УДК 628.981

КВАЗИСТАЦИОНАРНАЯ РАСЧЕТНО-КОНТРОЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КАЧЕСТВА СВЕТОВОЙ СРЕДЫ ГЕРМООБЪЕКТА

© 2026 В.П. Кузьменко

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 26.08.2026

В работе представлена математическая постановка квазистационарной расчетно-контрольной модели оценки качества световой среды гермообъекта. Целью исследования являлась разработка вычислительной процедуры, позволяющей определять и оценивать соответсвие фотометрических характеристик освещенности функциональным требованиям внутри замкнутого геометрического пространства гермообъекта при длительном пребывании человека. Предлагаемая модель опирается на решение краевой задачи переноса излучения света в прозрачной среде с диффузными граничными условиями на внутренней поверхности гермообъекта, которая представляется объединением отражающих поверхностей материалов пространства. Геометрия расчетной области гермообьекта задавалась в трехмерном евклидовом пространстве, направления распространения светового излучения параметризировались единичной сферой, а спектральный диапазон светового излучения ограничивался видимым оптическим диапазоном 380-780 нм. Научная новизна модели заключается в представлении краевой задачи переноса излучения света в гермообъекте через дискретизацию внутренней поверхности пространства и коэффициенты геометрического переноса светового потока между элементами отражающих поверхностей материалов для количественной оценки качества световой среды по средней освещенности и равномерности освещенности функциональных зон пространства гермообъекта. Для оценки качества световой среды введены степени соответствия средней освещенности требуемому диапазону и равномерности освещенности, на основе которых формируется интегральный показатель качества световой среды по шкале 0-100. Разработанная модель обеспечивает вычислительную основу для оценки и контроля качества световой среды гермообъекта через сопоставление рассчитанных фотометрических характеристик с установленными эксплуатационными требованиями при варьировании параметров источников света и режимов эксплуатации.

Ключевые слова: контроль качества освещения; световая среда; контроль освещения гермообъекта; нормированные критерии оценки, светодиодное освещение, квазистационарное моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-32-42
EDN: OFLFIP

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение качества световой среды в замкнутых пространствах с длительным пребыванием человека без доступа к естественному освещению представляет собой комплексную научно-техническую задачу. К таким объектам относятся космические модули, подводные аппараты, командные пункты, технологические герметичные камеры и другие замкнутые обитаемые пространства сложных технических объектов. В отличие от бытовых помещений с оконными проемами, где естественное освещение обеспечивает как фотометрические, так и биологические функции, в гермообъектах искусственное освещение является единственным источником светового излучения и должно полностью удовлетворять функциональным требованиям различных режимов работы и отдыха при одновременном соблюдении жестких ограничений по энергопотреблению, массе и надежности оборудования.

Исследования показывают, что качество световой среды в замкнутых пространствах оказывает существенное влияние на психофизиологическое состояние, когнитивные функции и работоспособность людей. Экспериментально подтверждено, что условия освещения в замкнутых пространствах влияют на уровень бдительности, рабочую память и показатели вариабельности сердечного ритма операторов в циклах работа-отдых, причем эффекты проявляются даже при кратковременном пребывании [1-3].

Исследования метрик равномерности яркости показывают, что обычно используемый подход «максимум-к-минимуму» может быть нечувствительным к важным различиям в градиенте яркости, которые влияют на воспринимаемую равномерность освещенности рабочей зоны и функционального пространства [4-6]. В задачах освещения гермообъектов качество световой среды определяется не только выбором режима эксплуатации и схемой размещения источников света, но и исходной пригодностью светодиодной компонентной базы к целевым условиям применения. В этом контек-

Кузьменко Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: labenerg@guap.ru

сте показателен подход документарной оценки пригодности светодиодных компонентов для аэрокосмических систем, где на основе нормативных документов и доступных отчетов испытаний формируется воспроизводимая процедура принятия решения о применимости компонента в условиях ограниченной экспериментальной базы [7].

Актуальность разработки квазистационарной расчетно-контрольной модели оценки и контроля качества световой среды гермообъекта определяется необходимостью создания вычислительной процедуры, которая обеспечивает прямую связь между параметрами источников света, геометрией функционального пространства и количественными показателями качества световой среды для различных режимов эксплуатации гермообъектов. Квазистационарный подход позволяет рассматривать каждый режим эксплуатации независимо при неизменных параметрах источников света в пределах режима, что существенно снижает вычислительные затраты и обеспечивает возможность параметрического анализа световой среды без повторного решения нестационарной задачи переноса излучения при изменении режима эксплуатации [8-10].

Целью данной работы является математическая постановка и реализация квазистационарной расчетно-контрольной модели оценки качества световой среды гермообъекта, обеспечивающей вычисление фотометрических характеристик светового поля и формирование количественных показателей качества световой среды для функциональных зон в различных режимах эксплуатации.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ В КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ РАСЧЕТНО-КОНТРОЛЬНОЙ МОДЕЛИ КАЧЕСТВА СВЕТОВОЙ СРЕДЫ ГЕРМООБЪЕКТА

Объем гермообъекта задается областью $V \subset R^3$, а его внутренняя граница (поверхности материалов и источников) задается поверхностью ∂V.

Примем, что в данном пространстве существует точка пространства $r = (x, y, z)$, $r \in V$; где x, y, z – это декартовы координаты.

Направление распространения светового излучения задается единичным вектором $s \in S^2$. В сферической параметризации:

$$s = (\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta),\ \theta \in [0, \pi] \text{ и } \phi \in [0, 2\pi);$$

где s – единичный вектор направления излучения [–];

θ – полярный угол (угол от положительного направления выбранной оси) [рад];

ϕ – азимутальный угол (угол поворота вокруг выбранной оси) [рад];

S^2 – единичная сфера направлений излучения [–].

Световое поле в модели зависит не только от точки r, но и от направления s. Поэтому при переходе от направленных величин (яркости) к ненаправленным величинам (освещенности) требуется суммирование вкладов по всем направлениям, то есть интегрирование по сфере направлений. Для такого интегрирования вводится стандартная мера на сфере – телесный угол, где $d\Omega$ является его дифференциальным элементом. Это обеспечивает математическую корректность интеграла и независимость результата от выбора параметризации углами θ, ϕ:

$$d\Omega = \sin\theta\, d\theta\, d\phi.$$

Физически это означает, что $d\Omega$ задает «вес» бесконечно малого пучка направлений, без которого невозможно корректно сложить вклад излучения, приходящего с разных направлений, в одну скалярную величину (освещенность).

Описанные пространственные и геометрические допущения модели представлены на рисунке 1.

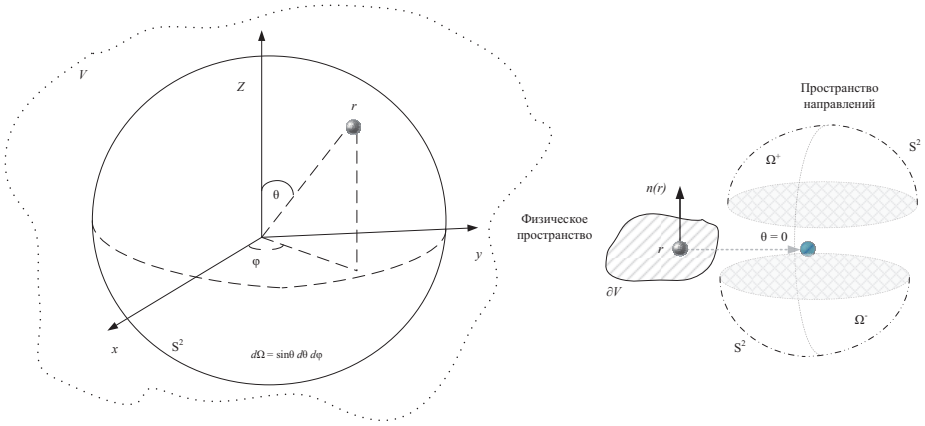


Рис. 1. Геометрия расчетной области в объеме $V \subset R^3$ и локальное разбиение сферы направлений S^2 в точке $r \in \partial V$

Спектральный диапазон светового излучения задается конечным интервалом длины волны светового излучения: $\lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$; где λ_{min}, λ_{max} – границы спектрального диапазона светового излучения, в данном случае принимаются в видимом оптическом диапазоне 380-780 нм.

Для точки $r \in \partial V$ с внутренней нормалью $n(r)$ вводятся полусферы направлений:

$$\Omega^+(r) = \{s \in S^2 : s \cdot n(r) > 0\}, \Omega^-(r) = \{s \in S^2 : s \cdot n(r) < 0\}.$$

где $\Omega^+(r)$ – полусфера исходящих направлений, (направлений, уходящих от поверхности внутрь объема) [–];

$\Omega^-(r)$ – множество падающих направлений (направлений, приходящих к поверхности из объема) [–];

$n(r)$ – единичная внутренняя нормаль к поверхности [–].

Световое поле в гермообъекте задается спектральной энергетической яркостью:

$$L_{e,\lambda}(r, s, t), r \in V, s \in S^2, t \in [0, T], \lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}].$$

где $L_{e,\lambda}$ – спектральная энергетическая яркость [Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·нм$^{-1}$];

t – время [с];

T – горизонт моделирования [с];

Внутренняя граница объема гермообъекта ∂V состоит из поверхностей материалов и светящихся поверхностей источников света. Для однозначного задания граничных условий ∂V представляется в виде объединения двух непересекающихся частей:

$$\partial V = \partial V_{мат} \cup \partial V_{ист}, \partial V_{мат} \cap \partial V_{ист} = \varnothing,$$

где $\partial V_{мат}$ – совокупность внутренних поверхностей конструкционных и отделочных материалов гермообъекта, не являющихся источниками света;

$\partial V_{ист}$ – совокупность светящихся поверхностей источников света (осветительных приборов), с которых в объем гермообъекта непосредственно испускается излучение.

Для длительного пребывания человека освещение задается режимами (например, «работа», «отдых», «ночь»). Чтобы модель была исполнимой, используется квазистационарная постановка: на каждом интервале режима параметры источников постоянны, а расчет выполняется стационарно. Формально это означает, что для каждого режима k поле светового излучения рассматривается как спектральная энергетическая яркость светового излучения в режиме k.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ РАСЧЕТНО-КОНТРОЛЬНОЙ МОДЕЛИ КАЧЕСТВА СВЕТОВОЙ СРЕДЫ ГЕРМООБЪЕКТА

Внутри гермообъекта принимается прозрачная оптическая среда (без устойчивой дымки), и стационарный перенос в объеме описывается уравнением (1):

$$(s \cdot \nabla) L_{e,\lambda,k}(r,s) = 0; r \in V, s \in S^2, \lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}], \quad (1)$$

где ∇ – градиент по точке пространства r [м$^{-1}$];

$(s \cdot \nabla)$ – производная вдоль направления s [м$^{-1}$]

$L_{e,\lambda,k}(r,s)$ – спектральная энергетическая яркость светового излучения в режиме k [Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$·нм$^{-1}$].

Величина $L_{e,\lambda,k}(r,s)$ описывает световое поле независимо от происхождения излучения: она включает вклад прямого излучения источников и вклад излучения после отражений от поверхностей.

Поле спектральной энергетической яркости $L_{e,\lambda,k}(r,s)$, определенное в объеме гермообъекта V, в стационарной прозрачной среде удовлетворяет уравнению переноса без объемных источников. Следовательно, значение $L_{e,\lambda,k}(r,s)$ в каждой внутренней точке $r \in V$ определяется значениями этого поля на внутренней границе ∂V в направлениях, соответствующих лучам, проходящим через точку r. Поэтому для замыкания математической постановки необходимо задать граничные условия для $L_{e,\lambda,k}(r,s)$ на поверхностях ∂V.

В разрабатываемой модели поверхности материалов внутри гермообъекта описываются диффузным отражением, которое представляется как исполнимая и верифицируемая модель отражений, поскольку оно задается измеряемым коэффициентом отражения и приводит к замкнутому интегральному граничному условию. Тогда для точки $r \in \partial V$ и исходящего направления $s \in \Omega^+(r)$ задается выражением (2):

$$L_{e,\lambda,k}(r,s) = L_{e,\lambda,k,ист}(r,s) + \frac{\rho_\lambda(r)}{\pi} \int_{\Omega^-(r)} L_{e,\lambda,k}(r,s_i) |s_i \cdot n(r)| d\Omega_i, \quad (2)$$

где $\rho_\lambda(r)$ – спектральный коэффициент диффузного отражения поверхности [–], $0 \leqslant \rho_\lambda \leqslant 1$.

$$L_{e,\lambda,k,ист}(r,s) = \begin{cases} L_{e,\lambda,k,ист}(r,s), & r \in \partial V_{ист}, \quad s \in \Omega^+(r), \\ 0, & r \in \partial V_{мат}, \quad s \in \Omega^+(r) \end{cases}.$$

Выражения (1)-(2) задают стационарную краевую задачу для неизвестной функции спектральной энергетической яркости светового поля $L_{e,\lambda,k}(r,s)$, определенной в области $r \in V$, и по направлениям $s \in S^2$ при $\lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}]$.

Внутри объема V функция $L_{e,\lambda,k}(r,s)$, удовлетворяет уравнению переноса (1), а на внутренней границе ∂V для исходящих направлений $s \in \Omega^{+}(r)$ выполняется граничное условие (2), которое выражает исходящую спектральную энергетическую яркость через заданную излучательную компоненту на светящихся участках границы и через интеграл по падающим направлениям $s_i \in \Omega^{-}(r)$, соответствующий диффузному отражению.

Далее выполняется переход к фотометрическим величинам с явными пределами спектрального интеграла. Фотометрическая яркость определяется через спектральную энергетическую яркость по выражению (3) [11]:

$$L_{v,k}(r,s) = K_m \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} L_{e,\lambda,k}(r,s)\mho(\lambda)\, d\lambda, \tag{3}$$

где $L_{v,k}(r,s)$ – фотометрическая яркость светового поля в точке r в направлении s в режиме k [кд·м$^{-2}$].

K_m = 683 лм·Вт$^{-1}$ – максимальная световая эффективность излучения;

$\mho(\lambda)$ – фотопическая спектральная функция световой эффективности (функция относительной спектральной чувствительности глаза при дневном зрении) [–].

Освещенность на поверхности в точке $r \in \partial V$ с нормалью $n(r)$ выражается через яркость поля как интеграл по полусфере падающих направлений (4):

$$E_{v,k}(r) = \int_{\Omega^{-}(r)} L_{v,k}(r,s)|s \cdot n(r)|d\Omega, \tag{4}$$

$E_{v,k}$ – фотометрическая освещенность поверхности в точке $r \in \partial V$ в режиме k [лк].

$L_{v,k}(r,s)$ – фотометрическая яркость светового поля, приходящая к поверхности в точке r из направления s в режиме k [кд·м$^{-2}$].

Чтобы пределы интегрирования в уравнении освещенности на поверхности в точке $r \in \partial V$ с нормалью $n(r)$ были представлены в развернутом виде, в локальной системе координат поверхности (ось θ=0 вдоль n(r)), выражение (4) может быть записано:

$$E_{v,k}(r) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\frac{\pi}{2}} L_{v,k}(r,\theta,\varphi)cos\theta \cdot sin\theta \cdot d\theta d\varphi,$$

здесь θ∈ [0, π/2] задает падающую полусферу, а cosθ соответствует $|s \cdot n|$:

$$\sin\theta d\theta d\phi = d\Omega.$$

Дальнейший расчет показателей качества световой среды выполняется в фотометрических величинах. Для этого используются фотометрическая яркость светового поля $L_{v,k}(r,s)$ и фотометрическая освещенность поверхности $E_{v,k}$, определенные формулами (3)-(4).

Далее внутренняя поверхность гермообъекта ∂V разбивается на конечное число P непересекающихся элементов поверхности ΔA_p [м^2] с центрами r_p[м] и нормалями n_p [–], $p = 1, \ldots, P$, таких что:

$$\partial V = \bigcup_{p=1}^{P} \Delta A_p, \qquad \Delta A_p \cap \Delta A_q = \emptyset (p \neq q).$$

В качестве неизвестной для каждого элемента поверхности ΔA_p вводится выходная плотность светового потока (фотометрическая выходная плотность) этого элемента в режиме k:

$$M_{v,p,k} = \frac{1}{\Delta A_p} \int_{\Delta A_p} \left(\int_{\Omega^{+}(r)} L_{v,k}(r,s)(s \cdot n(r))d\Omega \right) dA,$$

где $M_{v,p,k}$ – выходная плотность излучения светового потока [лм·м$^{-2}$];

Для диффузной (ламбертовой) поверхности исходящая яркость не зависит от направления, и тогда связь между выходной плотностью светового потока и яркостью становится простой и проверяемой:

$$L_{v,p,k} = \frac{M_{v,p,k}}{\pi},$$

где $L_{v,p,k}$ – яркость светового поля, исходящая с элемента поверхности ΔA_p [кд·м$^{-2}$];

Для того, чтобы разложить выходную плотность излучения светового потока на $M_{v,p,k}$ излучательную и отражательную части для каждого элемента ΔA_p вводятся:

ρ_p – коэффициент диффузного отражения элемента ΔA_p, $0 \leqslant \rho_p \leqslant 1$;

$M_{v,p,k,ист}$ – излучательная составляющая выходной плотности светового потока, то есть та часть $M_{v,p,k}$, которая задается собственным излучением источника света/осветительного прибора на светящейся поверхности $\partial V_{ист}$ [лм·м$^{-2}$]. На поверхностях материалов $\partial V_{мат}$ эта составляющая равна нулю.

Тогда локальный баланс выходной плотности излучения светового потока элемента поверхности в режиме k записывается в виде:

$$M_{v,p,k} = M_{v,p,k,\text{ист}} + \rho_p E_{v,p,k}.$$

Данное выражение описывает смысл допущения об элементе поверхности: элемент поверхности выдает световой поток наружу в объем гермообъекта по двум причинам: (I) он сам светится (если это светящаяся часть), (II) он отражает падающий на него свет (если это материал, а не источник излучения).

В дискретной поверхностной модели необходимо связать выходную плотность светового потока элемента ΔA_p, то есть сколько света элемент выдает в объем и освещенность другого элемента, то есть сколько света падает на элемент.

Освещенность $E_{v,p,k}$ на элементе ΔA_p складывается из вкладов всех элементов ΔA_q, которые видимы из ΔA_p (см. рис.2).

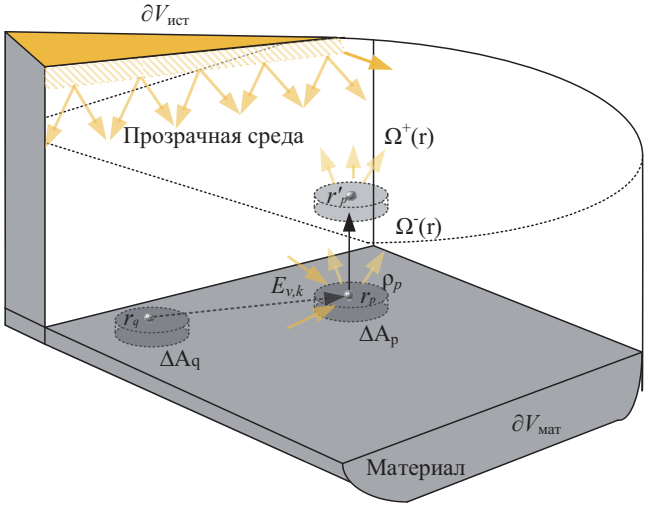


Рис. 2. Пространственная схема моделирования освещенности элемента поверхности в объеме гермообъекта

Коэффициент F_{pq} вводится как безразмерная величина, которая описывает какая доля выходного светового потока элемента ΔA_q в результате пространственного распространения в полости и с учетом взаимной ориентации поверхностей и экранирования формирует вклад в освещенность элемента ΔA_p. Поэтому F_{pq} является коэффициентом геометрического переноса светового потока между элементами поверхности, математически это выражается следующим образом:

$$E_{v,p,k} = \sum_{q=1}^{P} F_{pq} M_{v,q,k}.$$

Коэффициент F_{pq} вычисляется только из геометрии пространства и видимости и задается двойным интегралом по площадям двух элементов поверхности:

$$F_{pq} = \frac{1}{\Delta A_p} \int_{\Delta A_p} \int_{\Delta A_q} \frac{(n_p \cdot u)_+ \cdot (n_q \cdot (-u))_+}{\pi H^2} \chi(r_p, r_q) dA_q\, dA_p,$$

где n_p и n_q – внутренние нормали элементов [–];

$H = \|r_p - r_q\|$ – расстояние между точками [м];

$\chi(r_p, r_q) \in \{0,1\}$ – индикатор видимости (1 – прямая видимость без перекрытия/экранирования, 0 – есть перекрытие/экранирование) [–].

u – единичный вектор направления [–];

$$u = \frac{(r_p - r_q)}{R};$$

$$(n_p \cdot u)_+ = \begin{cases} (n_p \cdot u, & n_p \cdot u > 0, \\ 0, & n_p \cdot u \le 0 \end{cases};$$

$$(n_q \cdot (-u))_+ = \begin{cases} (n_q \cdot (-u), & n_q \cdot (-u) > 0, \\ 0, & n_q \cdot (-u) \le 0 \end{cases}.$$

Интегралы берутся по площадям элементов, а деление на ΔA_p делает F_{pq} безразмерным.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВЕТОВОЙ СРЕДЫ ГЕРМООБЪЕКТА

В разрабатываемой модели качество световой среды гермообъекта учитывается непосредственно на уровне расчетных фотометрических характеристик, получаемых из решения краевой задачи переноса излучения. Для каждого режима эксплуатации и каждой выделенной функциональной зоны гермообъекта световое поле, описываемое фотометрической яркостью $L_{v,k}(r,s)$ и освещенностью $E_{v,k}(r)$, используется для вычисления средней освещенности, равномерности распределения освещенности и интегрального показателя качества световой среды. Дополнительно контролируются режимные и спектральные характеристики источников света, включая коррелированную цветовую температуру, индекс цветопередачи и форму спектрального распределения излучения. Таким образом, качество световой среды в модели формализуется как соответствие рассчитанных пространственно-усредненных и локальных фотометрических характеристик заданным критериям, а сама модель обеспечивает вычислительную основу для контроля и анализа качества освещения при варьировании параметров источников света, геометрии пространства и режимов эксплуатации.

Разработанная в предыдущем разделе дискретная пространственная модель светового излучения связывает выходную плотность светового потока элементов внутренней поверхности ΔA_p с их освещенностью через геометрический перенос F_{pq}.

Пусть $P_Q \subset \{1, \ldots, P\}$ – множество индексов элементов ΔA_p, соответствующих контролируемым зонам (рабочие поверхности/зоны пребывания) в режиме k.

Средняя освещенность на контролируемой области определяется следующим выражением:

$$\bar{E}_{v,k} = \frac{\sum_{p \in P_Q} E_{v,p,k} \Delta A_p}{\sum_{p \in P_Q} \Delta A_p}.$$

Равномерность освещенности вводится в стандартной форме как отношение минимального значения к среднему:

$$U_{v,k} = \frac{\min\limits_{p \in P_Q} E_{v,p,k}}{E_{v,k}}.$$

Для целей управления и оптимизации качество световой среды фиксируется как непрерывная степень выполнения требований по освещенности, равномерности и спектральным характеристикам. При этом учитывается, что как недосвет, так и существенный пересвет являются нежелательными: недосвет приводит к невыполнению зрительной задачи, а пересвет вызывает избыточность режима и может ухудшать зрительный комфорт. Поэтому степень соответствия по средней освещенности задается не как бинарный признак попадания в допустимый диапазон, а как непрерывная функция, учитывающая недосвет, допустимое превышение над требуемым уровнем и выход за верхнюю границу:

$$\eta_{E,k} = \begin{cases} \dfrac{\bar{E}_{v,k}}{\bar{E}_{v,k,\text{тр}}}, \bar{E}_{v,k} < \bar{E}_{v,k,\text{тр}}, \\ 1, \bar{E}_{v,k,\text{тр}} \le \bar{E}_{v,k} \le \bar{E}_{v,k,\text{доп}}\ ; \quad \eta_{U,k} = \min\left(\dfrac{U_{0,k}}{U_{0,k,\text{тр}}}, 1\right), \\ \dfrac{\bar{E}_{v,k,\text{доп}}}{E_{v,k}}, \bar{E}_{v,k} > \bar{E}_{v,k,\text{доп}}, \end{cases}$$

где $\bar{E}_{v,k,\text{тр}}$, – требуемый уровень освещенности для режима k, [лк];

$U_{0,k,\text{тр}}$ – требуемый уровень равномерности освещенности для режима k, [–];

$\bar{E}_{v,k,\text{доп}}$ – верхний допустимый уровень освещенности для режима k (принимается по выбранному нормативному документу и типу зрительной задачи режима k), [лк];

где $\eta_{E,k}$ – степень соответствия средней освещенности требуемому диапазону в режиме k [–];

$\eta_{U,k}$ – степень соответствия равномерности требуемому уровню в режиме k [–].

Интегральный показатель качества режима вводится в шкале 0…100:

$$Q_k = 100(w_E \eta_{E,k} + w_U \eta_{U,k}), \quad w_E + w_U = 1, \qquad w_E, w_U \ge 0,$$

где Q_k – интегральный показатель качества световой среды в режиме k [0…100];

w_E – весовой коэффициент критерия по освещенности [–];

w_U – весовой коэффициент критерия по равномерности освещенности [–].

Имитационное моделирование световой среды выполнялось для замкнутого гермообъекта, геометрия и функциональная структура которого заданы явно и используются в качестве исходных

данных вычислительного эксперимента. Принятая геометрическая модель соответствует внутреннему объему обитаемого герметичного модуля (например, пилотируемого отсека, подвижного командного пункта или автономного технологического модуля), в котором осуществляется длительное пребывание человека и выполнение разнородных зрительных задач.

Геометрия расчетной области $V \subset R^3$, параметры отражающих поверхностей $\partial V_{мат}$, состав функциональных зон контроля и параметры источников света $\partial V_{ист}$ заданы детерминированно и не подбираются в ходе расчета. Это обеспечивает воспроизводимость моделирования и однозначную интерпретацию полученных фотометрических полей.

Исходные данные, используемые в расчете, сведены в табл. 1. Эти данные определяют расчетную постановку задачи моделирования и служат входом для всех последующих вычислений фотометрических характеристик.

Таблица 1 – Исходные данные имитационного моделирования световой среды гермообъекта

Геометрия и отражающие поверхности	**Значение**
Габариты гермопространства (Д х Ш х В), м	8,0 х 4,0 х 2,8
Коэффициент диффузного отражения стен	0,7
Коэффициент диффузного отражения пола	0,4
Коэффициент диффузного отражения потолка	0,8
Коэффициент диффузного отражения оборудования	0,5
Коэффициент диффузного отражения панелей	0,3

В таблице 2 представлены функциональные зоны контроля и их рабочие поверхности, а также условные зоны пребывания.

Таблица 2 – Функциональные зоны контроля (рабочие поверхности и зоны)

№	**Тип зоны**	**Положение (x,y), м**	**Размер, м**	**Высота контроля z, м**	**Требуемая освещенность, лк**	**Требуемая равномерность**
1	Рабочая №1	(1,0, 1,0)	2,0×1,0	0,9	500	0,7
2	Рабочая №2	(5,0, 1,0)	1,5×1,0	0,8	400	0,6
3	Медицинская	(2,0, 2,5)	2,0×1,5	0,9	750	0,8
4	Отдых	(6,5, 2,5)	1,5×1,5	0,5	100	0,4
5	Оборудование	(4,0, 3,0)	3,0×1,0	1,8	300	0,5

Зоны пребывания в геометрической модели объекта вводятся как контролируемые функциональные области, соответствующие характерным сценариям деятельности (работа с пультом и документами, медицинские процедуры, отдых/сон, обслуживание оборудования). Каждая зона задается на плане прямоугольной областью (положение и размеры) и характерной высотой контроля – уровнем рабочей поверхности или уровня пребывания (например, 0,8-0,9 м для рабочих плоскостей, 0,5 м для зоны сна, до 1,8 м для оборудования).

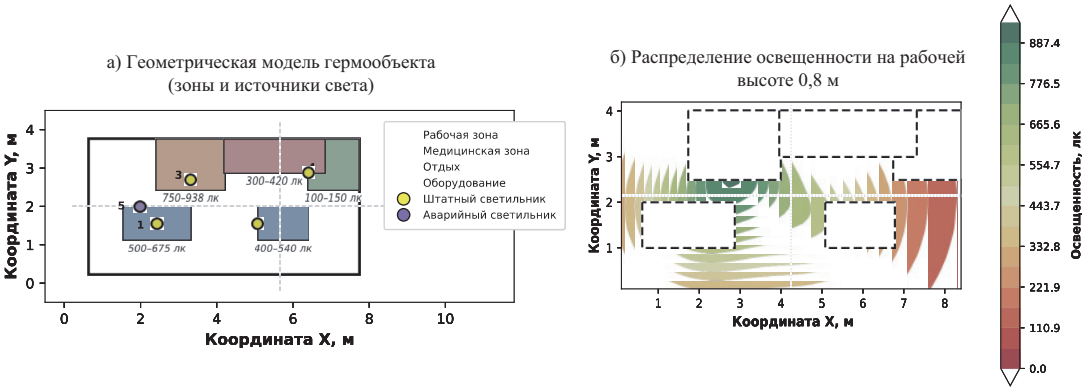
Параметры и координаты светящихся поверхностей источников ($\partial V_{ист}$), используемые в расчете (тип, уровень излучения, ССТ, CRI и угол излучения), приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Параметры светящихся поверхностей источников света

№	**Координаты (*x*,*y*,*z*), м**	**Тип освещения**	**Световой поток Φ_v, лм**	**ССТ, К**	**CRI**	**Угол излучения, °**
1	(2,0; 1,5; 2,7)	Основное освещение	1500	4000	85	120
2	(5,0; 1,5; 2,7)		1200	4000	85	120
3	(3,0; 2,8; 2,7)		1800	5000	90	120
4	(6,5; 3,0; 2,7)		800	2700	80	100
5	(1,5; 2,0; 2,0)	Аварийное освещение	500	4000	70	360

Имитационное моделирование реализовано в среде **Python**: численный расчет фотометрических характеристик в контрольных точках и по сетке выполнен на основе векторизованных операций **NumPy**, а визуализация результатов (геометрия с зонами и источниками, карты распределения освещенности, зональные показатели качества и вспомогательные графики) – средствами **Matplotlib**.

Результаты имитационного моделирования и расчетного распределения освещенности в геометрической модели объекта представлены на рис. 3.

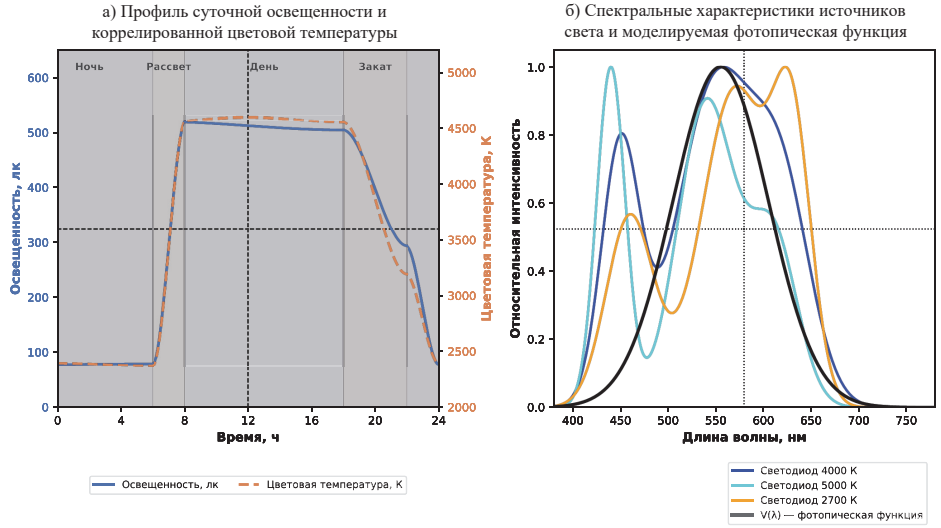


а б

Рис. 3. Геометрическая модель гермообъекта и расчетное распределение освещенности:
а – функциональные зоны контроля и размещение источников света;
б – распределение горизонтальной освещенности на рабочей высоте 0,8 м

Структура светового поля воспроизводит заданное функциональное зонирование (панель а): области повышенной освещенности совпадают с рабочей и медицинской зонами, а зона отдыха расположена в области пониженных значений. Соответствие расчетного поля геометрии размещения источников подтверждает корректность реализованной модели.

Распределение освещенности на рабочей высоте (панель б) получено как сумма прямой составляющей от источников и многократно отраженной составляющей, рассчитанной через дискретизацию внутренней поверхности на элементы ΔA_p и коэффициенты геометрического переноса F_{pq}. Световое поле пространственно неоднородно: максимум (порядка $0{,}9 \cdot 10^3$ лк) локализован в области совместного действия источников света № 1 и № 3 и монотонно убывает к периферии в соответствии с законом обратных квадратов, при этом отраженная составляющая повышает освещенность затененных участков и сглаживает поле, что отвечает физике переноса излучения в полости с диффузно отражающими поверхностями. Моделирование режимов (профилей) освещенности в течение суток и сопоставление фотопической функции со смоделированными спектральными характеристиками источников света представлены на рис. 4.



а б

Рис. 4. Человеко-ориентированные режимы и спектральные характеристики освещения:
а – суточный профиль освещенности и коррелированной цветовой температуры;
б – спектральные характеристики источников и фотопическая функция

Суточный профиль (панель а) представляет последовательность режимов эксплуатации, каждый из которых рассчитывается как самостоятельное квазистационарное состояние с постоянным набором параметров источников; переходы между режимами заданы гладкими функциями, что исключает разрывы светового стимула. Профиль реализует согласованное изменение освещенности (от ночных 80 лк до дневных ≈ 520 лк) и цветовой температуры (2400-4600 К), а спектры источников и фотопическая функция (панель б) показывают, что управление цветовой температурой достигается изменением соотношения коротко- и длинноволновой составляющих спектра при сохранении световой отдачи вблизи максимума чувствительности глаза (555 нм). Практически это означает, что человеко-ориентированный режим реализуется штатными источниками без потери светового потока и без пересчета поля для каждого момента времени – достаточно рассчитать конечный набор режимов, что и делает модель пригодной для задания суточных сценариев освещения в реальных гермообъектах.

На рис. 5 приведена декомпозиция интегрального показателя качества световой среды Q по функциональным зонам гермообъекта для выбранного режима эксплуатации после подбора параметров источников света.

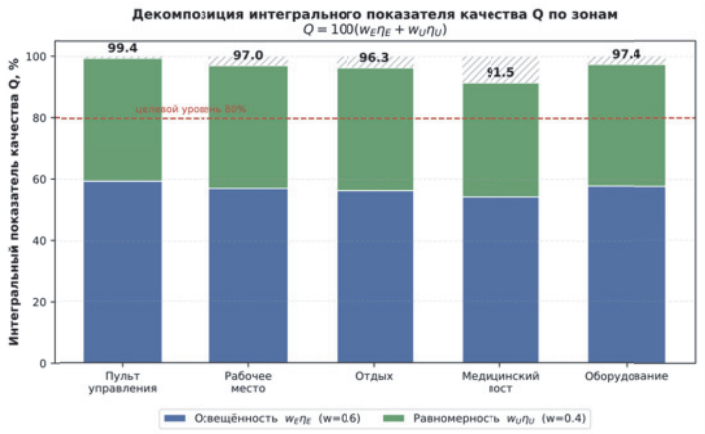


Рис. 5. Декомпозиция интегрального показателя качества световой среды Q по функциональным зонам гермообъекта после оптимизации параметров источников

Декомпозиция интегрального показателя качества световой среды (рис. 5) разделяет его значение в каждой функциональной зоне на вклад степени соответствия средней освещенности и вклад степени соответствия равномерности освещенности. После оптимизации параметров источников света интегральный показатель качества во всех пяти функциональных зонах превышает целевой уровень 80, при этом степень соответствия равномерности освещенности достигает требуемого уровня в большинстве зон, а степень соответствия средней освещенности остается ниже единицы во всех зонах (от 0,905 до 0,990) и определяет основной дефицит интегрального показателя. Наименьшее значение показателя соответствует медицинской зоне (91,5) с наибольшим требуемым уровнем освещенности 750 лк, где одновременно снижены обе степени соответствия. Практически это означает, что декомпозиция интегрального показателя указывает, какая из нормируемых характеристик – уровень или равномерность освещенности – ограничивает оценку качества световой среды в конкретной функциональной зоне, и тем самым переводит контроль качества световой среды в данной зоне из проверки итогового значения освещенности в адресный анализ ее составляющих, что и позволяет использовать данный подход для целенаправленной оптимизации параметров освещения в помещениях и функциональных зонах, где это особенно необходимо, например в системах с техническим зрением и машинным контролем выполнения повторяемых операций, дефектоскопии и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена квазистационарная расчетно-контрольная модель оценки качества световой среды замкнутого пространства гермообъекта.

Выполнено имитационное моделирование световой среды для условного пространства гермообъекта с габаритами 8,0×4,0×2,8 м, разделенного на пять функциональных зон. Получены расчетные распределения освещенности на рабочей высоте, определены зональные значения средней освещенности и ее равномерности. Оценка качества световой среды выполнялась с использованием предложенного интегрального показателя, который при необходимости может быть расширен за счет вклю-

чения дополнительных частных критериев в зависимости от контекста расчета и оценки. Результаты показали, что даже при наличии нескольких источников света в пределах рабочих поверхностей сохраняются локальные перепады освещенности, зависящие от размещения источников света, геометрии исследуемой зоны и отражающих свойств поверхностей. Это дополнительно подтверждает работоспособность модели и необходимость зональной оценки качества световой среды.

В отличие от описательной стационарной оценки освещенности функциональной зоны, предложенная модель позволяет перейти к количественной процедуре оценки качества световой среды по параметрам средней освещенности и ее равномерности через интегральный показатель качества, отражающий степень выполнения заданных требований.

Таким образом, разработанная модель может использоваться как инструмент проектирования, проверки и параметрической оптимизации систем внутреннего освещения. Ее применение позволяет обоснованно выбирать параметры источников света, сравнивать варианты их размещения, оценивать соответствие функциональных зон эксплуатационным требованиям и формировать управляемые сценарии освещения для различных режимов работы в исследуемом замкнутом пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sun Z., Xie S., Hu S., Jiang C., Ding S., Wu L., Xu W., Li H.* The Impact of Lighting Conditions on Users' Alertness and Working Memory in Confined Spaces // PsyCh Journal. 2025. Vol. 14, № 4. P. 614–629. DOI: 10.1002/pchj.70022.
2. *Zhu M., Zhang X., Chen D., Gong Y.* Impact of lighting environment on human performance and prediction modeling of personal visual comfort in enclosed cabins // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 927. Art. 171970. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171970.
3. *Zhang X., Qiao Y., Wang H., Wang J., Chen D.* Lighting environmental assessment in enclosed spaces based on emotional model // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 870. Art. 161933. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161933.
4. *Нероев, В. В.* Функциональная активность сетчатки и зрительные вызванные корковые потенциалы при моделировании факторов космического полета в условиях четырехмесячной изоляции в гермообъекте с искусственной средой обитания / В. В. Нероев, М. В. Зуева, И. В. Цапенко, Ю. А. Бубеев, О. М. Манько, А. Е. Смолеевский, А. М. Алескеров, М. А. Грачева // Вестник Российской академии медицинских наук. – 2021. – Т. 76. – № 5. – С. 488–496. – DOI: 10.15690/vramn1323.
5. *Abboushi B., Rodriguez-Feo Bermudez E., Irvin L., Feagin B. Jr., Royer M., Davis R.* Examining perceptual luminance uniformity of simulated luminaire patterns // Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXV: Proceedings of SPIE. 2021. Vol. 11706. Art. 117061E. DOI: 10.1117/12.2577901.
6. *Abboushi B., Irvin L., Rodriguez-Feo Bermudez E., Royer M.* Evaluating Luminance Uniformity Metrics Using Online Experiments // LEUKOS. 2023. Vol. 19, № 3. P. 308–323. DOI: 10.1080/15502724.2022.2133964.
7. *Кузьменко, В. П.* Методика оценки пригодности светодиодных компонентов к эксплуатации в аэрокосмических системах на основе нормативных документов / В. П. Кузьменко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 5. – С. 141–151. – DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-5-141-151.
8. *Brown T. M., Brainard G. C., Cajochen C., Czeisler C. A., Hanifin J. P., Lockley S. W., Lucas R. J., Münch M., O'Hagan J. B., Peirson S. N., Price L. L. A., Roenneberg T., Schlangen L. J. M., Skene D. J., Spitschan M., Vetter C., Zee P. C., Wright K. P. Jr.* Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults // PLOS Biology. 2022. Vol. 20, № 3. Art. e3001571. DOI: 10.1371/journal.pbio.3001571.
9. *Сладкова, Ю. Н.* Освещение жилых и общественных зданий: основные проблемы и совершенствование методов контроля / Ю. Н. Сладкова, В. Е. Крийт, О. В. Волчкова, Д. Н. Скляр, В. П. Плеханов // Здоровье населения и среда обитания. – 2022. – Т. 30. – № 5. – С. 32–40. – DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-5-32-40.
10. *Balomenaki C., Chrysochoou I., Oungrinis K.-A.* Lighting Scenarios and Human Well-Being in Extreme Environments: Insights from St. Kliment Ohridski Antarctic Base // Advancing Human-Computer Interaction for Space Exploration (SpaceCHI 2025). Open Access Series in Informatics (OASIcs). 2025. Vol. 130. P. 16:1–16:25. DOI: 10.4230/OASIcs.SpaceCHI.2025.16.
11. *Schlangen L. J. M., Price L. L. A.* The Lighting Environment, Its Metrology, and Non-visual Responses // Frontiers in Neuro*logy*. 2021. Vol. 12. Art. 624861. DOI: 10.3389/fneur.2021.624861.

QUASI-STATIONARY COMPUTATIONAL–MONITORING MODEL FOR THE LIGHTING-ENVIRONMENT QUALITY OF A HERMETIC ENCLOSURE

© 2026 V.P. Kuzmenko

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

This paper presents the mathematical formulation and implementation of a quasi-stationary computational–monitoring model for assessing the lighting quality of a hermetic enclosure. The aim of the study is to develop a computational procedure that determines the photometric characteristics of optical radiation–i.e., the lighting environment formed inside the enclosed volume–and evaluates their compliance with functional requirements under conditions of prolonged human occupancy. The proposed model is based on solving a boundary-value radiative transfer problem in a transparent medium with diffuse boundary conditions on the internal surface of the enclosure, which is represented as the union of material surfaces and luminous surfaces of light sources. The geometry of the computational domain is defined in three-dimensional Euclidean space; propagation directions are parameterized on the unit sphere; and the spectral range is restricted to the visible band of 380–780 nm. The scientific novelty of the study lies in the development of a quasi-stationary computational–monitoring framework in which the solution of the radiative transfer boundary-value problem is integrated with a quantitative procedure for lighting-environment quality assessment. This integration is achieved through discretization of the internal surface and the introduction of geometric transfer coefficients that describe the transport of luminous flux between surface elements. Lighting-environment quality is evaluated by degrees of compliance of (i) average illuminance with the required admissible range and (ii) illuminance uniformity with the specified requirement; these degrees are then aggregated into an integral lighting-quality index for different operating modes. The degrees of compliance are used to form an integral lighting-environment quality indicator on a 0–100 scale. The developed model provides a computational basis for monitoring the lighting-environment quality of a hermetic enclosure by comparing the computed photometric characteristics with established operational requirements while varying light-source parameters and operating modes.

Keywords: lighting quality control; lighting environment; lighting control of a hermetic enclosure; normalized evaluation criteria; LED lighting; quasi-stationary modeling.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-32-42
EDN: OFLFIP

REFERENCES

1. *Sun Z., Xie S., Hu S., Jiang C., Ding S., Wu L., Xu W., Li H.* The Impact of Lighting Conditions on Users' Alertness and Working Memory in Confined Spaces // PsyCh Journal. 2025. Vol. 14, no. 4. P. 614–629. DOI: 10.1002/pchj.70022.
2. *Zhu M., Zhang X., Chen D., Gong Y.* Impact of lighting environment on human performance and prediction modeling of personal visual comfort in enclosed cabins // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 927. Art. 171970. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171970.
3. *Zhang X., Qiao Y., Wang H., Wang J., Chen D.* Lighting environmental assessment in enclosed spaces based on emotional model // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 870. Art. 161933. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161933.
4. *Neroev V. V., Zueva M. V., Tsapenko I. V., Bubeev Yu. A., Manko O. M., Smoleevskiy A. E., Aleskerov A. M., Gracheva M. A.* Functional Activity of the Retina and Visual Evoked Cortical Potentials in Simulation the Factors of Space Flight in Conditions of Four Month Isolation in a Hermetic Object with Artificial Habitat // Annals of the Russian Academy of Medical Sciences. 2021. Vol. 76, no. 5. P. 488–496. DOI: 10.15690/vramn1323.
5. *Abboushi B., Rodriguez-Feo Bermudez E., Irvin L., Feagin B. Jr., Royer M., Davis R.* Examining perceptual luminance uniformity of simulated luminaire patterns // Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXV: Proceedings of SPIE. 2021. Vol. 11706. Art. 117061E. DOI: 10.1117/12.2577901.
6. *Abboushi B., Irvin L., Rodriguez-Feo Bermudez E., Royer M.* Evaluating Luminance Uniformity Metrics Using Online Experiments // LEUKOS. 2023. Vol. 19, no. 3. P. 308–323. DOI: 10.1080/15502724.2022.2133964.
7. *Kuzmenko V. P.* Metodika otsenki prigodnosti svetodiodnykh komponentov k ekspluatatsii v aerokosmicheskikh sistemakh na osnove normativnykh dokumentov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. 2025. Vol. 27, no. 5. P. 141–151. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-5-141-151.
8. *Brown T. M., Brainard G. C., Cajochen C., Czeisler C. A., Hanifin J. P., Lockley S. W., Lucas R. J., Münch M., O'Hagan J. B., Peirson S. N., Price L. L. A., Roenneberg T., Schlangen L. J. M., Skene D. J., Spitschan M., Vetter C., Zee P. C., Wright K. P. Jr.* Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults // PLOS Biology. 2022. Vol. 20, no. 3. Art. e3001571. DOI: 10.1371/journal.pbio.3001571.
9. *Sladkova Yu. N., Kriit V. E., Volchkova O. V., Sklyar D. N., Plekhanov V. P.* Osveshchenie zhilykh i obshchestvennykh zdanii: osnovnye problemy i sovershenstvovanie metodov kontrolya // *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2022. Vol. 30, no. 5. P. 32–40. DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-5-32-40.
10. *Balomenaki C., Chrysochoou I., Oungrinis K.-A.* Lighting Scenarios and Human Well-Being in Extreme Environments: Insights from St. Kliment Ohridski Antarctic Base // *Advancing Human-Computer Interaction for Space Exploration (SpaceCHI 2025). Open Access Series in Informatics (OASIcs)*. 2025. Vol. 130. P. 16:1–16:25. DOI: 10.4230/OASIcs.SpaceCHI.2025.16.
11. *Schlangen L. J. M., Price L. L. A.* The Lighting Environment, Its Metrology, and Non-visual Responses // *Frontiers in Neurology*. 2021. Vol. 12. Art. 624861. DOI: 10.3389/fneur.2021.624861.

Vladimir Kuzmenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: labenerg@guap.ru