

Методика определения эффективных режимов воздействия оптического излучения при управлении циркадианной активностью организма человека

А. В. ЛЕОНИДОВ

E-mail: avleonidoff@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены этапы преобразования прямой и рассеянной составляющих солнечного излучения в коротковолновом и длинноволновом спектральных каналах тракта управления циркадианной активностью человека. Разработана методика определения зависимости облучённости от угловой высоты Солнца, а также значений энергетических экспозиций в циркадианной области оптического спектра, необходимых для эффективного управления циркадианной активностью человека. Приведён пример использования разработанной методики. Показано совпадение результатов расчётов по этой методике с результатами независимых экспериментальных исследований. Разработанная методика позволяет сформулировать основные светотехнические требования к характеристикам облучательных установок, управляющих циркадианной активностью человека, предотвращающих и купирующих её нарушения.

Ключевые слова: циркадианная активность, угловая высота Солнца, составляющие солнечного излучения, термодинамическая температура, спектральные каналы, эффективная облучённость, энергетическая экспозиция, режимы воздействия, методика расчётов.

Введение

Ведущий физический фактор, управляющий циркадианной активностью (ЦА) организма человека, – суточные изменения характеристик оптического излучения Солнца, достигшего земной поверхности. Эти изменения характеристик солнечного излучения (СИ) обусловлены текущим положением Земли при её орбитальном движении вокруг Солнца, а также его текущей угловой высотой, характерной для конкретной расчётной точки земной поверхности.

При проведении светотехнических и биологических исследований необходимо иметь сведения о зависимости эффективной¹ облучённости E , управляющей ЦА организма человека, от угловой высоты Солнца h в произвольной точке земной поверхности. Эти сведения, а также значения энергетических экспозиций H в разных расчётных точках земной поверхности необходимы и в проектировании специализированных облучательных установок, предназначенных для предотвращения и купирования нарушений ЦА.

¹ Здесь и далее под «эффективной» понимается мера реакции организма человека на воздействие облучённости и спектральной плотности облучённости, создаваемых СИ в циркадианной области спектра, а также – энергетической экспозиции в соответствующем управлении ЦА диапазоне угловых высот Солнца.

Предотвращение и купирование нарушений ЦА человека создают предпосылки для сохранения психосоматического здоровья и поддержания на необходимом уровне общей и зрительной работоспособности человека, а также обеспечивают поддержание его суточной интеллектуальной активности.

Цель настоящей работы – разработка методики определения эффективных энергетических характеристик солнечного и искусственного излучений, управляющих ЦА организма человека.

Исходные данные

В качестве модели излучения Солнца использована спектральная плотность энергетической светимости его фотосферы $m_{es}(\lambda, T)$, описываемая функцией Планка [1]:

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

где λ – длина волны излучения, T – термодинамическая температура равновесного излучения чёрного тела, $C_1 \approx 3,742 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² и $C_2 \approx 1,439 \cdot 10^{-2}$ м·К [2].

Спектральная плотность облучённости (СПО), создаваемой СИ при нормальном падении на площадку, расположенную на верхней границе земной атмосферы, выражается как [3]

$$e_{es}(\lambda, T) = \left(\frac{r}{R} \right)^2 m_{es}(\lambda, T), \quad (1)$$

где T – усреднённая по фотосфере Солнца термодинамическая температура СИ, $r = 6,96 \cdot 10^5$ км – экваториальный радиус Солнца, $R = 1,496 \cdot 10^{12}$ км – радиус круговой орбиты Земли [4, 5].

Значение T в (1) существенно зависит от номера года n в пределах 11-летнего цикла Швабе [6] солнечной активности и представляется как [3]

$$T(n) = T_{aver} \left[1 + 0,027 \sin \left(\frac{2\pi n}{11} - \frac{\pi}{2} \right) \right],$$

где $T_{aver} = 0,5 \cdot (T_{min} + T_{max})$, $T_{min} \approx 5480$ К, $T_{max} \approx 5780$ К – значения термодинамической температуры СИ на верхней границе атмосферы, соответствующие минимуму и максимуму солнечной активности, $0 \leq n \leq 11$.

В результате распространения СИ в атмосфере на земной поверхности образуются две составляющие излучения: прямая (Dir) и рассеянная ($Diff$). Значения термодинамической температуры прямой и рассеянной составляющих СИ в светлый период суток в расчётной точке земной поверхности зависят от угловой высоты Солнца, то есть $T_{Dir} = T_{Dir}(h, n)$ и $T_{Diff} = T_{Diff}(h, n)$.

Функции $T_{\text{Dir}}(h, n)$ и $T_{\text{Diff}}(h, n)$ могут быть представлены в виде аппроксимирующих зависимостей

$$T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \approx T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n). \quad (2)$$

Анализ литературы касательно экспериментальных данных по зависимостям $T_{\text{Dir}}(h, n)$ и $T_{\text{Diff}}(h, n)$, в частности [7] и др., а также проведённая аппроксимация этих данных показала, что $T_{\text{Dir(Diff)}}(h)$ в (2) может быть представлена как

$$T_{\text{Dir(Diff)}}(h) = a_{\text{Dir(Diff)}} \exp(-b_{\text{Dir(Diff)}} h). \quad (3)$$

Спектральные плотности прямой и рассеянной составляющих облучённости на земной поверхности, создаваемые СИ, выражаются как

$$e_{\text{eS,Dir(Diff)}} \left[\lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \right] = \left(\frac{r}{R} \right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h) C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)} - 1 \right)^{-1}, \quad (4)$$

где $T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)$ – зависимости (2), $\tau_{\text{Dir(Diff)}}(h)$ – зависимости интегральных коэффициентов пропускания прямой и рассеянной составляющих СИ в спектральном окне прозрачности атмосферы $300 \leq \lambda \leq 1200$ нм [8] при разных состояниях облачного покрова атмосферы.

Зависимость $\tau_{\text{Dir(Diff)}}(h)$ в (4) имеет вид [3]

$$\tau_{\text{Dir(Diff)}}(h) = \tau_{\text{Dir(Diff)}}(90^\circ) \times 0,5 \left[1 + \sin(d_{\text{Dir(Diff)}} h - g_{\text{Dir(Diff)}}) \right], \quad (5)$$

где $\tau_{\text{Dir(Diff)}}(90^\circ)$ – интегральные коэффициенты пропускания при нормальном падении СИ на земную поверхность (максимальная угловая высота Солнца $h = 90^\circ$ реализуется на экваторе в полдень суток весеннего или осеннего равноденствий), коэффициенты $d_{\text{Dir(Diff)}}$, $g_{\text{Dir(Diff)}}$ для разных составляющих облачного покрова атмосферы приведены в [9].

СПО прямой и рассеянной составляющих СИ на земной поверхности по соотношению (4) принимаются фотоприёмниками сетчатки, характеризующимися функцией относительной спектральной циркадианной эффективности (ФОСЦЭ) вида [10]

$$c(\lambda) = c_1(\lambda) + c_2(\lambda) = \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_{1\text{max}})^2}{2\sigma_1^2} \right] + \frac{\alpha_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_{2\text{max}})^2}{2\sigma_2^2} \right], \quad (6)$$

полученной при аппроксимации результатов независимых экспериментальных исследований Д. Брейнарда и К. Тапана с сотрудниками, в частности [11–14].

Графики функции (6) и её слагаемых $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$ приведены на рис. 1. ФОСЦЭ, полученные Брейнардом и Тапаном, различаются лишь соотношением максимумов функций $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$.

Полученные результаты

Функции $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$ образуют коротковолновый (*SW*) и длинноволновый (*LW*) спектральные каналы тракта управления ЦА [10] и осуществляют спектрально-селективные преобразования СПО СИ (4), описываемые произведениями

$$e_{\text{eS,Dir(Diff),SW(LW)}} \left[\lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \right] c_{1(2)}(\lambda) = \left(\frac{r}{R} \right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h) C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)} - 1 \right)^{-1} \times c_{1(2)}(\lambda) \quad (7)$$

с выделением из широкополосного спектра (4) спектральной области $350 \leq \lambda \leq 540$ нм при спектральной селекции, осуществляемой только синечувствительными (*B*) колбочками, спектральной области $450 \leq \lambda \leq 570$ нм при спектральной селекции только палочками и спектральной области $350 \leq \lambda \leq 570$ нм при совместной спектральной селекции *B*-колбочками и палочками сетчатки. Очевидно, после спектрально-селективной обработки функции (4) функциями $c_1(\lambda)$, $c_2(\lambda)$, $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$ по соотношению (7) форма полученного спектра определяется исключительно неизменными и независимыми от угловой высоты Солнца спектральными характеристиками этих функций.

Изменение $T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)$ на земной поверхности при изменении угловой высоты Солнца в светлый период суток приводит не только к изменению спектрального состава СИ (4), но и к смещению максимума спектра (4) по λ в соответствии с законом смещения Вина $\lambda_{\text{max}} \cdot T(h, n) = C_3 \approx 0,2898 \cdot 10^{-2}$ м·К [2].

Изменение значений λ_{max} относительно фиксированного по λ положения функций $c_1(\lambda)$, $c_2(\lambda)$, $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$ при неизменной спектральной форме (7) приводит к зависимости энергетических характеристик (7) от угловой высоты Солнца.

Определение зависимости энергетических характеристик (7) от угловой высоты Солнца основано на использовании двухэтапного преобразования аргументов в (7). На первом этапе осуществляется переход от шкалы λ к шкале λ_{max} , представляющий собой линейное (тождественное) преобразование аргумента λ в аргумент λ_{max} . На втором этапе производится нелинейное функциональное преобразование λ_{max} в угловую высоту Солнца h с использованием закона смещения Вина, осуществляемое посредством функции, обратной функции (2).

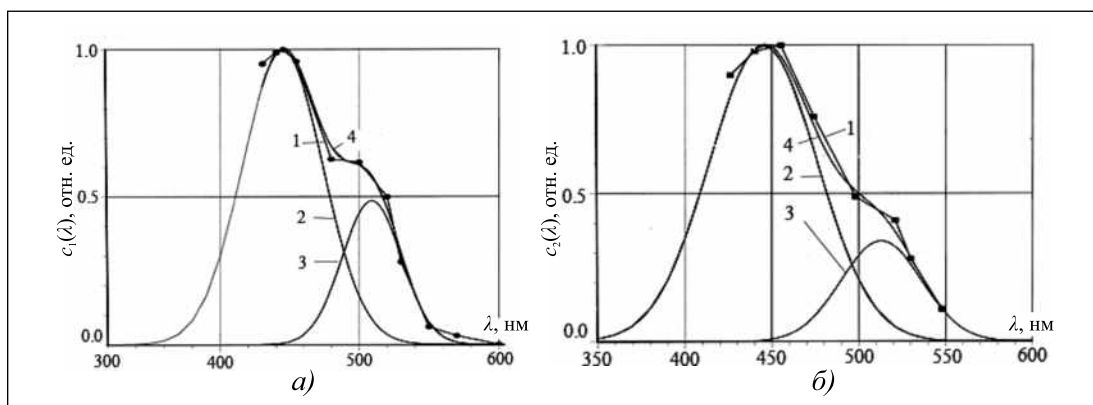
Функциональное преобразование аргументов в (7) осуществляется по известному правилу, например [15, 16]:

$$S(y) = S(x) \left| \frac{dx}{dy} \right| = S[\varphi(y)] \left| \frac{d\varphi(y)}{dy} \right|, \quad (8)$$

где x – исходный аргумент, y – новый аргумент, $x = \varphi(y)$ – функция, обратная исходной функции $y = f(x)$.

На первом этапе преобразований аргумента λ в λ_{max} производится прямая подстановка в (4) аргумента λ_{max} вместо λ :

Рис. 1. ФОСЦЭ, полученные Брейнардом (а) и Тапаном (б), слагаемые $c_1(\lambda)$, $c_2(\lambda)$ в соотношении (9) и сумма $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$: 1 – результаты экспериментальных исследований [11–14], 2 – функция $c_1(\lambda)$, 3 – функция $c_2(\lambda)$, 4 – функция $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$, аппроксимирующая результаты исследований [11–14]



$$e_{\text{Dir(Diff),SW(LW)}}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}, h, n) \cdot c_{1(2)}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}) = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) C_1 \lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}^{-5} \times \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}} T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)} - 1\right) \right]^{-1} \times \left| \frac{d\lambda}{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}} \right| c_{1(2)}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}). \quad (9)$$

В соотношении (9) модуль производной $\left| \frac{d\lambda}{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}} \right| = 1$,

а само (9) описывает форму спектра, сохраняющую подобие при всех значениях h и n , так как его форма определяется исключительно функциями $c_1(\lambda)$, $c_2(\lambda)$ или $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$.

Определение энергетических характеристик зависимости функции $e_{\text{Dir(Diff),SW(LW)}}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}, h, n) \cdot c_{1(2)}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}})$ от угловой высоты Солнца производится с использованием закона смещения Вина.

Закон Вина при нелинейном функциональном преобразовании $\lambda_{\text{max}} \rightarrow h$ имеет вид

$$\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}(h, n) = C_3 \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^{-1}. \quad (10)$$

При нелинейном преобразовании аргументов $\lambda_{\text{max}} \rightarrow h$ в соотношении (9) по правилу (8) вместо сомножителей

$$\left| \frac{d\lambda}{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}} \right| c_{1(2)}(\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}) \text{ вводятся сомножители } \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}}{dh} \right| c_{1(2)}(h, n).$$

В остальных сомножителях производится простая подстановка соотношения (10).

Производные $\left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}}{dh} \right|$ выражаются как

$$\left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir(Diff)}}}{dh} \right| = C_3 \left| \frac{d \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) \right]}{dh} \right| \times \frac{1}{\left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^2}. \quad (11)$$

После подстановки (10) и (11) в соотношение (9) оно описывает лишь зависимость его формы от значений h и n в относительных единицах (*rel*):

$$e_{\text{Dir(Diff),SW(LW)}} \left\{ C_3 \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^{-1} \right\} \Big|_{\text{rel}} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) C_1 C_3^{-5} \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^5 \times \left[\exp\left(\frac{C_2}{\left\{ C_3 \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^{-1} \right\}} - 1\right) \right]^{-1} \times C_3 \left| \frac{d \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) \right]}{dh} \right| \frac{1}{\left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^2} c_{1(2)}(h, n). \quad (12)$$

Упрощение выражения (12) приводит его к виду

$$e_{\text{Dir(Diff),SW(LW)}}(h, n) \Big|_{\text{rel}} = e_{\text{Dir(Diff)eS}}(h, n) \left| \frac{dT_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)}{dh} \right| c_1(h, n) \Big|_{\text{rel}} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) C_1 C_3^{-5} \times \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{C_3} - 1\right) \right)^{-1} \times C_3 \left| \frac{d \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) \right]}{dh} \right| \frac{1}{\left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^2} c_{1(2)}(h, n). \quad (13)$$

В соотношениях (12) и (13) произведения $C_3 C_3^{-5}$, $\left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \right]^5$ и $\frac{1}{\left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) \right]^2}$ для наглядности остав-

лены без упрощения.

Функция (13) имеет форму, близкую к колоколообразной, с максимумами при разных сочетаниях прямой и рассеянной составляющих СИ с SW- и LW-спектральными каналами, то есть при $h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}}$.

Введение в (13) в качестве дополнительного сомножителя произведения $c_{1(2)}(\lambda)$ из (9) позволяет получить зависимости СПО (в относительных единицах) от двух переменных $-h$ и λ – в виде трёхмерного сигнала управления $e_{\text{SW(LW)}}(\lambda, h, n)|_{\text{rel}}$ на входе *супрагипертензивных ядер гипоталамуса* (СХЯГ):

$$e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}}(\lambda, h, n)|_{\text{rel}} = \left(\frac{r}{R} \right)^2 \tau_{\text{Dir(Diff)}}(h, n) C_1 C_3^{-5} \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^5 \times \left(\exp \frac{C_2}{C_3} - 1 \right)^{-1} \left| \frac{dT_{\text{Dir(Diff)}}(h, n)}{dh} \right| c_{1(2)}(h, n) c_{1(2)}(\lambda). \quad (14)$$

График функции (14) в относительных единицах, как и – функции (13), также имеет колоколообразную форму.

Зависимости абсолютных эффективных значений (13) от текущих значений угловой высоты Солнца при каждом возможном сочетании прямой и рассеянной составляющих СИ с функциями $c_{1(2)}(h, n)$ определяется с использованием вычисленных значений $h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}}$, соответствующих максимальным значениям (13). После этого проводится нормирование соотношения (13) путём деления его левой и правой частей на значения (13), вычисленные при $h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}}$, то есть определяются функции

$$e_{\text{norm, Dir(Diff), SW(LW)}}(h, n) = \frac{e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}} \left\{ C_3 \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h) + T(n) \right]^{-1} \right\} |_{\text{rel}}}{e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}} \left\{ C_3 \left[T_{\text{Dir(Diff)}}(h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)})} + T(n) \right]^{-1} \right\} |_{\text{rel}}}. \quad (15)$$

Для вычисленных значений угловых высот Солнца $h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}}$, соответствующих максимальным значениям соотношения (13), по соотношению (7) определяются зависимости абсолютных значений СПО

$$e_{\text{eS, Dir(Diff), SW(LW)}} \left[\lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(n, h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)})} \right] c_{1(2)}(\lambda)$$

от λ .

Зависимости абсолютных значений СПО на входе СХЯГ (в 3-мерном представлении) получены с использованием соотношения (7) путём умножения

$$e_{\text{eS, Dir(Diff), SW(LW)}} \left[\lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(n, h = h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)})} \right] c_{1(2)}(\lambda)$$

на нормированные функции (15).

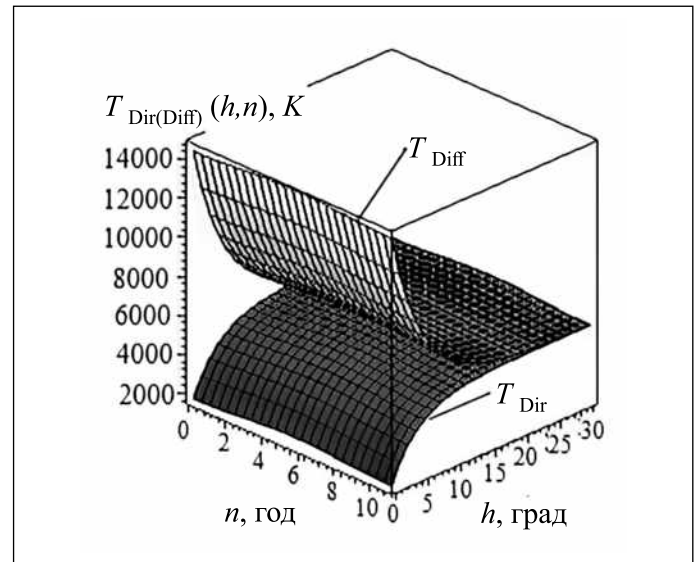


Рис. 2. Графики функций $T_{\text{Dir}}(h, n)$ и $T_{\text{Diff}}(h, n)$ в произвольной расчётной точке земной поверхности в 11-летнем цикле солнечной активности

Максимальные значения СПО в абсолютных единицах на выходе СХЯГ (зависящие лишь от значений h) получены с использованием (7) из произведения

$$e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}}(\lambda, h) = e_{\text{norm, Dir(Diff), SW(LW)}}(h, n) \times e_{\text{eS, Dir(Diff), SW(LW)}} \left[\lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(n, h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)})} \right] c_{1(2)}(\lambda)$$

путём подстановки значений $\lambda = 445$ и 505 нм, соответствующих максимальным значениям функций $c_1(\lambda)$ и $c_2(\lambda)$. Зависимости $e_{\text{Dir(Diff), SW(LW)}}(h, n)$ на выходе СХЯГ, полученные после указанной подстановки, есть сигналы, непосредственно управляющие суточной активностью эпифиза, секретирующего в плазму крови гормон мелатонин. Суточные вариации концентрации мелатонина в плазме крови приводят в итоге к суточному управлению неосознаваемыми биологическими реакциями, в том числе ЦА человека. ЦА непосредственно влияет на разные характеристики зрительного восприятия, являющиеся основой при построении психической модели Мира в статике и динамике, и управление на этой основе высшими интеллектуальными функциями человека, включая конкретную и абстрактную мыслительную деятельность.

Разработанная методика и произведение соотношений (7) и нормированных функций (15) позволяет получить важные для экспериментальных и теоретических исследований ЦА зависимости облучённости в циркадианной области спектра от угловой высоты Солнца – $E(h)$, а также значения энергетической экспозиции H в диапазоне $\Delta h = h_{\text{fin}} - h_{\text{init}}$ изменения функции $E(h)$, где h_{fin} и h_{init} – конечная и начальная угловые высоты Солнца.

Облучённость $E(h)$ представляется в виде

$$E(h) = e_{\text{norm, Dir(Diff), SW(LW)}}(h, n) \times \int_{\lambda_{\text{init}}}^{\lambda_{\text{fin}}} e_{\text{eS, Dir(Diff), SW(LW)}} \left[\lambda, T_{\text{Dir(Diff)}}(h_{\text{max, Dir(Diff), SW(LW)}, n) \right] \times c_{1(2)}(\lambda) d\lambda, \quad (16)$$

а энергетическая экспозиция в виде

$$H(\Delta h) = \int_{\lambda_{\text{init}}}^{\lambda_{\text{fin}}} \int_{0^\circ}^{90^\circ} e_{eS, \text{Dir}(\text{Diff}), \text{SW}(\text{LW})} \left[\lambda, T_{\text{Dir}(\text{Diff})} \left(h_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff}), \text{SW}(\text{LW}), n} \right) \right] c_{1(2)}(\lambda) e_{\text{norm}, \text{Dir}(\text{Diff}), \text{SW}(\text{LW})} (h, n) d\lambda dh. \quad (17)$$

В соотношениях (16) и (17) λ_{init} и λ_{fin} есть λ , ограничивающие рассматриваемый спектральный диапазон, определяемые функциями $c_1(\lambda)$, $c_2(\lambda)$, $c_1(\lambda) + c_2(\lambda)$, 0° и 90° – угловые высоты Солнца, ограничивающие возможный диапазон угловой высоты Солнца.

Ниже, в качестве примера, приведены результаты расчётов с использованием разработанной методики, описывающие обработку прямой и рассеянной составляющих СИ в SW-спектральном канале тракта управления ЦА и определяющие эффективные режимы воздействия излучения при максимуме солнечной активности ($n = 5,5$), например, в условиях безоблачного неба.

Функция $T_{h_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff}), \text{SW}(\text{LW})}}(h, n)$ (2) с учётом (3) в выражении для спектральной плотности прямой и рассеянной составляющих облучённости (4) в рассматриваемых условиях выражается как

$$T_{\text{Dir}(\text{Diff})}(h, n) \approx a_{\text{Dir}(\text{Diff})} \exp(-b_{\text{Dir}(\text{Diff})} h) + T(n). \quad (18)$$

В выражении (18) $a_{\text{Dir}} = -3780$, $b_{\text{Dir}} = 0,2444$, $a_{\text{Diff}} = 8950$, $b_{\text{Diff}} = 0,2084$, $T(n = 5,5) = 5780$.

Графики зависимостей (18) изображены на рис. 2.

В выражении (5) коэффициенты имеют следующие значения: $\tau_{\text{Dir}}(90^\circ) = 0,73$, $d_{\text{Dir}} = 0,0348$, $g_{\text{Dir}} = 1,55$, $\tau_{\text{Diff}}(90^\circ) = 0,13$, $d_{\text{Diff}} = 0,029$, $g_{\text{Diff}} = 1,04$, а коэффициенты в выражении (6), например, при данных [13] – следующие: $\alpha_1 = 72,56 \cdot 10^{-9}$ м, $\sigma_1 = 28,99 \cdot 10^{-9}$ м, $\lambda_{1, \text{max}} = 445 \cdot 10^{-9}$ м, $\alpha_2 = 25,89 \cdot 10^{-9}$ м, $\sigma_2 = 21,21 \cdot 10^{-9}$ м, $\lambda_{2, \text{max}} = 505 \cdot 10^{-9}$ м.

В соответствии с законом смещения Вина, выражения для $\lambda_{\text{max}, \text{Dir}}$ и $\lambda_{\text{max}, \text{Diff}}$ (10) с учётом выражения (3) имеют вид

$$\lambda_{\text{max}, \text{Dir}} = C_3 [-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]^{-1}, \quad (19)$$

$$\lambda_{\text{max}, \text{Diff}} = C_3 [8950 \exp(-0,2084h) + 5780]^{-1}. \quad (20)$$

Производные в (9) таковы:

$$\left| \frac{d\lambda_{\text{max}, \text{Dir}}}{dh} \right| = \frac{2,6773 \exp(-0,2444h)}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]^2}, \quad (21)$$

$$\left| \frac{d\lambda_{\text{max}, \text{Diff}}}{dh} \right| = \frac{5,4053 \exp(-0,2084h)}{[8950 \exp(-0,2084h) + 5780]^2}. \quad (22)$$

После подстановки выражения (6) с входящими в него коэффициентами α_1 , σ_1 , $\lambda_{1, \text{max}}$, α_2 , σ_2 , $\lambda_{2, \text{max}}$ и выражений (19)–(22) в соотношение (13) – для максимальных значений прямой составляющей СИ в SW-спектральном канале – выражение $e(h, n)|_{\text{rel}}$ на входе СХЯГ в развёрнутом виде имеет вид

$$e_{\text{Dir}, \text{SW}}(h, n)|_{\text{rel}} =$$

$$= \left(\frac{r}{R} \right)^2 0,73 \cdot 0,5 [1 + \sin(0,0348h - 1,55)] \times \\ \times C_1 \left\{ \frac{C_3}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]} \right\}^{-5} \left[\exp \frac{C_2}{C_3} - 1 \right]^{-1} \times \\ \times \frac{2,6773 \exp(-0,2444h)}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]^2} \frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \\ \times \exp \left[- \frac{\left(\frac{C_3}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]} - 445 \cdot 10^{-9} \right)^2}{2\sigma_1^2} \right]. \quad (23)$$

Аналогичное выражение для рассеянной составляющей СИ в SW-спектральном канале выглядит как

$$e_{\text{Diff}, \text{SW}}(h, n) = \\ = \left(\frac{r}{R} \right)^2 0,13 \cdot 0,5 [1 + \sin(0,029h - 1,04)] \times \\ \times C_1 \left\{ \frac{C_3}{[8950 \exp(-0,2084h) + 5780]} \right\}^{-5} \cdot \left[\exp \frac{C_2}{\tilde{N}_3} - 1 \right]^{-1} \times \\ \times \frac{5,4053 \cdot \exp(-0,2084h)}{[8950 \cdot \exp(-0,2084h) + 5780]^2} \times \left(\frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \right) \times \\ \times \exp \left[- \frac{\left(\frac{C_3}{[8950 \exp(-0,2084h) + 5780]} - 445 \cdot 10^{-9} \right)^2}{2\sigma_1^2} \right].$$

Зависимость СПО от $\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}$ и h на входе СХЯГ представляется в форме

$$e_{\text{Dir}(\text{Diff})}(\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}, h, n)|_{\text{rel}} = \\ = \left(\frac{r}{R} \right)^2 \tau_{\text{Dir}(\text{Diff})}(h, n) C_1 \lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}^{-5} \times \\ \times \left(\exp \frac{C_2}{\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})} T_{\text{Dir}(\text{Diff})}(h, n)} - 1 \right)^{-1} \times \\ \times c_{1(2)}(\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}) \left| \frac{d\lambda_{\text{max}, \text{Dir}(\text{Diff})}}{dh} \right| c_{1(2)}(h, n).$$

Угловая высота Солнца, соответствующая максимальному значению $e_{\text{Dir}, \text{SW}}(h)$, вычисленная по выражению (23), равна $h_{\text{max}} 16,14^\circ$, а соответствующее максимальное значение функции $e_{\text{Dir}, \text{SW}}(h)|_{\text{rel}}$ составляет 0,01533.

Интегрирование по λ функции $e_{eS, \text{Dir}, \text{SW}}(\lambda, h)$ по соотношению (7) при $h_{\text{max}} = 16,14^\circ$ даёт максимальное значение облучённости:

$$E_{\text{Dir}, \text{SW}}(h_{\text{max}} = 16,14^\circ) =$$

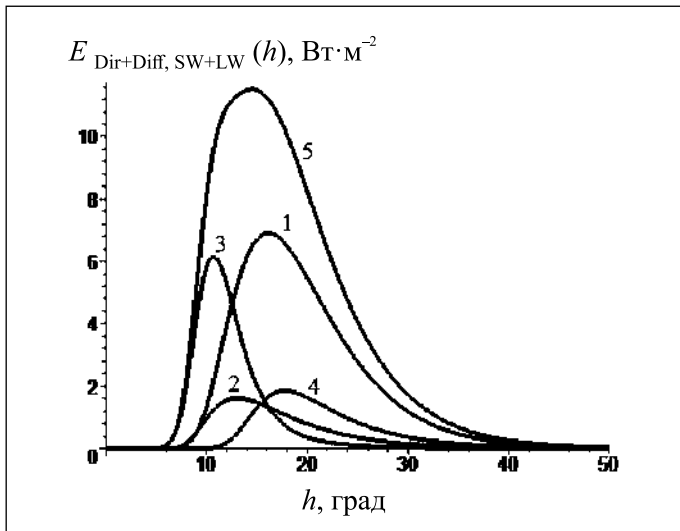


Рис. 3. Зависимости эффективных облучённостей от угловой высоты Солнца при совместном воздействии прямой и рассеянной составляющих СИ одновременно на *SW*- и *LW*-спектральные каналы: 1 – облучённость при воздействии прямой составляющей СИ на *SW*-спектральный канал, 2 – облучённость при воздействии прямой составляющей СИ на *LW*-спектральный канал, 3 – облучённость при воздействии рассеянной составляющей СИ на *SW*-спектральный канал, 4 – облучённость при воздействии рассеянной составляющей СИ на *LW*-спектральный канал, 5 – облучённость, соответствующая сумме прямой и рассеянной составляющих СИ, воздействующих одновременно на *SW*- и *LW*-спектральные каналы

$$= \int_{350 \cdot 10^{-9}}^{570 \cdot 10^{-9}} e_{\text{Dir,SW}}(\lambda) \Big|_{h_{\text{max}}=16,14^\circ} d\lambda = 6,915 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (24)$$

После умножения вычисленного значения интеграла (24) на нормированную функцию $e_{\text{norm,Dir,SW}}(h, n)$, получаемую из $e_{\text{norm,Dir(Diff),SW(DW)}}(h, n)$ по соотношению (15), выражение для зависимости облучённости $E_{\text{Dir,SW}}(h)$, создаваемой прямой составляющей СИ в *SW*-спектральном канале, имеет вид

$$\begin{aligned} E_{\text{Dir,SW}}(h) &= \frac{6,9145}{0,01533} e_{\text{Dir es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir}}}{dh} \right| c_1(h) = \\ &= 4,5115 \cdot 10^2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \cdot C_1 \left\{ \frac{C_3}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]} \right\}^{-5} \times \\ &\quad \times \left[\exp \frac{C_2}{C_3} - 1 \right]^{-1} \cdot 0,73 \times \\ &\quad \times 0,5 [1 + \sin(0,0348h - 1,55)] \times \\ &\quad \times \frac{2,6773 \exp(-0,2444h)}{[-3780 \exp(-0,2444h) + 5780]^2} \times \\ &\quad \times \left(\frac{\alpha_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \right) \times \\ &\quad \times \exp \left[- \frac{\left(\frac{C_3}{[-3780 \exp(-0,244h) + 5780]} - 445 \cdot 10^{-9} \right)^2}{2\sigma_1^2} \right]. \quad (25) \end{aligned}$$

Зависимости абсолютных значений эффективной облучённости от угловой высоты Солнца по выражению (25) приведены на рис. 3.

Абсолютное значение эффективной энергетической экспозиции $H_{\text{Dir,SW}}(\Delta h)$ в интервале угловой высоты Солнца, соответствующем воздействию на *SW*-спектральный канал тракта управления ЦА прямой составляющей облучённости $E_{\text{Dir,SW}}(h)$, рассчитывается как

$$H_{\text{Dir,SW}}(\Delta h) = \int_{0^\circ}^{90^\circ} E_{\text{Dir,SW}}(h) dh = 91,218 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}.$$

При совместном воздействии прямой и рассеянной составляющих СИ одновременно на *SW*- и *LW*-спектральные каналы зависимость абсолютных значений эффективной облучённости от угловой высоты Солнца $E_{\text{Dir+Diff, SW+LW}}(h)$ описывается суммой

$$\begin{aligned} E_{\text{Dir+Diff,SW+LW}}(h) &= E_{\text{Dir,SW}}(h) + E_{\text{Dir,LW}}(h) + E_{\text{Diff,SW}}(h) + \\ &+ E_{\text{Diff,LW}}(h) = \frac{6,9145}{0,01533} e_{\text{Dir es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir}}}{dh} \right| c_1(h) + \\ &+ \frac{1,6179}{0,09506} e_{\text{Dir es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Dir}}}{dh} \right| c_2(h) + \\ &+ \frac{6,1639}{0,9512} e_{\text{Diff es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Diff}}}{dh} \right| c_1(h) + \\ &+ \frac{1,8434}{0,07545} e_{\text{Diff es}}(h) \left| \frac{d\lambda_{\text{max,Diff}}}{dh} \right| c_1(h), \quad (26) \end{aligned}$$

слагаемых которой определяются (аналогично соотношению (25)) по данной методике.

Графики слагаемых в (26) $E_{\text{Dir,SW}}(h)$, $E_{\text{Dir,LW}}(h)$, $E_{\text{Diff,SW}}(h)$, $E_{\text{Diff,LW}}(h)$ и их суммы приведены на рис. 3.

Абсолютное значение эффективной энергетической экспозиции $H_{\text{Dir+Diff, SW+LW}}(\Delta h)$ в интервале угловой высоты Солнца $0^\circ \leq h \leq 43^\circ$, соответствующем одновременному воздействию на *SW*- и *LW*-спектральные каналы прямой и рассеянной составляющих эффективной облучённости, выражается как

$$\begin{aligned} H_{\text{Dir+Diff,SW+LW}} &= H_{\text{Dir,SW}} + H_{\text{Dir,LW}} + H_{\text{Diff,SW}} + H_{\text{Diff,LW}} = \\ &= 169,845 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}. \end{aligned}$$

В таблице представлены сводные данные об энергетических характеристиках сигналов управления ЦА при разных сочетаниях воздействий прямой и рассеянной составляющих СИ на *SW*- и *LW*-спектральные каналы.

Данные в последней строке таблицы – облучённости и энергетические экспозиции, реализующиеся в условиях нормального состояния здоровья человека (без фатального поражения одного из спектральных каналов тракта управления ЦА).

Фатальному поражению *LW*-спектрального канала соответствует пятая строка таблицы, а поражению *SW*-спектрального канала – шестая.

Следует отметить, что управление ЦА осуществляется (согласно имеющимся экспериментальным данным) исключительно при непосредственном воздействии СИ на организм человека, то есть в период после восхода и перед заходом Солнца. Данные в таблице полностью соответствуют этому положению: управление ЦА начинается

Эффективные режимы воздействия солнечного излучения в циркадианной области спектра при управлении циркадианной активностью организма человека

Энергетические характеристики → Виды воздействия ↓	h_{init}	h_{fin}	h_{max}	$E(h_{max}), \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	$H, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{град}$
Прямое СИ в <i>SW</i> -спектральном канале	7°	43°	16,14°	6,915	91,218
Прямое СИ в <i>LW</i> -спектральном канале	6°	43°	13,04°	1,618	18,768
Рассеянное СИ в <i>SW</i> -спектральном канале	4,5°	34°	10,69°	6,164	38,100
Рассеянное СИ в <i>LW</i> -спектральном канале	10°	43°	17,78°	1,848	21,731
Прямое и рассеянное СИ в <i>SW</i> -спектральном канале	4,5°	43°	12,56°	9,262	129,341
Прямое и рассеянное СИ в <i>LW</i> -спектральном канале	6°	43°	16,75°	2,987	40,499
Прямое СИ в <i>SW</i> - и <i>LW</i> -спектральных каналах	7°	43°	15,62°	8,263	109,987
Рассеянное СИ в <i>SW</i> - и <i>LW</i> -спектральных каналах	4,5°	43°	10,69°	6,164	59,858
Прямое и рассеянное СИ в <i>SW</i> - и <i>LW</i> -спектральных каналах	4,5°	43°	14,10°	11,492	169,845

(в утренний период) и заканчивается (в вечерний период) при угловой высоте Солнца $h = 4,5^\circ$.

Важным обстоятельством служит и то, что отсутствию нарушений ЦА в реальных случаях воздействия СИ (строки 7–9 таблицы) и случаям фатального поражения одного из спектральных каналов (строки 5 и 6 таблицы) соответствует суточное значение верхней кульминации Солнца h_{fin} , приблизительно равное 43° (рис. 3). При этом, как видно из рис. 3 и таблицы, при $h_{fin} \geq 43^\circ$ управление ЦА прекращается. Обработка результатов независимых экспериментальных исследований показала, что полному отсутствию нарушений ЦА человека при произвольных значениях географической широты и суток года соответствует значение $h_{fin} = 43,13^\circ$ [17]. Дальнейшее увеличение угловой высоты Солнца, например при уменьшении географической широты в произвольные сутки года, не приводит к изменениям ЦА [17].

Совпадение значений h_{fin} , определённых с использованием предлагаемой методики, и полученных обработкой результатов независимых экспериментальных исследований свидетельствует о практической применимости этой методики. Адекватность результатов вычислений, получаемых с использованием последней, свидетельствует о возможности её использования в теоретических и экспериментальных исследованиях ЦА, учитывающих воздействие оптического излучения на организм человека.

Заключение

Приведённые на рис. 3 и в таблице эффективные облучённости и энергетические экспозиции могут использоваться в экспериментальных исследованиях неосознаваемых суточных реакций организма человека на уровни воздействующих облучённости и энергетической экспозиции при разных сочетаниях прямой и рассеянной составляющих оптического излучения на *SW*- и *LW*-спектральные каналы тракта управления ЦА. Использование предлагаемой методики позволяет определять облучённости и энергетические экспозиции, управляющие ЦА человека, также и при наличии разных видов облачного покрова [9]. Результаты настоящей работы, в частности, могут служить основой для организации исследований по нарушениям ЦА при трансмеридианальных авиационных перелётах и сменной работе на предприятиях с непрерывным циклом производства. Кроме того, полученные в работе сведения могут быть использованы при разработке специальных облучательных установок для предотвращения нарушений ЦА, коррекции ЦА в случае их возникновения и для поддержания должной ЦА человека в условиях суточного дефицита СИ, что особенно актуально в связи с необходимостью защиты национальных интересов на приполярных и полярных территориях страны и развитии их хозяйственного использования.

1. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь: Пер. с англ. / Под ред. А.Г. Шереметьева. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
2. Мешков В.В. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов. Ч. 1. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1979. – 368 с.
3. Leonidov A.V. Changes in irradiance and illuminance on Earth surface during 11 – year solar activity cycle // *Light & Engineering*. – 2020. – Vol. 28, No. 2. – P. 61–66,
4. Аллен К.У. Астрофизические величины. Справочное изд. Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 279 с. (*Allen C.W. Astrophysical quantities*. – London: The Athlone Press, 1973. – 279 p.)
5. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. – М.: Наука, 1977.
6. Schwabe H. Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843 // *Astronomische Nachrichten*. – 1844. – Vol. 21. – P. 233.
7. Шварцер К. Освещение с управляемым цветом – исследование и оптимизация систем управления цветовым освещением / Заключительный отчет, 2006. URL: <http://www.bocom.eu/rus/catalog/downloads/Farblichtstadie.rus.pdf> (дата обращения: 30.07.2019).
8. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии: Учебное пособие / Под ред. В.В. Иванова. Изд. 2-е, испр. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 544 с.
9. Leonidov A.V. Calculation of the Natural Illumination of the Earth's Surface at Different States of Cloud Cover // *Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2019. – Vol. 55, No. 11. – P. 1592–1601.
10. Leonidov A.V. On optical receivers in pathway implicated in control of human circadian rhythm // *Biophysics*. – 2016. – Vol. 61, No. 6. – P. 1002–1010.
11. Brainard G.C., Glickman G.L. The biological potency of light in humans: significance to health and behavior / *CIE152*: 2003.
12. Брейнард Г.К., Гликман Г.Л. Биологическое влияние света на здоровье и поведение человека // *Светотехника*. – 2004. – № 1. – С. 4–8.
13. Thapan K., Arendt J., Skene D.J. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non – rod, non – cone photoreceptor system in humans // *J. Physiol*. – 2001. – Vol. 535. – P. 261–267.
14. Brainard G.C., Provencio I. Photoreception for the neurobehavioral effects of light in humans / *CIE031:2006 «Proc. 2nd CIE Expert Symposium on «Lighting and Health»»*. – P. 6–21.
15. Венцель Е.С. Теория вероятностей. Изд 2-е, перераб. и доп. – М.: Физматгиз, 1962. – 564 с.
16. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая. – М.: Советское радио, 1966. – 728 с.
17. Leonidov A.V. On conditions of occurrence of seasonal disorders in human circannual and circadian rhythm // *Biophysics*. – 2014. – Vol. 59, No. 1. – P. 157–161.



Леонидов Александр Вячеславович,
кандидат техн. наук. Окончил в 1970 г. МЭИ
по специальности «Светотехника и источники
света»

Российские учёные обнаружили чрезвычайно яркие вспышки, которые испускал искусственный алмаз, содержащий примеси германия. Необычное по характеристикам излучение исследователи связали с переходом германиевых центров к своеобразному коллективному состоянию. В результате вероятность поглощения и излучения света увеличивалась в разы. Результаты работы опубликованы в журнале «*Physical Review B*» (*N.A. Lozing, M.G. Gladush, I. Yu. Eremchev, E.A. Ekimov, A.V. Naumov Stochastic superflares of photoluminescence from a single microdiamond with germanium-vacancy color centers: A general phenomenon or a unique observation // Phys. Rev. B102, 060301(R) – Published 12 August 2020*).

По структуре алмаз представляет собой кристаллическую решётку, в которой каждый атом углерода связан с четырьмя ближайшими соседями, расположенными в вершинах правильного тетраэдра. Алмаз очень прочен, нетоксичен для живых организмов и достаточно прост для синтеза, при этом сохраняется возможность замещения нескольких узлов кристаллической решётки атомами других элементов. Подобные замены называют точечными дефектами кристалла. Такие примеси, как азот, кремний и германий позволяют алмазам эффективно поглощать и испускать свет, что обеспечивает характерный цвет кристалла. Оптические свойства алмазов с примесями зависят от внешних условий: температуры, давления, параметров электрических и магнитных полей, а потому их можно использовать в качестве сенсоров

В ходе поддержанной грантом Российского научного фонда работы коллективу под руководством профессора РАН Андрея Наумова удалось пронаблюдать и объяснить необычный эффект значительного (более чем на порядок величины) возрастания интенсивности свечения алмаза за очень короткий промежуток времени – от нескольких секунд до минут. Исследователи наблюдали необычную по своим характеристикам люминесценцию в одном из искусственных микроалмазов с примесями германия. Алмаз был создан с использованием оригинального метода синтеза при высоком давлении и температуре.

Для изучения оптико-спектральных свойств алмазов с германиевыми примесями специалисты использовали технику лазерной флуоресцентной спектроскопии. Микрокристаллы, размещённые на поверхности прозрачного стекла, освещали непрерывным зелёным светом лазера, а возникающее при этом излучение детектировала высокочувствительная камера. Свечение одного из исследованных алмазов представляло собой повторяющиеся яркие вспышки, возникающие в германиевых центрах. В основе механизма, вероятно, лежит кооперация между отдельными центрами, представляющими источники излучения. Авторы полагают, что это явление носит всеобщий характер, и дальнейшие эксперименты с условиями синтеза алмазов позволят получать подобные сверхъяркие частицы.

«Понимание природы наблюдаемого эффекта не только внесёт вклад в копилку фундаментальных знаний, но и может заложить основу фотонных и оптоэлектронных устройств нового поколения», – подчеркнул Наумов (зав. лабораторией электронных спектров молекул Института спектроскопии РАН).