

Оценка освещенности земной поверхности космическим отражателем, предназначенным для стабилизации температурного режима атмосферы

© Е.И. Старовойтов

ПАО «РКК «Энергия», г. Королев, Московская обл.,
141070, Россия

Для стабилизации температурного режима атмосферы Земли в условиях глобального похолодания предлагается использовать солнечный парусный корабль, расположенный в точках либрации системы Земля — Луна, который увеличит инсоляцию земной поверхности. Методами геометрической оптики выполнен количественный анализ светового воздействия в видимой и УФ-области спектра, способного оказать негативное влияние на живые организмы. Проведено сравнение полученных результатов с другими данными о воздействии избыточной освещенности на экологию и человека. Сформулированы основные технические проблемы, связанные с постройкой солнечного парусного корабля.

Ключевые слова: Солнце, отражатель, освещенность, экология, световое загрязнение, УФ-индекс

Введение. Изменение климата в ближайшем будущем несет в себе угрозу существованию современной цивилизации на Земле, для предотвращения которой необходимо использовать широкий арсенал имеющихся технических средств, особое место в котором занимает космическая техника.

В РКК «Энергия» предложена концепция космической системы регулирования температурного режима атмосферы Земли на основе солнечного парусного корабля (СПК), расположенного в точках либрации фотогравитационного поля систем Земля — Солнце или Земля — Луна [1, 2], используемого для изменения инсоляции земной поверхности.

Рассмотрен вариант СПК, предназначенный для увеличения инсоляции земной поверхности, который позволяет поднять глобальную температуру на 4 °С в условиях глобального похолодания [2]. Такой СПК с двухсторонней зеркально отражающей поверхностью диаметром 1960 км размещают в точках либрации L_4 или L_5 системы Земля — Луна.

Период вращения корабля вокруг оси, лежащей в отражающей плоскости конструкции и расположенной нормально к плоскости эклиптики, вдвое превышает период вращения Луны вокруг Земли. При пересечении СПК прямой Земля — Солнце нормали отражающих

поверхностей совпадают с ней. Основой для изготовления СПК является алюминиевая фольга, произведенная, возможно, с использованием ресурсов Луны.

В ходе эксплуатации СПК увеличиваются освещенность земной поверхности и продолжительность светового дня, что может повлиять как на живую природу, так и на человека.

В течение десятков лет различные специалисты многих стран мира обсуждают проблему увеличения яркости ночного неба вблизи крупных мегаполисов и промышленных объектов, так называемое световое загрязнение, которое негативно воздействует на окружающую среду, вызывает перерасход энергии и ухудшает условия для ведения астрономических наблюдений [3].

Все живые организмы на Земле, подвергающиеся воздействию солнечной радиации, имеют определенные фотобиологические реакции, среди которых особое место занимает фотопериодизм — реакция на суточные изменения освещенности. Циклические изменения освещенности, не совпадающие с ритмами, формируемыми естественными источниками света, могут повлиять на фотопериодизм многих организмов самым неизвестным образом.

Кроме того, некоторые организмы используют небесные тела для ориентации в пространстве [4]. Механизмы такой их ориентации в настоящее время мало исследованы, поэтому трудно оценить, какое влияние окажут на них изменения внешней освещенности.

В спектре отраженного излучения присутствует УФ-радиация (0,28...0,38 мкм), которая в зависимости от мощности оказывает различные фотобиологические эффекты. Необходима отдельная оценка их воздействия в этом спектральном диапазоне.

Цель настоящей работы заключается в оценке освещенности СПК земной поверхности в видимой и УФ-области спектра и в последующем сопоставлении количественных результатов с известными к настоящему времени данными об уровнях избыточной освещенности, оказывающей негативное воздействие на экологию в целом и на человека в частности.

Оценка уровня отраженной УФ-радиации. Алюминиевая фольга, из которой изготовлен отражатель СПК, имеет высокую отражательную способность в УФ-области спектра.

Уровень солнечной УФ-радиации, приходящей на горизонтальную площадку земной поверхности, характеризуется УФ-индексом (УФИ), который выражают через целое положительное число от 1 до 14 (степень воздействия — от низкой до опасной). УФИ — безразмерная величина, количественно определяемая [5] по выражению

$$\text{УФИ} = k \int_{250\text{ нм}}^{400\text{ нм}} E_c(\lambda) s_{\text{эп}}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $k = 40 \text{ м}^2/\text{Вт}$ и является константой; $E_c(\lambda)$ — спектральная плотность излучения Солнца; $s_{\text{эп}}(\lambda)$ — характеристика эритемного воздействия на кожу человека, определяемая [5] следующим образом:

$$s_{\text{эп}}(\lambda) = \begin{cases} 1 & \text{при } 250 \text{ нм} \leq \lambda \leq 298 \text{ нм}; \\ 10^{0,094(298-\lambda)} & \text{при } 298 \text{ нм} \leq \lambda \leq 328 \text{ нм}; \\ 10^{0,015(140-\lambda)} & \text{при } 328 \text{ нм} \leq \lambda \leq 400 \text{ нм}. \end{cases} \quad (2)$$

Освещенность земной поверхности при зеркальном отражении светового потока от СПК оценивается в приближении геометрической оптики как

$$E_3(\lambda) = \frac{S_{\text{отр}} F(\lambda) \rho_3(\lambda) K(\lambda) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos(\theta)}{S_{\text{осв}}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{отр}}$ — площадь отражателя; $F(\lambda)$ — спектральная плотность излучения Солнца на околоземной орбите в данном диапазоне; $\rho_3(\lambda)$ — спектральное альbedo материала при зеркальном отражении; $K(\lambda)$ — спектральный коэффициент поглощения в атмосфере; φ — угол между падающим и отраженным световыми пучками; θ — зенитный угол; $S_{\text{осв}}$ — площадь освещенного участка земной поверхности, которая для симметричного отраженного светового пучка составляет

$$S_{\text{осв}} = \frac{\pi(\beta D)^2}{4}, \quad (4)$$

где β — угол расхождения отраженного светового пучка; D — расстояние от СПК до Земли.

На ночной стороне орбиты при приближении СПК к прямой Земля — Солнце он будет попадать в полутень, а затем и в тень от Земли. Минимальное значение угла φ , при котором СПК не затеняется Землей, находят по формуле

$$\varphi = \frac{\omega_3}{2} + \omega_C, \quad (5)$$

где $\omega_3 = 1,94^\circ$ — угловой размер Земли при наблюдении с Луны; $\omega_C = 0,53^\circ$ — угловой размер Солнца; $\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sim 1$.

Расходимость отраженного светового пучка равна сумме углового размера Солнца ω_c и погрешности отклонения от нормали поверхности отражателя Δ :

$$\beta = \omega_c + \Delta. \quad (6)$$

Определение величины Δ для протяженной конструкции отражателя СПК представляет собой отдельную задачу, которую предстоит решить перед его постройкой. В первом приближении принимается значение $\Delta = 10'$, откуда $\beta = 42'$.

Площадь отражателя $S_{\text{отр}} = 3,02 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$ [1, 2], значения $F(\lambda)$, $\rho_3(\lambda)$ и $K(\lambda)$ для спектрального диапазона 0,28...0,38 мкм определены по работе [6]. Точки либрации L_4 и L_5 лежат на орбите Луны, поэтому $D = 3,76 \cdot 10^8 \text{ м}$.

Оценка по выражению (1) дает значение УФИ:

$$\text{УФИ}_{\text{СПК}} = 0,87.$$

Результат соответствует низкому уровню воздействия (УФИ < 2,00) [7], соответственно, отраженная от СПК УФ-радиация не представляет опасности.

Оценка освещенности земной поверхности в видимой области спектра. При определении освещенности СПК земной поверхности кроме зеркальной составляющей (см. формулу (3)) также необходимо учесть более слабую диффузную составляющую отраженного светового потока. Она определяется по выражению

$$E_d(\lambda) = \frac{S_{\text{отр}} F(\lambda) \rho_d(\lambda) K(\lambda) \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right) \cos(\theta)}{\pi D^2}. \quad (7)$$

Яркость небесного тела определяется с помощью известного фотометрического соотношения

$$L = \frac{E}{\Omega}, \quad (8)$$

где Ω — телесный угол, под которым видно это тело с Земли (для СПК $\Omega = 2,13 \cdot 10^{-5} \text{ ср}$).

Для оценки примем, что $\rho_d(\lambda) = 0,15\rho_3(\lambda)$. Значения $F(\lambda)$, $\rho_3(\lambda)$ и $K(\lambda)$ для спектрального диапазона 0,38...0,78 мкм определены по работе [6]. В таблице представлены значения освещенности земной поверхности, а также яркость СПК и естественных источников света [8].

Освещенность земной поверхности и яркость соответствующих источников света

Источник света	Освещенность, лк	Яркость, кд/м ²
СПК, зеркально отраженный свет	$1,7 \cdot 10^4$	$8,0 \cdot 10^8$
СПК, диффузно рассеянный свет	0,1	$4,7 \cdot 10^3$
Солнце	$1 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^9$
Облака днем	$1 \dots 2 \cdot 10^4$	$1,0 \dots 1,2 \cdot 10^4$
Луна	0,25	$2,5 \cdot 10^3$
Звездное небо	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$

При зеркальном отражении света СПК является самым ярким объектом на небе после Солнца, создавая максимальную освещенность, соответствующую пасмурному дню. Вследствие сильной яркости возникает сильный зрительный дискомфорт при непосредственном наблюдении СПК.

Свет, диффузно рассеянный СПК, соответствует ~40 % освещенности от полной Луны, при этом яркость СПК больше, чем у Луны.

Диаметр светового пучка, отраженного от СПК на расстоянии D , составляет

$$d_n = D\beta + d_{\text{отр}}, \quad (9)$$

где $d_{\text{отр}}$ — диаметр отражателя СПК.

Вследствие влияния кривизны земной поверхности вблизи краев светового пятна (от зеркально отраженного светового пучка) СПК можно наблюдать при значениях зенитного угла θ , отличных от нуля (рисунок).

Для оценки в первом приближении будем пренебрегать расширением к краям проекции светового пятна на Землю. Угол ν определяется как

$$\nu = \frac{\beta + \omega_{\text{СПК}}}{2}, \quad (10)$$

где $\omega_{\text{СПК}} = 0,3^\circ$ — угловой размер СПК при наблюдении с Земли.

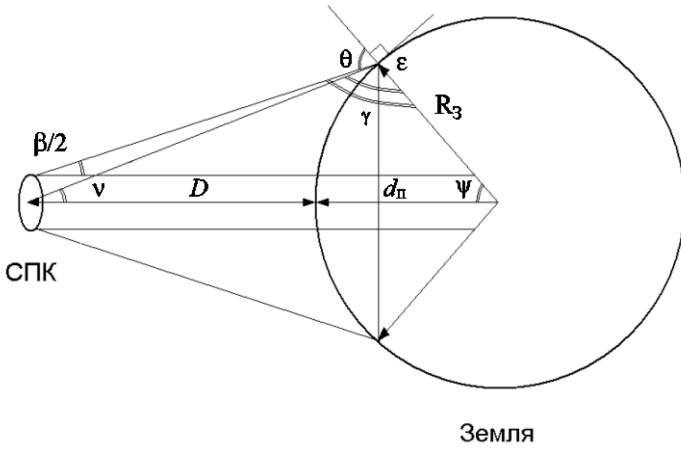
Из очевидных геометрических соотношений следует, что

$$\psi = \arcsin\left(\frac{d_n}{2R_3}\right), \quad (11)$$

где $R_3 = 6370$ км — средний радиус Земли;

$$\gamma = 180^\circ - \psi - \nu, \quad (12)$$

$$\theta = \psi + \frac{\beta}{2}, \text{ т. е. } \theta = 31,31^\circ. \quad (13)$$



Покрытие земной поверхности зеркально отраженным от СПК световым пучком: D — дальность от СПК до Земли; R_3 — средний радиус Земли; $d_{\text{п}}$ — диаметр светового пятна; β — угол расхождения отраженного от СПК светового пучка; θ — зенитный угол на краю светового пятна; ν — угол между направлением в центр и на край светового пятна; γ — угол между надиром на краю светового пятна и направлением на край СПК; ε — угол между надиром на краю светового пятна и направлением в центр СПК; ψ — угол между нормалью к земной поверхности на краю светового пятна и направлением в центр светового пятна

Диаметр светового пятна в проекции на земную поверхность равен

$$d'_{\text{п}} = 2\psi R_3, \quad \text{т. е. } d'_{\text{п}} = 6880 \text{ км.} \quad (14)$$

Ослабление интенсивности светового потока на наклонной трассе в атмосфере определяется законом Бугера, который при $\theta < 60^\circ$ имеет вид [9]:

$$K(\theta) = \exp[-\alpha(\lambda)D_a \sec(\theta)], \quad (15)$$

где $\alpha(\lambda)$ — коэффициент затухания; D_a — длина трассы в атмосфере.

Отсюда для разных значений зенитного угла ослабление определяется выражением

$$K(\theta, \lambda) = K(\lambda)\exp[1 - \sec(\theta)]. \quad (16)$$

Оценка показывает, что на краю светового пятна освещенность от зеркально отраженного пучка уменьшится на 15,7 %. Если зеркально отраженный пучок падает только на участок земной поверхности диаметром 6880 км, то диффузно рассеянный свет можно видеть всегда после восхода СПК над горизонтом (при отсутствии сильной облачности).

Для оценки освещенности в заданное время в определенном районе земной поверхности необходима специальная модель и учет дополнительных факторов, которые влияют на распространение света в атмосфере.

Обсуждение полученных результатов. Особенностью движения СПК, расположенного в точках либрации L_4 или L_5 системы Земля — Луна, относительно Луны является сдвиг по времени 4 ч. Как известно, Луна в зените может наблюдаться на широтах $\psi = \pm 28,5^\circ$. При зеркальном отражении край светового пятна доходит до широт $\pm(\varphi + \psi) = \pm 59,5^\circ$. Если диаметр светового пятна $d'_n = 6880$ км, СПК можно наблюдать из одной точки земной поверхности в течение 4 ч в сутки. При этом СПК (подобно Луне) имеет наибольшую яркость при минимальном значении угла φ .

Как показывают выполненные оценки (см. таблицу), при зеркальном отражении СПК увеличивает естественную освещенность на 5–8 порядков, при диффузном — на 2 порядка (в безлунную ночь).

Поскольку УФИ $< 2,00$, специальных мер для защиты органов зрения и открытых участков тела не потребуется. Однако в то же время СПК обусловит превышение естественной ночной освещенности в УФ-области.

В работе [10] утверждается, что слабая УФ-радиация имеет важное значение в жизнедеятельности многих организмов, населяющих Землю, поэтому ее воздействие на экологию, отличное от естественного, потребует дополнительного изучения.

Согласно исследованиям, изложенным в работах [11, 12], для искусственного освещения предпочтительными являются источники света со спектром излучения, смещенным в область желтого цвета — 0,56...0,59 мкм, и цветовой температурой источника света, равной примерно 3000К.

По данным работы [13], для освещения автодорог в ночное время преимущество остается за источниками света с цветовой температурой около 3000К, поскольку они обеспечивают наилучшие показатели цветопередачи и длительности темновой адаптации (т. е. использование этих источников света комфортнее для оператора).

При оценке по известной методике [14] коррелированная цветовая температура СПК с алюминиевым отражателем составляет 5200К (при $\rho(\lambda) = 1,0$ она составляет 5300К). Такой спектр излучения, по данным работ [3, 11–13], не рекомендуется для освещения в ночное время. В последующих исследованиях необходимо провести анализ влияния спектра отраженного СПК света на экологию и здоровье человека.

При создании СПК возникает большое количество инженерных проблем: постройка громоздких и массивных крупногабаритных космических конструкций, быстрое их развертывание в космическом поле, разработка соответствующих бортовых систем и агрегатов и т. д.

Конструкция отражателя должна обеспечивать постоянство его геометрии в течение запланированного ресурса. Бескаркасная конструкция, формируемая центробежными силами, несмотря на малую

удельную массу отражателя и простоту его раскрытия, не обеспечивает точность поддержания требуемой формы поверхности, подвержена влиянию сил Кориолиса при переориентации и требует демпфирования колебаний от гироскопических сил. Кроме того, для изготовления бескаркасного отражателя с требуемыми оптическими характеристиками необходимо использовать монолитное (неразрезное) полотнище, изготовление которого не представляется возможным вследствие огромных размеров [15].

Функционирование СПК предполагает лишь небольшое увеличение инсоляции, но даже в этом случае для обеспечения безопасности должны быть предусмотрены технические возможности для быстрого возвращения к естественному уровню освещенности.

Целесообразность увеличения инсоляции земной поверхности для стабилизации температурного режима атмосферы Земли можно определить при сравнении экологических последствий от увеличения освещенности с ущербом от изменения климата. В этом случае также необходимо рассмотреть все реальные альтернативы использования СПК, размещенного в точках либрации L_4 или L_5 системы Земля — Луна.

Заключение. Выполнена оценка освещенности от СПК с диаметром отражателя 1960 км, расположенного в точках либрации L_4 или L_5 системы Земля — Луна. Впервые проведена оценка освещенности земной поверхности, создаваемой крупногабаритным отражателем в видимом и УФ-диапазоне излучения. При выполнении расчетов учтены зеркальная и диффузная составляющие отраженного светового потока, кривизна земной поверхности и рассеяние в атмосфере. Полученные результаты показывают следующее:

- отраженная УФ-радиация не представляет прямой опасности для человечества и не требуется специальных мер защиты от нее;
- освещенность в видимом и УФ-диапазоне является избыточной в ночное время (так как превышает естественную освещенность на 5–8 порядков при зеркальном отражении), а яркость наблюдаемого с Земли СПК соизмерима с яркостью Солнца и Луны;
- спектр отраженного излучения может создавать дискомфорт для работы оператора в ночное время.

Необходимы дополнительные исследования экологических последствий избыточной ночной освещенности для определения целесообразности увеличения инсоляции земной поверхности за счет СПК с учетом рисков глобального похолодания и его возможных последствий.

С инженерной точки зрения необходима детальная проработка используемых в СПК конструктивных решений, а также способов его развертывания на орбите.

Автор выражает благодарность Г.А. Сизенцеву, Е.Н. Рябко и И.В. Сорокину за полезные дискуссии при работе над материалом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сизенцев Г.А., Сотников Б.И. Концепция космической системы регулирования термического режима земной атмосферы. *Известия РАН. Энергетика*, 2009, № 2, с. 91–100.
- [2] Сизенцев Г.А. Космический комплекс для решения энергоклиматических проблем на Земле. *Космическая техника и технологии*, 2013, № 3, с. 82–95.
- [3] Бармасов А.В., Бармасова А.М., Яковлева Т.Ю. Биосфера и физические факторы. Световое загрязнение окружающей среды. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*, 2014, № 33, с. 84–101.
- [4] Bingman V., Jechura T., Kahn M.C. Behavioral and Neural Mechanisms of Homing and Migration in Birds. In M.F. Brown and R.G. Cook (eds.), *Animal Spatial Cognition: Comparative, Neural and Computational Approaches*. November, 2006. URL: <http://www.pigeon.psy.tufts.edu/asc/bingman/> (дата обращения 28.12.16).
- [5] *Rationalizing nomenclature for UV doses and effects on Humans*. URL: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/GAW_Report_211_CIE.pdf (дата обращения 28.12.16).
- [6] Аллен К.У. *Астрофизические величины*. Москва, Мир, 1977, 448 с.
- [7] Global Solar UV Index. *World Health Organization*. URL: <http://www.who.int/uv/publications/en/GlobalUVI.pdf?ua=1> (дата обращения 28.12.16).
- [8] Бебчук Л.Г., Богачев Ю.В., Заказнов Н.П. и др. *Прикладная оптика*. 3-е изд., стер. Санкт-Петербург, Издательство «Лань», 2009, 320 с.
- [9] Хромов С.П., Петросянец М.А. *Метеорология и климатология*. 7-е изд. Москва, Издательство Мос. университета; Наука, 2006, 582 с.
- [10] Панюшин С.К. Ультрафиолет как оператор гормональных биоритмов. *Электронный научно-образовательный вестник: Здоровье и образование в XXI веке*, 2012, т. 14, № 10, с. 289–291.
- [11] Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е. О биологическом эквиваленте излучения светодиодных и традиционных источников света с цветовой температурой 1800–10 000 К. *Светотехника*, 2012, № 3, с. 7–10.
- [12] Капцов В.А., Сосунов Н.Н., Шищенко И.И. и др. Функциональное состояние зрительного анализатора при использовании традиционных и светодиодных источников света. *Гигиена и санитария*, 2014, № 4, с. 120–123.
- [13] Jin H., Jin S., Chen L., Cen S., Yuan K. Research on the Lighting Performance of LED Street Lights With Different Color Temperatures. *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, pp. 1–9.
- [14] Wyszecki G. *Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2nd ed. *Wiley-Interscience*. New York, 2000, 968 p.
- [15] Райкунов Г.Г., Комков В.А., Мельников В.М., Харлов Б.Н. *Центрбежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции*. Москва, Физматлит, 2009, 448 с.

Статья поступила в редакцию 28.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Старовойтов Е.И. Оценка освещенности земной поверхности космическим отражателем, предназначенным для стабилизации температурного режима атмосферы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 4.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-4-1605>

Старовойтов Евгений Игоревич — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ПАО «РКК «Энергия». Автор более 20 научных работ в области бортовых опико-электронных и световых приборов космических аппаратов. e-mail: post@rsce.ru

Estimation of the Earth's surface illumination by space reflector designed to stabilize atmosphere temperature regime

© E.I. Starovoytov

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia,
Korolev town, Moscow region, 141070, Russia

The paper considers the usage of solar-sailing ship (SPC) located in the libration points of the Earth-Moon system, which will increase the Earth's surface insolation in order to stabilize the temperature regime of the Earth's atmosphere under the conditions of global cooling. A quantitative analysis of the light exposure in visible and UV spectral regions, which is able to cause offsetting impact on living organisms, is done using methods of geometrical optics. The findings of the light pollution impact on the environment and people are compared with those obtained by other authors. Fundamental technical problems associated with the construction of SPC are formulated.

Keywords: sun, reflector, illumination, ecology, light pollution, UV index

REFERENCES

- [1] Sizentsev G.A., Sotnikov B.I. *Izvestiya RAN. Energetika — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2009, no. 2, pp. 91–100.
- [2] Sizentsev G.A. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2013, no. 3, pp. 82–95.
- [3] Barmasov A.V., Barmasova A.M., Yakovleva T.Yu. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta — Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 2014, no. 33, pp. 84–101.
- [4] Bingman V.P., Jechura T., Kahn M.C. (2006). Behavioral and neural mechanisms of homing and migration in birds. In M.F. Brown and R.G. Cook (eds.). *Animal Spatial Cognition: Comparative, Neural, and Computational Approaches*. Available at: www.pigeon.psy.tufts.edu/asc/bingman/ (accessed 28 December, 2016).
- [5] *Rationalizing nomenclature for UV doses and effects on Humans*. Available at: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/GAW_Report_211_CIE.pdf (accessed 28 December, 2016).
- [6] Allen K.U. *Astrofizicheskie velichiny [Astrophysical quantities]*. Moscow, Mir Publ., 1977, 448 p. [in Russ.].
- [7] *Global Solar UV Index. World Health Organization*. Available at: <http://www.who.int/uv/publications/en/GlobalUVI.pdf?ua=1> (accessed 28 December, 2016).
- [8] Bebchuk L.G., Bogachev Yu.V., Zakaznov N.P. *Prikladnaya optika [Applied optics]*. St. Petersburg, Lan Publ., 2009, 320 p.
- [9] Khromov S.P., Petrosyants M.A. *Meteorologiya i klimatologiya [Meteorology and climatology]*. Moscow, Moscow State University, Nauka Publ., 2006, 582 p.
- [10] Panyushin S.K. *Elektronnyi nauchno-obrazovatelnyi vestnik Zdorove i obrazovaniye v XXI veke — On-line Scientific & Educational Bulletin "Health & education millennium"*, 2012, vol. 14, no. 10, pp. 289-291.

- [11] Aladov A.V., Zakgeim A.L., Mizerov M.N., Chernyakov A.E. *Svetotekhnika — Light & Engineering*, 2012, no. 3, pp. 7–10.
- [12] Kaptsov V.A., Sosunov N.N., Shishchenko I.I., Viktorov V.S., Tulushev V.N., Deinego V.N., Bukhareva E.A., Murashova M.A., Shishchenko A.A. *Gigiiena i sanitariya — Hygiene and Sanitation*, 2014, no. 4, pp. 120–123.
- [13] Jin H., Jin S., Chen L., Cen S., Yuan K. *IEEE Photonics Journal*, vol. 7. pp. 1–9.
- [14] Wyszecki G. *Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2nd ed. Wiley-Interscience, New York, 2000, 968 p.
- [15] Raikunov G.G., Komkov V.A., Melnikov V.M., Kharlov B.N. *Tsentrobezhnye beskarkasnye krupnogabaritnye kosmicheskie konstruksii* [Centrifugal frameless large space structures]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009, 448 p.

Starovoytov E.I., Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Scientist, S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia. Research interests include onboard opto-electronics and light devices of spacecrafts. e-mail: post@rsce.ru