

Законы теплового излучения

Лучистая энергия

Свечение тел при их нагревании называется температурным или тепловым излучением. В этом случае энергия внутренних хаотических тепловых движений частиц тела (при $T > 0^\circ K$) непрерывно переходит в энергию испускаемого электромагнитного излучения. Основной количественной характеристикой теплового излучения тела является его лучеиспускательная способность (e_T), т.е. лучистая энергия, испускаемая единицей поверхности тела за единицу времени ($\text{эрг}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$ или $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot \text{сек} = \text{Вт}/\text{м}^2$) при температуре тела T . Эта энергия переносится электромагнитными волнами различной длины ($0 \leq \lambda \leq \infty$) и при изучении излучения полная лучеиспускательная способность тела (e_T) анализируется в различных диапазонах длин волн. Энергия электромагнитных волн с длиной от λ до $\lambda + d\lambda$, испускаемая единицей поверхности излучающего тела за единицу времени, пропорциональна величине выделенного интервала длин волн:

$$de_T = e_{\lambda,T} d\lambda.$$

Коэффициент пропорциональности $e_{\lambda,T}$ есть лучеиспускательная способность тела при данной температуре T для данной длины волны λ , и имеет размерность $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{м} = \text{Вт}/\text{м}^3$ (т.е. рассчитывается на единицу интервала длин волн $d\lambda = 1$). Полная лучеиспускательная способность тела e_T складывается из элементарных интервалов de_T , т.е.

$$e_T = \int de_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} e_{\lambda,T} d\lambda,$$

где интеграл распространен на весь бесконечный интервал всевозможных длин волн (Зисман, Тодес, 1970; Ландсберг, 1973, 2000; Сивухин, 2002).

С ростом температуры увеличивается интенсивность теплового движения частиц и, возрастает энергия, излучаемая телом с электромагнитными волнами любых λ . При абсолютном нуле температуры ($T = 0^\circ K$) тепловое излучение отсутствует и $e_{\lambda,0} \equiv 0$, т.е. тело не может далее уменьшать своей энергии и его тепловое излучение прекращается.

При тепловом излучении энергия теплового движения в теле переходит в энергию испускаемых электромагнитных волн. При поглощении света происходит обратный процесс перехода лучистой энергии в тепловую энергию тела. В обоих случаях взаимные превращения тепловой и лучистой энергии протекают через промежуточную стадию колебания электрических зарядов в теле. Поэтому лучеиспускательная и лучепоглощательная способности тела обусловлены одними и теми же деталями его строения и тесно связаны между собой. При этом отношение полной лучеиспускательной способности любого тела к его же поглощательной способности при данной температуре есть величина постоянная, равная испускательной способности абсолютно черного тела при той же самой температуре. Это соотношение было найдено в 1860 году Г. Кирхгофом (Kirchhof). Закон, названный его именем, формулируется следующим образом. Отношение лучеиспускательной и поглощательной способности для любых тел при одинаковой их температуре T и для одной и той же длины волны λ одинаково и не зависит от природы этих тел. Это отношение является универсальной функцией длины волны и температуры и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела $E_{\lambda,T}$:

$$\frac{e_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = E_{\lambda,T}$$

Поскольку для абсолютно черного тела лучепоглощение $a = 1$ (поглощает все падающие на него лучи), а для других тел $a_{\lambda,T} < 1$, то из закона Кирхгофа следует весьма

важное утверждение. Излучение, которое тело сильнее поглощает, сильнее и испускается. При данной температуре

$$e_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot E_{\lambda,T} < E_{\lambda,T},$$

т.е. тепловое излучение абсолютно черного тела во всех частях спектра интенсивнее, чем для нечерного тела, нагретого до той же самой температуры.

В 1878 году Й. Стефаном (Stefan), а в 1884 году Л. Больцманом (Boltzmann) была доказана пропорциональность полной лучеиспускательной способности абсолютно черного тела четвертой степени его абсолютной температуры т.е.

$$E_T = \sigma T^4.$$

Это соотношение получило название закона Стефана – Больцмана.

Исследуя спектральное распределение излучения В. Вин (Wien) показал, что максимум лучеиспускательной способности находится на некоторой длине волны λ_{max} , которая связано с абсолютной температурой T соотношением

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{const.}$$

Таким образом, с ростом температуры максимум лучеиспускательной способности абсолютно черного тела смещается в сторону более коротких волн. Это соотношение получило название закона смещения Вина (Кондратьев, Филипович, 1960; Зисман, Тодес, 1970; Ландсберг, 1973, 2000; Сивухин, 2002).

Это законы волновой электромагнитной теории света. Однако, физики столкнулись с проблемами при изучении излучения с короткими длинами волн («ультрафиолетовая катастрофа»), что указало на теоретические дефекты и необходимость пересмотра принципиальных положений этой теории. В 1901 году М. Планк высказал предположение о том, что излучение испускается телами не непрерывно, но в виде отдельных порций (дискретно). Энергия каждой такой порции – кванта излучения – пропорциональна его частоте:

$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, где h - универсальная постоянная, одинаковая по всему спектру и получившая впоследствии название постоянной Планка ($6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · сек). В результате Планк получил выражение для лучеиспускательной способности абсолютно черного тела (формула Планка):

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}.$$

Согласно формуле Планка для каждой данной длины волны λ с ростом температуры показатель $\frac{hc}{\lambda kT}$ и величина, стоящая в знаменателе, $e^{\frac{hc}{\lambda kT}}$, убывают, а сама дробь возрастает. Следовательно, с ростом температуры возрастает и лучеиспускательная способность во всех участках спектра, но в различной степени. Из формулы Планка вытекают также законы теплового излучения Стефана – Больцмана и Вина (Кондратьев, Филипович, 1960; Кондратьев, 1954, 1965; Бакулин и др., 1966, 1983; Хргиан, 1986; Зисман, Тодес, 1970; Ландсберг, 2000; Сивухин, 2002).

Распространение излучения

Для пространственных задач распространения излучения существенно понятие о телесном угле (Перрен де Бришамбо, 1966; Зисман, Тодес, 1970; Ландсберг, 1973). Мерой телесного угла является отношение площади dS_0 участка, вырезаемого конусом на по-

верхности сферы к квадрату ее радиуса r , т.е. $d\omega = \frac{dS_0}{r^2}$ (рис. 1). За единицу телесного угла принят телесный угол, опирающийся на участок поверхности сферы, площадь которого равна квадрату ее радиуса ($dS_0 = r^2$). Эта единица называется стерадиан (*стер*). Наибольший телесный угол равен, очевидно, 4π стер (площадь всей поверхности сферы $4\pi r^2$).

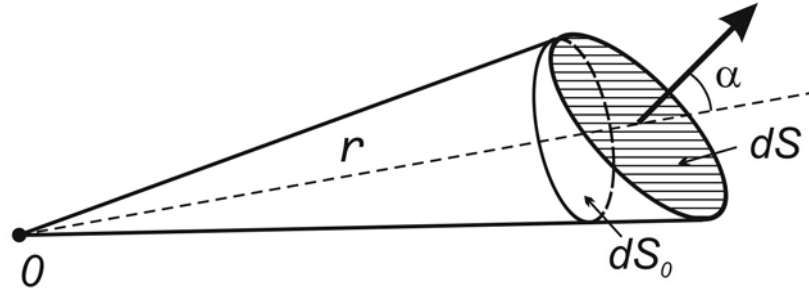


Рис. 1. Телесный угол.

Как видно из рисунка 1 площадка dS , нормаль к которой n составляет угол α с радиусом r , проведенным из точки наблюдения O , видна из этой точки O , под телесным углом

$$d\omega = \frac{dS_0}{r^2} = \frac{dS \cos\alpha}{r^2}. \quad (1)$$

Основной энергетической величиной излучения является лучистый поток Φ (Миланкович, 1939; Кондратьев, 1965; Зисман, Годес, 1970; Ландсберг, 2000) Эта величина характеризует энергию, проходящую через данную поверхность за единицу времени, и измеряется соответственно в единицах мощности (*Вт, эрг/сек*).

На рис. 2 изображен точечный источник S и, выделен телесный угол $d\omega$ с вершиной в точке S .

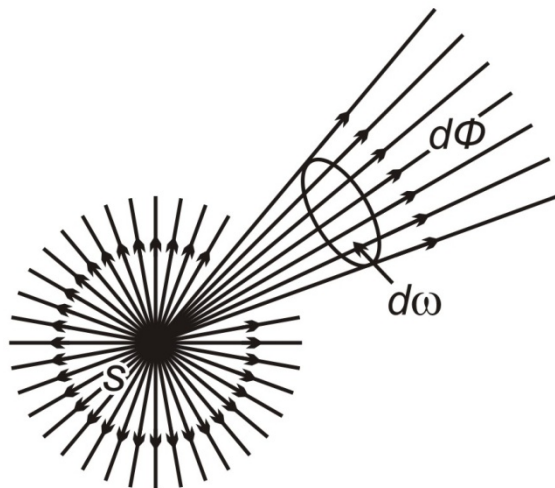


Рис. 2. Лучистый поток.

Если обозначить лучистый поток, заключенный в телесном угле $d\omega$, через $d\Phi$, тогда соотношение $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$ является силой излучения точечного источника в данном направлении. Из этого соотношения следует, что сила излучения характеризуется величиной потока, заключенного в единице телесного угла, и измеряется соответственно в *Вт/стер* или *эрг/сек · стер*. Если поток, испускаемый точечным источником, равномерный во всех направлениях, то

$$I = \frac{\Phi}{\omega} = \frac{\Phi}{4\pi} \text{ и } \Phi = 4\pi I, \quad (2)$$

где Φ - полный лучистый поток, испускаемый источником по всем направлениям, т.е. во всем телесном угле $\omega = 4\pi$. Если же поток неравномерен, то формула (2) определяет среднюю силу излучения источника.

Интенсивность излучения протяженного источника характеризуется его лучистостью. Она численно равна силе излучения в данном направлении, создаваемой единицей площади видимой поверхности источника (измеряется в $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{стер}$ или $\text{эрг}/\text{сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{стер}$). Лучистость протяженного источника может быть различной в разных направлениях. Однако, для таких источников, как Солнце величина лучистости не зависит от направления наблюдения. Т.е. сила излучения (света) такого источника пропорциональна косинусу угла с нормалью (закон Ламберта) и максимальна в направлении нормали. Если поверхность испускает лучистый поток Φ по всем направлениям (в телесном угле 2π), то лучистый поток, испускаемый единицей площади, $\frac{\Phi}{S} = R$ характеризует плотность излучения (светимость) источника и измеряется в $\text{Вт}/\text{м}^2$ или $\text{эрг}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$.

Понятие облученности (освещенности) E относится уже не к источникам излучения (света), а характеризует интенсивность лучистой энергии, падающей на освещаемую поверхность. Величина E численно равна величине потока, падающего на единицу освещаемой поверхности, т.е. $E = \frac{d\Phi}{dS}$ (измеряется в $\text{Вт}/\text{м}^2$ или $\text{эрг}/\text{сек} \cdot \text{см}^2$).

Если произвольно ориентированная в пространстве площадка dS освещается точечным источником O (рис. 1), то согласно формуле (1) $dS = \frac{r^2}{\cos \alpha} d\omega$, где r – расстояние от источника до площадки, α - угол между направлением лучей и нормалью к площадке, а $d\omega$ - телесный угол, под которым видна площадка dS из точечного источника O . Освещенность этой поверхности

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{d\Phi \cos \alpha}{d\omega \cdot r^2} = \frac{I \cos \alpha}{r^2}, \quad (3)$$

так как $\frac{d\Phi}{dS}$ есть сила света источника I .

Формула (3) выражает два закона освещенности:

1. Освещенность площадки обратно пропорциональна квадрату расстояния от точечного источника (закон обратных квадратов).
2. Освещенность площадки прямо пропорциональна косинусу угла между направлением лучистого потока и нормалью к площадке (закон косинуса).

Соляренный климат Земли

Под соляренным климатом (радиационный климат) понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной радиации на верхней границе атмосферы (Алисов, Полтараус, 1974; Хромов, Петросянц, 2006).

Солнце по своим лучеиспускаемым свойствам близко к абсолютно черному телу. Распределение энергии в спектре солнечной радиации (до поступления ее в атмосферу) достаточно близко к теоретически полученному для абсолютно черного тела при температуре 6000°K . Максимум лучистой энергии приходится в обоих случаях на диапазоны с длинами волн около $0,47 \text{ мк}$ (зелено-голубые лучи видимой части спектра). Однако в ультрафиолетовом диапазоне солнечного спектра энергии существенно меньше, чем в ультрафиолетовой области спектра абсолютно черного тела при температуре 6000°K . Таким

образом, Солнце в точности не является абсолютно черным телом. Однако указанную температуру (6000°K) принято считать близкой к реальной температуре на поверхности Солнца (Эйгенсон, 1963; Хромов, 1968; Кондратьев, 1965; Гарвей, 1982; Хргиан, 1986; Хромов, Петросянц, 2006).

В спектральном составе солнечной радиации на интервал длин волн между 0,1 и 4 мк приходится 99% всей энергии солнечной радиации. Всего 1% остается на радиацию с меньшими и большими длинами волн, вплоть до рентгеновских лучей и радиоволн. Видимый свет занимает узкий интервал длин волн, всего от 0,4 до 0,75 мк. Однако в этом интервале заключается почти половина всей солнечной лучистой энергии (46%). Почти столько же (47%) приходится на инфракрасные лучи, а остальные 7% - на ультрафиолетовые (Хромов, 1968; Гарвей, 1982; Хромов, Петросянц, 2006). Видимое излучение Солнца отличается большим постоянством (изменение его светимости составляет не более 2%). Ультрафиолетовая и рентгеновская области спектра более значительно изменяются с изменением активности Солнца. Изменяется также интенсивность корпускулярного излучения. Солнечная активность проявляется в ряде образований, возникающих в атмосфере Солнца: солнечные пятна, факелы, флоккулы, вспышки (Струве и др., 1967; Бакулин и др., 1983; Ермолаев, 1975; Неклюкова, 1976; Поток энергии Солнца., 1980; Ливингстон, 1982; Макарова и др., 1991; Мордвинов, 1998; Foukal, 2004).

Соляренный климат Земли определяется распределением лучистой энергии Солнца, поступающей на внешнюю границу земной атмосферы. Солнце непрерывно излучает в мировое пространство энергию, мощность потока которой приблизительно составляет $3,94 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$. На диск Земли приходится часть этой энергии равная произведению солнечной постоянной на площадь большого круга Земли. При среднем радиусе Земли равном 6371 км, площадь большого круга составляет $1,275 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$, а приходящая на нее лучистая энергия равна $1,743 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$. Годовой приход солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы Земли составляет $5,49 \cdot 10^{24} \text{ Дж}$. (Дроздов и др., 1989; Хромов, Петросянц, 2006; Абдусаматов, 2009).

Мерой соляренного климата является солнечная постоянная, представляющая поток (другие названия: плотность потока радиации, интенсивность) солнечной радиации на внешней границе атмосферы (Алисов, Полтараус, 1974). Размеры Земли и Солнца очень малы по сравнению с расстоянием между ними, поэтому можно считать падающие на Землю солнечные лучи параллельными. Солнечная постоянная, таким образом – это полное количество солнечной энергии по всему спектру, падающее за единицу времени на единицу площади перпендикулярную солнечным лучам на среднем расстоянии Земли от Солнца за пределами земной атмосферы. (Миланкович, 1939; Алисов и др., 1952; Кондратьев, 1965; Эдди, 1980; Фрелих, 1980; Монин, 1982; Бакулин и др., 1983).

Солнечная постоянная зависит от излучательной способности Солнца и от расстояния между Землей и Солнцем. Излучательная способность Солнца (солнечная активность) периодически меняется. Заметили это, прежде всего по изменениям числа солнечных пятен и даже установили средний период изменений равный 11 годам. Это оказалось верным для всего комплекса солнечной активности: распространенность факелов и флоккул, частота вспышек, количество протуберанцев, форма короны. Но так как интервалы между максимумами солнечной активности колеблются от 7 до 17 лет, а между минимумами от 9 до 14, правильнее говорить о ее 11-летнем цикле (цикл Швабе – Вольфа), а не периодичности. Выделяются и другие циклы, но вопрос о периодизации солнечной активности

нельзя считать завершенным (Ермолаев, 1975; Неклюкова, 1976; Гриббин, 1980; Витинский, 1983; Полтараус, Кислов, 1986; Хргиан, 1986; Кондратьев, 1987; Макарова и др., 1991; Предстоящие изменения..., 1991; Абдусаматов, 2009).

Если обозначить l_0 – среднее расстояние между Землей и Солнцем, то при другом расстоянии l_x поток солнечной радиации составит $I_x = I_0 \left(\frac{l_0}{l_x}\right)^2$. Выражение $\left(\frac{l_0}{l_x}\right)^2$ характеризует уменьшение плотности потока излучения при увеличении расстояния от Солнца (Полтараус, Кислов, 1986; Хргиан, 1986).

Земля вращается вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце (рис. 3). В начале января (в современную эпоху) она наиболее близка к Солнцу (147 млн. км), в начале июля – наиболее далека от него (152 млн. км).

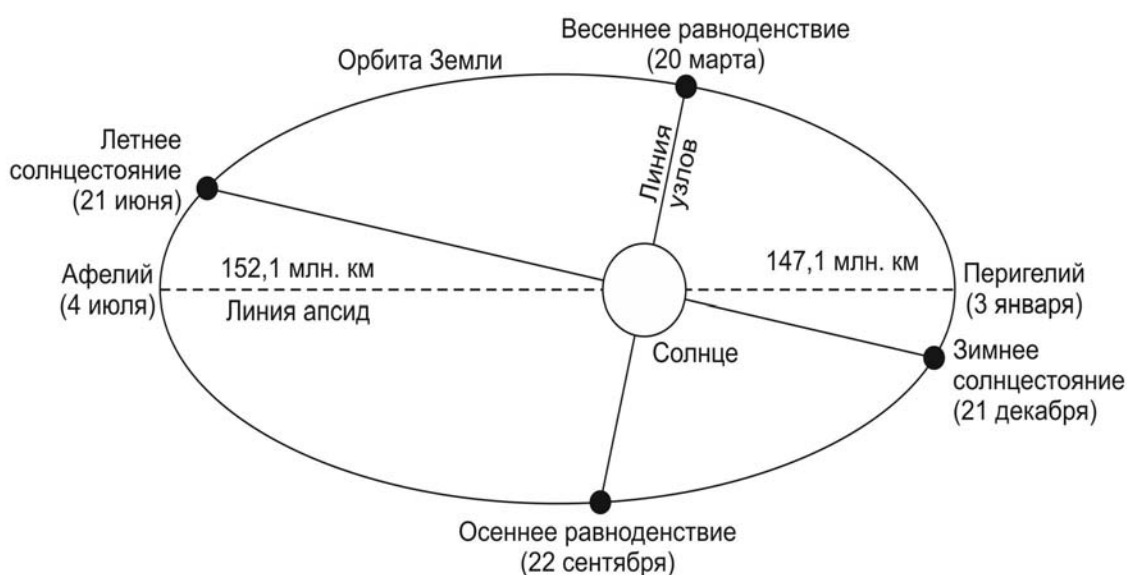


Рис. 3. Эллиптическая невозмущенная орбита Земли и положение её кардинальных точек в современную эпоху.

Так как интенсивность радиации меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, то солнечная постоянная в течение года меняется и имеет правильный годовой ход (Алисов и др., 1952; Кондратьев, 1965; Кислов, 2001; Хромов, Петросянц, 2006). Отклонение интенсивности солнечной радиации на внешней границе атмосферы от средней величины солнечной постоянной (амплитуда годовой вариации) составляет около 3,5% (рис. 4). В январе солнечная постоянная приблизительно на $0,07 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$ (около 49 Вт/м^2) больше, а в июле на такую же величину меньше, чем при среднем расстоянии между Землей и Солнцем. Это годовая вариация, связанная с эллиптическим движением и изменением расстояний между Землей и Солнцем в течение года (афелий – перигелий).

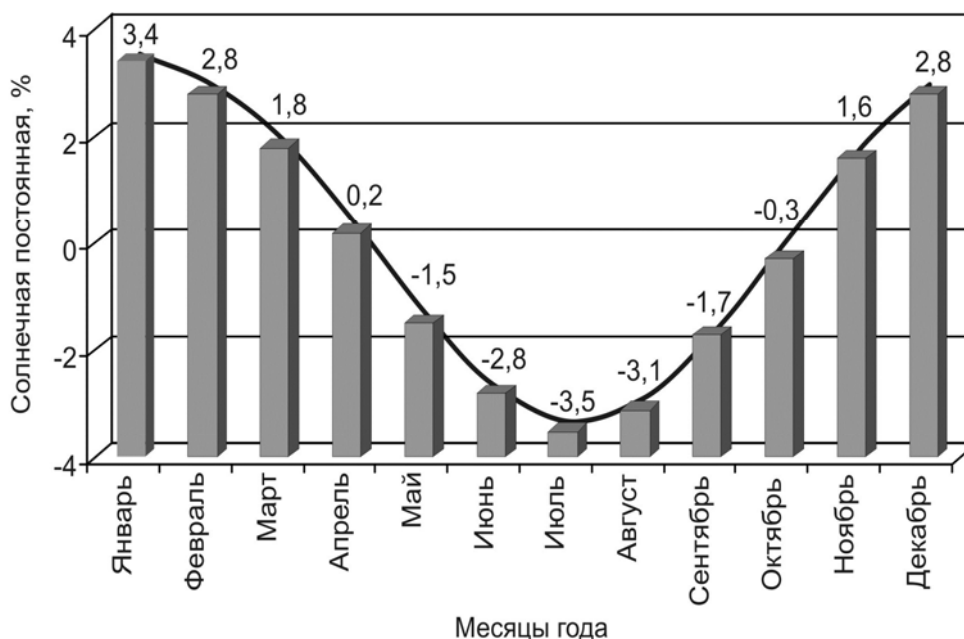


Рис. 4. Годовой ход солнечной постоянной в процентах, по отношению к ее значению при среднем расстоянии Земли от Солнца (*a.e.*). По данным [Б.П. Алисова](#), [О.А. Дроздова](#) [Е.С. Рубинштейн](#), 1952; [Б.В. Полтарауса](#) и [А.В. Кислова](#), 1986.

По данным внеатмосферных наблюдений солнечная постоянная составляет $1367 \text{ Вт/м}^2 (\pm 0,3\%)$ или $1,959 \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$ ([Хромов, 1968](#); [Lamb, 1972](#); [Stringer, 1972](#); [Витвицкий, 1980](#); [Полтараус, Кислов, 1986](#); [Кислов, 2001](#); [Хромов, Петросянец, 2006](#)). Это значение используется и в наших исследованиях.

Солнечная постоянная определяется соотношением:

$$S_o = \frac{\sigma R^2 T_{\text{эфф}}^4}{A^2},$$

где σ - постоянная Стефана – Больцмана, A – астрономическая единица, R – радиус Солнца, $T_{\text{эфф}}$ – эффективная температура фотосферы ([Абдусаматов, 2009](#)).

В соллярном климате выражена асимметрия в инсоляции полугодий. В летнее полугодие (для северного полушария) при орбитальном движении от точки весеннего равноденствия к точке летнего солнцестояния и далее – к точке осеннего равноденствия, Земля проходит окрестности афелия своей орбиты, то есть находится на большем расстоянии r от Солнца (около $1,52 \cdot 10^{13} \text{ см}$). В зимнее (для северного полушария) полугодие, когда Земля проходит путь от точки осеннего равноденствия к точке зимнего солнцестояния (рис. 3) и далее к точке весеннего равноденствия, она проходит окрестности перигелия орбиты, то есть, находится на наименьшем расстоянии от Солнца (около $1,47 \cdot 10^{13} \text{ см}$). При отмеченном изменении расстояния Земля, в зимнее (для северного полушария) полугодие, должна получать большее количество энергии, чем в летнее, в связи с соответствующими расстояниям изменениями солнечной постоянной. Принято считать, что в связи с тем, что летнее (для северного полушария) полугодие продолжительнее зимнего (186 и 179 суток соответственно), в целом за год эти различия в притоке общей солнечной энергии на верхнюю границу атмосферы между полугодиями сглаживаются. То есть, в течение года полугодия получают одинаковое количество суммарной солнечной радиации ([Перен](#)

де Бришамбо, 1966; Монин, Шишков, 1979; Монин, 1982; Полтараус, Кислов, 1986). Это следует и из второго закона Кеплера для невозмущенного движения.

Другой характерной особенностью распределения инсоляции является сезонность. Выделяются четыре астрономических сезона (весенний, летний, осенний и зимний), разделяемых положением Солнца на эклиптике в кардинальных точках ($\lambda = 0$ – точка весеннего равноденствия; $\lambda = \pi/2$ – точка летнего солнцестояния; $\lambda = \pi$ – точка осеннего равноденствия; $\lambda = 3\pi/2$ – точка зимнего солнцестояния; λ – долгота Солнца на эклиптике, отсчитываемая от точки весеннего равноденствия в сторону, противоположную суточному движению небесной сферы). При этом, из второго закона (закона площадей) Кеплера для невозмущенного движения следует, что инсоляция весной в точности равна инсоляции в течение лета, а инсоляция осенью – зимней инсоляции (Перен де Бришамбо, 1966; Монин, Шишков, 1979; Монин, 1982; Полтараус, Кислов, 1986).

Изменение расстояния между Землей и Солнцем связанное с многовековыми колебаниями элементов земной орбиты: наклона экватора к эклиптике, эксцентриситета и долготы перигелия приводит к соответствующим изменениям в поступлении солнечной радиации к Земле ([астрономическая теория климата](#)). Суммарная годовая инсоляция при этом остается неизменной, происходит лишь ее перераспределение между сезонами и различными широтными зонами Земли (Полтараус, Кислов, 1986). Это действительно справедливо, но только если рассматривать такие многовековые колебания по отношению к кеплеровскому, невозмущенному движению Земли.

Таким образом, в современной геофизике и климатологии солярный климат рассматривается, в основном, исходя из представлений о невозмущенном (кеплеровском) движении Земли по эллиптической орбите. Однако, реальное движение Земли является, по крайней мере, возмущенным. В этом случае, отмеченные для невозмущенного движения соотношения в поступлениях солнечной энергии за сезоны, полугодия (энергетическое равенство) и годы, строго не выполняются ([результаты](#), [публикации](#)). Поэтому одной из основных задач исследования солярного климата Земли (исходя из его определения) является выполнение расчетов солнечной радиации приходящей на верхнюю границу атмосферы Земли с учетом ее возмущенного движения на интервале времени малой продолжительности. Эти расчеты позволяют определить реальные энергетические соотношения между астрономическими сезонами, полугодиями и тропическими годами в отдельных широтных зонах, полушариях и на Земле в целом. Для изучения динамики солярного климата, с учетом возмущенного орбитального движения Земли и поисков связи изменений глобального климата Земли с вариациями ее солярного климата подобные расчеты представляются вполне актуальными (Кондратьев, 1987).

Литература

1. Абдусаматов Х.И. Солнце диктует климат Земли. – СПб.: Логос, 2009. – 197 с.
2. Алисов Б.П., Дроздов О.А., Рубинштейн Е.С. Курс климатологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1952. – 488 с.
3. Алисов Б.П., Полтараус Б.В. Климатология. – М.: Московский университет, 1974. – 210 с.
4. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. – М.: Наука, 1966. – 528 с.
5. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. – М.: Наука, 1983. – 560 с.
6. Витвицкий Г.Н. Зональность климата Земли. – М.: Мысль, 1980. – 253 с.
7. Витинский Ю.И. Солнечная активность. – М.: Наука, 1983. – 192 с.
8. Гарвей Д. Атмосфера и океан. – М.: Прогресс, 1982. – 184 с.
9. Гриббин Дж. Поиск цикличности / Изменения климата. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – с. 188 – 202.

10. Дроздов О.А., Васильев Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный В.П. Климатология. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 568 с.
11. Ермолаев М.М. Введение в физическую географию. – Л.: ЛГУ, 1975. – 250 с.
12. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – М.: Наука, 1970. – т. III. – 496 с.
13. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. – М.: МАИК «Наука / Интерпериодика», 2001. – 351 с.
14. Кондратьев К.Я. Лучистая энергия Солнца. – Л.: Гидрометеоздат, 1954. – 600 с.
15. Кондратьев К.Я. Актинометрия. – Л.: Гидрометеоздат, 1965. – 692 с.
16. Кондратьев К.Я. Глобальный климат и его изменения. – Л.: Наука, 1987. – 232 с.
17. Кондратьев К.Я., Филипович О.П. Тепловой режим верхних слоев атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1960. – 356 с.
18. Ландсберг Г.С. (ред). Элементарный учебник физики. – М.: Наука, 1973. – т. 1. – 656 с.
19. Ландсберг Г.С. (ред). Элементарный учебник физики. – М.: Физматлит, 2000. – т. 1. – 608 с.
20. Ливингстон У.К. Поток солнечного излучения в системе солнечно-земных связей / Солнечно-земные связи, погода и климата. – М.: Мир, 1982. – с. 61 – 76.
21. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. – М.: Наука, 1991. – 400 с.
22. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.–Л.: ГОНТИ, 1939. – 208 с.
23. Монин А.С. Введение в теорию климата. – Л.: Гидрометеоздат, 1982. – 246 с.
24. Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 408 с.
25. Мордвинов А. В. Вариации потока излучения Солнца и энергетика активных областей // Известия РАН, сер. физическая, 1998. – т. 62. – № 6. – с. 1204 – 1205.
26. Неклюкова Н.П. Общее землеведение. М.: Просвещение, 1976. – 336 с.
27. Перрен де Бришамбо Ш. Солнечное излучение и радиационный обмен в атмосфере. – М.: Мир, 1966. – 320 с.
28. Полтараус Б.В., Кислов А.В. Климатология (Палеоклиматология и теория климата). – М.: МГУ, 1986. – 144.
29. Поток энергии Солнца и его изменения / Ред. О.Р. Уайт. – М.: Мир, 1980. – 560 с.
30. Предстоящие изменения климата. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 272 с.
31. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – М.: Физматлит, 2002. – т. 2. – 576 с.
32. Струве О., Линдс Б., Пилланс Э. Элементарная астрономия. – М.: Наука, 1967. – 468 с.
33. Фрëлих К. Современные измерения солнечной постоянной / Поток энергии Солнца и его изменения. Ред. О. Уайт. – М.: Мир, 1980. – с. 110 – 127.
34. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. – М.: МГУ, 1986. – 328 с.
35. Хромов С.П. Метеорология и климатология для географических факультетов. Л.: Гидрометеоздат, 1968. – 492 с.
36. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. – М.: МГУ, 2006. – 582 с.
37. Эдди Дж. А. Интегральный поток солнечной энергии / Поток энергии Солнца и его изменения. Ред. О. Уайт. – М.: Мир, 1980. – с. 32 – 36.
38. Эйгенсон М.С. Солнце, погода и климат. – Л.: Гидрометеоздат, 1963. – 276.
39. Foukal P.V. Solar astrophysics. – 2nd rev. ed. – Weinheim: Wiley-VCH, 2004. – 480 p.
40. Lamb H.H. Climate: present, past and future. – London.: Methuen, 1972. – v. 1. Fundamentals and Climate Now. – 648 p.
41. Stringer E.T. Foundations of Climatology. Freeman, 1972. – 586 p.