

УДК 681.7 : 681.782

## О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С БОРТОВОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРОЙ МОНИТОРИНГА ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЪЕМОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

## ON THE POSSIBILITY OF USING SPACECRAFT WITH ONBOARD OPTICAL-ELECTRONIC EQUIPMENT FOR MONITORING SPACE TO OBTAIN REMOTE SENSING DATA

С. А. АРХИПОВ<sup>1</sup>, В. Я. ГЕЧА<sup>2</sup>, С. А. НОВОСЕЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПК «СПП», Москва

<sup>2</sup>АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва

S. A. Arkhipov<sup>1</sup>, V. Ya. Gecha<sup>2</sup>, S. A. Novoselov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JC "RPC "PSI", Moscow

<sup>2</sup>JSC "VNIIE Corporation", Moscow

Аннотация. Одно из современных направлений развития технических средств мониторинга техногенных космических объектов в околоземном космическом пространстве – создание космической системы мониторинга техногенных космических объектов. В состав космической системы техногенных космических объектов кроме наземных средств входят космические аппараты, оснащенные бортовой оптико-электронной аппаратурой. Зона контроля околоземного космического пространства космической системы техногенных космических объектов ограничена двумя основными «вредными факторами»: экранирование Землей и засветка входного окна бортовой оптико-электронной аппаратуры солнечным излучением.

Целью данного исследования является разработка методики расчета линейного разрешения на местности для бортовой оптико-электронной аппаратуры и оценка возможности использования бортовой оптико-электронной аппаратуры для дистанционного зондирования Земли в условиях действия указанных «вредных факторов».

Для орбитального построения космических аппаратов, расположенных на солнечно-синхронной околотерминаторной орбите, «вредный фактор» – экранирование поля зрения бортовой оптико-электронной аппаратуры Землей становится «полезным» – появляется возможность съемки подстилающей поверхности Земли при углах Солнца над горизонтом менее 10° и в сумерки. Разработана аналитическая методика расчета линейного разрешения на местности бортовой оптико-электронной аппаратуры для заданных геометрических условий наблюдения, учитывающая рассеяние солнечного излучения в небе и его отражение от подстилающей поверхности. С использованием предложенной методики проведена оценка линейного разрешения на местности для конкретных параметров бортовой оптико-электронной аппаратуры. Сформулированы требования к космическому аппарату для обеспечения решения задач дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, бортовая оптико-электронная аппаратура, линейное разрешение на местности.

Для цитирования: Архипов С. А., Геча В. Я., Новоселов С. А. О возможности использования космических аппаратов с бортовой оптико-электронной аппаратурой мониторинга околоземного космического пространства для получения съемочной информации дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 208. № 5. С. 9–20.

Annotation. One of the modern trends in the development of technical instruments for monitoring technical space objects in near-Earth space is the creation of a space monitoring system for technical space objects. In addition to ground-based facilities, the space system of technical space objects includes spacecraft equipped with onboard optical and electronic equipment. The control zone of near-Earth space of the space system of technical space objects is limited by two main "harmful factors": Earth shielding and illumination of the entrance window of the onboard optoelectronic equipment with solar radiation.

The purpose of this article is to develop a methodology for calculating linear resolution for on-board optoelectronic equipment and to evaluate the possibility of using on-board optoelectronic equipment for remote sensing of the Earth under the influence of these "harmful factors".

For the orbital construction of spacecraft located in a sun-synchronous near-terminator orbit, the "harmful factor" – the shielding of the field of view of on-board optoelectronic equipment by the Earth becomes "useful" – it becomes possible to photograph the underlying surface of the Earth at Sun angles above the horizon of less than 10° and at dusk. An analytical technique has been developed for calculating the linear resolution of on-board optoelectronic equipment for specified geometric observation conditions, taking into account the scattering of solar radiation in the sky and its reflection from the underlying surface. Using the proposed methodology, an assessment of the linear resolution on the ground for specific parameters of on-board optoelectronic equipment was carried out. The requirements for the spacecraft to provide solutions to the problems of remote sensing of the Earth are formulated.

Key words: remote sensing of the Earth, spacecraft, onboard optical-electronic equipment, linear resolution on the ground.

For citation: Arkhipov S. A., Gecha V. Ya., Novoselov S. A. On the possibility of using spacecraft with onboard optical-electronic equipment for monitoring space to obtain remote sensing data // Electromechanical matters. VNIIE studies. 2025. Vol. 208. № 5. P. 9–20.

### Введение

В работе [1] предложена космическая система (КС) мониторинга техногенных космических объектов (ТКО) в околоземном космическом пространстве (ОКП), в состав которой входят космические аппараты (КА), оснащенные бортовой оптико-электронной аппара-

турой (БОЭА) и размещенные на околотерминаторной солнечно-синхронной орбите (ССО). В номинальном положении поле зрения БОЭА ориентировано по направлению от Солнца. Перенацеливание поля зрения БОЭА обеспечивается за счет разворота КА вокруг оси касательной к орбите в диапазоне уг-

лов крена от  $-25^\circ$  до  $+90^\circ$ . Выбранный диапазон углов крена ограничен с одной стороны (менее  $-25^\circ$ ) экранированием Земли, а с другой стороны (более  $+90^\circ$ ) – засветкой входного окна БОЭА солнечным излучением, которые назовем «вредными факторами».

Цель работы – исследовать возможность использования БОЭА для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в условиях действия указанных «вредных факторов».

### Требования к ориентации космического аппарата на околотерминаторной солнечно-синхронной орбите для получения съемочной информации дистанционного зондирования Земли

В качестве базовой ориентации КА на ССО в плоскости терминатора в работе [1] предложена схема (рис. 1), при которой одна из осей КА постоянно ориентирована на центр Земли (как принято для классических КА ДЗЗ). На рис. 1 восемь КА (условно изображены прямоугольниками) находятся на ССО в плоскости терминатора. Одна из осей КА в номинальном положении ориентирована на центр Земли (3).

Как уже было отмечено, в номинальном положении поле зрения БОЭА ориентировано по направлению от Солнца (перпендикулярно плоскости терминатора). Перенацеливание поля зрения БОЭА для мониторинга ОКП обеспечивается за счет разворота КА вокруг оси касательной к орбите в диапазоне углов крена от  $-25^\circ$  до  $+90^\circ$ . Выбранный диапазон углов крена ограничен с одной стороны (менее  $-25^\circ$ ) экранированием Земли, а с другой стороны (более  $+90^\circ$ ) – засветкой входного окна БОЭА солнечным излучением, которые назовем «вредными факторами».

На рис. 2 приведен общий вид КА КС ТКО на примере иллюстрации [2].

Плоскости четырех солнечных батарей (БС) расположены под углом  $135^\circ$  относительно направления на Солнце. При максимальном отвороте КА на  $+90^\circ$  по крену (для мониторинга ОКП) поля зрения БОЭА и радиатора системы обеспечения теплового режима (СОТР) так же, как и для номинального положения, ориентированы на холодный космос. Отсюда следует, что при отворотах КА на  $+90^\circ$  по крену температурный режим космической платформы и БОЭА практически не изменяется. Однако коэффициент прихода от БС уменьшается на 50%.

Для получения съемочной информации ДЗЗ поле зрения БОЭА должно в номинальном положении быть ориентировано на Землю (подстилающую поверхность). Следовательно, КА должен быть повернут вокруг оси касательной к ССО на угол  $-90^\circ$ . При этом коэффициент прихода от БС аналогично уменьшается на 50%, что не критично. Поле зрения

радиатора СОТР будет уже постоянно ориентировано на подстилающую поверхность. Таким образом, баланс тепловых потоков на входных окнах БОЭА и радиатора СОТР возрастает на величину собственного излучения Земли  $\sim 200 \div 230 \text{ Вт/м}^2$ . Однако, все же баланс останется отрицательным, так как отраженное солнечное излучение от подстилающей поверхности мало, собственное излучение входных окон аппаратуры  $\sim 400 \text{ Вт/м}^2$ , и составит ориентировочно  $\sim -170 \div 200 \text{ Вт/м}^2$ .

КА ДЗЗ, оснащенные съемочной аппаратурой видимого диапазона спектра, обычно предназначены для съемки при углах Солнца над горизонтом  $h_c \sim$  от  $10^\circ$  до  $90^\circ$  [3, 4]. При углах  $h_c$  менее  $10^\circ$  крышка входного окна съемочной аппаратуры закрывается с целью сохранения температурного режима, таким образом, информация по «терминаторной области» подстилающей поверхности действующими КА ДЗЗ практически не регистрируется.

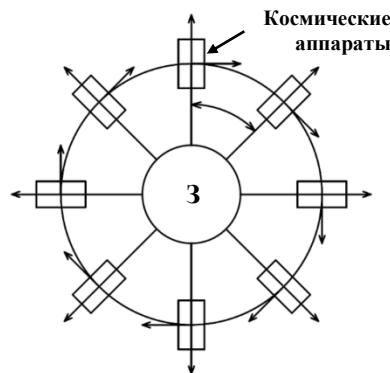


Рис. 1. Базовая ориентация космического аппарата космической системы мониторинга техногенных космических объектов

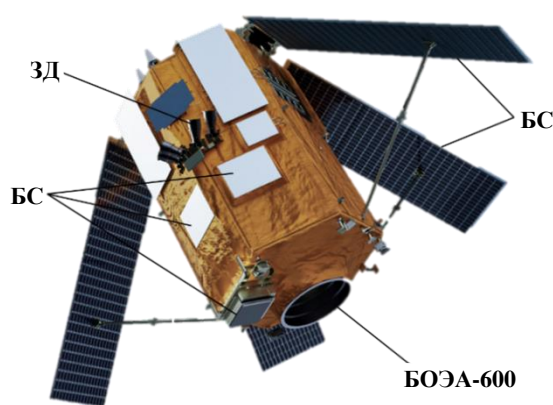


Рис. 2. Иллюстрация космического аппарата космической системы мониторинга техногенных космических объектов: БС – солнечные батареи; ЗД – звездные датчики; БСА – бортовая служебная аппаратура; БОЭА-600 – бортовая оптико-электронная аппаратура (диаметр входного зрачка 600 мм)

Использование КА КС ТКО для целей ДЗЗ позволяет получить уникальную возможность съемки подстилающей поверхности при углах Солнца над горизонтом менее  $10^\circ$  и в сумерки. Для этого диапазон поворотов КА по крену должен быть расширен от  $-25^\circ$  до  $-102^\circ$ .

#### Оценка облученности входного зрачка бортовой оптико-электронной аппаратуры при съемке в диапазоне углов крена космического аппарата

При съемке подстилающей поверхности на входном зрачке БОЭА действуют три типа облученности [4]:

- облученность отраженным от  $1 \text{ м}^2$  подстилающей поверхности солнечным излучением –  $O_{\text{о.с.и.}}$ ;
- облученность отраженным от  $1 \text{ м}^2$  подстилающей поверхности рассеянным в небе солнечным излучением –  $O_{\text{о.неб.}}$ ;
- облученность от  $1 \text{ м}^2$  рассеянного в небе солнечного излучения –  $O_{\text{неб.}}$ .

Построим упрощенные модели этих типов облученности.

Спектральная плотность энергетической яркости Солнца моделируется абсолютно черным телом, имеющим температуру  $T = 6000 \text{ К}$ , и рассчитывается по формуле Планка [5]:

$$L(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}, \quad (1)$$

где  $C_1/\pi = 1,19 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ ;  $C_2 = 1,44 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

Спектральную облученность подстилающей поверхности прямым солнечным излучением находим по формуле:

$$E_C = L_\lambda(\lambda, T) \Omega_C \tau_{\text{атм}}(\lambda), \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Omega_C = 6,79 \cdot 10^{-5} \text{ ср}$  – телесный угол Солнца;  $\tau_{\text{атм}}(\lambda)$  – спектральное пропускание атмосферы в надир, указано в табл. 1.

В табл. 1 приведен результат расчета по формулам (1) и (2).

Интегральный коэффициент пропускания атмосферы в надир в диапазоне длин волн  $0,42 - 0,94 \text{ мкм}$  составит  $\tau_{\text{атм}} = 0,744$ .

Интегральная облученность Солнцем в надир в спектральном диапазоне длин волн  $0,42 - 0,94 \text{ мкм}$  составит  $E_C = 633 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Интегральная облученность подстилающей поверхности зависит от угла Солнца над горизонтом по следующей формуле:

$$E_C(h_C) = E_C \sin(h_C) \left( \tau_{\text{атм}} \right)^{\frac{1}{\sin(h_C)}}. \quad (3)$$

При малых углах  $h_C$  формула (3) не работает, имеет место «проблема воздушной массы» [6]. Для корректного расчета экстинкции атмосферы следует учитывать сферичность, неоднородность атмосферы и рефракцию лучей.

Приведем грубую оценку пропускания атмосферы для малых углов  $h_C$ , полагая, что атмосфера однородна, имеет толщину  $H_{\text{атм}} = 20 \text{ км}$  и кривизну, соответствующую радиусу Земли  $R_3 = 6371 \text{ км}$ .

Согласно закону Бугера:

$$\tau_{\text{атм}} = \exp(-k_{\text{атм}} H_{\text{атм}}). \quad (4)$$

Получим значение коэффициента пропускания  $k_{\text{атм}} = 0,0148 \text{ км}^{-1}$ .

На рис. 3 изображена толща атмосферы в форме разомкнутого кольца. Стрелкой указан радиус Земли. Линия  $AD$  – линия горизонта. Толща атмосферы  $H_{\text{атм}} = 20 \text{ км}$  равна отрезку  $AB$ . Солнечный луч  $CA$  падает в точку  $A$  на поверхности Земли. Угол  $CAD$  равен  $h_C$  – углу Солнца над горизонтом. Катет  $CD$  в прямоугольном треугольнике  $ADC$  обозначим  $d$ . Катет  $AD$  обозначим  $x$ . Длина солнечного луча  $U$  в атмосфере равна гипотенузе  $CA$ .

Из рис. 3 следуют формулы:

$$\frac{x}{H_{\text{атм}} - h_C x} = \frac{2R_3}{x}; \quad (5)$$

$$x = -R_3 h_C + \sqrt{(R_3 h_C)^2 + 2R_3 H_{\text{атм}}}; \quad (6)$$

$$U = U(h_C) = \frac{x}{\cos(h_C)}. \quad (7)$$

С учетом угла Солнца закон Бугера примет вид:

$$\tau_{\text{атм}}(h_C) = \exp(-k_{\text{атм}} U(h_C)). \quad (8)$$

Таблица 1

Спектральная облученность подстилающей поверхности прямым солнечным излучением,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$

$\lambda$ , мкм	0,42	0,46	0,5	0,54	0,58	0,65	0,66	0,70	0,78	0,86	0,94
$\tau_{\text{атм}}(\lambda)$	0,57	0,64	0,69	0,72	0,75	0,77	0,79	0,83	0,83	0,72	0,7
$E_C(\lambda)$	1172	1375	1487	1512	1503	1376	1385	1343	1127	812	653

В табл. 2 приведены значения коэффициента пропускания, рассчитанные по формуле (8) для малых углов  $h_c$ .

Уточненная формула (3) запишется в следующем виде:

$$E_C(h_c) = E_C \sin(h_c) \tau_{\text{атм}}(h_c), \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (9)$$

Определим геометрические условия наблюдения. На рис. 4 приведена схема расположения КА при съемке подстилающей поверхности, освещенной Солнцем.

Пояснения к рис. 4:  $P$  – точка, в которой находится наблюдаемый объект на подстилающей поверхности;  $B$  – точка, в которой находится КА;  $O$  – центр Земли;  $l-l$  – линия местного горизонта;  $BP$  – дальность от объекта до КА, обозначим  $D_{\text{КА}}$ ;  $OA$  – радиус Земли, обозначим  $R_3$ ;  $AB$  – высота круговой орбиты КА, обозначим  $H$ ;  $ABP$  – угол (обозначим его  $\alpha$ ) поворота разворота КА от плоскости терминатора по крену, предполагается, что этот угол совпадает с линией визирования (оптической осью) БОЭА;  $BPl$  – угол (обозначим его  $h$ ) места КА;  $POB$  – угол (обозначим его  $\varphi$ ) объект – центр Земли – КА; стрелкой обозначено направление солнечных лучей; угол Солнца над горизонтом  $h_c$  – угол между направлением солнечных лучей и линией местного горизонта.

Из треугольника  $OPB$  по теореме синусов получаем формулы, которые связывают геометрические параметры съемки:

$$\frac{\sin \varphi}{D_{\text{КА}}} = \frac{\sin \alpha}{R_3} = \frac{\cos(h)}{R_3 + H}. \quad (10)$$

При этом  $\alpha + \varphi + h + 90^\circ = 180^\circ$ .

По теореме косинусов определяем дальность:

$$D_{\text{КА}}^2 = R_3^2 + (R_3 + H)^2 - 2R_3(R_3 + H)\cos\varphi. \quad (11)$$

Формулы (10) – (11) однозначно связывают параметры ( $\alpha$ ,  $\varphi$ ,  $h$ ,  $H$ ,  $D_{\text{КА}}$ ), характеризующие геометрические условия съемки.

Полагаем, что подстилающая поверхность ламбертова и имеет альбедо  $a_s$ . Тогда облученность входного зрачка БОЭА (диаметром  $D$ ) отраженным от подстилающей поверхности солнечным излучением определяется по следующей формуле:

$$O_{\text{о.с.и}} = a_s \frac{\pi}{4} (1 - \varepsilon^2) \left( \frac{D}{D_{\text{КА}}} \right)^2 \frac{E_C \sin(h_c) \tau_{\text{атм}}(h_c)}{\pi} \sin(h) \left( \tau_{\text{атм}} \right)^{\frac{1}{\sin(h)}}. \quad (12)$$

Для оценки облученности входного зрачка БОЭА отраженным рассеянным в небе солнечным излучением воспользуемся графиком из книги [5], который приведен на рис. 5. На графике представлена зависимость интегральной яркости неба, освещенного Солнцем в зенит, за счет рассеяния в атмосфере солнечного излучения.

Таблица 2

Коэффициент пропускания атмосферы для малых углов Солнца над горизонтом

$h_c, ^\circ$	0	2	4	6	8	10
$\tau_{\text{атм}}(h_c)$	0,001	0,008	0,034	0,081	0,138	0,197

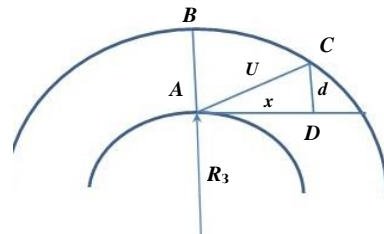


Рис. 3. Прохождение солнечного луча через толщу атмосферы

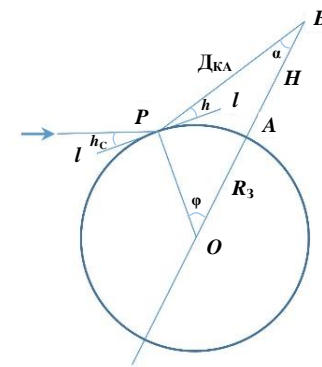


Рис. 4. Схема расположения космического аппарата при съемке подстилающей поверхности, освещенной Солнцем

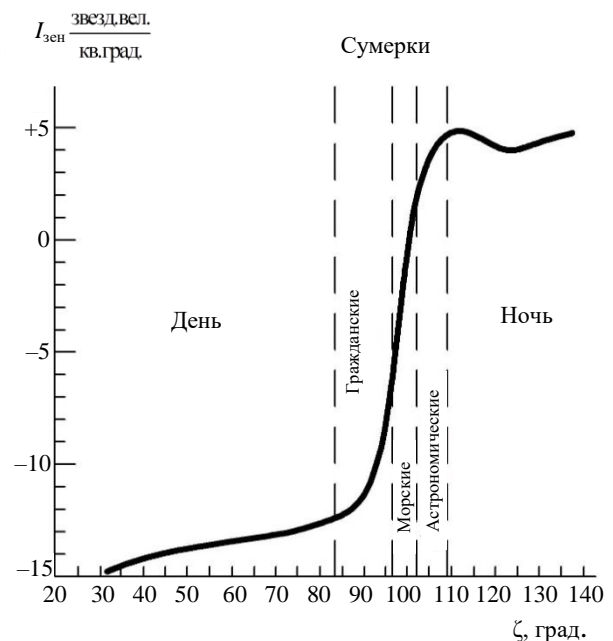


Рис. 5. График зависимости интегральной яркости неба, освещенного Солнцем в зенит, за счет рассеяния в атмосфере солнечного излучения



На графике по оси абсцисс отложен зенитный угол Солнца  $\zeta$ , который связан с углом Солнца над горизонтом соотношением  $h_C = 90^\circ - \zeta$ . По оси ординат графика отложена яркость неба, обусловленная рассеянием в атмосфере солнечного излучения.

В табл. 3 приведены значения яркости неба (в звездных величинах и в энергетических единицах) в зависимости от угла Солнца над горизонтом, полученной из графика.

Облученность входного зрачка БОЭА (диаметром  $D$ ) отраженным от подстилающей поверхности излучением неба определяется по формуле:

$$O_{\text{о.неб}} = a_s I_{\text{неб}} \frac{\pi}{4} (1 - \varepsilon^2) \left( \frac{D}{D_{\text{КА}}} \right)^2 \sin(h) \left( \tau_{\text{атм}} \right)^{\frac{1}{\sin(h)}}. \quad (13)$$

Облученность входного зрачка БОЭА (диаметром  $D$ ) рассеянным в небе солнечным излучением определяется по формуле:

$$O_{\text{неб}} = a_s I_{\text{неб}} \frac{\pi}{4} (1 - \varepsilon^2) \left( \frac{D}{D_{\text{КА}}} \right)^2. \quad (14)$$

### Методика расчета пространственного разрешения бортовой оптико-электронной аппаратуры при съемке подстилающей поверхности в терминаторной области

За основу методики примем математическую модель, которая описана в работах [7, 8].

Методика обеспечивает расчет линейного разрешения на местности (ЛРМ) по величине разрешаемой пространственной частоты в фокальной плоскости при заданной величине контраста трехшпальной миры относительно фона. ЛРМ есть усредненная величина полупериода произвольно ориентированной трехшпальной квадратной миры, каждая шпала которой при известных значениях альбедо фона, контраста миры, угла визирования обнаруживается наблюдателем на получаемом изображении с вероятностью не менее заданной.

Тестовым объектом в методике является трехшпальная квадратная мира, характеристики которой указаны в табл. 4.

Условия наблюдения описаны в табл. 5.

Таблица 3

Зависимость яркости неба от угла Солнца над горизонтом

$\zeta, ^\circ$	80	84	86	88	90	92	94	96	98
$h_C, ^\circ$	10	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8
$I_{\text{зсн. звезд. вел./кв. град.}}$	-13	-12,6	-12,4	-12,2	-11,8	-11,2	-9,8	-7,0	-4,0
$I_{\text{неб}}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{стер}^{-1}$	8,53	5,90	4,91	4,08	2,83	1,63	0,45	0,03	0,002

Таблица 4

Характеристики тест-объекта (трехшпальной квадратной миры)

Характеристика	Обозначение	Принятое значение
Количество шпал миры	—	3
Отношение длины шпалы к ее ширине	—	5:1
Альбедо шпалы прямоугольное	$\rho_1$	0,32
Альбедо фона миры прямоугольное	$\rho_2$	0,48
Рассеивающие поверхности фона и шпал	—	Ламбертовы
Контраст миры	$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$	0,2
Среднее альбедо в кадре	$a_s = \frac{\rho_2 - \rho_1}{2}$	0,4

Таблица 5

Условия наблюдения

Характеристика условий наблюдения	Обозначение	Принятое значение
Спектральный диапазон наблюдения	$\lambda_1 - \lambda_2$	0,42 – 0,94 мкм
Высота КА над поверхностью Земли	$H$	800 км
Угол места КА	$h$	$78^\circ - 102^\circ$
Угол Солнца над горизонтом	$h_C$	Табл. 3
Погрешность стабилизации угловой скорости КА относительно подстилающей поверхности	$\Delta\omega$	0,0005 °/с
Облученность входного окна БОЭА отраженным от $1 \text{ м}^2$ подстилающей поверхности солнечным излучением	$O_{\text{о.с.н}}$	Формула (12)
Облученность входного окна БОЭА отраженным от $1 \text{ м}^2$ подстилающей поверхности рассеянным в небе солнечным излучением	$O_{\text{о.неб}}$	Формула (13)
Облученность входного окна БОЭА $1 \text{ м}^2$ рассеянного в небе солнечного излучения	$O_{\text{неб}}$	Формула (14)
Вероятность обнаружения тест-объекта	$P$	0,96
Время экспонирования кадра	$t_3$	0,05 с

Таблица 6

### Характеристики БОЭА-600

Характеристика	Обозначение	Принятое значение
Диаметр входного зрачка	$D$	600 мм
Фокусное расстояние	$f$	1200 мм
Рабочий спектральный диапазон	$\lambda_1 - \lambda_2$	0,42 – 0,94
Коэффициент экранирования (для расчета $T_{\text{ид.об}}$ )	$\varepsilon$	0,4
Интегральное пропускание оптики	$\tau_{\text{опт}}$	0,6
Функция передачи модуляции оптики	$T_{\text{опт}}$	Формулы (22) – (29)
Размер пикселя	$\delta$	9 мкм
Квантовый выход (средний в рабочем спектральном диапазоне)	$\eta$	0,7
Шум считывания	$\sigma_{\text{сч}}$	2,3 е
Темновой шум	$\sigma_{\text{т}}$	3 е
Емкость пикселя	$\Pi$	39 ке
Разрядность аналого-цифрового преобразователя	$n$	12
Функция передачи модуляции фотоприемного устройства	$T_{\text{ФПУ}}$	Формулы (30) – (32)

В табл. 6 представлены характеристики БОЭА-600. В фотоприёмном устройстве (ФПУ) применяются матрицы GSENSE4040BSI фирмы *Gpixel*. Зеркально-линзовый объектив рассчитан на основе системы Ричи – Кретьена.

Излагаемая далее аналитическая методика ограничена и направлена лишь на получение оценки возможности использования БОЭА для съемки «терминаторной области» подстилающей поверхности. Приняты следующие упрощения:

- простейшая модель яркости неба, не учитывающая неоднородный состав, сложное пространственное строение атмосферы, распределенное спектральное поглощение, разнообразие механизмов рассеяния излучения в атмосфере, сезонную метеорологическую изменчивость атмосферы, наличие дымки;
- упрощенная модель условий наблюдения, не учитывающая возможности и погрешности ориентации и стабилизации КА;
- упрощенное описание функции передачи модуляции (ФПМ) БОЭА, ориентировочно учитывающее абберации и светотехнику объектива, погрешности и неоднородности ФПУ;
- не учтено влияние условий эксплуатации на ФПМ БОЭА (в том числе температурный режим БОЭА, динамика погрешностей стабилизации и ориентации КА);
- ограничение оценки ЛРМ лишь для центра поля зрения БОЭА;
- отношение сигнал/шум БОЭА определяется как произведение отношения сигнал/шум на нулевой пространственной частоте и ФПМ, т.е. принимается независимость пространственно-частотных и радиометрических характеристик.

Разрешающее уравнение, согласно [7, 8], имеет следующий вид:

$$\Psi_{\text{зад}} = \frac{4}{\pi} \frac{2}{\pi} \frac{ST_{\text{БОЭА}}}{\sigma_{\text{ш}}} K_{\text{сум}}, \quad (15)$$

где  $S$  – величина полезного сигнала;  $T_{\text{БОЭА}}(\nu)$  – ФПМ БОЭА;  $\nu$  – пространственная частота;  $\Psi_{\text{зад}}$  – заданное отношение сигнал/шум;  $\sigma_{\text{ш}}$  – среднеквадратичное отклонение (СКО) шума;  $4/\pi$  – амплитуда первой гармоники разложения прямоугольного сигнала в ряд Фурье;  $2/\pi$  – коэффициент, учитывающий усреднение зрительным анализатором сигнала единичной амплитуды по положительному полупериоду;  $K_{\text{сум}}$  – коэффициент, учитывающий эффект пространственной суммации зрительного анализатора по площади мира.

В левой части уравнения (15) – отношение сигнал/шум, при котором зрительный анализатор обнаруживает тест-объект с заданной вероятностью.

В правой части – отношение сигнал/шум, воспринимаемое системой, включая БОЭА, условия наблюдения и свойства зрительного анализатора.

Изложим методику последовательно, по шагам. На каждом шаге расчет проводится в диапазоне углов  $h_c$  и  $h$ . Соответственно, рассчитываемый параметр заносится в таблицу.

**Шаг 1.** Расчет облучённости на входном окне БОЭА в диапазоне углов  $h_c$  и  $h$ . Используем формулы (1) – (14).

**Шаг 2.** Расчет сигнала на одном пикселе и полезного сигнала. Вычисляем сигнал на одном пикселе.

$$N_1 = \frac{O_{\text{БОЭА}} + O_{\text{о.неб}}}{E_{\text{фот}}} \left( \frac{\delta}{f} H \right)^2 \tau_{\text{опт}} \eta t_3, \quad (16)$$

где  $E_{\text{фот}} = 3,0 \cdot 10^{-19}$  Дж – энергия фотона с длиной волны 0,66 мкм;  $\frac{\delta}{f} H$  – проекция пикселя на подстилающую поверхность.

Вычисляем полезный сигнал:

$$S = \frac{2k}{1+k} N_1. \quad (17)$$

Шаг 3. Расчет шума.

СКО шума и его составляющие выражаются в числе шумовых электронов на выборку. Результирующая величина СКО шума определяется как среднеквадратичная сумма шумов от подстилающей поверхности, фона неба, собственных шумов ФПУ, умноженная на коэффициент запаса, обеспечивающий учет неравномерности чувствительности элементов ФПУ, шумов электронного тракта и возможных погрешностей исходных данных:

$$\sigma_{ш} = 1,1 \sqrt{N_1 + N_{фон} + \sigma_t^2 + \sigma_{сч}^2 + \sigma_{АЦП}^2}, \quad (18)$$

где 1,1 – коэффициент запаса;  $N_1$  – дисперсия фотонного шума от подстилающей поверхности, равна сигналу на 1 пикселе;  $N_{фон}$  – дисперсия фотонного шума фона неба:

$$N_{фон} = \frac{O_{неб}}{E_{фот}} \left( \frac{\delta}{f} H \right)^2 \tau_{опт} \eta t_3; \quad (19)$$

$\sigma_t^2$  – дисперсия темнового шума;  $\sigma_{сч}^2$  – дисперсия шума считывания;  $\sigma_{АЦП}^2$  – дисперсия аналого-цифрового преобразования (АЦП), которая определяется разрядностью  $n$  АЦП и емкостью пиксела П:

$$\sigma_{АЦП} = \frac{\Pi}{\sqrt{12} (2^n - 1)}. \quad (20)$$

Шаг 4. Расчет ФПМ БОЭА.

ФПМ БОЭА равна произведению ФПМ оптики, ФПУ и обусловленную смазом изображения:

$$T_{БОЭА} = T_{опт} T_{ФПУ} T_{см}. \quad (21)$$

ФПМ идеального объектива  $T_{ид.об}(z)$  с центральным экранированием  $\varepsilon$  рассчитывается по известным формулам, приведенным в книге [9]. Здесь:

$z = v/v_{пр}$  – относительная пространственная частота;

$v$  – пространственная частота,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$v_{пр} = D/\lambda f$  – предельная пространственная частота,  $\text{мм}^{-1}$ .

Влияние aberrаций на снижение ФПМ объектива определяем по следующей формуле [7]:

$$T_{аб} = 1 - k_{в.ф} [1 - 4(z - 0,5)^2], \quad (22)$$

где  $k_{в.ф} = 0,3$  – коэффициент, соответствующий СКО волнового фронта  $\sim 0,1\lambda$ .

ФПМ оптики:

$$T_{опт} = T_{ид.об} T_{аб}. \quad (23)$$

ФПМ идеального ФПУ:

$$T_{ид.ФПУ} = \frac{\sin \left( \pi \frac{v}{v_{Най}} \right)}{\pi \frac{v}{v_{Най}}}, \quad (24)$$

где  $v_{Най} = \frac{1}{2\delta}$  – частота Найквиста.

Влияние технологических потерь на снижение ФПМ ФПУ определяем по следующей формуле [7]:

$$T_{т.п.ФПУ} = \left[ 1 + k_{т.п} \left( \frac{v}{0,5v_{Най}} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (25)$$

ФПМ ФПУ:

$$T_{ФПУ} = T_{ид.ФПУ} T_{т.п.ФПУ}. \quad (26)$$

ФПМ, обусловленную смазом изображения  $T_{см}$  для заданных условий наблюдения не учитываем.

Шаг 5. Расчет коэффициента суммации.

В последующих формулах использованы следующие обозначения:

$K_{сум}$  – коэффициент суммации, учитывающий эффект пространственного интегрирования зрительного анализатора по площади шпалы миры, определяется соотношением площадей шпалы и элемента изображения;  $R_{ш}$  – ширина шпалы;  $r$  – ширина изображения шпалы;  $D_{КА}$  – дальность до объекта (КА);  $f$  – фокусное расстояние;  $v_{и.мир}$  – частота изображения тест-объекта (трёхшпальной миры).

$$v_{и.мир} = v = \frac{1}{2r} = \frac{D_{КА}}{2fR_{ш}}; \quad (27)$$

$$K_{сум} = \sqrt{\frac{5r^2}{\delta^2}} = \sqrt{5} \frac{v_{Най}}{v}. \quad (28)$$

Функция, обратная  $K_{сум}$ , характеризует пороговые свойства зрительного анализатора по восприятию штриховой миры:

$$\frac{1}{K_{сум}} = \frac{1}{\sqrt{5}} \frac{v}{v_{Най}}. \quad (29)$$

**Шаг 6.** Расчет отношения сигнал/шум, требуемого для обнаружения тест-объекта.

Вероятность обнаружения прямоугольных тест-объектов зависит от воспринимаемого глазом отношения сигнал/шум и описывается нормальным распределением со среднеквадратичным отклонением, равным 1, и средним значением  $\Psi_{\text{п}} = 3,2$ :

$$P = 0,5 \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\Psi_{\text{зад}} - 3,2}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (30)$$

**Шаг 7.** Расчет пространственной частоты, характеризующей разрешающую способность БОЭА, расчет ЛРМ.

Итак, в результате выполнения шагов 1 – 6 получены все необходимые параметры и зависимости, которые необходимы для решения уравнения (15). Решение может быть получено численно или графически путем приравнивания левой и правой частей уравнения (15).

Запишем разрешающее уравнение (15), следуя работе [10], в форме следующего нелинейного уравнения:

$$\frac{4}{\pi} \frac{2}{\pi} k_{\text{з.а}} T_{\text{БОЭА}}(\nu) - \frac{\Psi_{\text{зад}}}{\frac{N_1}{\sigma_{\text{ш}}} K_{\text{сум}}} = 0, \quad (31)$$

где введен параметр  $k_{\text{з.а}}$ , который определяет контраст, воспринимаемый зрительным анализатором:

$$k_{\text{з.а}} = \frac{2k}{1+k} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}. \quad (32)$$

Теперь разрешающее уравнение обрело понятный физический смысл.

Первый член уравнения (31) характеризует ФПМ БОЭА, умноженную на комплекс коэффициентов, которые переводят гармоники в их восприятие зрительным анализатором. Второй член уравнения (31) характеризует функцию порогового контраста (ФПК) БОЭА с учетом зрительного анализатора при анализе изображения тест-объекта, полученного БОЭА.

Таким образом, согласно уравнению (31), разрешающая способность – абсцисса точки пересечения двух указанных функций. Обозначим эту частоту  $\nu_{\text{р.с.}}$ .

Отметим, что достоинство подхода, предложенного в работе [10], состоит в распространении и использовании огромного методического задела, созданного для априорного расчета ЛРМ оптико-фотографической аппаратуры, подтвержденного полувекковой практикой аэросъемки [11], для расчетов разрешающей способности современной оптико-электронной аппаратуры.

В соответствии с рис. 4 расчет ЛРМ проводим по следующей формуле:

$$\text{ЛРМ} = \frac{D_{\text{КА}}}{2\nu_{\text{р.с.}} f \sin(h)}. \quad (33)$$

#### Численная оценка линейного разрешения на местности БОЭА-600 при съемке терминаторной области подстилающей поверхности

Оценка пространственной разрешающей способности и ЛРМ БОЭА-600 проведена по изложенной выше методике.

Ниже в табл. 7 – 9 представлены результаты расчета для угла места КА  $h = 90^\circ$  в диапазоне углов Солнца над горизонтом  $h_{\text{С}}$ .

Таблица 7

Облучённости входного зрачка БОЭА-600

$h_{\text{С}}, ^\circ$	10	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8
$O_{\text{о.с.н}} \cdot 10^{13}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	0,76	0,32	0,13	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$O_{\text{о.неб}} \cdot 10^{13}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	0,94	0,65	0,54	0,45	0,31	0,18	0,05	0,003	0,0002
$O_{\text{неб}} \cdot 10^{12}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	3,17	2,19	1,82	1,51	1,05	0,60	0,17	0,011	0,0007

Таблица 8

Сигнал на пикселе и полезный сигнал

$h_{\text{С}}, ^\circ$	10	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8
$N_1 \cdot 10^{-2}, \text{е}$	42793	24435	16783	11984	7852	4523	1249	83	5,5
$S \cdot 10^{-2}, \text{е}$	14264	8145	5594	3995	2617	1508	416	28	1,8

Таблица 9

Шум на пикселе и дисперсии его составляющих

$h_{\text{С}}, ^\circ$	10	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8
$N_1 \cdot 10^{-2}, \text{е}$	42793	24435	16783	11984	7852	4523	1249	83	5,5
$N_{\text{фон}} \cdot 10^{-3}, \text{е}$	19882	13752	11445	9510	6596	3799	1049	70	4,7
$(N_1 + N_{\text{фон}}) \cdot 10^{-3}, \text{е}$	24162	16196	13123	10708	7382	4252	1174	78	5,2
$\sigma_{\text{ш}}, \text{е}$	5407	4427	3985	3600	2989	2268	1192	308	79



Дисперсии шумов ФПУ  $\sigma_t^2 = 9$  е;  $\sigma_{сч}^2 = 5,3$  е;  $\sigma_{АПЧ}^2 = 45$  е меньше фотонных шумов, и поэтому для оценки их можно не учитывать.

Обратим внимание на значительное превышение сигнала (для углов  $h_C$ , в интервале от  $10^\circ$  до  $-6^\circ$ ) величины емкости пикселя  $\Pi = 39$  ке. Для исключения переполнения потенциальной ямы следует использовать меньшее время экспонирования  $t_s$  и светофильтры. Однако, высокая изменчивость и пространственная неоднородность атмосферы затрудняет прогноз времени экспонирования и выбор светофильтров. Схемотехническое решение этой проблемы может заключаться во введении в состав БОЭА упреждающего спектрофотометра.

Далее для оценки положим, что сигнал и фон ослаблены (на коэффициент ослабления порядка обозначим –  $K_{осл}$ ) для углов  $h_C$ , в интервале от  $10^\circ$  до  $-4^\circ$ ). Физически это означает, что в оптическую схему введены светофильтры и выбрано необходимое время экспонирования, которые обеспечивают заданный коэффициент  $K_{осл}$ . Коэффициент ослабления выбирается таким образом, чтобы сигнал на пикселе  $N_1 + N_{фон}$  не превышал глубину потенциальной ямы  $\Pi - 30\,000$  е (табл. 10).

Из табл. 10 следует, что, начиная с угла  $h_C = -8^\circ$ , который соответствует началу навигационных (морских) сумерек, имеет место дефицит сигнала. Во время гражданских сумерек сигнал достаточен для получения изображений подстилающей поверхности. Поэтому далее на шаге 7 расчет ЛРМ будем проводить для  $h_C = -8^\circ$ .

Дополнительно отметим, что в общем случае в формулу (21) должна войти ФПМ, обусловленная

смазом изображения. Однако, для заданной погрешности стабилизации угловой скорости КА относительно подстилающей поверхности  $\Delta\omega = 0,0005$  %/с и заданного времени экспонирования  $t_s = 0,05$  с, смаз изображения  $\Delta\delta$  не превышает 10% размера пикселя  $\delta = 9$  мкм:

$$\Delta\delta = \Delta\omega f t_s = 0,5 \text{ мкм.} \quad (34)$$

Поэтому в формуле (21) ФПМ, обусловленная смазом изображения  $T_{см}$ , не учтена.

В ходе расчетов выявлено, что предельная пространственная частота оптики  $\nu_{пр} = 757 \text{ мм}^{-1}$  значительно превосходит частоту Найквиста ФПУ  $\nu_{Най} = 55 \text{ мм}^{-1}$ . С точки зрения решения задач ДЗЗ такое соотношение не рационально. Объясним это несоответствие.

Для решения задач мониторинга ОКП проникающая способность БОЭА определяется диаметром входного зрачка. Выбран максимально возможный диаметр (600 мм) головного зеркала объектива, исходя из габаритных ограничений космической платформы, при этом достигаемая ФПМ БОЭА-600 представлена в табл. 11. Фокусное расстояние БОЭА должно быть минимальным по двум причинам: 1) обеспечить регистрацию треков (изображений) космических объектов, имеющих большую угловую скорость относительно БОЭА; 2) минимизировать габариты БОЭА в целом. При этом фокусное расстояние не должно быть минимальным, так как это усложняет оптическую схему объектива. Противоречие разрешено компромиссом – фокусное расстояние было выбрано  $f = 1200$  мм, что соответствует относительному увеличению 1:2.

Таблица 10

Сигнал и шум на пикселе с учетом ослабления сигнала и фотонных шумов

$h_C, ^\circ$	10	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8
$K_{осл}$	1000	1000	1000	1000	1000	500	100	10	1
$N_1, \text{е}$	4279	2444	1678	1198	785	905	1249	832	555
$N_{фон}, \text{е}$	19882	13752	11445	9510	6596	7599	10489	6993	4662
$N_1 + N_{фон}, \text{е}$	24162	16196	13123	10708	7382	8503	11738	7825	5217
$\sigma_{ш}, \text{е}$	171	140	126	114	95	101	119	97	79

Таблица 11

Функция передачи модуляции БОЭА-600

$\nu, \text{мм}^{-1}$	0,00	5,56	11,11	16,67	22,22	27,78	33,33	38,89	44,44	50,00	55,56
$T(\nu)$	1,00	0,96	0,88	0,77	0,64	0,51	0,38	0,26	0,15	0,07	0,00

Таблица 12

**Зависимость коэффициента, обратного коэффициенту суммации, от пространственной частоты**

$\nu, \text{мм}^{-1}$	0,00	5,56	11,11	16,67	22,22	27,78	33,33	38,89	44,44	50,00	55,56
$1/K_{\text{сум}}(\nu)$	0,00	0,04	0,09	0,13	0,18	0,22	0,27	0,31	0,36	0,40	0,45

Таблица 13

**Зависимости членов уравнения (31) от пространственной частоты**

$\nu, \text{мм}^{-1}$	0,00	5,56	11,11	16,67	22,22	27,78	33,33	38,89	44,44	50,00	55,56
1-й член (ФПМ)	0,27	0,26	0,24	0,21	0,17	0,14	0,10	0,07	0,04	0,02	0,00
2-й член (ФПК)	0,00	0,03	0,06	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,29	0,32

Таблица 14

**Оценка разрешающей способности БОЭА-600 в зависимости от угла Солнца над горизонтом для заданных условий наблюдения**

$h_c, ^\circ$	10	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8
$K_{\text{осл}}$	1000	1000	1000	1000	1000	500	100	10	1
$\nu_{\text{р.с}}, \text{мм}^{-1}$	40	37	34	32	28	29	31	29	27
ЛРМ, м	8,3	9	9,8	10,4	11,8	11,5	10,8	11,5	12,3

Результаты расчета обратного коэффициента суммации представлены в табл. 12.

Для заданной вероятности обнаружения  $P = 0,96$  отношение сигнал/шум составит  $\Psi_{\text{зад}} = 5$ .

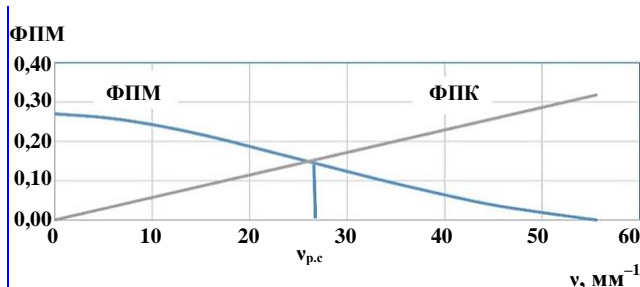
В табл. 13 представлена функциональная зависимость первого и второго членов уравнения (31) от пространственной частоты (для частного случая, когда производится съемка в надири, угол Солнца над горизонтом  $h_c = -8^\circ$  и  $K_{\text{осл}} = 1$ ).

Графическое представление функций табл. 13 представлено на рис. 6, где абсцисса точки пересечения функций равна пространственной частоте  $\nu_{\text{р.с}} = 27 \text{ мм}^{-1}$ , что соответствует значению ЛРМ – 12,3 м.

В табл. 14 представлены результаты расчетов разрешающей способности БОЭА-600 для различных углов Солнца над горизонтом, при угле места КА  $h = 0^\circ$ . Коэффициент ослабления  $K_{\text{осл}}$  подбирался таким образом, чтобы при съемке потенциальная яма пиксела не переполнялась.

Из табл. 14 следует, что в заданных условиях наблюдения КА, оснащенный БОЭА-600 и предназначенный для мониторинга ОКП, обеспечивает уникальную возможность получения снимков подстилающей поверхности при углах Солнца над горизонтом менее  $10^\circ$  и в сумерки.

Из формулы (33) и табл. 14 можно сделать вывод, что значение ЛРМ может быть существенно улучшено за счет увеличения фокусного расстояния БОЭА. Так при увеличении фокусного расстояния БОЭА-600 в четыре раза ЛРМ составит 2,5 – 3,0 м, что значительно повысит востребованность съемочной информации ДЗЗ.



**Рис. 6. График зависимости функций передачи модуляции и порогового контраста от пространственной частоты**

## Закключение

1. Разработана упрощенная аналитическая методика расчета ЛРМ для заданных геометрических условий наблюдения при низких углах Солнца над горизонтом и в сумерки. Предложенная методика учитывает три типа облученности входного зрачка БОЭА: облученность отраженным от подстилающей поверхности солнечным излучением; облученность отраженным от подстилающей поверхности рассеянным в небе солнечным излучением; облученность рассеянного в небе солнечного излучения.

2. С использованием разработанной методики проведена оценка ЛРМ для БОЭА, предназначенной для мониторинга ОКП. Показано, что для КА с БОЭА, размещенных на солнечно-синхронной околоземной орбите, имеется уникальная возможность получения съемочной информации ДЗЗ при углах Солнца над горизонтом менее  $10^\circ$  и в сумерки.

3. В случае принятия решения об использовании указанных КА для решения попутных задач ДЗЗ следует провести схемотехнические доработки КА и БОЭА:

- обеспечить возможность поворота КА вокруг оси крена, касательной плоскости ССО в номинальное положение, при котором линия визирования (оптическая ось) БОЭА ориентирована в надир;
- обеспечить повороты КА относительно указанного номинального положения по углу крена от минус 12° до плюс 12°;

– ввести в состав БОЭА спектрофотометр, обеспечивающий автоматическую упреждающую регистрацию облучённости, по сигналам которого автоматически вычисляется требуемое время экспонирования и подбор светофильтров, с целью исключения возможности переполнения потенциальной ямы пиксела;

– рассмотреть возможность увеличения фокусного расстояния БОЭА, что позволит улучшить значение ЛРМ и повысит востребованность съёмочной информации ДЗЗ.

### Список источников

1. Олейников И. И., Архипов С. А., Тунгушпаев А. Т. Перспективная космическая система наблюдения космических объектов в околоземном космическом пространстве опτικο-электронными средствами // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 4. С.14–20. DOI : 10.18127/j00338486-202303-03.
2. Космический аппарат «Хайям» – 2.5 года успешной эксплуатации [Электронный ресурс] // BARL : [сайт]. 2025. URL : <https://barl.ru/космический-аппарат-хайям-2-5-года-успешной-эксплуатации> (дата обращения: 13.08.2025).
3. Хартов В. В., Ефанов В. В., Занин К. А. Основы проектирования орбитальных опτικο-электронных комплексов : Учебное пособие. М. : Издательство МАИ-ПРИНТ, 2011. 130 с.
4. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М. : Техносфера, 2010. 560 с.
5. Мирошников М. М. Теоретические основы опτικο-электронных приборов. Л. : Машиностроение, 1983. 690 с.
6. Розенберг Г. В. Сумерки. М. : Физматлит, 1963. 380 с.
7. Батраков А. С., Анатольев А. Ю. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических опτικο-электронных систем дистанционного зондирования // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 7. С. 92–97.
8. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга: Учебное пособие. М. : «БИНOM» Лаборатория знаний, 2009. 234 с.
9. Проектирование оптических систем / Под редакцией Р. Шеннона, Дж. Вайанта. Пер. с англ. М. : Мир, 1983. 432 с.
10. Математическая модель цифровой инфракрасной системы дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] / Веселов Ю. Г. [и др.] // Наука и образование. 2012. № 6. С. 1–32. DOI : 10.7463/0612.0423297.
11. Мельканович А. Ф. Фотографические средства и их эксплуатация. М. : Изд-во МО, 1984. 576 с.

### References

1. Oleynikov I. I., Arkhipov S. A., Tungushpaev A. T. Advanced space surveillance system space objects in near-earth space by optical-electronic means // Radio Engineering. 2023. Vol. 87. No 4. Pp. 14–20. DOI : 10.18127/j00338486-202303-03.
2. The Khayyam spacecraft has been in successful operation for 2.5 years [Electronic resource] // BARL : [website]. 2025. URL : <https://barl.ru/космический-аппарат-хайям-2-5-года-успешной-эксплуатации> (date of access: 13.08.2025).
3. Khartov V. V., Efanov V. A., Zanin K. A. Fundamentals of designing orbital optical-electronic complexes : Textbook. M. : MAI-PRINT Publishing House, 2011. 130 p.
4. Shovengerdt R. A. Remote sensing. Methods and models of image processing. M. : Technosphaera, 2010. 560 p.
5. Miroshnikov M. M. Theoretical foundations of optical-electronic devices. L. : Mechanical Engineering, 1983. 690 p.
6. Rosenberg G. V. Twilight. M. : Fizmatlit, 1963. 380 p.
7. Batrakov A. S., Anatolyev A. Yu. Mathematical model for forecasting linear resolution of space optoelectronic systems for remote sensing // Journal of Optical Technology. 2000. Vol. 67. № 7. Pp. 92–97.
8. Baklanov A. I. Observation and monitoring systems : Textbook. M. : 'BINOM. Knowledge Laboratory' Publishing House, 2009. 234 p.
9. Optical System Design / Edited by R. Shannon, J. Vaillant. Translated from English. M. : Mir, 1983. 432 p.
10. Mathematical model of a digital infrared system for remote sensing of the Earth [Electronic resource] / Veselov Yu. G. [et al.] // Science and Education. 2012. № 6. Pp. 1–32. DOI : 10.7463/0612.0423297.
11. Melkanovich A. F. Photographic equipment and its operation. M. : USSR Ministry of Defense, 1984. 576 p.

*Поступила в редакцию 23.09.2025*

*The article was submitted 23.09.2025*

---

**Информация об авторах**

*Сергей Алексеевич Архипов* – кандидат технических наук, главный конструктор, т. +7 (916) 593-37-24, e-mail: [morenos@nprk-spp.ru](mailto:morenos@nprk-spp.ru);

*Владимир Яковлевич Геча* – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, т. +7 (495) 366-16-01, e-mail: [vgecha@hq.vniiem.ru](mailto:vgecha@hq.vniiem.ru);

*Сергей Александрович Новоселов* – научный сотрудник, т. +7 (495) 366-16-01, e-mail: [d20@mcc.vniiem.ru](mailto:d20@mcc.vniiem.ru).

**Information about the authors**

*Sergey Alekseevich Arkhipov* – Ccandidate of Technical Sciences, Chief Designer, t. +7 (916) 593-37-24, e-mail: [morenos@nprk-spp.ru](mailto:morenos@nprk-spp.ru);

*Vladimir Yakovlevich Gecha* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy General Director for Research, t. +7 (495) 366-16-01, e-mail: [vgecha@hq.vniiem.ru](mailto:vgecha@hq.vniiem.ru);

*Sergey Aleksandrovich Novoselov* – Rresearcher, t. +7 (495) 366-16-01, e-mail: [d20@mcc.vniiem.ru](mailto:d20@mcc.vniiem.ru).