

СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОПРИЕМНИКАМИ СЕТЧАТКИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЦИРКАДИАННЫМ РИТМОМ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2020 г. А.В. Леонидов

E-mail: avleonidoff@mail.ru

Поступила в редакцию 21.05.2019 г.

После доработки 21.05.2019 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

Рассмотрено суточное воздействие солнечного излучения на фотоприемники сетчатки глаза при управлении циркадианной ритмикой организма человека в пределах произвольного 11-летнего цикла солнечной активности. Приведены расчетные данные, описывающие изменение в течение цикла солнечной активности спектральных и энергетических характеристик солнечного излучения, достигшего земной поверхности. На этой основе получено обобщенное аналитическое выражение, моделирующее спектрально-селективную обработку палочками и синевоспринимающими колбочками сетчатки суммы прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения. Полученное выражение позволяет провести рассмотрение отдельной спектрально-селективной обработки прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения палочками и синевоспринимающими колбочками сетчатки, в том числе в случае фатального поражения одного из нейронных каналов, связывающих палочки или синевоспринимающие колбочки с супрахиазмными ядрами гипоталамуса. Показано, что эффективный спектр, полученный в результате спектральной селекции составляющих солнечного излучения и используемый для управления циркадианной активностью организма человека, определяется исключительно спектральной чувствительностью палочек и синевоспринимающих колбочек. Эффективный спектр не зависит от суточных вариаций спектра солнечного излучения при изменении угловой высоты Солнца; суточные энергетические характеристики эффективного спектра, изменяющиеся в пределах каждого цикла солнечной активности, сохраняют зависимость от суточной угловой высоты Солнца и текущей фазы цикла солнечной активности. Значительные изменения характеристик солнечного излучения в пределах цикла солнечной активности позволили сделать вывод о необходимости их учета при исследовании и моделировании процессов управления циркадианной активностью организма человека солнечным излучением.

Ключевые слова: циркадианная активность, палочки, синевоспринимающие колбочки, сетчатка, относительная спектральная циркадианная эффективность, спектральная селекция, цикл солнечной активности, излучение, коэффициенты пропускания атмосферы, спектральная плотность облученности, облученность.

DOI: 10.31857/S0006302920030217

Основным физическим фактором, осуществляющим управление циркадианной активностью на уровне целостного организма человека, являются суточные изменения характеристик естественной энергетической освещенности (облученности) земной поверхности, создаваемой солнечным излучением [1].

Суточные изменения характеристик облученности обусловлены также отчетливо проявляю-

щими себя циклическими изменениями солнечной активности (цикл Швабе [2–4]) с периодом, равным 11 годам. Циклические изменения солнечной активности, связанные с изменением числа пятен (число Вольфа W [2]) на видимой поверхности фотосферы Солнца, приводят к циклическим изменениям эффективной термодинамической температуры $T_{\text{эфф}}$ солнечного излучения, изменениям абсолютных значений спектральной плотности светимости и собственно светимости фотосферы. Максимальные изменения параметров излучения фотосферы в преде-

Сокращение: СПО – спектральная плотность облученности.

лах одного цикла солнечной активности могут достигать ~ 35%. Очевидно, что в любых фазах цикла солнечной активности эти изменения оказывают влияние на управление и характеристики циркадианной активности человека.

До настоящего времени совместное влияние суточных и циклических 11-летних изменений характеристик облученности при исследованиях и моделировании процессов управления циркадианной активностью человека солнечным излучением не учитывалось.

Целью работы является представляющее интерес для биологии, хронобиологии и светотехники описание спектрально-селективных преобразований, производимых приемниками оптического излучения тракта управления циркадианной активностью, при совместном воздействии суточных и 11-летних изменений спектральных и энергетических характеристик солнечного излучения.

Солнечное излучение, достигшее земной поверхности, воздействует на аналоговые приемники оптического излучения в виде некоторой совокупности синевоспринимающих колбочек и палочек, расположенных в периферических зонах сетчатки глаза [5]. Палочки и синевоспринимающие колбочки представляют собой начальное звено тракта управления циркадианной активностью человека [1]. На этой стадии в тракте управления циркадианной активностью осуществляется собственно прием и спектрально-селективная аналоговая обработка солнечного излучения, заключающаяся в выделении из спектра солнечного излучения его циркадианной области и обеспечивающая собственно управление циркадианной активностью человека.

Результатом этой обработки является сформированные ганглиозными (выходными) клетками сетчатки нейронные сигналы, содержащие в бинарной форме информацию о спектральной

плотности облученности (СПО), принятой и обработанной аналоговыми приемниками оптического излучения [5].

Сформированные ганглиозными клетками выходные сигналы сетчатки доставляются к супрахиазмным ядрам гипоталамуса, в которых происходит формирование сигналов управления суточной активностью эпифиза, секретирующего в плазму крови гормон мелатонин. Суточные изменения концентрации мелатонина в плазме крови приводят в конечном счете к управлению циркадианной активностью человека.

Выходные бинарные сигналы сетчатки являются взаимно однозначным и взаимно непрерывным, гомеоморфным отображением СПО, воздействующей на сетчатку. Поэтому дальнейшее описание преобразований сигналов в тракте управления циркадианной активностью для наглядности и удобства представления проводится с использованием аналоговых эквивалентов бинарных сигналов с соответствующими этому описанию понятиями и терминологией.

Функция $m_{eS}(\lambda, T)$ спектральной плотности энергетической светимости фотосферы Солнца описывается функцией Планка излучения черного тела [6, 7]:

$$m_{eS}(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, T — термодинамическая температура равновесного излучения черного тела, $C_1 \approx 3.742 \cdot 10^{-16}$ Вт · м² и $C_2 \approx 1.439 \cdot 10^{-2}$ м · К.

Спектральная плотность облученности при нормальном падении солнечного излучения на площадку, расположенную на верхней границе земной атмосферы, имеет следующий вид:

$$e_{eS}(\lambda, T_{\text{эфф}}) = \left(\frac{r}{R} \right)^2 m_{eS}(\lambda, T_{\text{эфф}}) = \left(\frac{r}{R} \right)^2 C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T_{\text{эфф}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $T_{\text{эфф}}$ — эффективная (усредненная по фотосфере) термодинамическая температура солнечного излучения, $r = 6.96 \cdot 10^5$ км — экваториальный радиус Солнца, $R = 1.496 \cdot 10^{12}$ км — радиус круговой орбиты Земли [8, 9].

Значение $T_{\text{эфф}}$ в соотношении (2), согласно действующим рекомендациям Международной комиссии по радиации [10], принимается равным

постоянному значению, что не позволяет выявить зависимость $e_{eS}(\lambda, T_{\text{эфф}})$ от номера года n в пределах цикла солнечной активности.

Очевидно, что в соотношении (2) $T_{\text{эфф}} = T_{\text{эфф}}(n)$. В качестве основы при определении зависимости $T_{\text{эфф}}(n)$ использовано значение солнечной постоянной

$$E_{\text{СП}}(T_{\text{эфф}}) = \int_0^{\infty} e_{eS}(\lambda, T_{\text{эфф}}) d\lambda = \left(\frac{r}{R} \right)^2 \int_0^{\infty} m_{eS}(\lambda, T_{\text{эфф}}) d\lambda, \quad (3)$$

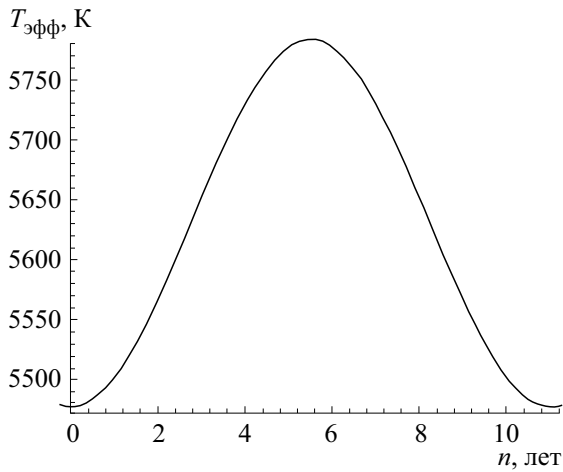


Рис. 1. Изменение эффективной термодинамической температуры излучения фотосферы Солнца в произвольном 11-летнем цикле солнечной активности.

представляющей собой энергетическую освещенность (облученность) при нормальном паде-

$$E_{\text{ССП}}(T_{\text{эфф}}) = 683 \int_{350 \cdot 10^{-9}}^{770 \cdot 10^{-9}} e_{eS}[\lambda, T_{\text{эфф}}] V(\lambda) d\lambda = \left(\frac{r}{R}\right)^2 683 \int_{350 \cdot 10^{-9}}^{770 \cdot 10^{-9}} m_{eS}[\lambda, T_{\text{эфф}}] V(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

представляющей собой освещенность площадки, расположенной на верхней границе земной атмосферы, при нормальном падении солнечного излучения в условиях минимума солнечной активности. В условиях минимальной солнечной активности значение $E_{\text{ССП},\text{min}} = 135110$ лк [12]. Указанному значению $E_{\text{ССП},\text{min}}$ по результатам вычислений с использованием соотношений (2) и (4) соответствуют значения $E_{\text{СП},\text{min}} = 1106 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $T_{\text{эфф},\text{min}} = 5480 \text{ К}$.

Ранее определенным для максимума солнечной активности значениям $E_{\text{СП},\text{max}} \approx 1370 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $T_{\text{эфф},\text{max}} = 5780 \text{ К}$ соответствует значение световой солнечной постоянной $E_{\text{ССП}} = 173600$ лк.

Зависимость эффективной термодинамической температуры излучения фотосферы Солнца $T_{\text{эфф}}(n)$ при указанных выше значениях $T_{\text{эфф},\text{min}}$ и $T_{\text{эфф},\text{max}}$ для произвольного цикла солнечной активности, временные характеристики которого получены усреднением известных 25 циклов солнечной активности [2–4], описывается соотношением:

$$T_{\text{эфф}}(n) = T_{\text{эфф},\text{средн}} \left[1 + 0.027 \sin\left(\frac{2\pi n}{11} - \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (5)$$

где $T_{\text{эфф},\text{средн}} = 0.5(T_{\text{эфф},\text{min}} + T_{\text{эфф},\text{max}})$.

нии солнечного излучения на площадку, расположенную на верхней границе земной атмосферы [11].

По данным спутниковых актинометрических измерений, относящихся к максимальным значениям 20 и 21 циклов солнечной активности [2–4], наиболее вероятное значение $E_{\text{СП}}(T_{\text{эфф}})$ заключено в интервале $1368\text{--}1377 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ при отсутствии регулярности изменения во времени. Это позволяет использовать термин «солнечная постоянная». В качестве стандартного значения солнечной постоянной, соответствующего максимуму солнечной активности, принято значение по Международной пиргелиометрической шкале 1956 г., равное $E_{\text{СП},\text{max}}(T_{\text{эфф}}) \approx 1370 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ [9, 10]. Этому значению $E_{\text{СП},\text{max}}(T_{\text{эфф}})$, согласно соотношениям (2) и (3), соответствует значение $T_{\text{эфф},\text{max}} = 5780 \text{ К}$.

Значения $T_{\text{эфф},\text{min}}$ и $E_{\text{СП},\text{min}}$ определялись с использованием так называемой световой солнечной постоянной $E_{\text{ССП},\text{min}}(T_{\text{эфф}})$ (в диапазоне длин волн $350 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 770 \cdot 10^{-9} \text{ м}$):

График зависимости по соотношению (5) приведен на рис. 1.

Минимальные и максимальные значения так называемой солнечной и световой солнечной «постоянной» в различных спектральных диапазонах приведены в таблице.

Зависимости $E_{\text{СП}}(n)$, определенные по соотношению (3) при вычисленных значениях $E_{\text{СП},\text{min}}$ и $E_{\text{СП},\text{max}}$ для спектрального диапазона $0 \leq \lambda \leq \infty \text{ м}$, для спектрального окна прозрачности атмосферы $300 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 1200 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ и циркулярной области спектра $350 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 570 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ имеют следующий вид:

$$E_{\text{СП}}(n) = E_{\text{СП},\text{средн}} \left[1 + 0.1062 \sin\left(\frac{2\pi n}{11} - \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (6)$$

при $0 \leq \lambda \leq \infty \text{ м}$,

$$E_{\text{СП}}(n) = E_{\text{СП},\text{средн}} \left[1 + 0.1153 \sin\left(\frac{2\pi n}{11} - \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (7)$$

при $300 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 1200 \cdot 10^{-9} \text{ м}$,

$$E_{\text{СП}}(n) = E_{\text{СП},\text{средн}} \left[1 + 0.1485 \sin\left(\frac{2\pi n}{11} - \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (8)$$

при $350 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 570 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. (8)

Значения $E_{\text{СП},\text{средн}}$ для каждого спектрального диапазона приведены в последней строке таб-

Значения солнечной постоянной $E_{СП}$ в различных спектральных диапазонах, а также значения световой солнечной постоянной $E_{ССП}$ в видимой области спектра при минимуме и максимуме солнечной активности

Характер солнечной активности	$E_{СП}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2},$ при $0 \text{ нм} \leq \lambda \leq \infty \text{ нм}$	$E_{СП}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2},$ при $300 \text{ нм} \leq \lambda \leq 1200 \text{ нм}$ (спектральное окно прозрачности атмосферы [13])	$E_{СП}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2},$ при $350 \text{ нм} \leq \lambda \leq 570 \text{ нм}$ (циркадианная область спектра)	$E_{ССП}, \text{лк},$ при $350 \text{ нм} \leq \lambda \leq 770 \text{ нм}$ (видимая область спектра)
Минимум	1106.3	838.7	272.6	135110
Максимум	1369.2	1057.4	367.7	173600
Среднее	1237.7	948.1	320.1	154355

лицы. Графики зависимостей (6)–(8) приведены на рис. 2.

После распространения в земной атмосфере солнечное излучение содержит в своем составе прямую и рассеянную составляющие.

Прямая $e_{\Pi, eS}(\lambda, h)$ и рассеянная $e_{P, eS}(\lambda, h)$ составляющие СПО на земной поверхности после распространения в спектральном окне прозрачности атмосферы описываются соотношениями

$$e_{\Pi, eS}[\lambda, T_{\text{эфф}, \Pi}(h)] = \left(\frac{r}{R}\right)^2 m_{eS}[\lambda, T_{\text{эфф}, \Pi}(h)] \tau_{\Pi}(h), \quad (9)$$

$$e_{P, eS}[\lambda, T_{\text{эфф}, P}(h)] = \left(\frac{r}{R}\right)^2 m_{eS}[\lambda, T_{\text{эфф}, P}(h)] \tau_P(h), \quad (10)$$

где $\tau_{\Pi}(h)$ и $\tau_P(h)$ – зависимости интегральных коэффициентов пропускания атмосферы прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения от угловой высоты Солнца в спектральном окне прозрачности земной атмосферы $300 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 1200 \cdot 10^{-9} \text{ м}$.

Очевидно, что характер функций $\tau_{\Pi}(h)$ и $\tau_P(h)$ существенно зависит от текущего состояния земной атмосферы и определяется наличием или от-

сутствием облачного покрова и степенью покрытия неба облаками.

Использованные в дальнейшем функции $\tau_{\Pi}(h)$ и $\tau_P(h)$ определены на основе экспериментальных данных [12]. Данные, приведенные в работе [12], в настоящее время представляют собой наиболее полный свод сведений, позволяющих определить зависимости облученности и освещенности земной поверхности от угловой высоты Солнца.

В качестве примера далее рассмотрим случай безоблачного неба. В этом случае функции $\tau_{\Pi}(h)$ и $\tau_P(h)$ описываются следующими соотношениями:

$$\tau_{\Pi}(h) = \tau_{\Pi}(90^\circ) 0.5[1 + \sin(0.035h - 1.47)], \quad (11)$$

$$\tau_P(h) = \tau_P(90^\circ) 0.5[1 + \sin(0.029h - 1.09)]. \quad (12)$$

В соотношениях (11) и (12) значения коэффициентов $\tau_{\Pi}(90^\circ) = 0.729$ и $\tau_P(90^\circ) = 0.205$ представляют собой интегральные коэффициенты пропускания атмосферы (при безоблачном небе) на экваторе при нормальном падении солнечного излучения на земную поверхность в сутки весеннего или осеннего равноденствия.

Суточные зависимости прямой $T_{\Pi}(h)$ и рассеянной $T_P(h)$ составляющих термодинамической температуры солнечного излучения на земной поверхности с учетом 11-летнего цикла солнечной активности равны:

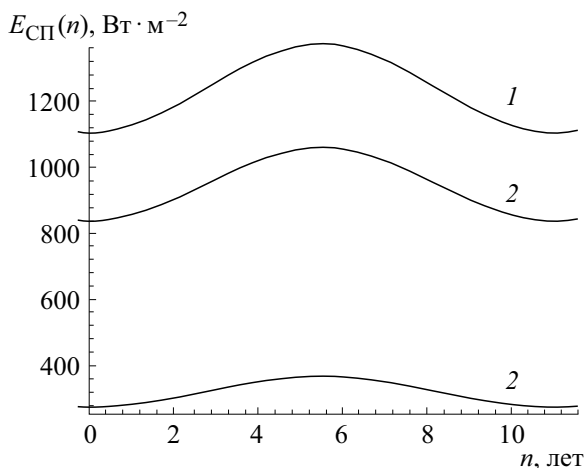


Рис. 2. Изменение солнечной постоянной для различных спектральных диапазонов (в нм) излучения Солнца в произвольном цикле солнечной активности: 1 – $0 \leq \lambda \leq \infty$, 2 – $300 \leq \lambda \leq 1200$, 3 – $350 \leq \lambda \leq 770$.

$$T_{\text{эфф},\Pi}(h, n) = [-3780 \exp(-0.2444h) + T_{\text{эфф}}(n)], \quad (13)$$

$$T_{\text{эфф},\text{P}}(h, n) = [8950 \exp(-0.2084h) + T_{\text{эфф}}(n)]. \quad (14)$$

Первые слагаемые в соотношениях (13) и (14) представляют собой определенные на основе независимых экспериментальных данных [14] зависимости термодинамической температуры прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения на земной поверхности в светлый период произвольных суток года, вторые слагаемые в соотношениях (13) и (14) описываются выражением (5).

Подстановка в соотношения (9) и (10) выражений (13) и (14), а также численных значений $\tau_{\Pi}(90^\circ)$ и $\tau_{\text{P}}(90^\circ)$ позволяет получить развернутые соотношения для зависимостей СПО прямой $e_{\Pi, eS}(\lambda, h, n)$ и рассеянной $e_{\text{P}, eS}(\lambda, h, n)$ составляющих солнечного излучения от длины волны λ в спектральном окне прозрачности земной атмосферы и от угловой высоты Солнца в произвольной точке земной поверхности при фиксированном значении n в цикле солнечной активности:

$$e_{\Pi, eS}(\lambda, h, n) = \left(\frac{r}{R}\right)^2 C_1 \lambda^{-5} \left\{ \exp \frac{C_2}{\lambda \left[-3780 \exp(-0.2444h) + 5630 \left[1 + 0.027 \sin \left(\frac{2\pi n}{11} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right]} - 1 \right\}^{-1} 0.729 \times \quad (15)$$

$$\times 0.5 [1 + \sin(0.035h - 1.47)],$$

$$e_{\text{P}, eS}(\lambda, h, n) = \left(\frac{r}{R}\right)^2 C_1 \lambda^{-5} \left\{ \exp \frac{C_2}{\lambda \left[8950 \exp(-0.2084h) + 5630 \left[1 + 0.027 \sin \left(\frac{2\pi n}{11} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right]} - 1 \right\}^{-1} 0.205 \times \quad (16)$$

$$\times 0.5 [1 + \sin(0.029h - 1.09)].$$

Значения $n = 0$ и $n = 5.5$ в соотношениях (15) и (16) относятся к минимуму и максимуму солнечной активности соответственно. Разности соотношений (15) при $n = 0$ и $n = 5.5$, а также соотношений (16) при $n = 0$ и $n = 5.5$ определяют максимальные изменения СПО $e_{\Pi, eS}(\lambda, h)$ и $e_{\text{P}, eS}(\lambda, h)$ на земной поверхности в пределах одного цикла активности Солнца.

Солнечное излучение, достигшее земной поверхности и описываемое СПО прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения (соотношения (15), (16)) или их суммой, воздейству-

ет на синевоспринимающие колбочки и палочки сетчатки глаза и подвергается этими фотоприемниками спектрально-селективной обработке функцией относительной спектральной циркадианной эффективности $c(\lambda)$ [5], полученной с использованием результатов независимых экспериментальных исследований [15–17]. Функция $c(\lambda)$ может быть описана нормированной суммой взвешенных функций относительной спектральной чувствительности $c_1(\lambda)$ синевоспринимающих колбочек и $c_2(\lambda)$ палочек сетчатки [5]:

$$c(\lambda) = c_1(\lambda) + c_2(\lambda) = \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_{1\max})^2}{2\sigma_1^2} \right] + \frac{\alpha_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_{2\max})^2}{2\sigma_2^2} \right], \quad (17)$$

где $\alpha_1 = 72.56 \cdot 10^{-9}$ м, $\sigma_1 = 28.99 \cdot 10^{-9}$ м, $\lambda_{1\max} = 445 \cdot 10^{-9}$ м, $\alpha_2 = 25.89 \cdot 10^{-9}$ м, $\sigma_2 = 21.21 \cdot 10^{-9}$ м, $\lambda_{2\max} = 505 \cdot 10^{-9}$ м.

График функции (17) изображен на рис. 3.

Аналоговые эквиваленты бинарных сигналов, сформированных ганглиозными клетками сетчатки и зависящих от угловой высоты h Солнца, представляются произведением прямой $e_{\Pi, eS}(\lambda, h, n)$ и рассеянной $e_{\text{P}, eS}(\lambda, h, n)$ составляю-

щих солнечного излучения или их суммы на функцию относительной спектральной циркадианной эффективности $c(\lambda)$. Функция $c(\lambda)$, как и ее слагаемые $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$, могут рассматриваться в качестве характеристик узкополосных спектральных фильтров, выделяющих из широкополосного спектра солнечного излучения (в спектральном окне прозрачности земной атмосферы) узкополосные участки в спектральных диапазонах существования функций $c_1(\lambda)$, $c_2(\lambda)$ и $c(\lambda)$,

осуществляя тем самым узкополосную спектральную селекцию солнечного излучения [18].

Очевидно, что в реальном процессе управления циркадианной активностью солнечным излучением на синевоспринимающие колбочки и палочки сетчатки в подавляющем большинстве случаев воздействует сумма прямой $e_{\Pi, eS}(\lambda, h, n)$ и рассеянной $e_{P, eS}(\lambda, h, n)$ составляющих солнечного излучения. В норме, при отсутствии фатальных повреждений нейронных трактов от синевоспринимающих колбочек и палочек сетчатки до супрахиазмальных ядер гипоталамуса, прямая и рассеянная составляющие солнечного излучения подвергаются спектральной селекции суммой функций $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$.

Теоретический и практический интерес представляют также варианты отдельной обработки прямой $e_{\Pi, eS}(\lambda, h, n)$ и рассеянной $e_{P, eS}(\lambda, h, n)$ составляющих СПО функциями $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$ по отдельности, а также их возможными сочетаниями.

В этом случае появляется возможность составления композиций произведений $e_{i, eS}(\lambda, h, n) \cdot c_j(\lambda)$, (индекс $i = 1, 2$ обозначает прямую или рассеянную составляющие СПО, а индекс $j = 1, 2$ определяет функцию $c_1(\lambda)$ либо $c_2(\lambda)$) и выявления особенностей отдельной обработки прямой $e_{\Pi, eS}(\lambda, h, n)$ и рассеянной $e_{P, eS}(\lambda, h, n)$ составляющих СПО функциями $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$ или их суммой $c(\lambda)$, а также описать различные варианты спектральной селекции солнечного излучения при управлении циркадианной активностью человека.

Области определения функций $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$ лежат в спектральных диапазонах $350 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 435 \cdot 10^{-9}$ м и $435 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 570 \cdot 10^{-9}$ м соответственно, а их сумма $c(\lambda) = c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$ – в спектральном диапазоне $350 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 570 \cdot 10^{-9}$ м [5].

Спектральные функции $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$ образуют два перекрывающихся спектральных канала обработки солнечного излучения – соответственно коротковолновой и длинноволновой.

Варианты обработки солнечного излучения только функцией $c_1(\lambda)$ или только функцией $c_2(\lambda)$ описывают случаи фатального поражения ней-

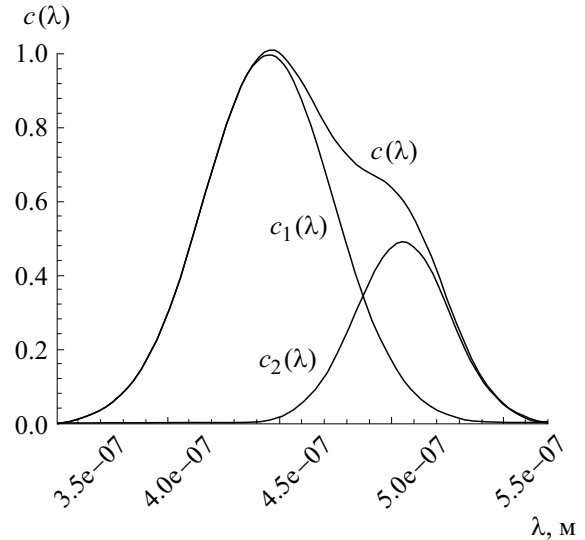


Рис. 3. Функция относительной спектральной циркадианной эффективности: 1, 2 – графики функций $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$ соответственно, 3 – график функции $c(\lambda)$.

ронного пути от палочек или от синевоспринимающих колбочек сетчатки до супрахиазмальных ядер гипоталамуса соответственно.

При изменении угловой высоты Солнца в светлый период суток значения весовых коэффициентов α_1 и α_2 в соотношении (17) постоянны [19]. Очевидно, что спектральные характеристики функций $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$, а также спектральные характеристики произведений $e_{i, eS}(\lambda, h, n) \cdot c_j(\lambda)$, независимо от значений весовых коэффициентов α_1 и α_2 , остаются постоянными. При этом абсолютные значения функций $e_{i, eS}(\lambda, h, n) \cdot c_j(\lambda)$ сохраняют зависимость от угловой высоты Солнца.

В наиболее часто реализуемом случае воздействия суммы прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения одновременно на коротковолновый и длинноволновый спектральные каналы (функции (15)–(17)) соотношение для СПО, образованное в результате спектрально-селективной обработки солнечного излучения функцией $c(\lambda) = c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 e_{\Pi+P, KB+ДВ}(\lambda, h, n) &= [e_{\Pi, eS}(\lambda, h, n) + e_{P, eS}(\lambda, h, n)] \cdot [c_1(\lambda) + c_2(\lambda)] = \\
 &= \left(\frac{r}{R}\right)^2 C_1 \lambda^{-5} \left\{ \left[\exp \frac{C_2}{\lambda [-3780 \exp(-0.2444h) + T_{эфф}(n)]} - 1 \right]^{-1} 0.729 \cdot 0.5 [1 + \sin(0.035h - 1.47)] \right\} + \\
 &+ \left\{ \exp \frac{C_2}{\lambda [8950 \exp(-0.2084h) + T_{эфф}(n)]} - 1 \right\}^{-1} 0.205 \cdot 0.5 [1 + \sin(0.029h - 1.09)] \left. \right\} \times \\
 &\times \left\{ \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_{1\max})^2}{2\sigma_1^2} \right] + \frac{\alpha_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_{2\max})^2}{2\sigma_2^2} \right] \right\}, \quad (18)
 \end{aligned}$$

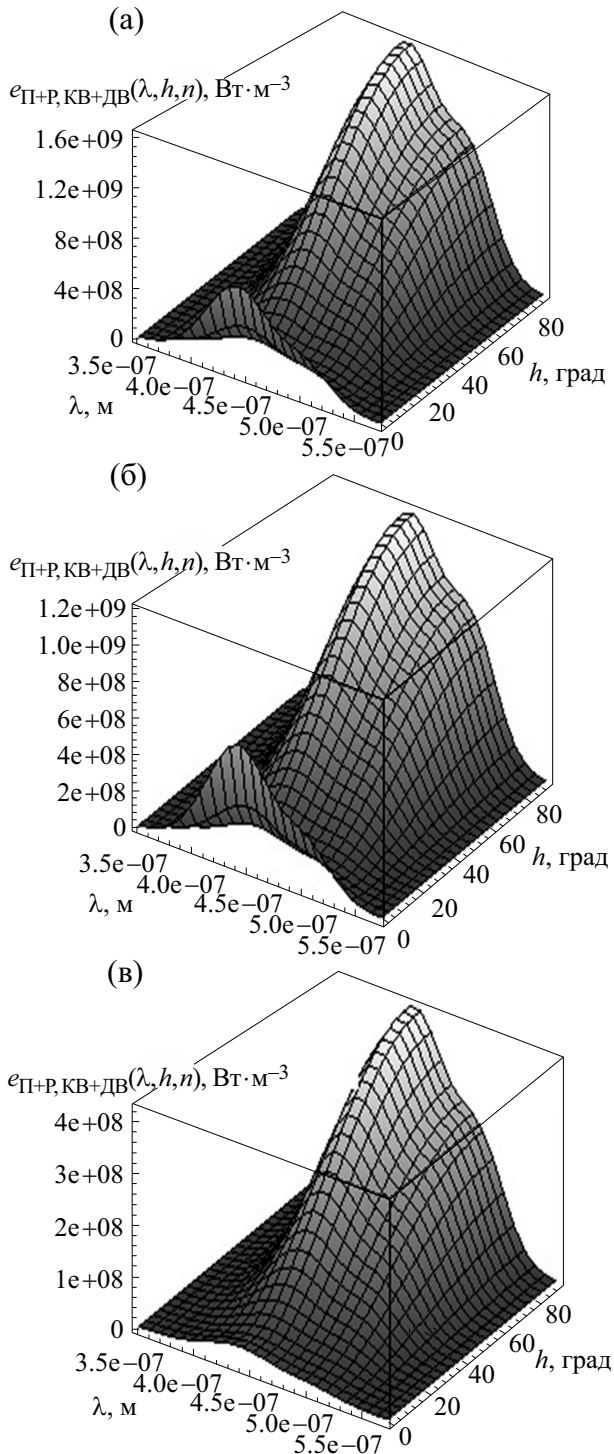


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности облученности от угловой высоты Солнца и длины волны излучения, создаваемой суммой прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения при одновременном воздействии на коротковолновой и длинноволновой спектральные каналы: (а) — при максимуме солнечной активности ($n = 5.5$, $T_{эфф} = 5780$ К); (б) — при минимуме солнечной активности ($n = 0$, $T_{эфф} = 5480$ К); (в) — разность спектральных плотностей облученности при максимуме и минимуме солнечной активности.

где функция $T_{эфф}(n)$ описывается соотношением (5).

Соотношение (18) позволяет получить возможные комбинации $e_{П,еS}(\lambda, h, n)$, $e_{Р,еS}(\lambda, h, n)$, $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$, а также описать и исследовать особенности спектрально-селективной обработки солнечного излучения при различных сочетаниях функций (14)–(16).

Графики зависимости (18) в циркадианной области спектра излучения Солнца при максимуме $n = 5.5$ ($T_{эфф} = 5780$ К) и минимуме $n = 0$ ($T_{эфф} = 5480$ К) солнечной активности, а также график, иллюстрирующий различия абсолютных значений $e_{П+Р,КВ+ДВ}(\lambda, h, n)$ при максимуме и минимуме солнечной активности, полученные в результате спектрально-селективной обработки солнечного излучения палочками и колбочками сетчатки, приведены на рис. 4.

Из рис. 4а,б непосредственно следует, что после спектральной селекции солнечного излучения палочками и синевоспринимающими колбочками сетчатки глаза спектральные характеристики функций $e_{П,еS}(\lambda, h, n)$ и $e_{Р,еS}(\lambda, h, n)$ сохраняют свою форму независимо от угловой высоты Солнца. Напротив, их энергетические характеристики существенно зависят от длины волны солнечного излучения в циркадианной области спектра и текущей угловой высоты Солнца.

График, иллюстрирующий зависимость разности $\Delta e_{П+Р,КВ+ДВ}(\lambda, h, n)$ значений СПО в максимуме и минимуме солнечной активности на длине волны $\lambda = 445 \cdot 10^{-9}$ м, а также график зависимости разности значений СПО, отнесенных к СПО при минимуме солнечной активности $\frac{\Delta e_{П+Р,КВ+ДВ}(\lambda, h, n)}{e_{П+Р,КВ+ДВ}(\lambda, h, n)_{\min}}$ в интервале изменения угловой высоты Солнца $0^\circ \leq h \leq 90^\circ$, приведен на рис. 5.

Максимальное значение разности значений СПО в циркадианной области спектра излучения Солнца при максимуме и минимуме солнечной активности при $\lambda = 445 \cdot 10^{-9}$ м, $h = 90$ составляет $4.302 \cdot 10^8$ Вт · м⁻³.

Из рис. 5б следует, что относительные различия в значениях СПО при максимуме и минимуме солнечной активности имеют место в условиях небольших значений угловой высоты Солнца и находятся в пределах от 5 до 36% с последующей стабилизацией этого значения на уровне 36% при угловой высоте Солнца $h > 25^\circ$.

Использование приведенной выше методики позволяет на основе данных работы [12] аналогичным образом получить аналитические выражения, описывающие интегральные коэффициенты пропускания земной атмосферы и спек-

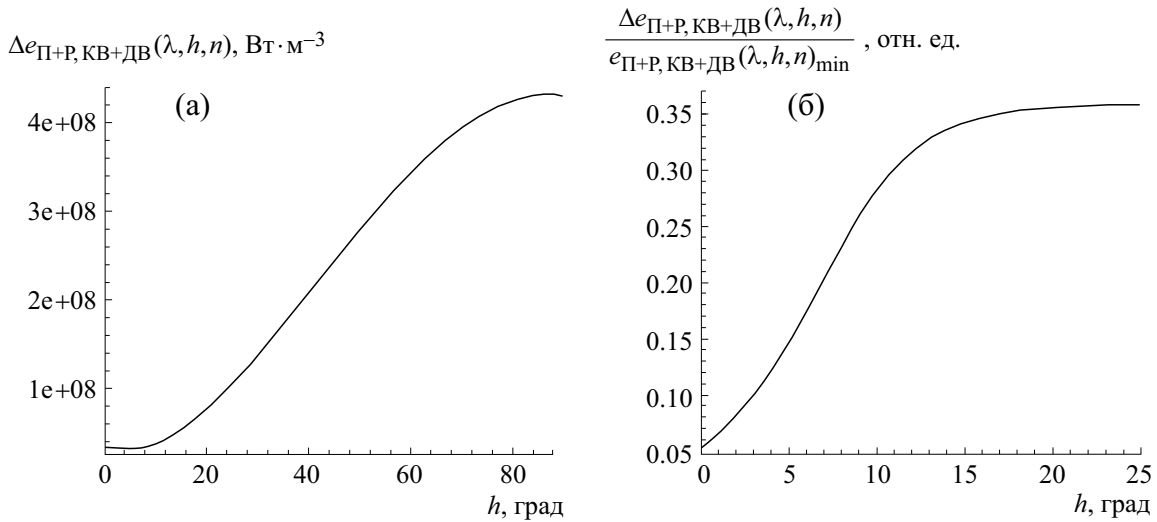


Рис. 5. (а) – Зависимость разности значений СПО при $\lambda = 445 \cdot 10^{-9}$ м в интервале изменения угловой высоты Солнца $0^\circ \leq h \leq 90^\circ$; (б) – зависимость разности значений СПО, отнесенной к СПО при минимуме солнечной активности.

трально-селективную обработку солнечного излучения, управляющего циркадианной активностью человека, при различных видах облачного покрова и различной степени покрытия неба облаками.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют также о том, что в спектре любого широкополосного источника оптического излучения спектр циркадианной активности определяется исключительно спектрально-селективными свойствами палочек и синевоспринимающих колбочек сетчатки. Однако в этом случае коэффициент использования воздействующего широкополосного излучения оказывается достаточно низким. Повышение коэффициента использования излучения может быть достигнуто в специализированных облучательных установках, предназначенных для предотвращения и/или купирования нарушений циркадианной активности человека, в которых используются узкополосные источники оптического излучения, суммарный спектр излучения которых соответствует спектральному диапазону $350 \cdot 10^{-9} \leq \lambda \leq 570 \cdot 10^{-9}$ м циркадианной активности человека.

Полученные в работе результаты указывают на необходимость учета при биологических, хронобиологических и светотехнических исследованиях изменений в течение произвольных суток влияния 11-летней цикличности оптического излучения Солнца. В частности, при проведении экспериментальных и теоретических исследований циркадианной активности, а также при моделировании процессов управления циркадианной активностью человека солнечным излучением учет циклической активности Солнца позволит получать более достоверные сведения о

существо исследуемых явлений, обеспечит возможность адекватной интерпретации полученных результатов и формулирование достоверных выводов по результатам исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. В. Леонидов, *Биофизика* **59** (4), 805 (2014).
2. Ю. И. Витинский, М. Копецкий и Г. В. Куклин, *Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца* (Наука, М., 1986).
3. URL: <http://www.sidc.be/silso/ssngraphics> (SILSO data/image, Royal Observatory of Belgium, Brussels).
4. URL: http://cyclowiki.org/wiki/11-летний_цикл_солнечной_активности.
5. А. В. Леонидов, *Биофизика* **61** (6), 1208 (2016).
6. Р. М. Гальярди и Ш. Карп, *Оптическая связь*, под ред. А. Г. Шереметьева (Связь, М., 1978).
7. Э. Г. Пестов и Г. М. Лапшин, *Квантовая электроника* (Воениздат, М., 1972).
8. *Альфа и омега: Краткий справочник*, 2-е изд. (Валгус, Таллин, 1988).
9. К. У. Аллен, *Астрофизические величины. Справочное изд.* (Мир, М., 1977). 279 с.
10. А. А. Кмитов и Ю. А. Складов, *Пиргелиометрия* (Гидрометеиздат, Л., 1981).
11. *Физика космоса. Маленькая энциклопедия*, под ред. Р. А. Сюняева и др., 2-е изд. (Советская энциклопедия, М., 1986).
12. В. В. Шаронов, *Таблицы для расчета природной освещенности и видимости* (Изд-во АН СССР, 1945).
13. Э. В. Кононович и В. И. Мороз, *Общий курс астрономии: учеб. пособие*, под ред. В. В. Иванова, Изд. 2-е, испр. (Едиториал УРСС, М., 2004).

14. К. Шварцер, Освещение с управляемым цветом – исследование и оптимизация систем управления цветовым освещением. Заключительный отчет (2006), http://www/bocom.eu/rus/catalog/downloads/Farblichtstadie_rus.pdf.
15. Г. К. Брейнард и Г. Л. Гликман, Светотехника, № 1, 4 (2004).
16. K. Thapan, J. Arendt, and D. J. Skene, *J. Physiol.* **535**, 261 (2001).
17. G. C. Brainard and I. Provencio, in *2nd CIE Expert Symp. «Lighting and Health» CIE 031* (2006).
18. А. В. Леонидов и В. Г. Барышников, Светотехника, № 5, 12 (1983).
19. А. В. Леонидов, Светотехника, № 2, 66 (2012).

Spectral-Selective Transformations of Solar Radiation by Retinal Photoreceptors while Controlling the Circadian Rhythm of the Human Body in an 11-Year Cycle of Solar Activity

A.V. Leonidov

The daily effect of solar radiation on photoreceptors of the retina of the eye when controlling the circadian rhythm of the human body within an arbitrary 11-year cycle of solar activity is considered. The calculated data describing the change during the solar activity cycle of the spectral and energy characteristics of solar radiation that reached the earth's surface are given. On this basis, a generalized analytical expression has been obtained that simulates spectral-selective treatment with retinal rods and blue-sensitive cones of the sum of the direct and diffuse components of solar radiation. The expression obtained allows consideration of separate spectral-selective processing of the direct and diffuse components of solar radiation with rods and blue-sensitive cones of retina, including in the case of a fatal lesion of one of the neural channels connecting rods or blue-sensitive cones with suprachiasmatic hypothalamus nuclei. It is shown that the effective spectrum obtained as a result of spectral selection of the components of solar radiation and used to control the circadian activity of the human body is determined solely by the spectral sensitivity of rods and blue-sensitive cones. The effective spectrum does not depend on daily variations in the spectrum of solar radiation when the angular height of the sun varies; the daily energy characteristics of the effective spectrum, varying within each solar activity cycle, retain their dependence on the daily angular height of the Sun and the current phase of the solar activity cycle. Significant changes in the characteristics of solar radiation within the solar activity cycle have led to the conclusion that it is necessary to take them into account in the study and simulation of the control processes of the circadian activity of the human body by solar radiation.

Keywords: circadian activity, rods, blue-sensitive cones, retina, relative spectral circadian efficiency, spectral selection, solar activity cycle, radiation, atmospheric transmission coefficients, spectral density of irradiance, irradiance