

ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.7.013

СВЕТОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

© 2023 г. Е. В. Медведев^{1,*}, Д. С. Бурый¹, С. А. Гулин¹,
В. Г. Страдинь¹, Р. В. Чумарин¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_lab13@mil.ru

Поступила в редакцию 10.10.2023 г.

После доработки 10.10.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

Рассмотрен процесс светоэнергетического расчета оптической системы видимого диапазона из состава разрабатываемой мультиспектральной оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (атмосферы). Для правильного функционирования любой оптической системы важно обеспечить необходимые энергетические соотношения – собрать нужное количество энергии и тем самым обеспечить необходимое соотношение между полезным сигналом (потокотом от цели) и вредным (потокотом от фона или помехой). На основании расчетов можно будет сделать вывод, верно ли выбрана оптическая система.

DOI: 10.56304/S2782375X23010060

ВВЕДЕНИЕ

В ходе светоэнергетического расчета, как правило, рассматриваются потери при отражении от поверхностей раздела сред воздух–стекло и потери на поглощение атмосферы. Кроме того, рассчитывается коэффициент пропускания разрабатываемой оптической системы.

Конечным результатом расчета должно получиться следующее выражение:

$$\mu = \frac{E_{\text{пл}}}{E_{\text{пор}}} > 100 \text{ — отношение сигнал/шум.} \quad (1)$$

СВЕТОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Для разрабатываемой аппаратуры дистанционного зондирования Земли в видимом диапазоне спектра предлагается использовать зеркально-линзовый объектив оригинальной конструкции с относительным отверстием 1:10.6 и коэффициентом пропускания 0.6. В качестве приемника излучения выбрана ФПЗС-матрица типа ELCT1080v1U со среднеквадратическим значением (СКЗ) числа шумовых электронов, равным 45.

С учетом этого перед началом расчета с использованием данных табл. 1 [1] определяется

значение пороговой энергетической освещенности $E_{\text{пор}}$ для предлагаемой ФПЗС-матрицы:

$$E_{\text{пор}} = \frac{3.489 \cdot 10^{-4}}{5} = 0.6978 \cdot 10^{-4} = 7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (2)$$

Примем для расчетов значение энергетической освещенности Земли $E_e = 600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Тогда ее

световая освещенность равна $E_V = 1.37 \cdot 10^5$ лк.

При наблюдении планеты из космоса ее излучение складывается из:

- отраженного солнечного излучения;
- собственного теплового излучения.

Применительно к планетам энергетический коэффициент отражения солнечного излучения называется альбедо ρ_e и представляет собой отношение отраженного потока излучения Φ_{ep} к падающему потоку Φ_e :

$$\rho_e = \frac{\Phi_{ep}}{\Phi_e}. \quad (3)$$

Для Земли альбедо равно $\rho_e = 0.1–0.8$. Разброс обусловлен разными метеоусловиями на отдельных участках земной поверхности.

При удалении от Земли ее альбедо усредняется и при наблюдении из космоса принимает $\rho_e = 0.39$ (усреднен для всего диска Земли).

Таблица 1. Паспортные данные ФПЗС-матриц

Паспортная минимальная освещенность, лк	Пороговая освещенность ФПЗС-матрицы, Вт/м ²	Пороговый поток на одном элементе ФПЗС 8 × 8 мкм, Вт	СКЗ числа темновых шумовых электронов n_m , ед.
3	0.01	6.698×10^{-13}	5990
1	0.003	2.233×10^{-13}	1996
0.1	3.489×10^{-4}	2.233×10^{-14}	200
0.05	1.744×10^{-4}	1.116×10^{-14}	100
0.01	3.489×10^{-5}	2.233×10^{-15}	20

Зная освещенность Земли, можно найти собственную светимость объектов, т.е. то излучение, которое будет исходить от рассматриваемых объектов.

Светимость Земли, выраженная через освещенность Земли, будет равна

$$M = \rho_e \cdot E_e = 0.4 \cdot 600 = 240 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (4)$$

Необходимо найти освещенность на приемнике излучения. Она связана с освещенностью на объекте коэффициентом пропускания τ , который зависит от коэффициентов пропускания атмосферы и оптической системы. Формула для его расчета выглядит следующим образом:

$$\tau = \frac{E_{\text{ПИ}}}{E_{\text{ОБ}}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{ПИ}}$ – освещенность на приемнике излучения, $E_{\text{ОБ}}$ – освещенность на объекте наблюдения.

Отсюда освещенность на приемнике:

$$E_{\text{ПИ}} = \tau \times E_{\text{ОБ}}. \quad (6)$$

Вычислим освещенность на объекте, учитывая, что освещенность есть отношение падающего потока излучения на проецируемую площадь объекта:

$$E_{\text{ОБ}} = \frac{\Phi}{S'_{\text{ОБ}}}, \quad (7)$$

где

$$S'_{\text{ОБ}} = 2 \cdot x'_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y'_{\text{ОБ}}.$$

Здесь $x_{\text{ОБ}}, y_{\text{ОБ}}$ – размеры полуосей объекта наблюдения, $x'_{\text{ОБ}}, y'_{\text{ОБ}}$ – размеры полуосей проекции объекта на приемнике соответственно.

Посчитать поток излучения можно через силу излучения $I_{\text{ОБ}}$ и телесный угол Ω :

$$\Phi = I_{\text{ОБ}} \cdot \Omega. \quad (8)$$

Сила излучения может быть выражена через произведение яркости объекта $L_{\text{ОБ}}$ и площади объекта $S_{\text{ОБ}}$:

$$I_{\text{ОБ}} = L_{\text{ОБ}} \cdot S_{\text{ОБ}}, \quad (9)$$

где

$$S_{\text{ОБ}} = 2 \cdot x_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y_{\text{ОБ}}.$$

Телесный угол рассчитывается по формуле

$$\Omega = \frac{\pi \cdot D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot H^2}, \quad (10)$$

где H – высота полета спутника, а $D_{\text{зр}}$ – диаметр входного зрачка объектива аппаратуры.

Учитывая изложенное выше, выражение для расчета потока излучения будет иметь вид

$$\Phi = I_{\text{ОБ}} \cdot \Omega = L_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot x_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y_{\text{ОБ}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot H^2}. \quad (11)$$

Значение яркости объекта $L_{\text{ОБ}}$ можно выразить через его светимость $M_{\text{ОБ}}$ по формуле

$$L_{\text{ОБ}} = \frac{M_{\text{ОБ}}}{\pi}. \quad (12)$$

Тогда

$$\Phi = \frac{M_{\text{ОБ}}}{\pi} \cdot 2 \cdot x_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y_{\text{ОБ}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot H^2}. \quad (13)$$

Сократив на π и учитывая формулу (2), получим следующее выражение:

$$\Phi = E_e \cdot \rho_e \cdot 2 \cdot x_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y_{\text{ОБ}} \cdot \frac{D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot H^2}. \quad (14)$$

Полученное выражение потока используем в следующей формуле:

$$E_{\text{ОБ}} = \frac{\Phi}{S'_{\text{ОБ}}} = \frac{E_e \cdot \rho_e \cdot 2 \cdot x_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y_{\text{ОБ}} \cdot \frac{D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot H^2}}{2 \cdot x'_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y'_{\text{ОБ}}}. \quad (15)$$

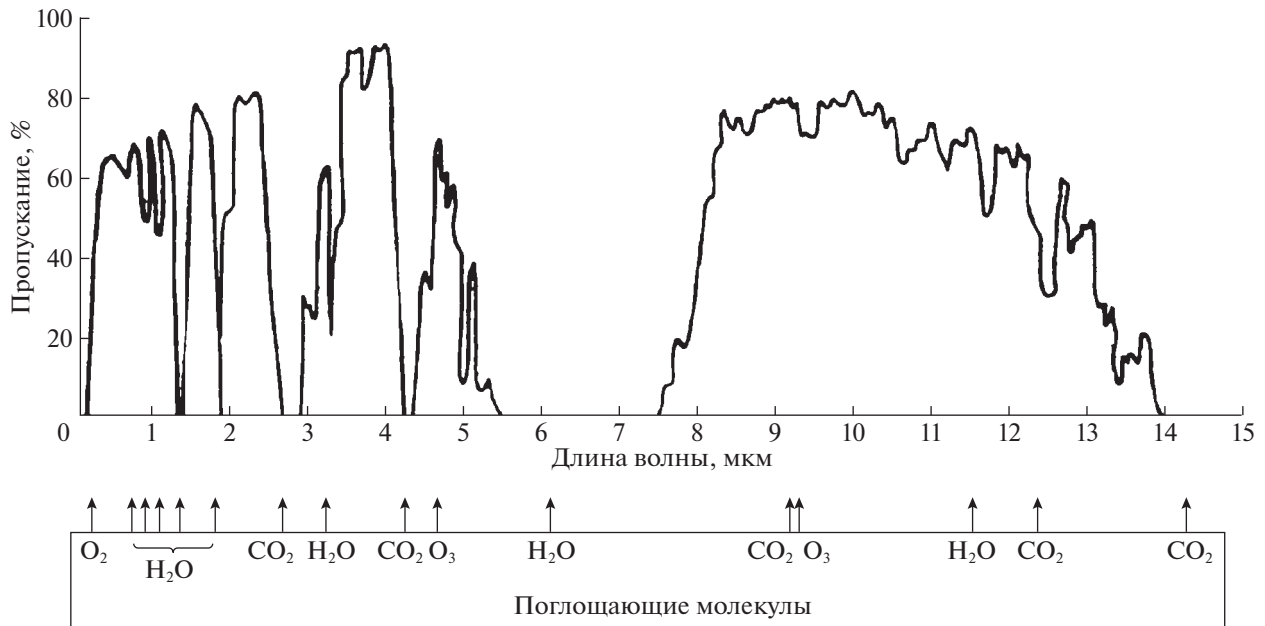


Рис. 1. Спектр пропускания атмосферы на горизонтальной трассе на уровне моря протяженностью 1.852 км (одна морская миля) при толщине слоя осажденной воды $h_{\text{эКВ}} = 17$ мм.

Учитывая, что

$$\frac{2 \cdot x'_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y'_{\text{ОБ}}}{2 \cdot x_{\text{ОБ}} \cdot 2 \cdot y_{\text{ОБ}}} = \beta^2, \quad (16)$$

где β — линейное увеличение системы, получим формулу облученности объекта:

$$E_{\text{ОБ}} = E_e \cdot \rho_e \frac{D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot H^2 \cdot \beta^2}. \quad (17)$$

По определению линейное увеличение f' равно

$$f' = H \cdot \beta. \quad (18)$$

Тогда для освещенности на объекте

$$E_{\text{ОБ}} = E_e \cdot \rho_e \frac{D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot f'^2}. \quad (19)$$

В результате имеем окончательное выражение для расчета освещенности на приемнике излучения:

$$\begin{aligned} E_{\text{ПИ}} &= \tau \cdot E_{\text{ОБ}} = \tau \cdot E_e \cdot \rho_e \frac{D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot H^2 \cdot \beta^2} = \\ &= \frac{\tau \cdot E_e \cdot \rho_e}{4} \cdot \left(\frac{D_{\text{зр}}}{f'} \right)^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Для полученной формулы необходимо знать коэффициент пропускания τ . Этот коэффициент состоит из двух частей: коэффициента пропускания атмосферы τ_A и коэффициента пропускания оптической системы $\tau_{\text{ОС}}$.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Коэффициент пропускания разрабатываемой оптической системы $\tau_{\text{ОС}}$ был рассчитан ранее и составляет 0.6.

Рассчитаем коэффициент пропускания атмосферы τ_A . Существуют три метода расчета коэффициента пропускания атмосферы:

- метод Эльдара–Стронга;
- метод Лангера;
- метод Эльзассера.

Самым точным из трех является метод Эльзассера, учитывающий молекулярное поглощение H_2O и CO_2 и молекулярное рассеяние H_2O . Используя его, проведем дальнейший расчет.

Молекулярное поглощение определяет характерный вид спектрального коэффициента пропускания $\tau_A(\lambda)$ атмосферы. Для усредненных условий зависимость $\tau_A(\lambda)$ приведена на рис. 1.

Атмосфера не может считаться полностью прозрачной средой, так как содержащиеся в ней газы и замутняющие примеси препятствуют прохождению оптического излучения сквозь нее. Излучение, проходя через атмосферу, ослабляется вследствие поглощения и рассеивания молекулами различных газов, скоплениями молекул (аэрозоли), дымкой, туманом, дождем, снегом. Поглощение обусловлено главным образом присутствием в атмосфере молекул воды, углекислого газа и озона. Газы, в основном составляющие ат-

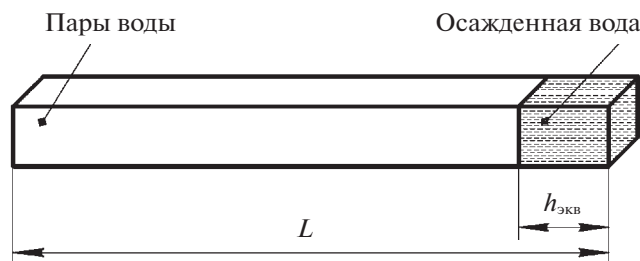


Рис. 2. Определение толщины осажденного слоя воды $h_{экв}$ на трассе длиной L .

мосферу – азот, кислород и аргон, дают лишь слабые полосы поглощения в ИК-области спектра, поэтому в большинстве практических случаев их можно считать полностью прозрачными. В данном случае будем рассматривать только поглощение молекулами воды в соответствии с рис. 1.

Поглощение излучения зависит от числа поглощающих молекул на трассе. Поэтому необходимо ввести величину, характеризующую количество водяных паров на пути прохождения пучка излучения. Такой величиной является эквивалентная толщина осажденного слоя воды $h_{экв}$, измеряемая толщиной слоя воды, который получился бы при конденсации всех водяных паров вдоль трассы (в слое атмосферы длиной L) в контейнере такого же поперечного сечения, что и пучок излучения (рис. 2). Толщина слоя сконденсированных в таком цилиндре всех водяных паров трассы будет характеризовать условия поглощения на трассе.

Эквивалентная толщина слоя воды считается по формуле

$$h_{экв} = \sigma_{нп} \cdot H \cdot \chi \cdot L \cdot \exp(-0.5154 \cdot H), \quad (21)$$

где $L = 19.2$ – длина трассы (по ТЗ), км, $H = 30$ – высота для данного метода, км, $\chi = 0.6$, – относительная влажность при температуре 20°C (отношение массовой доли водяного пара, содержащегося в воздухе, к максимально возможной, которое при данной температуре может содержаться в

насыщенном воздухе), $\sigma_{нп} = 17.2$ – плотность насыщенного водяного пара при температуре 20°C , г/м^3 , $\sigma_n = \sigma_{нп} \times \chi$ – абсолютная влажность (количество водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха).

Коэффициент при H учитывает изменение концентрации молекул воды и поглощательной способности при изменении высоты и имеет размерность $1/\text{км}$. С увеличением высоты влажность и поглощательная способность молекул уменьшаются. Поглощение H_2O оценивается путем приведения поглощенной массы молекул воды на трассе длиной L к массе эквивалентной толщины слоя воды.

Подставив известные величины в формулу (19), получим:

$$h_{экв} = 17.2 \cdot 0.6 \cdot 19.2 \cdot 10^3 \cdot \exp(-0.5154 \times 30) = 0.038 \text{ мм.}$$

Далее найдем эквивалентную длину трассы $L_{экв}$ для молекулярного поглощения углекислым газом, приведенную к уровню моря. Она рассчитывается по формуле

$$L_{экв} = L \cdot \exp(-0.313 \cdot H). \quad (22)$$

Тогда $L_{экв} = 19.2 \cdot \exp(-0.313 \cdot 30) = 0.002 \text{ км}$.

Спектральные коэффициенты пропускания излучения парами воды $\tau_{МПн}^{\text{H}_2\text{O}}$ и углекислым газом $\tau_{МПн}^{\text{CO}_2}$ для рассчитанных значений $h_{экв}$ и $L_{экв}$ представлены в табл. 2 [2].

Поглощение излучения углекислым газом не оказывает влияния на пропускание оптического излучения для спектрального диапазона прибора, поэтому значения коэффициента пропускания излучения углекислым газом в расчетах не используются (в соответствии с табл. 2).

Относительное спектральное распределение излучения источника (объекта) определяется с использованием системы относительных координат, введенной в соответствии с законом смещения Вина следующим образом:

$$x_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{\max}}; \quad (23)$$

$$y_i = \frac{dM_e(\lambda_i T)}{dM_e(\lambda_{\max} T)}, \quad (24)$$

где x_i – относительная длина волны, а y_i – относительная спектральная плотность энергетической светимости.

Далее выбираем шесть значений диапазона рабочей длины волны прибора от 0.4 до 0.9 с шагом в $\Delta\lambda = 0.1 \text{ мкм}$.

Таблица 2. Спектральные коэффициенты пропускания излучения парами воды и углекислым газом

$\lambda_n, \text{мкм}$	$\tau_{МПн}^{\text{H}_2\text{O}}$	$\tau_{МПн}^{\text{CO}_2}$
0.4	0.980	1
0.5	0.986	1
0.6	0.990	1
0.7	0.991	1
0.8	0.989	1
0.9	0.965	1

Таким образом,

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_{\max}} = \frac{0.4}{0.9} \approx 0.4; \\ x_2 &= \frac{\lambda_2}{\lambda_{\max}} = \frac{0.5}{0.9} \approx 0.6; \\ x_3 &= \frac{\lambda_3}{\lambda_{\max}} = \frac{0.6}{0.9} \approx 0.7; \\ x_4 &= \frac{\lambda_4}{\lambda_{\max}} = \frac{0.7}{0.9} \approx 0.8; \\ x_5 &= \frac{\lambda_5}{\lambda_{\max}} = \frac{0.8}{0.9} \approx 0.9; \\ x_6 &= \frac{\lambda_6}{\lambda_{\max}} = \frac{0.9}{0.9} = 1. \end{aligned} \right\} (25)$$

По рассчитанным значениям $x(\lambda)$ определяется значение функции Планка $y = f(x)$ в относительных координатах по табл. 3 [2].

Суммарное промежуточное значение спектральных коэффициентов пропускания излучения для H_2O и CO_2 в каждом спектральном поддиапазоне с учетом молекулярного рассеивания рассчитывается по формуле [3]:

$$\sum_{N=1}^{N=6} y(x_n) \cdot 10^{-2} \cdot \tau_{\text{МПн}}^{H_2O} \cdot \tau_{\text{МПн}}^{CO_2} \cdot 0.998^{h_{\text{экв}}} = 4.02, \quad (26)$$

где N – количество разбиений диапазона рабочей длины волны приборы.

Данное промежуточное значение необходимо для расчета эффективного коэффициента пропускания атмосферы τ_A для излучения, который выражается следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} \tau_A &= \frac{\sum_{n=1}^N \Phi_{e0}(\lambda_n) \cdot \tau_{\text{МП}}(\lambda_n) \cdot \Delta\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e0}(\lambda) d\lambda} \cdot 0.998^{h_{\text{экв}}} = \\ &= \frac{\sum_{n=1}^N M_{e0}(\lambda_n) \cdot \tau_{\text{МП}}(\lambda_n) \cdot \Delta\lambda}{\int_0^\infty M_{e0}(\lambda) d\lambda} \cdot 0.998^{h_{\text{экв}}} = \\ &= \frac{C \cdot T^5 \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{n=1}^N y(x_n) \cdot \tau_{\text{МП}}(\lambda_n)}{C \cdot T^5 \cdot \int_0^\infty y(x_n)(\lambda) d\lambda} \cdot 0.998^{h_{\text{экв}}} = \\ &= \frac{C \cdot T^5 \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{n=1}^N y(x_n) \cdot \tau_{\text{МП}}(\lambda_n)}{\sigma \cdot T^4} \cdot 0.998^{h_{\text{экв}}} = \\ &= \frac{C \cdot T \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{n=1}^N y(x_n) \cdot \tau_{\text{МП}}(\lambda_n)}{\sigma} \cdot 0.998^{h_{\text{экв}}} = \\ &= \frac{C \cdot T \cdot \Delta\lambda}{\sigma} \cdot \sum_{n=1}^N y(x_n) \cdot \tau_{\text{МП}}^{H_2O}(\lambda_n) \cdot \tau_{\text{МП}}^{CO_2}(\lambda_n) \cdot 0.998^{h_{\text{экв}}}, \end{aligned} \quad (27)$$

Таблица 3. Значения функции Планка $y = f(x)$

$x(\lambda_n)$	$y(x_n) \cdot 10^{-2}$	$y(x_n) \tau_{\text{МПн}}^{H_2O} \tau_{\text{МПн}}^{CO_2}$
0.4	5.65	0.06
0.6	46.63	0.46
0.7	70.42	0.70
0.8	87.74	0.87
0.9	97.24	0.96
1	100	0.97

где M_{e0} – энергетическая светимость, $Вт \cdot м^{-2}$, $\tau_{\text{МП}}^{H_2O}(\lambda_n) \tau_{\text{МП}}^{CO_2}(\lambda_n)$ – спектральные коэффициенты пропускания излучения парами воды и углекислым газом, $C = 1.2864 \cdot 10^{-5} \left(\frac{Вт}{м^3 \cdot К^5} \right) = 1.2864 \cdot 10^{-15}$ – вторая постоянная Вина, $\frac{Вт}{см^2 \cdot мкм \cdot К^5}$, $T = 5600$ – температура Солнца, $К$, $\Delta\lambda = 0.1$ – значение шага для каждого спектрального поддиапазона, $мкм$, а $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left(\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4} \right) = 5.7 \cdot 10^{-12} \left(\frac{Вт}{см^2 \cdot К^4} \right)$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Используя (26) и (27), рассчитаем значение коэффициента пропускания атмосферы τ_A :

$$\tau_A = \frac{1.2864 \cdot 10^{-15} \cdot 5600 \cdot 0.1}{5.67 \cdot 10^{-12}} \cdot 4.02 = 0.48.$$

Зная коэффициенты пропускания атмосферы и оптической системы, найдем выражение для расчета освещенности на приемнике $E_{\text{ПИ}}$, используя формулу (20):

$$\begin{aligned} E_{\text{ПИ}} &= E_{\text{Об}} \cdot \tau = E_e \cdot \rho_e \frac{D_{\text{зр}}^2}{4 \cdot H^2 \cdot \beta^2} \cdot \tau = \\ &= \frac{E_e \cdot \rho_e}{4} \cdot \left(\frac{D_{\text{зр}}}{f'} \right)^2 \cdot \tau_A \cdot \tau_{\text{ОС}}. \end{aligned} \quad (28)$$

Таким образом, для разрабатываемой системы освещенность на приемнике зависит лишь от относительного отверстия и коэффициента пропускания:

$$\begin{aligned} E_{\text{ПИ}} &= \frac{600 \cdot 0.4}{4} \cdot \left(\frac{1}{10.1} \right)^2 \cdot 0.48 \cdot 0.8 \cdot 0.1747 = \\ &= 0.0295933 = 2959.33 \cdot 10^{-5}, \end{aligned}$$

где 0.1747 – значение коэффициента использования кремниевой матрицы.

В результате значение отношения сигнал/шум равно

$$\mu = \frac{2959.333 \cdot 10^{-5}}{7 \cdot 10^{-5}} = 422.762.$$

Так как данное значение удовлетворяет заданному критерию оценки (1), можно сделать вывод о том, что оптическая система для разрабатываемой аппаратуры подобрана верно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание и развитие космических средств и технологий дистанционного зондирования Земли являются одним из важных направлений совершенствования космической техники. Проводимая авторами разработка малогабаритной оп-

тико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли видимого диапазона представляется актуальной. Светоэнергетический расчет предлагаемого для данной аппаратуры варианта объектива с относительным отверстием 1:10.1 и коэффициентом пропускания 0.6 подтвердил возможность его использования с выбранной моделью фотоприемника излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маринина Л.А.* // Наука и военная безопасность. 2017. № 1 (8). С. 25.
2. *Дмитриев В.Е., Попов Д.В.* //Аллея науки. 2017. Т. 3. № 16. С. 284.
3. *Смирнов Л.В., Гришканич А.С.* // Сборник трудов VIII Конгресса молодых ученых. Сборник научных трудов. 2019. С. 300.