекислого газа в

атмосфере повышается, что ведет к усилению парникового эффекта и грозит глобальным изменением климата.

Солнечные лучи, пройдя атмосферу, попадают на поверхность Земли и нагревают ее, а та, в свою очередь, отдает тепло атмосфере. Этим объясняется характерная особенность тропосферы: понижение температуры воздуха с высотой. Но бывают случаи, когда высшие слои атмосферы оказываются более теплыми, чем низшие. Такое явление носит название **температурной инверсии** (от лат. *inversio* — переворачивание).

3.4. Эффективное излучение и радиационный баланс земной поверхности

Эффективное излучение. Земная поверхность теряет тепло за счет положительной разности между собственным и встречным излучением. Разность между собственным излучением земной поверхности и встречным излучением атмосферы называют эффективным излучением. Эффективное излучение, представляет собой чистую потерю лучистой энергии, следовательно, и тепла с земной поверхности ночью. Эффективное излучение, конечно, существует и в дневные часы. Но днем оно перекрывается или частично компенсируется поглощенной солнечной радиацией. Поэтому земная поверхность днем теплее, чем ночью, но и эффективное излучение днем больше.

Радиационный баланс это та часть суммарной радиации, которая остается после отражения и теплового излучения земной поверхности. По-другому, это разность между поглощенной радиацией и эффективным излучением. В ночные часы, когда суммарная радиация отсутствует, отрицательный радиационный баланс равен эффективному излучению. Радиационный баланс земной поверхности меняется в течение суток и по сезонам года, однако в среднем за год имеет положительное значение всюду, за исключением ледяных пустынь Гренландии и Антарктиды. Максимальных значений радиационный баланс достигает в низких широтах (между 20° с. ш. и 20° ю. ш.) — свыше $42 \cdot 10^2$ Дж/м², на широте около 60° обоих полушарий он снижается до $8 \cdot 10^2$ - $13 \cdot 10^2$ Дж/м².

3.5. Географическое распределение суммарной радиации и радиационного баланса

Распределение годовых и месячных количеств суммарной солнечной радиации по земному шару зонально: изолинии (т. е. линии равных значений) потока радиации на картах не совпадают с широтными кругами. Отклонения эти объясняются тем, что на распределение радиации по земному шару оказывают влияние прозрачность атмосферы и облачность.

Годовые количества суммарной радиации особенно велики в малооблачных субтропических пустынях. Зато над приэкваториальными лесными областями с их большой облачностью они снижены. К более высоким широтам обоих полушарий годовые количества суммарной радиации убывают. Но затем они снова растут — мало в Северном полушарии, но весьма значительно над малооблачной и снежной Антарктидой. Над океанами суммы радиации ниже, чем над сушей.

Радиационный баланс земной поверхности за год положительный повсюду на Земле, кроме ледяных плато Гренландии и Антарктиды. Это означает, что годовой приток поглощенной радиации больше, чем эффективное излучение за то же время. Но это вовсе не значит, что земная поверхность год от года становится все теплее. Избыток поглощенной радиации над излучением уравнивается передачей тепла от земной поверхности в воздух путем теплопроводности и при фазовых преобразованиях воды (при испарении с земной поверхности и последующей конденсации в атмосфере).

Следовательно, для земной поверхности не существует радиационного равновесия в получении и отдаче радиации, но существует тепловое равновесие: приток тепла к земной поверхности как радиационными, так и нерадиационными путями равен его отдаче теми же способами.

На океанах радиационный баланс больше, чем на суше в тех же широтах. Это объясняется тем, что радиация в океанах поглощается большим слоем, чем на суше, а эффективное излучение не такое большое вследствие более низкой температуры морской поверхности, чем поверхности суши. Существенные отклонения от зонального распределения имеются в пустынях, где баланс ниже вследствие большого эффективного излучения в сухом и малооблачном воздухе. Баланс понижен также, но в меньшей мере, в районах с муссонным климатом, где в теплое время года облачность увеличивается, а поглощенная радиация уменьшается по сравнению с другими районами под той же широтой.

Как известно, радиационный баланс является разностью между суммарной радиацией и эффективным излучением. Эффективное излучение земной поверхности распределяется по земному шару более равномерно, чем суммарная радиация. Дело в том, что с ростом температуры земной поверхности, т. е. с переходом к более низким широтам, растет собственное

излучение земной поверхности; однако одновременно растет и встречное излучение атмосферы вследствие большего влагосодержания воздуха и более высокой его температуры. Поэтому изменения эффективного излучения с широтой не слишком велики.