

УДК 629.786: 628.936: 613.165

## **Выбор металлизации для отражателей космической системы орбитального освещения поверхности Земли**

**Старовойтов Е.И.**

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева,  
ул. Ленина, д.4А, Королев, Московская область, 141070, Россия  
e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)*

### **Аннотация**

В статье выполнен анализ спектрального состава отраженного излучения Солнца от разных видов металлических покрытий отражателей КА-рефлекторов, используемых в космической системе орбитального освещения поверхности Земли. Для повышения экологической безопасности предлагается снизить отраженный поток излучения Солнца в коротковолновой области. В связи с этим рекомендуется использовать серебряное, золотое и медное покрытия отражателей КА-рефлекторов.

**Ключевые слова:** орбитальное освещение, отражатель, металлическое покрытие, спектр, экология.

### **Введение**

Развитие цивилизации и деятельность человека неразрывно связаны с изменением окружающей среды, в том числе световой обстановки. Наружное освещение определяет внешний облик городов, улучшает условия видимости для

управления транспортными средствами, позволяет снизить криминогенную обстановку и т.д. [1]

Особое значение наружное освещение имеет для населенных пунктов за полярным кругом, в которых имеет место явление «полярной ночи».

Во всем мире на наружное освещение расходуется значительная часть вырабатываемой электрической энергии, которая в свою очередь включает значительные потери при транспортировке и преобразовании. При этом, на всей Земле в дневное время необходимость в наружном освещении практически полностью удовлетворяется естественным источником света – Солнцем.

Поэтому представляет интерес разработка экономически целесообразных способов использования солнечного света для наружного освещения в ночное время. Здесь большие возможности предоставляет космонавтика. Предложения использовать космические отражатели (зеркала, рефлекторы) для освещения поверхности Земли высказывались еще в начале XX в. пионерами космонавтики (Кондратюк Ю.В., Оберт Г.). Эти идеи были в дальнейшем развиты Эрике К.А. в его программе «Космический свет» [2], которая подразумевала развертывание на орбите Земли нескольких систем различных отражателей.

В 1992-1993 гг. в Исследовательском центре им. М.В. Келдыша и РКК «Энергия» им. С.П. Королева выполнялась разработка системы орбитального освещения приполярных городов, расположенных по географической широте  $70 \pm 2^\circ$  Северного полушария (Мурманск, Норильск).

Эта система [3,4] должна была включать 100 КА-рефлекторов, оснащенных отражателями пленочно-каркасной конструкции, размещаемых на круговой солнечно-синхронной орбите высотой 1700 км и наклоном  $103^\circ$ . Ресурс КА-рефлекторов составлял 10 лет, диапазон обслуживаемых широт  $70 \pm 2^\circ$ , время освещения в суточном цикле 8 ч. Освещаемый район представлял собой круг диаметром 15...17,0 км, в котором обеспечивалась освещенность горизонтальной поверхности при сплошной облачности не менее 5 лк. Рабочий режим освещения соответствовал угловому возвышению КА-рефлектора над горизонтом  $\geq 30^\circ$ .

При разработке этих систем орбитального освещения не проводились оценки их влияния на экологию. В настоящее время известно, что все живые организмы на Земле, подвергающиеся воздействию Солнца, имеют определенные фотобиологические реакции на внешнее освещение.

Цель настоящей работы заключается в оценке освещенности земной поверхности КА-рефлектором и сравнении количественных результатов с данными других авторов об уровнях избыточной освещенности (оказывающих побочное действие на экологию и человека) для выбора покрытия используемых отражателей.

### **Спектральный диапазон излучения, отраженного КА-рефлектором и его фотобиологическое действие**

Необходимо отметить о существенных различиях режима подсветки для разных типов космических систем. Система орбитального освещения приполярных городов [4] разрабатывалась для подсветки в «дневные» часы полярных ночей

сеансами по 8 ч с симметричным распределением относительно 12 ч дня в течение четырех месяцев в году (с ноября по февраль).

Такой режим освещения приближен к естественному дневному и должен быть комфортным для людей. Степень воздействия на природу приполярных районов необходимо дополнительно исследовать, так как фотобиологические реакции местных живых организмов соответствуют условиям естественной освещенности во время полярной ночи в высоких широтах.

А вот применение КА-рефлекторов для подсветки в ночное время средних и низких широт (как в системе типа «Лунетты» [2]) однозначно будет создавать в этих районах избыточный уровень освещения для людей и природы.

В настоящее время разными специалистами во многих странах изучается воздействие избыточного освещения от крупных мегаполисов и промышленных объектов на экологию (т.н. светового загрязнения), так как оно влияет на фотобиологические реакции различных организмов и полностью меняет среду обитания ночных животных [5,6,7].

В качестве мер борьбы со световым загрязнением в последние годы проводятся работы по обоснованию требований к спектральным характеристикам источников света, используемых для ночного освещения.

Анализ фотобиологического воздействия искусственных источников света разных типов и экспериментальные исследования функционального состояния операторов в работах [8-10] показывает, что для искусственного освещения наиболее предпочтительны источники света со спектром излучения, смещенным в

область желтого цвета (0,56...0,59 мкм, цветовая температура источника около 3000 К).

В спектре источников света с цветовой температурой выше 3000 К, в том числе Солнца (цветовая температура 5081 К [9]) возрастает доля коротковолнового излучения. В работах [5,8,9] рекомендуется с осторожностью применять в ночное время источники излучения с высоким содержанием синего света (0,44...0,48 мкм).

Система орбитального освещения приполярных городов [4] должна была обеспечивать освещенность горизонтальной земной поверхности при сплошной облачности не менее 5 лк. При этом средняя освещенность земной поверхности от Луны равна всего около 0,25 лк, а в безлунную ночь она составляет 0,0010...0,0002 лк (в ясную погоду). Следовательно, КА-рефлектор будет самым ярким объектом на небе после Солнца.

КА-рефлектор с отражателем площадью 30 000 м<sup>2</sup> будет наблюдаться с Земли как точечный источник света, т.е. его угловой размер меньше, чем у Солнца и Луны.

В конструкции КА-рефлекторов системы орбитального освещения планировалось использовать отражатели из металлизированной с одной стороны полиамидной пленки (ПМ-1). Для металлизации должен был использоваться натрий (имеющий коэффициент отражения на длине волны 0,59 мкм – 0,997 [11]), алюминий или титан. Для поддержания требуемого значения коэффициента отражения было предложено выполнять напыление покрытия в условиях космического полета с помощью соответствующего агрегата и запаса напыляемого материала [4].

Однако использование натрия ограничено его сравнительно низкой технологичностью (он является щелочным металлом), пожаровзрывоопасностью и применением дополнительных мер предосторожности при обращении с ним. Для полностью автоматического напыления покрытия на отражатель в условиях космического полета необходима разработка соответствующей технологии.

На рис. 1 представлены кривые спектрального отражения разных металлов по данным [11-13].

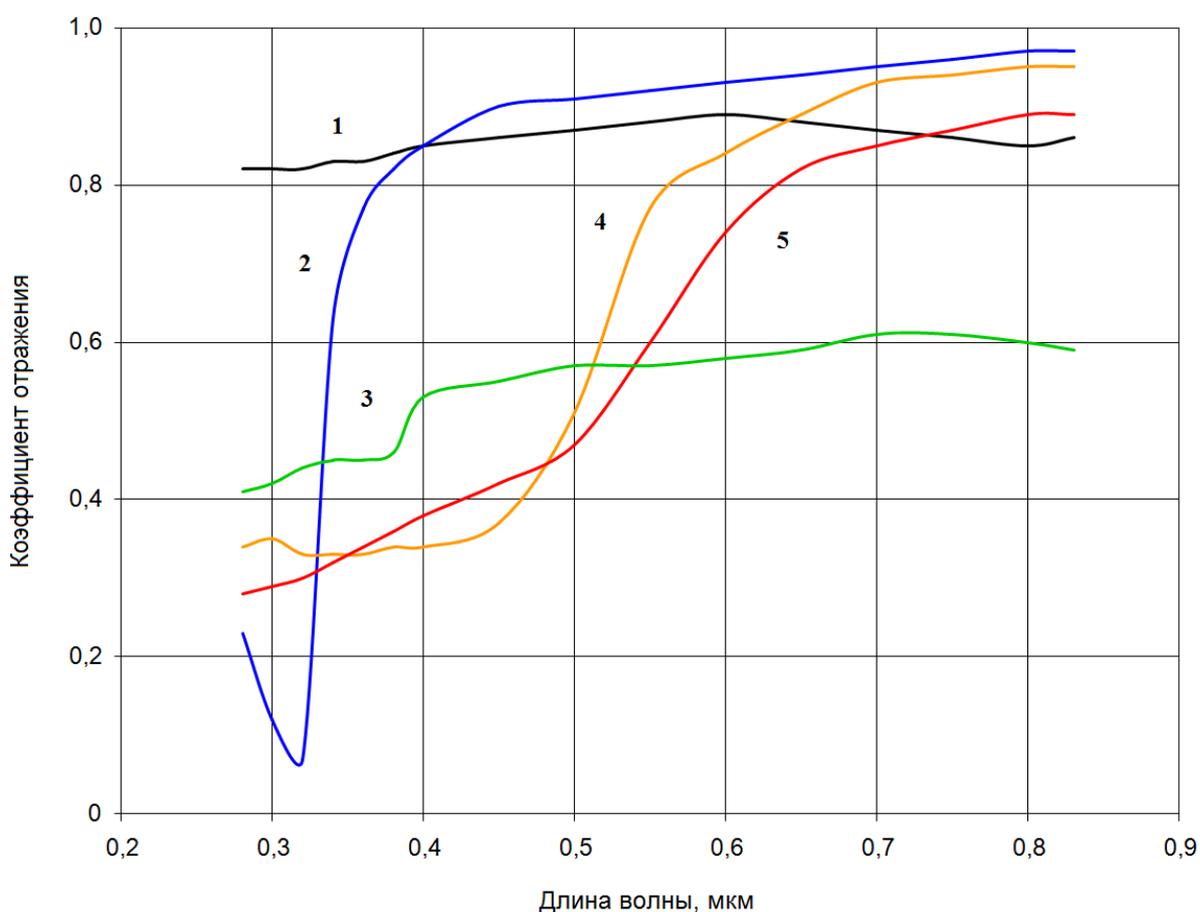


Рисунок 1 – Кривые спектрального отражения металлов, используемых для изготовления отражателей: 1 – алюминий; 2 – серебро; 3 – титан; 4 – золото; 5 – медь

Использование алюминия для металлизации пленки отражателя выглядит привлекательно. Отражатель с алюминиевым покрытием был испытан в ходе космического эксперимента «Знамя-2» [14].

Алюминий является единственным металлом, обеспечивающим высокую отражательную способность в УФ-, видимой и ИК-областях спектра. Следовательно, спектр отраженного КА-рефлектором излучения в окне прозрачности земной атмосферы в целом будет соответствовать спектру излучения Солнца, в том числе в УФ-области.

Здесь необходимо отметить, что в системах космического освещения предложенных Эрике К.А. [2] было предусмотрено использование отражателей с очень низким коэффициентом отражения в УФ-области.

Естественное свечение ночного неба в УФ-области в значительной степени зависит от фазы Луны, также отражающей излучение Солнца, при этом интенсивность свечения циклически меняется на два порядка [15]. По мнению некоторых авторов, слабое излучение УФ-области играет важную роль в жизнедеятельности многих организмов, населяющих Землю [16].

Кроме того, как следует из рис. 1, алюминиевое и серебряное покрытия имеют высокие коэффициенты отражения в спектральной полосе, соответствующей синему свету (0,44...0,48 мкм), использование которого по данным работ [5,8,9] нежелательно для освещения в ночное время.

Поэтому для снижения риска побочного влияния системы орбитального освещения на живые организмы, в том числе людей, предлагается снизить поток

отраженного излучения в УФ-области (0,28...0,38 мкм) и области синего света (0,44...0,48 мкм) путем использования других металлических покрытий для отражателей.

### **Спектральный состав отраженного излучения у разных покрытий отражателя**

В качестве материала для металлизации пленки отражателя кроме алюминия и титана были рассмотрены серебро, золото и медь. Освещенность отраженным от КА-рефлектора потоком определялась в соответствии с методикой, описанной в [4].

Освещенность в УФ-области вычислялась по выражению

$$E = \frac{4S_{\text{отр}} \cdot \int_{280}^{380} F(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot d\lambda \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sin(z)}{\pi \cdot (\beta \cdot D)^2}, \quad (1)$$

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

Для оценки были приняты следующие значения переменных:  $S_{\text{отр}} = 30\,000 \text{ м}^2$ ;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $z = 90^\circ$ ;  $\beta = 42'$ ;  $D = 1700 \text{ км}$  [4]. Значения  $F(\lambda)$ ,  $\rho(\lambda)$  и  $K(\lambda)$  для спектрального диапазона 0,28...0,38 мкм определялись по [12].

Спектральная плотность потока излучения в УФ-области на земной поверхности от отражателей с различными металлическими покрытиями, рассчитанная по выражению (1), представлена на рис. 2.

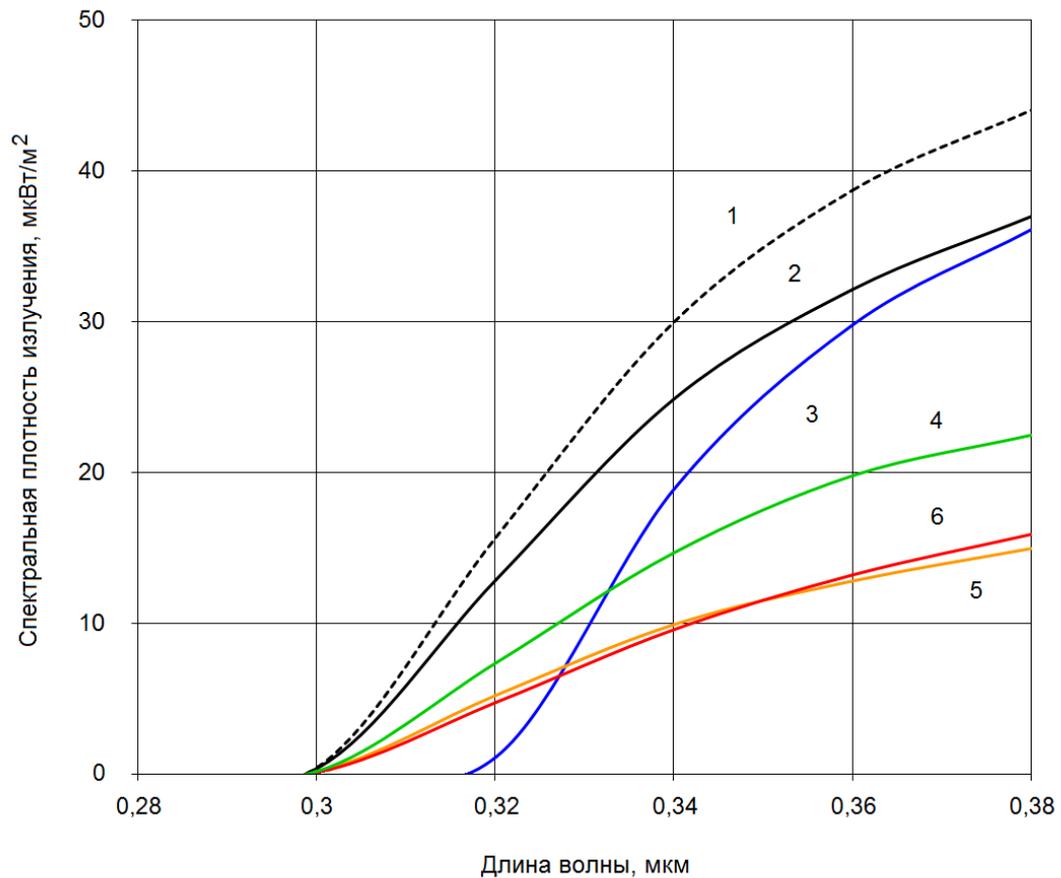


Рисунок 2 – Спектральная плотность потока излучения в УФ-области на земной поверхности для отражателей с различным металлическим покрытием: 1 – отражатель с  $\rho(\lambda) = 1,0$ ; 2 – алюминий; 3 – серебро; 4 – титан; 5 – золото; 6 – медь

Из рисунка следует, что при сравнении с «идеальным» отражателем ( $\rho(\lambda) = 1,0$ ) все покрытия, кроме алюминиевого обеспечивают снижение потока в УФ-области.

Для расчета освещенности в люксах в видимом диапазоне использовалось известное выражение [1]

$$E_{лк} = 683 \cdot \int_{380}^{780} E(\lambda) \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

где  $v(\lambda)$  – спектральная световая эффективность монохроматического излучения, определяемая в соответствии с ГОСТ 8.332–2013. С учетом (2) выражение (1) будет иметь вид

$$E_{лк} = \frac{4S_{отр} \cdot 683 \cdot \int_{380}^{780} F(\lambda) \cdot v(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot d\lambda \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sin(z)}{\pi \cdot (\beta \cdot D)^2} \quad (3)$$

Для оценки атмосферных потерь в видимом диапазоне было взято значение  $K(\lambda) = 0,23$  (что соответствует нахождению КА-рефлектора в зените, с учетом облачного покрова) [4].

Спектральная плотность потока излучения в видимой области на земной поверхности для отражателей с различными металлическими покрытиями, рассчитанная по выражению (1), представлена на рис. 3.

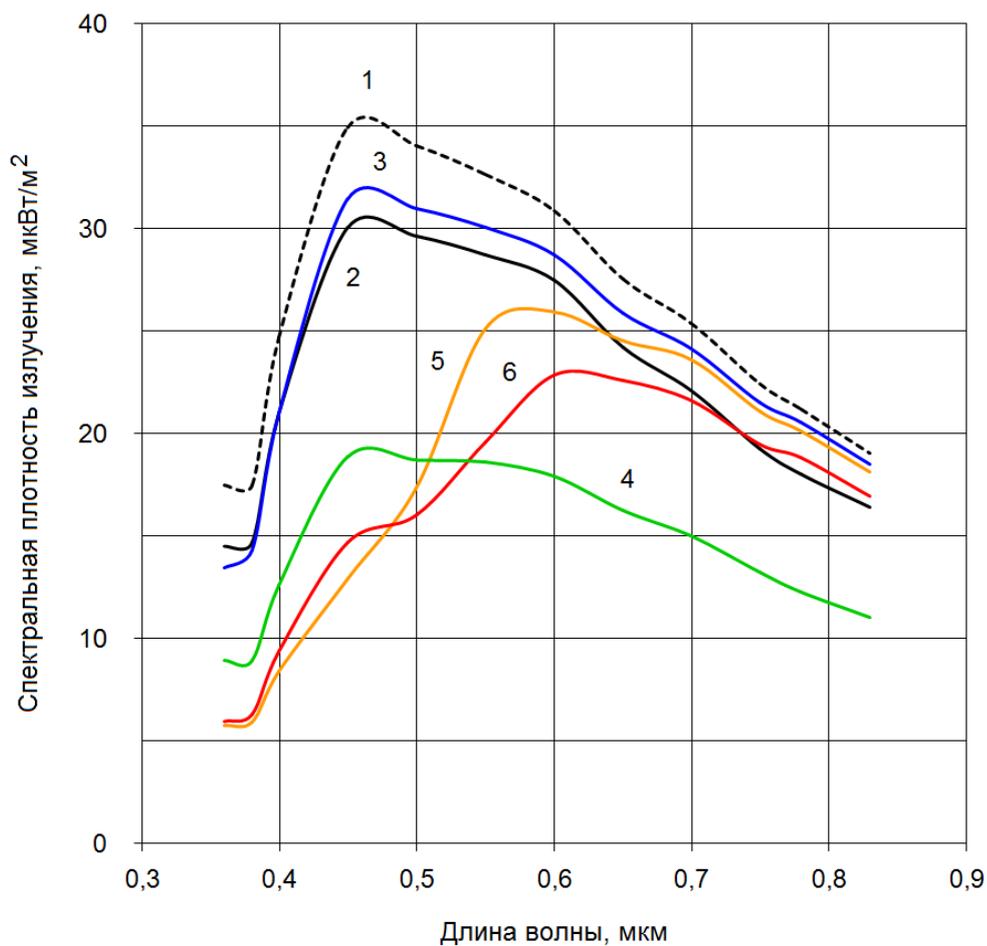


Рисунок 3 – Спектральная плотность потока излучения в видимой области на земной поверхности для отражателей с различным металлическим покрытием: 1 – отражатель с  $\rho(\lambda) = 1,0$ ; 2 – алюминий; 3 – серебро; 4 – титан; 5 – золото; 6 – медь

Для оценки потока в спектральной полосе, соответствующей синему свету (0,44...0,48 мкм), коэффициент пропускания атмосферы  $K(\lambda)$  определялся по данным [12], аналогично как и для расчета отраженной УФ-радиации (при максимальных значениях  $K(\lambda)$ ).

Максимальная освещенность обеспечивается серебряным покрытием. Наибольшая освещенность в спектральной полосе, соответствующей синему свету

(0,44...0,48 мкм) также у отражателя с серебряным покрытием, наименьшая – у отражателя с золотым покрытием.

Для сравнения характеристик отражателей с различными покрытиями автор использовал коэффициент  $k_{cp}$ , показывающий отношение соответствующих показателей для оцениваемого отражателя и «идеального» отражателя с  $\rho(\lambda) = 1,0$ . Значения  $k_{cp}$  для отражателей с разными покрытиями представлены в таблице 1.

Для показателя в первой строке таблицы 1 желательным является высокое значение (максимальная освещенность), а для показателей во второй и третьей строках – низкие значения (минимальный «хвост» спектра излучения в коротковолновой области).

Таблица 1 – Значения  $k_{cp}$  для отражателей с разными покрытиями

Сравниваемые показатели	Материал покрытия				
	Алюминий	Серебро	Золото	Медь	Титан
Суммарная освещенность в спектральном диапазоне 0,36...0,83 мкм	0,88	0,92	0,74	0,63	0,57
Освещенность в спектральном диапазоне, 0,28...0,38 мкм	0,83	0,63	0,33	0,33	0,50

Освещенность в спектральном диапазоне, 0,44...0,48 мкм	0,86	0,90	0,42	0,44	0,54
---	------	------	------	------	------

С точки зрения технической реализации сравнение с «идеальным» отражателем не оправдано, так как покрытия с такими свойствами отсутствуют. Для выбора варианта, наиболее соответствующего технологическим, конструктивным, технико-экономическим требованиям, максимально безопасного для экологии, необходимо решить задачу оптимизации.

### **Выбор покрытия отражателя КА-рефлектора**

Так как возможны два варианта реализации системы орбитального освещения – для подсветки в «дневные» часы полярных ночей высоких широт, и для подсветки в ночное время средних и низких широт, то целесообразно по-разному подойти к оценке их эффективности.

Выше уже говорилось, что в ночное время рекомендуется ограничивать освещенность в спектральном диапазоне 0,44...0,48 мкм. Поэтому данный показатель следует учитывать в первую очередь для системы орбитального освещения средних и низких широт, работающей в ночное время.

При решении оптимизационных задач часто применяется метод мультипликативной свертки частных критериев [17]

$$\varphi(x) = \prod_i \Phi_i(x), \quad (4)$$

где  $\Phi_i(x)$  – частный критерий.

Как следует из выражения (4), общий критерий будет стремиться к нулю, если один из частных критериев принимает небольшие значения.

Для оптимизации выбора покрытия отражателя КА-рефлектора на основе мультипликативной свертки частных критериев вводится следующая обобщенная функция

$$\varphi_{об} = \left( \frac{E_{лк}}{E'_{лк}} \right) \cdot \left( \frac{E'_{уф}}{E_{уф}} \right) \cdot \left( \frac{E'_{лкс}}{E_{лкс}} \right) \cdot \left( \frac{M'}{M} \right). \quad (5)$$

где  $E_{лкс}$  – освещенность в спектральной полосе, соответствующей синему свету (0,44...0,48 мкм);  $M$  – масса металлического покрытия, пропорциональная его плотности.

Со штрихом указаны желательные значения перечисленных параметров – их максимальные значения для одного из видов покрытий (например, суммарная освещенность в видимом диапазоне от отражателя с серебряным покрытием). Если желательные значения параметра должны как можно быть больше, то они находятся в знаменателе, если меньше – то в числителе. Оптимизация заключается в максимизации обобщенной функции.

Значения функции (5) для отражателей с разными покрытиями представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения  $\varphi_{об}$  для отражателей с разными покрытиями

Значения $\varphi_{об}$	Материал покрытия				
	Алюминий	Серебро	Золото	Медь	Титан
Без учета $E_{лкс}$	0,38	0,13	0,11	0,20	0,24
С учетом $E_{лкс}$	0,18	0,06	0,11	0,20	0,19

Анализ данных таблицы 2 показывает, что для системы орбитального освещения в дневное время (в высоких широтах) оптимальным является алюминиевое покрытие отражателя. В системе орбитального освещения в ночное время (в средних и низких широтах) более целесообразно использование отражателя с медным или титановым покрытием

Так как алюминиевое покрытие хорошо отражает УФ-радиацию, вместо него предпочтительнее использование титанового покрытия отражателя. Отражатель с алюминиевым покрытием при нахождении КА-рефлектора в зените будет обеспечивать освещенность горизонтальной поверхности в зависимости от наличия облачности в диапазоне 2,0...7,2 лк, а отражатель с титановым покрытием – 1,3...4,7 лк.

Оценки показывают, что по сравнению с серебряным или титановым покрытием, золотое и медное покрытия отражателя позволяют снизить его цветовую температуру (с ~ 5000 К до ~ 3500 К). Однако большая масса данных покрытий снижает их эффективность по сравнению с титановым покрытием, а отражающая способность уступает серебряному покрытию отражателя.

Таким образом, для освещения в разное время суток оптимальным является использование отражателей с титановым покрытием.

Тем не менее, если для реализации системы орбитального освещения потребуется иметь цветовую температуру отражателя не более 3500 К, золотое и медное покрытия станут предпочтительными.

Следует отметить, что система орбитального освещения [4] за счет малой площади освещаемых ей участков земной поверхности обеспечивает большую экологическую безопасность по сравнению с другими аналогичными проектами, например [2].

### **Заключение**

В статье был выполнен анализ спектральных характеристик отраженного излучения Солнца от различных металлических покрытий, наносимых на отражатели, предназначенных для использования в космической системе орбитального освещения поверхности Земли.

Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации для выбора покрытия отражателю КА-рефлектора системы орбитального освещения, которая может быть использована как для освещения приполярных городов в «дневные» часы полярных ночей, так и для освещения в ночное время районов в средних и низких широтах.

Из опубликованных работ по исследованию светового загрязнения следует, что использование искусственного освещения в ночное время может вызывать

нарушение фотобиологических реакций у различных живых организмов, в том числе у людей. Для снижения воздействия на экологию предлагается на КА-рефлекторах разместить отражатели с покрытием, позволяющим снизить поток отраженного излучения Солнца в коротковолновой области (0,28...0,38 мкм и 0,44...0,48 мкм), оказывающий наибольший биологический эффект.

Для снижения УФ-радиации (0,28...0,38 мкм) в отраженном излучении подходят отражатели с серебряным покрытием, а для снижения УФ-радиации (0,28...0,38 мкм) и освещенности синим светом (0,44...0,48 мкм) могут быть использованы отражатели с медным и золотым покрытиями. При этом, с учетом всей совокупности требований, наиболее оптимальным является использование титанового покрытия отражателей КА-рефлекторов.

В будущем необходимы углубленные исследования влияния искусственного освещения на фотобиологические реакции живых организмов в различных широтах.

Окончательный выбор материала покрытия отражателя может быть сделан только по результатам летных испытаний экспериментального КА-рефлектора.

В перспективе необходимо создание методики, учитывающей допустимые нормы и продолжительность создаваемого светового воздействия, которая позволит сформулировать количественные требования к системе орбитального освещения и нормировать негативные воздействия на живые организмы (в случае необходимости).

Техническая реализация такой космической системы возможна при успешном решении ряда технических проблем, одной из которых является принципиальная

невозможность полномасштабной наземной отработки и учета всех воздействующих факторов на динамику процесса раскрытия крупногабаритных каркасных конструкций в космическом полете [18]. В этой связи представляют интерес бескаркасные конструкции отражателя, стабилизируемые центробежными силами, типа испытанного в эксперименте «Знамя-2» [14] и планируемые к использованию в качестве «солнечного паруса» КА [19,20].

*Автор выражает благодарность Г.А. Сизенцеву, Е.Н. Рябко и И.В. Сорокину за ценные замечания и советы при работе над статьей.*

### **Библиографический список**

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. - М. Знак, 2006. - 972 с.
2. Крафт А. Эрике. Будущее космической индустрии. – М.: Машиностроение, 1979. - 200 с.
3. Семенов Ю.П., Лопота В.А. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева. 1946-1996. - М.: РКК «Энергия», 1996, - 675 с.
4. 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.
5. 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.

6. Международная ассоциация темного неба. Световое загрязнение окружающей среды и дикие животные, URL: <http://ida.darksky.org/assets/documents/ida-Russkij-Wildlife.pdf>
7. Richard H. French-Constant R.H., Somers-Yeates R., Bennie J., Economou T., Hodgson D., Spalding A., McGregor P.K. Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. 2016. URL: <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/royprsb/283/1833/20160813.full.pdf>
8. Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е. О биологическом эквиваленте излучения светодиодных и традиционных источников света с цветовой температурой 1800–10000 К // Светотехника. 2012. № 3. С.7–10.
9. 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.
10. 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, 2015, vol. 7, pp. 1–9.
11. Мороз Л.С., Чечулин Б.Б., Полин И.В. и др. Титан и его сплавы. - Л.: Судпромгиз, Т.1. 1960. - 516 с.
12. Аллен К.У. Астрофизические величины. - М.: Мир, 1977. - 448 с.
13. Лучинский Г.П. Химия титана. - М.: Изд-во «Химик», 1971. - 472 с.

14. Семенов Ю.П., Бранец В.Н., Григорьев Ю.И., Зеленчиков Н.И., Кошелев В.А., Мельников В.М., Платонов В.Н., Севастьянов Н.Н., Сыромятников В.С.. Космический эксперимент по разворачиванию пленочного бескаркасного отражателя  $D = 20$  м («Знамя-2») // Космические исследования. 1994. Т.32. № 4–5. С. 186–193.
15. Космический практикум / Под ред. А.С. Ковтюха. - М.: УНЦ ДО, 2005. - 181 с.
16. 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.
17. Романов В.Н. Системный анализ для инженеров. - СПб.: СЗГЗТУ, 2006. - 186 с.
18. Мельников В.М., Матюшенко И.Н., Чернова Н.А., Харлов Б.Н. Проблемы создания в космосе крупногабаритных конструкций // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53742>
19. Черемных Е.А., Зыков А.В. Разработка алгоритмов управления и исследование динамического поведения спутника с большим вращающимся солнечным парусом // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25397>
20. Макаренкова Н.А. Исследование формы поверхности полотна солнечного паруса при его пространственном развороте // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=65711>