

ОБ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОЗМОЖНЫХ ДНЕВНЫХ СУММ ПРЯМОЙ РАДИАЦИИ

И. УНДЛА

Рассматривается зависимость изменчивости возможных дневных сумм прямой солнечной радиации от колебания эффективной прозрачности атмосферы.

Актинометрическими наблюдениями установлено, что изменчивость возможных дневных сумм прямой радиации, хотя эти суммы соответствуют отсутствию облачности, т. е. отсутствию облаков и туманов, может совершаться в довольно широких пределах. Учет этого вариационного явления помогает повышению точности расчетов сумм прямой радиации и, следовательно, представляет собой задачу довольно большой практической важности.

Изменчивость возможных дневных сумм прямой радиации обусловлена колебаниями эффективной прозрачности атмосферы. Задача предлагаемой работы состоит в том, чтобы более подробно выяснить, как зависит изменчивость возможных дневных сумм прямой радиации от колебания эффективной прозрачности атмосферы и какова при этом роль годового изменения высоты Солнца.

При рассмотрении указанных здесь вопросов мы исходили из возможных дневных сумм прямой радиации, падающей на горизонтальную поверхность (назовем эти суммы возможными дневными суммами инсоляции). В основу анализа взяты относительные возможные дневные суммы инсоляции (α'_6), т. е. $\alpha'_6 = \frac{\Sigma S'_6}{\Sigma S'_0}$, где $\Sigma S'_6$ — действительная воз-

можная дневная сумма инсоляции, $\Sigma S'_0$ — средняя сглаженная возможная дневная сумма (она имеет постоянное значение для данного календарного дня, т. е. в данном географическом пункте).

Следует отметить, что исследование вариаций значений α'_6 является эквивалентным исследованию колебания возможных дневных сумм прямой радиации, падающей на перпендикулярную к солнечным лучам поверхность, так как $\frac{\Sigma S'_6}{\Sigma S'_0} = \frac{\Sigma S_6}{\Sigma S_0}$, где ΣS_6 и ΣS_0 — соответствующие абсолютные суммы на перпендикулярную поверхность.

Возможную дневную сумму инсоляции можно выразить, исходя из формулы Буге, в следующем виде:

$$\Sigma S'_6 = \frac{I_0}{r^2} \int_{t_B}^{t_3} p_m^m \sin h_{\odot} dt, \quad (1)$$

где I_0 — солнечная постоянная,
 r — расстояние между Землей и Солнцем, выраженное в астрономических единицах,
 m — относительная длина пути, проходимая солнечными лучами в атмосфере, т. е. так называемая масса атмосферы,
 ρ_m — интегральный коэффициент прозрачности атмосферы,
 h_\odot — высота Солнца,
 t — время (t_B — момент восхода, t_3 — момент захода Солнца).

Но подинтегральную функцию, входящую в формулу (1), можно выразить через эффективные величины. Такие величины являются какими-то средними, которые не изменяются в течение дня. Можем написать, что

$$\Sigma S'_6 = \frac{I_0}{r^2} \rho_{m_3}^m \sin h_3 \int_{t_B}^{t_3} dt, \quad (2)$$

где m_3 — эффективная масса атмосферы, ρ_{m_3} — эффективный коэффициент прозрачности атмосферы, h_3 — эффективная высота Солнца. Понятие последних двух эффективных величин является здесь аналогичным понятию эффективной прозрачности, указанному в работах [1, 2], но при предположении, что в исходную формулу вводится значение эффективного коэффициента прозрачности. Выражение $\frac{I_0}{r^2} \rho_{m_3}^m \sin h_3$ представляет собой среднюю плотность возможных инсоляционных потоков.

Эффективная масса определяется из условия, что по ее значению, подставленному либо в формулу

$$\Sigma S'_6 = \frac{I_0}{r^2} \int_{t_B}^{t_3} \rho_{m_3}^m \sin h_\odot dt,$$

либо в формулу

$$\Sigma S_6 = \frac{I_0}{r^2} \int_{t_B}^{t_3} \rho_{m_3}^m dt,$$

получается правильное значение возможной дневной суммы, соответствующее заданному значению эффективного коэффициента прозрачности. Эффективная высота Солнца определяется аналогично из формулы

$$\Sigma S'_6 = \frac{I_0}{r^2} \int_{t_B}^{t_3} \rho_{m_3}^m \sin h_\odot dt.$$

Но эффективную высоту Солнца можно определить и по эффективной массе атмосферы (возможно также обратное действие).

Обозначим продолжительность дня через Δt , т. е. $\int_{t_B}^{t_3} dt = \Delta t$, и выразим формулу (2) в виде

$$\Sigma S'_6 = \frac{I_0}{r^2} \rho_{m_3}^m \sin h_3 \Delta t. \quad (3)$$

Средняя сглаженная возможная дневная сумма, согласно формуле (3), выразится в виде

$$\Sigma S'_0 = \frac{I_0}{r_{(0)}^2} p_{m_{\Sigma}, 0}^{m_{\Sigma}, 0} \sin h_{\Sigma, 0} \Delta_0 t, \quad (4)$$

где $r_{(0)}$, $m_{\Sigma, 0}$, $p_{m_{\Sigma}, 0}$, $h_{\Sigma, 0}$ и $\Delta_0 t$ соответствуют значению $\Sigma S'_0$.

Относительную возможную дневную сумму инсоляции можно выразить теперь через формулы (3) и (4), т. е.

$$\alpha'_6 = \frac{\frac{I_0}{r^2} p_{m_{\Sigma}}^{m_{\Sigma}} \sin h_{\Sigma} \Delta t}{\frac{I_0}{r_{(0)}^2} p_{m_{\Sigma}, 0}^{m_{\Sigma}, 0} \sin h_{\Sigma, 0} \Delta_0 t}. \quad (5)$$

Так как в соотношении $\frac{\Sigma S'_6}{\Sigma S'_0}$ оба члена относятся к одному и тому же календарному дню, то можно предположить, что в формуле (5) $r = r_{(0)}$, $m_{\Sigma} = m_{\Sigma, 0}$, $h_{\Sigma} = h_{\Sigma, 0}$ и $\Delta t = \Delta_0 t$, причем расхождениями, которые могут здесь наблюдаться, можно пренебречь.

Следовательно, можно написать

$$\alpha'_6 = \left(\frac{p_{m_{\Sigma}}}{p_{m_{\Sigma}, 0}} \right)^{m_{\Sigma}, 0}. \quad (6)$$

Отклонение относительной возможной дневной суммы инсоляции ($\Delta \alpha'_6$) определяется формулой

$$\Delta \alpha'_6 = \alpha'_6 - 1, \quad (7)$$

но принимая во внимание формулу (6), имеем

$$\Delta \alpha'_6 = \left(\frac{p_{m_{\Sigma}}}{p_{m_{\Sigma}, 0}} \right)^{m_{\Sigma}, 0} - 1. \quad (8)$$

Причина колебания относительных возможных дневных сумм инсоляции заключается в колебании относительного эффективного коэффициента прозрачности атмосферы (ϵ), т. е. $\epsilon = \frac{p_{m_{\Sigma}}}{p_{m_{\Sigma}, 0}}$. Вариация названных сумм наблюдается при условии $p_{m_{\Sigma}} \neq p_{m_{\Sigma}, 0}$, так как в этом случае $\alpha'_6 \neq 1$ и $\Delta \alpha'_6 \neq 0$ (т. е. $\Sigma S'_6 \neq \Sigma S'_0$). Но при условии $p_{m_{\Sigma}} = p_{m_{\Sigma}, 0}$ $\alpha'_6 = 1$, т. е. $\Delta \alpha'_6 = 0$, вариация сумм отсутствует ($\Sigma S'_6 = \Sigma S'_0$).

Амплитуда колебания относительных возможных дневных сумм инсоляции зависит от соотношения $\frac{p_{m_{\Sigma}}}{p_{m_{\Sigma}, 0}}$ и от $m_{\Sigma, 0}$. Раздельный учет зависимости от $m_{\Sigma, 0}$ является необходимым особенно при рассмотрении колебания относительных сумм, относящихся к различным эффективным массам атмосферы. Различие рассматриваемых масс обусловлено как годовым, так и географическим изменением m_{Σ} , причем изменчивостью m_{Σ} можно практически пренебречь.

Нередко прозрачность атмосферы характеризуется при помощи фактора мутности. Из теории известно, что

$$\rho_m = q_m^{T_m}, \quad (9)$$

где T_m — интегральный фактор мутности, q_m — интегральный коэффициент, характеризующий прозрачность рэлеевской атмосферы.

Переходя к эффективным величинам,

$$\rho_{m_3} = q_{m_3}^{T_{m_3}}, \quad (10)$$

где q_{m_3} и T_{m_3} — эффективные величины, причем при $\Sigma S'_0$

$$\rho_{m_3,0} = q_{m_3,0}^{T_{m_3,0}}. \quad (11)$$

Относительный эффективный коэффициент прозрачности, исходя из формул (10) и (11), можно выразить в виде

$$\frac{\rho_{m_3}}{\rho_{m_3,0}} = q_{m_3,0}^{T_{m_3} - T_{m_3,0}}, \quad (12)$$

принимая во внимание, что в данный конкретный день практически $q_{m_3} = q_{m_3,0}$.

Следовательно, исходя из формул (6) и (12), можно написать

$$\alpha'_{6,i} = q_{m_3,0}^{m_{3,0}(T_{m_3} - T_{m_3,0})}. \quad (13)$$

Возможные дневные суммы инсоляции взяты в данной работе относительно средних возможных дневных сумм. Но за фоновые суммы могут быть приняты также суммы инсоляции другого устойчивого типа. Такими фоновыми суммами могут быть, например, экстратеррестрические суммы инсоляции [3].

Можно написать, что в какой-то день « i » $\alpha'_{6,i} = \varepsilon_i^{m_{3,i}}$, а в какой-то день « u » $\alpha'_{6,u} = \varepsilon_u^{m_{3,u}}$. Понятно, что при одинаковых относительных эффективных коэффициентах прозрачности, отличающихся от единицы, равенство $\alpha'_{6,i} = \alpha'_{6,u}$ будет выполняться только тогда, когда $m_{3,i} = m_{3,u}$, а в остальных случаях, т. е. при $m_{3,i} \neq m_{3,u}$, $\alpha'_{6,i} \neq \alpha'_{6,u}$. Все варианты следующие:

- | | |
|--|--|
| 1) если $m_{3,i} < m_{3,u}$, то | 3) если $m_{3,i} = m_{3,u}$, то $\alpha'_{6,i} = \alpha'_{6,u}$ |
| а) при $\varepsilon < 1$ $\alpha'_{6,i} > \alpha'_{6,u}$, | 4) если $\varepsilon = 1$, то $\alpha'_{6,i} = \alpha'_{6,u} = 1$. |
| б) при $\varepsilon > 1$ $\alpha'_{6,i} < \alpha'_{6,u}$; | |
| 2) если $m_{3,i} > m_{3,u}$, то | |
| а) при $\varepsilon < 1$ $\alpha'_{6,i} < \alpha'_{6,u}$, | |
| б) при $\varepsilon > 1$ $\alpha'_{6,i} > \alpha'_{6,u}$; | |

В общем, если $\varepsilon_i = \varepsilon_u$, то расхождение значения $\alpha'_{6,i}$ от значения $\alpha'_{6,u}$ должно быть тем больше, чем больше разница между $m_{3,i}$ и $m_{3,u}$.

В качестве числового примера приводятся здесь некоторые вычисления, чтобы конкретизировать представление о зависимости значений $\alpha'_{6,i}$ от эффективной массы атмосферы*.

* Все представленные в работе конкретные примеры соответствуют условиям нормального давления воздуха.

Предположим, что $p_{m_3} = 0,70$ и $p_{m_3,0} = 0,80$. По проведенным Х. Ю. Мюрком вычислениям найдем, что при солнцестояниях и осеннем равноденствии значениям указанных здесь коэффициентов соответствуют на географической широте Тарту следующие возможные дневные суммы инсоляции:

22. VI	1)	если $p_{m_3} = 0,70$, то $\Sigma S'_6 = 520 \cdot \text{кал/см}^2 \cdot \text{день}$,		
	2)	„ $p_{m_3,0} = 0,80$, „ $\Sigma S'_0 = 648$	„	„
23. IX	1)	„ $p_{m_3} = 0,70$, „ $\Sigma S'_6 = 185$	„	„
	2)	„ $p_{m_3,0} = 0,80$, „ $\Sigma S'_0 = 255$	„	„
22. XII	1)	„ $p_{m_3} = 0,70$, „ $\Sigma S'_6 = 4$	„	„
	2)	„ $p_{m_3,0} = 0,80$, „ $\Sigma S'_0 = 10$	„	„

Отсюда следует, что указанным здесь конкретным условиям соответствуют следующие относительные суммы:

$$22. VI \quad \alpha'_6 = 0,80,$$

$$23. IX \quad \alpha'_6 = 0,73,$$

$$22. XII \quad \alpha'_6 = 0,40.$$

В рассматриваемом случае

$$\frac{\alpha'_{6, 22.VI}}{\alpha'_{6, 22.XII}} = 2,0,$$

$$\frac{\alpha'_{6, 22.VI}}{\alpha'_{6, 23.IX}} = 1,1.$$

Некоторое представление о годовом ходе относительных возможных дневных сумм инсоляции, соответствующих на географической широте Тарту, одинаковым значениям относительного эффективного коэффициента прозрачности атмосферы, получается при рассмотрении графиков, приведенных на рис. 1. Графики построены для $\varepsilon = 0,81; 0,94; 1,00; 1,06$.

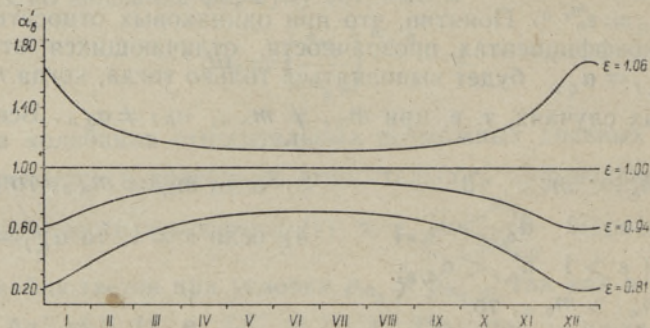


Рис. 1. Годовой ход относительных возможных дневных сумм инсоляции на географической широте Тарту при $\varepsilon = 0,81; 0,94; 1,00; 1,06$.

Из представленных нами примеров выясняется, что величины α'_6 довольно значительно могут зависеть от годового изменения m_3 . Этот факт говорит о том, что сравнение относительных дневных сумм инсоляции, относящихся к различным эффективным массам атмосферы, в общем случае невозможно без приведения относительных сумм к одной и той же массе атмосферы.

Годовой ход m_3 зависит практически от годового хода h_3 , так как зависимость от годового изменения остальных факторов оказывается небольшой.

Зависимость относительной возможной дневной суммы инсоляции от эффективной прозрачности атмосферы нелинейна, — выражается степенным законом, а в связи с годовым изменением массы атмосферы наблюдается экспоненциальная зависимость от m_3 . Имеется также зависимость от $p_{m_3,0}$, так как в течение года этот коэффициент изменяется.

Некоторое иллюстрирующее представление о зависимости значений α'_6 от p_{m_3} и от m_3 дает рис. 2, причем $p_{3,0} = 0,80$. В соответствии с условиями составления графиков, все рассматриваемые кривые пересекаются в одной и той же точке (т. е. $\alpha'_6 = 1$ и $\frac{p_{m_3}}{p_{m_3,0}} = 1$).

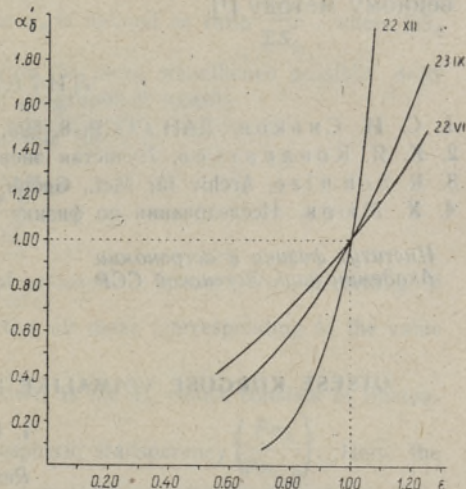


Рис. 2. Зависимость относительных возможных дневных сумм инсоляции от эффективной прозрачности атмосферы $\left(\frac{p_{m_3}}{0,80}\right)$; географическая широта Тарту.

Формулу (6) можно рассматривать как формулу поправочного множителя, входящего в расчетную формулу

$$\Sigma S'_6 = f(p_{m_3}) \Sigma S'_0, \quad (14)$$

где $f(p_{m_3})$ — функция от p_{m_3} . Но учитывая формулу (6), можно написать

$$\Sigma S'_6 = \left(\frac{p_{m_3}}{p_{m_3,0}}\right)^{m_{3,0}} \Sigma S'_0. \quad (15)$$

Масса атмосферы — сложная функция (функция Бемпорада), а по упрощающим предположениям $m \approx \operatorname{cosec} h_0$. Но в таком случае $m_3 \approx \operatorname{cosec} h_3$ и

$$\Sigma S'_6 \approx \left(\frac{p_{m_3}}{p_{m_3,0}}\right)^{\operatorname{cosec} h_{3,0}} \Sigma S'_0. \quad (16)$$

Расчет конкретных возможных дневных сумм инсоляции, исходя из формулы (15), сводится к вычислению фактических эффективных коэффициентов прозрачности атмосферы, причем климатологические величины, входящие в формулу (15), должны быть, конечно, известны.

Значение $p_{m_3,0}$ можно, исходя из значения $\Sigma S'_0$, найти по номограмме, дающей зависимость возможных дневных сумм инсоляции от эффективной прозрачности атмосферы; такая номограмма аналогична той, которая представлена Х. Мюрком [4].

Эффективную массу атмосферы ($m_{3,0}$) можно определить из формулы

$$\Sigma S'_0 = p_{m_3,0}^{m_{3,0}} \Sigma I_c, \quad (17)$$

где $\Sigma I'_c$ — дневная сумма инсоляции, соответствующая условиям солнечного климата. Из формулы (17) следует, что

$$m_{3,0} = \frac{\lg \Sigma S'_0 - \lg \Sigma I'_c}{\lg p_{m_{3,0}}} \quad (18)$$

Что касается определения фактических эффективных коэффициентов прозрачности (p_{m_3}), то эти коэффициенты могут быть вычислены по косвенному методу [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Сивков, ДАН СССР, 8, 599, 1951.
2. К. Я. Кондратьев, Лучистая энергия Солнца. Гидрометиздат. Л., 1954.
3. R. Schulze, Archiv für Met., Geoph. und Bioklimatol., S. B, 11, 281, 1962.
4. Х. Мюрк, Исследования по физике атмосферы. ИФА АН ЭССР, 4, 5, 1963.

Институт физики и астрономии
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
30. III 1963

OTSESE KIIRGUSE VOIMALIKE PÄEVASUMMADE VARIEERUMISEST

I. Undla

Resümee

Käesolev artikkel käsitleb Päikeselt horisontaalpinnale langeva otsese kiirguse võimalike päevasummade muutlikkuse küsimust. Üldjuhul ilmneb nimetatud varieerumine suhteliste summade (α'_6) kõikumises. Siin defineeritakse suhtena $\frac{\Sigma S'_6}{\Sigma S'_0}$, kus $\Sigma S'_6$ on vaadeldav võimalik päevasumma, $\Sigma S'_0$ — keskmine tasandatud võimalik päevasumma (vastavalt kalendripäevale ja geograafilisele punktile).

α'_6 võib avaldada valemiga (6), nimelt

$$\alpha'_6 = \left(\frac{p_{m_3}}{p_{m_{3,0}}} \right)^{m_{3,0}},$$

kus p_{m_3} ja $p_{m_{3,0}}$ on atmosfääri läbipaistvuse efektiivsed koefitsiendid (vastavalt $\Sigma S'_6$ -le ja $\Sigma S'_0$ -le), $m_{3,0}$ aga atmosfääri efektiivne mass (vastavalt $\Sigma S'_0$ -le).

α'_6 väärtuste varieerumise põhjus, vastavalt valemile (6), peitub atmosfääri läbipaistvuse suhtelise efektiivse koefitsiendi $\left(\frac{p_{m_3}}{p_{m_{3,0}}} \right)$ kõikumises; atmosfääri efektiivse massi kõikumisi võib siinjuures mitte arvestada. α'_6 väärtuste kõikumise amplituud aga sõltub nii suhtest $\frac{p_{m_3}}{p_{m_{3,0}}}$ kui ka koefitsiendist $m_{3,0}$.

Arvutused näitavad, et α'_6 sõltub atmosfääri efektiivse massi aastasest käigust (järelkult ka geograafilisest) küllalt märkimisväärselt (joon. 1). Atmosfääri erinevatele efektiivsetele massidele vastavate α'_6 väärtuste võrdlemiseks on vaja suhtelised summad taandada ühele ja samale atmosfääri efektiivsele massile, s. o. praktiliselt ühele ja samale Päikese efektiivsele kõrgusele.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Füüsika ja Astronoomia Instituut

Saabus toimetusse
30. III 1963

VARIATIONS IN POSSIBLE DAILY TOTALS OF DIRECT RADIATION

I. Undla

Summary

The paper deals with the variability of the possible daily sums of direct solar radiation upon a horizontal plane. In a general way, the variation mentioned above is revealed in the fluctuations of the relative totals (α'_6). Here α'_6 is defined as ratio $\frac{\Sigma S'_6}{\Sigma S'_0}$, where $\Sigma S'_6$ is the observed possible daily total. $\Sigma S'_0$ represents the mean smoothened possible daily total corresponding to a given date and a given geographical locality.

The value of α'_6 may be expressed by the formula (6), i. e.

$$\alpha'_6 = \left(\frac{p_{m_3}}{p_{m_{3,0}}} \right)^{m_{3,0}},$$

where p_{m_3} and $p_{m_{3,0}}$ are effective coefficients of atmospheric transparency, according to the values of $\Sigma S'_6$ and $\Sigma S'_0$, and $m_{3,0}$ is the effective air mass (corresponding to the value of $\Sigma S'_0$).

According to formula (6), the cause of variations in the α'_6 values consists in fluctuations of the relative effective coefficient of atmospheric transparency $\left(\frac{p_{m_3}}{p_{m_{3,0}}} \right)$. Here the fluctuations of the effective air mass may be neglected. The amplitude of fluctuations in the α'_6 values depends on the values of $\frac{p_{m_3}}{p_{m_{3,0}}}$, as well as on the values of $m_{3,0}$.

Calculations show that the α'_6 values are to a considerable extent dependent on the seasonal trend of the effective air mass (hence also on the geographical locality) (fig. 1). In order to compare the α'_6 values which correspond to the different values of effective air masses, the relative totals should be reduced to one and the same effective air mass, i. e. practically to the same effective altitude of the Sun.

Academy of Sciences of the Estonian S. S. R.,
Institute of Physics and Astronomy

Received
March 30th, 1963