

Проблемы реализации систем орбитального освещения земной поверхности

© Е.И. Старовойтов¹, М.Н. Поклад²

¹ПАО «РКК «Энергия», г. Королёв, Московская обл.,
141070, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены характеристики отражателя КА-рефлектора, безопасность эксплуатации систем орбитального освещения земной поверхности, а также экологические последствия их развертывания. Выполнена оценка создаваемой КА-рефлектором освещенности на земной поверхности. Определены значения коррелированной цветовой температуры для отражателей с алюминиевым, серебряным, титановым, золотым и медным покрытиями. Для уменьшения нагрузки на органы зрения оператора и снижения нежелательного воздействия на экологию в системе орбитального освещения рекомендуется применять различные металлические покрытия отражателя КА-рефлектора в зависимости от местного времени суток в освещаемом регионе земной поверхности.

Ключевые слова: орбитальное освещение, отражатель, металлическое покрытие, коррелированная цветовая температура, экологическая обстановка

Введение. Развитие цивилизации все сильнее обостряет проблему взаимоотношений человека с окружающей средой. С одной стороны, в мире продолжает возрастать потребление энергии, а с другой — все больше проявляются негативные последствия воздействия на природу в результате использования углеводородного топлива.

В дневное время Земля получает энергию от естественного и практически неисчерпаемого источника — Солнца. Этой энергии достаточно для наружного освещения и поддержания сравнительной постоянной глобальной температуры атмосферы.

Выработка электрической энергии для освещения в ночное время приводит к большому расходу углеводородного топлива. Негативные последствия для экологической обстановки можно уменьшить, используя отраженный свет Солнца, направляемый с КА-рефлекторов, находящихся на околоземной орбите, т. е. создав систему орбитального освещения [1, 2]. Однако для практической реализации таких систем требуется решить ряд технических проблем.

Целью данной работы является анализ характеристик отражателей КА-рефлектора с различными металлическими покрытиями, а также оценка экологических последствий избыточного освещения земной поверхности (путем сравнения количественных результатов с данными, полученными другими авторами).

Общие вопросы разработки систем орбитального освещения. В 1992–1993 гг. в Исследовательском центре им. М.В. Келдыша и РКК «Энергия» им. С.П. Королёва разрабатывали проект системы орбитального освещения приполярных городов, расположенных на географической широте $70^\circ \pm 2^\circ$ Северного полушария (г. Мурманск, г. Норильск) [1]. Этот проект может послужить основой для дальнейшей реализации системы орбитального освещения.

Перспективно использование в КА-рефлекторах бескаркасной конструкции отражателя, формируемой центробежными силами. Однако несмотря на малую удельную массу отражателя, имеющиеся бескаркасные конструкции не обеспечивают точность поддержания требуемой формы поверхности, подвержены влиянию сил Кориолиса при переориентации и требуется демпфирование колебаний от гироскопических сил [2]. По этим причинам разработчики системы [1] выбрали каркасную конструкцию отражателя КА-рефлекторов.

Пленочные отражатели должны раскрываться после выведения КА-рефлекторов на околоземную орбиту. Для поддержания требуемого значения коэффициента отражения изначально предусматривалось напыление металлического покрытия на полимерную пленку в условиях космического полета с помощью специального агрегата при наличии запаса напыляемого материала.

Нанесение металлического покрытия на отражатель в космосе — сложная операция. Технология нанесения металлов на различные подложки отработывалась в 1979–1990 гг. на борту пилотируемых орбитальных станций «Салют-6», «Салют-7» и «Мир» [3], но тогда все эксперименты были проведены под контролем экипажа. Для надежного выполнения этой операции в полностью автоматическом режиме потребуется ее длительная отработка в условиях космического полета. Кроме того, необходимо обеспечивать сохранность оптических свойств отражателей КА-рефлекторов в течение их продолжительного наземного хранения.

Отдельная задача — разработка конструкции отражателя, обеспечивающей постоянство его геометрических характеристик на время запланированного ресурса. Следует также провести дополнительные исследования стойкости металлизированных полимерных пленок к внешним воздействующим факторам космического полета.

Эксплуатация любого космического аппарата завершается его утилизацией. Прекращение работы отдельного КА-рефлектора обусловлено снижением оптических характеристик его отражателя и исчерпанием ресурса.

КА-рефлекторы массой 6500 кг системы орбитального освещения [1] находятся на круговой орбите высотой 1700 км, срок существования на которой составляет многие сотни лет. Спуск с такой орбиты с

последующим разрушением конструкции в плотных слоях атмосферы Земли требует больших энергетических затрат. Предпочтительнее, пожалуй, будет увод на более высокую орбиту захоронения посредством отражателя, частично сохранившего свойства солнечного паруса.

Принципиальным условием обеспечения безопасности эксплуатации систем орбитального освещения является постоянный контроль за уровнем освещенности земной поверхности.

Полностью работоспособные КА-рефлекторы могут быстро восстановить естественный уровень освещенности путем отворота отражателей от земной поверхности. Исходя из соображений экологической безопасности такая возможность должна быть гарантирована при разрывании системы орбитального освещения.

Оценка освещенности земной поверхности. Развернутая система орбитального освещения [1] должна обеспечивать освещенность земной поверхности в 5 лк при сплошной облачности (оценка уровня освещенности с учетом пропускания атмосферы и облачности, равного 0,23), т. е. до 18 лк в ясную погоду (оценка с учетом пропускания чистой атмосферы по данным [4]). При этом средняя освещенность земной поверхности в ясную погоду от полной Луны равна около 0,25 лк, а в безлунную ночь может не превышать 0,001 лк.

В настоящее время экологические последствия изменения естественной освещенности во время полярной ночи (как и в ночное время) сложно поддаются оценке. Известны результаты исследований негативного влияния на окружающую среду в ночное время так называемого светового загрязнения в крупных мегаполисах и на промышленных объектах [5, 6].

Все живые организмы на Земле, подвергающиеся воздействию Солнца, имеют определенные фотобиологические реакции, определяемые несколькими факторами, в том числе спектральным составом воздействующего излучения. Особенно следует выделить коротковолновую область спектра, имеющую выраженный фотобиологический эффект.

Ультрафиолетовая радиация Солнца (0,28...0,38 мкм) в зависимости от мощности оказывает различные фотобиологические воздействия. По современным представлениям даже слабая УФ-радиация оказывает на различные живые организмы влияние, которое пока еще недостаточно исследовано.

В работах [7, 8] рекомендуется с осторожностью применять в ночное время осветительные приборы с высоким содержанием синего света (0,44...0,48 мкм) в спектре излучения, так как они могут оказывать нежелательное побочное действие на физиологию оператора, нарушая биологические ритмы сна и бодрствования.

В системах орбитального освещения можно изменять спектральный состав падающего излучения, применяя в отражателях материалы с различной спектральной отражательной способностью.

Освещенность от КА-рефлектора в данной спектральной области определяли в соответствии с методикой, описанной в [1], на основе приближений геометрической оптики:

$$E_{\Delta\lambda} = \frac{4S_{\text{отр}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)\rho(\lambda)K(\lambda)d\lambda \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\sin(z)}{\pi(\beta D)^2}, \quad (1)$$

где $S_{\text{отр}}$ — площадь отражателя; $F(\lambda)$ — спектральная плотность излучения Солнца в данном диапазоне; λ — длина волны; $\rho(\lambda)$ — спектральное альbedo покрытия отражателя; $K(\lambda)$ — спектральный коэффициент поглощения в атмосфере; α — угол между падающим и отраженным пучком лучей; z — наклон отраженного пучка к местному горизонту подсветки; β — угол расхождения отраженного пучка; D — расстояние от КА-рефлектора до района подсветки.

Для оценки $E_{\Delta\lambda}$ были приняты следующие значения переменных: $S_{\text{отр}} = 30\,000\text{ м}^2$; $\alpha = 60^\circ$; $z = 90^\circ$; $\beta = 42'$; $D = 1700\text{ км}$ [1]. Спектральная плотность потока солнечного излучения, спектральная отражательная способность металлических покрытий и коэффициенты пропускания атмосферы взяты из [4, 9, 10].

Как показывают оценки, полученные по формуле (1) для различных видов металлических покрытий, освещенность земной поверхности в спектральном диапазоне от 0,28 до 0,38 мкм составит 0,7...1,7 мВт/м², а в диапазоне от 0,44 до 0,48 мкм — 2,0...4,4 мВт/м². При этом отношение освещенности от КА-рефлектора к освещенности от Солнца в этих диапазонах не превысит 10^{-5} , поэтому прямое фотобиологическое действие таких малых световых потоков (даже от нескольких КА-рефлекторов одновременно) маловероятно.

КА-рефлектор с отражателем площадью 30 000 м², находящийся на орбите высотой 1700 км, будет наблюдаться с Земли как точечный источник света, т. е. его угловой размер будет меньше, чем у Солнца и Луны.

Освещенность (в люксах) в видимом диапазоне вычисляется с использованием принятого в фотометрии выражения

$$L = 683 \int_{380}^{780} E(\lambda)v(\lambda)d\lambda,$$

где $v(\lambda)$ — спектральная световая эффективность монохроматического излучения, определяемая ГОСТ 8.332–2013.

Можно вычислить звездную величину оцениваемого источника света и по формуле

$$m = -2,5 \lg \left(\frac{L}{L_0} \right), \quad (2)$$

где L_0 — нулевая звездная величина (0^m), $L_0 = 2,54 \cdot 10^{-6}$ лк.

В условиях чистой атмосферы для различных металлических покрытий отражателя оценка по выражению (2) дает значения от $-15,67^m$ до $-16,19^m$. Это больше, чем у полной Луны ($-12,74^m$), что делает КА-рефлектор самым ярким объектом на небе после Солнца.

В то же время известно, что некоторые живые организмы (в частности, птицы) используют небесные тела для ориентации в пространстве. Этот биологический механизм пока мало исследован, поэтому трудно оценить влияние на него изменений внешней освещенности. Данному аспекту влияния орбитального освещения на экологическую обстановку обязательно должно быть уделено внимание в последующих исследованиях, так же как и влиянию низких освещенностей в отдельных спектральных диапазонах на биологические ритмы различных живых организмов.

По мнению авторов работы [7], для создания здоровой световой среды следует в течение суток использовать источники света с различным спектром излучения, что также необходимо учитывать при развертывании системы орбитального освещения. Назначение такой системы — улучшение видимости на открытой местности, причем должны быть исключены утомление оператора и негативное воздействие на его органы зрения.

Степень комфорта для оператора при восприятии им светового потока, отраженного КА-рефлектором, можно характеризовать с использованием коррелированной цветовой температуры, значения которой будут варьировать у различных покрытий отражателя.

Коррелированная цветовая температура отражателей с различными металлическими покрытиями. Для того чтобы оценить изменения спектрального состава излучения Солнца различными металлическими покрытиями отражателей КА-рефлекторов, была рассчитана их коррелированная цветовая температура по формуле [11]

$$T_c = T_{c1} + d_1 \frac{T_{c2} - T_{c1}}{d_1 - d_2}.$$

Здесь T_{c1} , T_{c2} — значения цветовой температуры абсолютно черного тела ближайших изотермических линий к точке, характеризующей исследуемый источник света; d_1 , d_2 — расстояния до указанных изотермических линий, вычисляемые следующим образом:

$$d_i = \frac{(v' - v'_{0i}) - t_i(u' - u'_{0i})}{\sqrt{1 + t_i^2}},$$

где t — тангенс угла наклона изотермы к оси абсцисс; v' , u' — координаты цвета исследуемого источника в специализированном цветовом пространстве (с равномерным расположением изотермических линий, характеризующих излучение абсолютно черного тела), определяемые как

$$u' = \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}};$$

$$v' = \frac{6\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}},$$

где \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} — координаты цвета в цветовом пространстве Международной комиссии по освещению (МКО) 1931 г.

Для численного определения координат цвета использованы соотношения

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda;$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda;$$

$$\bar{z} = \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda,$$

где $P_{\lambda}(\lambda_i)$ — спектральная плотность отраженного или ослабленного потока излучения; $\bar{x}(\lambda_i)$, $\bar{y}(\lambda_i)$, $\bar{z}(\lambda_i)$ — кривые сложения цветов в системе $\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ измерения цвета; $\Delta\lambda$ — спектральный интервал для дискретно заданных длин волн.

В случае $\rho(\lambda) = 1,0$ (идеальный отражатель) $T_c = 5310$ К. Ниже представлены полученные для пяти металлических покрытий отражателя КА-рефлектора значения коррелированной цветовой температуры T_c , К:

Алюминий.....	5200
Серебро.....	5180
Титан.....	5130
Медь.....	3660
Золото.....	3650

Из приведенных значений следует, что наибольшую T_c имеет алюминиевое покрытие отражателя, а наименьшую — золотое.

По данным, представленным в работе [12], для освещения автодорог в ночное время более предпочтительны источники света с $T_c \sim 3000$ К, так как они обеспечивают наилучшие показатели цветопередачи и длительности темновой адаптации, т. е. использование этих источников света более комфортно для оператора.

Таким образом, несмотря на сравнительно низкую отражающую способность золотого покрытия отражателя КА-рефлектора, в ночное время оно обеспечивает оператору оптимальное восприятие зрительной обстановки. Однако высокая стоимость и большая масса ограничивают применение золотого покрытия, поэтому более доступной альтернативой может быть использование медного покрытия, имеющего близкое значение T_c .

В проекте системы орбитального освещения [1] предполагалось, что будут использоваться 100 КА-рефлекторов. Следовательно, при развертывании такой системы потребуется большое количество металла для нанесения покрытий на отражатели. По технико-экономическим соображениям может оказаться нецелесообразным изготовление всех 100 отражателей с одинаковым покрытием.

В работе [7] для профилактики нежелательного воздействия на физиологию человека предлагается в середине дня повышать, а в утреннее и вечернее время снижать T_c используемых источников света. Поэтому можно рассмотреть такой вариант реализации системы орбитального освещения, в котором будут эксплуатироваться отражатели с металлическими покрытиями, обеспечивающие различную T_c в зависимости от времени суток в освещаемом регионе земной поверхности. Отражатели с золотым или медным покрытиями устанавливаются на КА-рефлекторах, используемых в начале и конце «светового дня», а отражатели с алюминиевым, серебряным или титановым покрытием стоит применять для освещения в середине «светового дня».

Указанный подход позволит минимизировать нагрузку на органы зрения оператора и нежелательное воздействие на экологическую обстановку.

Заключение. В работе были рассмотрены характеристики отражателей и безопасность эксплуатации КА-рефлекторов, используемых в системе орбитального освещения земной поверхности.

Для оценки влияния избыточной естественной освещенности от КА-рефлекторов на комфорт оператора рассчитана коррелированная цветовая температура для отражателей с алюминиевым, серебряным, титановым, золотым и медным покрытиями.

Полученные оценки показали, что в ночное время наилучшее восприятие оператором зрительной обстановки можно обеспечить установкой на КА-рефлекторах отражателей с золотым или медным покрытием.

Кроме того, для уменьшения нагрузки на органы зрения оператора и снижения нежелательного воздействия на окружающую среду рекомендуется применять различные металлические покрытия отражателя КА-рефлектора в зависимости от местного времени суток в освещаемом регионе земной поверхности.

Авторы выражают благодарность Г.А. Сизенцеву, И.В. Сорокину и Е.Н. Рябко за ценные замечания и советы при работе над материалом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Семенов В.Ф., Сизенцев Г.А., Сотников Б.И., Сытин О.Г. Система орбитального освещения приполярных городов. *Известия РАН. Энергетика*, 2006, № 1, с. 21–30.
- [2] Райкунов Г.Г., Комков В.А., Мельников В.М., Харлов Б.Н. *Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2009, 448 с.
- [3] Патон Б.Е., Лапчинский В.Ф. *Сварка и родственные технологии в космосе*. Киев, Наукова думка, 1998, 184 с.
- [4] Аллен К.У. *Астрофизические величины*. Москва, Мир, 1977, 448 с.
- [5] Бармасов А.В., Бармасова А.М., Яковлева Т.Ю. Биосфера и физические факторы. Световое загрязнение окружающей среды. *Ученые записки Росийского государственного гидрометеорологического университета*, 2014, № 33, с. 84–101.
- [6] *Международная ассоциация темного неба. Световое загрязнение окружающей среды и дикие животные*. URL: <http://ida.darksky.org/assets/documents/ida-Russian-Wildlife.pdf> (дата обращения 28.11.2016).
- [7] 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.
- [8] Капцов В.А., Сосунов Н.Н., Шищенко И.И., Викторов В.С., Тулушев В.Н., Дейнего В.Н., Бухарева Е.А., Мурашова М.А., Шищенко А.А. Функциональное состояние зрительного анализатора при использовании традиционных и светодиодных источников света. *Гигиена и санитария*, 2014, № 4, с. 120–123.
- [9] Мороз Л.С., ред. *Титан и его сплавы. Т. 1. Технически чистый титан*. Ленинград, Судпромгиз, 1960, 516 с.
- [10] Лучинский Г.П. *Химия титана*. Москва, Химик, 1971, 472 с.
- [11] Wyszecki G. *Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2nd ed. New York, Wiley-Interscience, 2000, 968 p.
- [12] 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.

Статья поступила в редакцию 15.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Старовойтов Е.И., Поклад М.Н. Проблемы реализации систем орбитального освещения земной поверхности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-5-1622>

*Статья подготовлена по материалам доклада,
представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике,
посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся
отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства.
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.*

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

Поклад Максим Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области систем управления космическими аппаратами. e-mail: rkt@bmstu.ru

Problems in the earth's surface orbital illumination systems implementation

© E.I. Staroyvotov¹, M.N. Poklad²

¹S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia,
Korolev town, Moscow Region, 141070, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers spacecraft-reflector characteristics, the earth's orbital illumination systems operation safety, and their deployment environmental consequences. We estimated the illumination on the earth's surface, created by spacecraft-reflector. The article determines the correlated color temperature values for reflectors with aluminum, silver, titanium, gold and copper coatings. To reduce the load on the operator's vision and the undesirable effects on the environment in the orbital illumination system, we recommend to apply various reflector metallic coatings, depending on the local time in the earth's surface illuminated region.

Keywords: *orbital illumination, reflector, metal coating, correlated color temperature, ecology*

REFERENCES

- [1] Semenov V.F., Sizentsev G.A., Sotnikov B.I., Sytin O.G. *Izvestiya RAN. Energetika — Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2006, no. 1, pp. 21–30.
- [2] Raykunov G.G., Komkov V.A., Melnikov V.M., Harlov B.N. *Tsentrobezhnye beskarkasnye krupnogabaritnye kosmicheskie konstruksii* [Centrifugal frameless large-sized space structures]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009, 448 p.
- [3] Paton B.E., Lapchinskiy V.F. *Svarka i rodstvennye tekhnologii v kosmose* [Welding and related technologies in space]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1998, 184 p.
- [4] Allen K.U. *Astrofizicheskie velichiny* [Astrophysical quantities]. Moscow, Mir Publ., 1977, 448 p. [in Russ.].
- [5] 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.
- [6] *Mezhdunarodnaya assotsiatsiya temnogo neba. Svetovoe zagryaznenie okruzhayushey sredy i dikiye zhivotnye* [International Association of the Dark Sky. Light pollution of the environment and wild animals]. Available at: <http://ida.darksky.org/assets/documents/ida-Russkij-Wildlife.pdf> (accessed November 28, 2016).
- [7] Aladov A.V., Zakgeym A.L., Mizerov M.N., Chernyakov A.E. *Svetotekhnika — Light & Engineering*, 2012, no. 3, pp.7–10.
- [8] Kaptsov V.A., Sosunov N.N., Shischenko I.I., Viktorov V.S., Tulushev V.N., Deynego V.N., Bukhareva E.A., Murashova M.A., Shischenko A.A. *Gigiena i sanitariya — Hygiene and Sanitation*, 2014, no. 4, pp. 20–123.
- [9] Moroz L.S., Chechulin B.B., Polin I.V. et al. *Titan i ego splavy. Tekhnicheski chisty titan. Tom 1* [Titanium and its alloys. Technically pure titanium. Vol. 1]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1960, 516 p.

- [10] Luchinskiy G.P. *Himiya titana* [Chemistry of titanium]. Moscow, Khimik Publ., 1971, 472 p.
- [11] Wyszecki G. *Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. New York, Wiley-Interscience Publ., 2000, 968 p.
- [12] Jin H., Jin S., Chen L., Cen S., Yuan K. *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, pp. 1–9.

Starovoytov E.I., Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Scientist of S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. Author of over 20 scientific publications in the field of onboard opto-electronics and light devices of space crafts. e-mail: post@rsce.ru

Poklad M.N., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 scientific publications in the field of spacecraft dynamical systems control. e-mail: rkt@bmstu.ru