



Сравнительная оценка критериев информативности данных дистанционного зондирования Земли из космоса

Д. В. Романов¹, П. А. Защепко^{1,2}, Р. В. Фёдорцев²,
М. Н. Котов¹

¹ ОАО «Пеленг», Минск, Республика Беларусь

² Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

В статье рассмотрены два критерия информативности изображения: линейное разрешение на местности (ЛРМ) и национальная шкала оценки интерпретируемости изображений (NIIRS). Предложена методика сравнения критериев интерпретируемости изображений объектов космической съемки по данным со спутников дистанционного зондирования Земли. Разработан алгоритм расчета ЛРМ и NIIRS, зависящий от основных технических параметров космической аппаратуры (КА) и начальных условий съемки Земли. Проведена сравнительная оценка критериев информативности данных дистанционного зондирования Земли для снимков высокого и сверхвысокого разрешения. Определены требования к оптико-электронной аппаратуре (ОЭА) по критериям ЛРМ и уровню NIIRS для различных сфер применения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, оптико-электронная аппаратура, линейное разрешение на местности, национальная шкала оценки интерпретируемости изображений, пространственное разрешение

Статья получена: 08.08.2022

Статья принята: 29.09.2022

Comparative Evaluation of Informative Criteria of Earth Remote Sensing Data From Space

D. V. Romanov¹, P. A. Zashchepko^{1,2}, R. V. Feodortsau²,
M. N. Kotov¹

¹ JSC "Peleng", Minsk, Republic of Belarus

² Belarusian National Technical University, Minsk,
Republic of Belarus

The article considers two criteria for image informativeness: linear terrain resolution (LRM) and National Image Interpretability Rating Scale (NIIRS). A method for comparing the criteria for the interpretability of images of space-based objects based on data from Earth remote sensing satellites is proposed. An algorithm for calculating the LRM and NIIRS has been developed, depending on the main technical parameters of the space equipment (SC) and the initial conditions for surveying the Earth. A comparative evaluation of the criteria for informativeness of Earth remote sensing data for high and ultra-high resolution images was carried out. The requirements for optoelectronic equipment (OEA) are determined according to the LRM criteria and the NIIRS level for various fields of application.

Keywords: remote sensing of the earth, optoelectronic equipment, linear resolution on the ground, national image interpretability scale, spatial resolution

Received on: 08.08.2022

Accepted on: 29.09.2022

INTRODUCTION

Earth remote sensing (ERS) is the process of collecting information about objects, territories or any phenomenon without direct contact with it.

In ERS from space, optoelectronic equipment (OEA) is used, which takes pictures of the underlying sur-

ВВЕДЕНИЕ

Классификация дистанционных методов зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса основана на типе источника сигнала для исследования объектов в активном или пассивном режиме.

В пассивном режиме ДЗЗ из космоса применяется оптико-электронная аппаратура (ОЭА), которая выполняет съемку подстилающей поверхности Земли, преобразование изображения в цифровой код, сжатие данных, формирование целевой информации (ЦИ), запоминание, хранение и выдачу ЦИ в высокоскоростную радиолинию (ВРЛ) космического аппарата (КА) для передачи на наземные пункты приема для последующей первичной и тематической обработки данных.

Основными техническими характеристиками ОЭА, определяющими сферу ее применения, являются следующие параметры (рис. 1):

- геометрическое пространственное разрешение (проекция пиксела на Землю) (GSD), м;
- ширина полосы захвата (съемки) (S), м;
- отношение сигнал / шум (SNR);
- функция передачи модуляции (ФПМ);
- спектральный диапазон, мкм;
- точность географической привязки.

Пространственное разрешение $GSD_{(x,y)}$ (м):

$$GSD_{(x,y)} = \frac{a \cdot H}{F \cdot \cos \theta},$$

где F – фокусное расстояние объектива, м; H – высота орбиты (м); a – ширина пикселя (м); θ – угол визирования (град.). Ширина полосы съемки: $S = N \cdot x$, (км), где N – количество пикселей в строке ПЗС-матрицы или ПЗС-линейке; x – ширина пикселя на Земле (м).

Совокупность значений данных параметров определяют критерий ОЭА по возможной сфере применения данных ДЗЗ. Одними из таких критериев являются линейное разрешение на местности (ЛРМ) (термин применяется в странах СНГ), уровень The National Imagery Interpretability Rating Scale (NIIRS) Национальная шкала оценки интерпретируемости изображений (термин применяется в зарубежных странах) и критерии Джонсона, которые используется повсеместно во всех сферах: и фото, и видеосъемки. Эти параметры характеризуют возможность различать «мелкие» детали на полученных снимках.

ЛРМ – усредненная величина полупериода произвольно ориентированной трехшпальной квадратной миры, каждая шпала которой при известных значениях альbedo фона, контраста миры, угла визирования обнаруживается наблюдате-

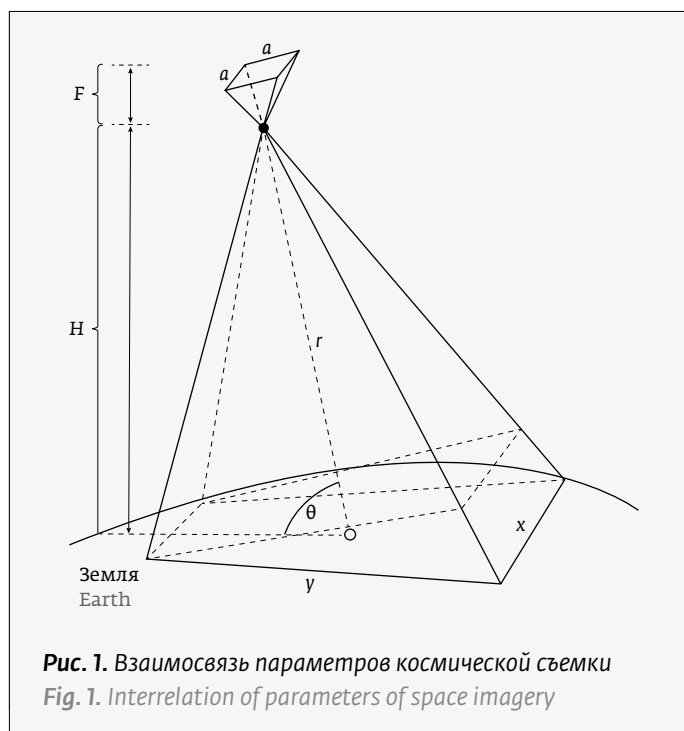


Рис. 1. Взаимосвязь параметров космической съемки
Fig. 1. Interrelation of parameters of space imagery

face of the Earth, converts the image into a digital code, and via a space-borne radio link (SRL) of a spacecraft (SC) transmits it to ground receiving stations for subsequent primary and thematic data processing.

The main technical characteristics of the OEA, that determine the scope of its application, are the following parameters (Fig. 1):

- geometric spatial resolution (projection of a pixel onto the Earth) (GSD), m,
- capture (survey) strip width (S), m,
- signal to noise ratio (SNR),
- modulation transfer function (MTF),
- spectral range, microns,
- georeferencing accuracy.

Spatial resolution $GSD_{(x,y)}$ (m):

$$GSD_{(x,y)} = \frac{a \cdot H}{F \cdot \cos \theta},$$

where F – the focal length of the lens, (m); H – the height of the orbit (m); a – pixel width (m); θ – viewing angle (degrees). Estimated survey strip width: $S = N \cdot x$, (km), where N – the number of pixels in a row of a CCD array or a CCD array; ϵ – the pixel width on Earth (m).

The totality of the values of these parameters determines the OEA criterion for the possible scope of remote sensing data application. Some of these criteria are linear resolution on the ground (LRM) (the term is used in the CIS countries), The National Imagery Interpretability Rating Scale (NIIRS) level according



лем на получаемом изображении с вероятностью не менее заданной [1].

NIIRS используется аналитиками изображений для присвоения числа, которое указывает на интерпретируемость данного изображения. Концепция NIIRS позволяет напрямую связать качество изображения с задачами интерпретации, для которых оно может быть использовано. Сама шкала интерпретируемости обеспечивает системный подход к измерению качества цифровых изображений и прямо зависит от пространственного разрешения ОЭА (GSD), которое описывается в дюймах для расчетов [2].

Критерии Джонсона позволяют выделить несколько уровней восприятия на основе достаточных психофизиологических экспериментальных исследований, не прибегая к сложным математическим выражениям, описывающим процесс восприятия и интерпретации изображения. Выделено несколько уровней восприятия: обнаружение (I), определение ориентации (II), различение (III), идентификация (IV). В качестве параметра, характеризующего уровень восприятия при работе с системой видения, используют разрешение штриховых мир, эквивалентных объекту. При этом сам объект характеризуется неким минимальным размером [3].

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Искомое ЛРМ в продольном и поперечном направлениях вычисляют по формуле [1]:

$$LRM_{(x,y)} = \frac{H}{2 \cdot v_{пред(x,y)} \cdot F \cdot \cos\theta},$$

где $v_{пред}$ – предельно разрешаемая пространственная частота элемента прямоугольной штриховой миры, при наблюдении изображения которой воспринимаемое оператором эффективное (визуальное) отношение сигнал-шум на ее отдельном штрихе будет составлять пороговое значение, обеспечивающее требуемую вероятность его распознавания по принятому критерию дешифрируемости (m^{-1}).

Сама же $v_{пред}$ находится путем решения сквозного частотно-энергетического уравнения [4], куда входят такие параметры, как системная функция передачи модуляции ($\Phi PM_{сист}$), SDNR – отношение сигнал/шум для Ламбертовских поверхностей с коэффициентами отражения 7% и 15% и пороговая частотно-энергетическая характеристика ($\Phi_{пор}$), характеризующаяся рассматриваемым тест-объектом:

$$\frac{4}{\pi} SDNR \cdot \Phi PM_{сист}(v) = \Phi_{пор}(v).$$

to the National Imagery Interpretability Rating Scale (the term is used in foreign countries) and the Johnson Criteria, which are used everywhere in all areas in photo and video filming. These parameters characterize the ability to distinguish “small” details in the obtained images.

LRM – the average value of the half-period of an arbitrarily oriented square 3-bar test target, each bar of which, with known values of the background albedo, target contrast, viewing angle, is detected by the observer in the resulting image with a probability not less than specified [1].

NIIRS is used by image analysts to assign a number that indicates the interpretability of a given image. The NIIRS concept makes it possible to directly relate image quality to the interpretation tasks for which it can be used. The interpretability scale itself provides a systematic approach to measuring the quality of digital images and directly depends on the spatial resolution of the OEA (GSD), which is described in inches for calculations [2,3].

The Johnson criteria make it possible to single out several levels of perception on the basis of sufficient psychophysiological experimental studies, without resorting to complex mathematical expressions that describe the process of image perception and interpretation. Several levels of perception are distinguished, depending on the number of allowed pairs of lines embedded in the target under consideration: detection (I – $1 \pm 0,25$); orientation determination (II – $1,4 \pm 0,35$); distinction (III – $1,4 \pm 0,35$); recognition (IV – $4 \pm 0,8$); identification (V – $6,4 \pm 1,5$). These values of embedded pairs of lines are resolved with a 50% probability of perception and at the same time the object itself is characterized by a certain minimum size [4].

DESCRIPTION OF THE MATHEMATICAL MODEL

The desired LRM in the longitudinal and transverse directions is calculated by the formula [1]:

$$LRM_{(x,y)} = \frac{H}{2 \cdot v_{limit(x,y)} \cdot F \cdot \cos\theta},$$

where v_{limit} – the maximum-resolved spatial frequency of an element of a rectangular bar test target, when observing the image of which, the effective (visual) signal-to-noise ratio perceived by the operator on its individual bar will constitute a threshold value that provides the required probability of its recognition according to the accepted interpretability criterion (m^{-1}).

The very same v_{limit} is found by solving the through frequency-energy equation [5], which includes such

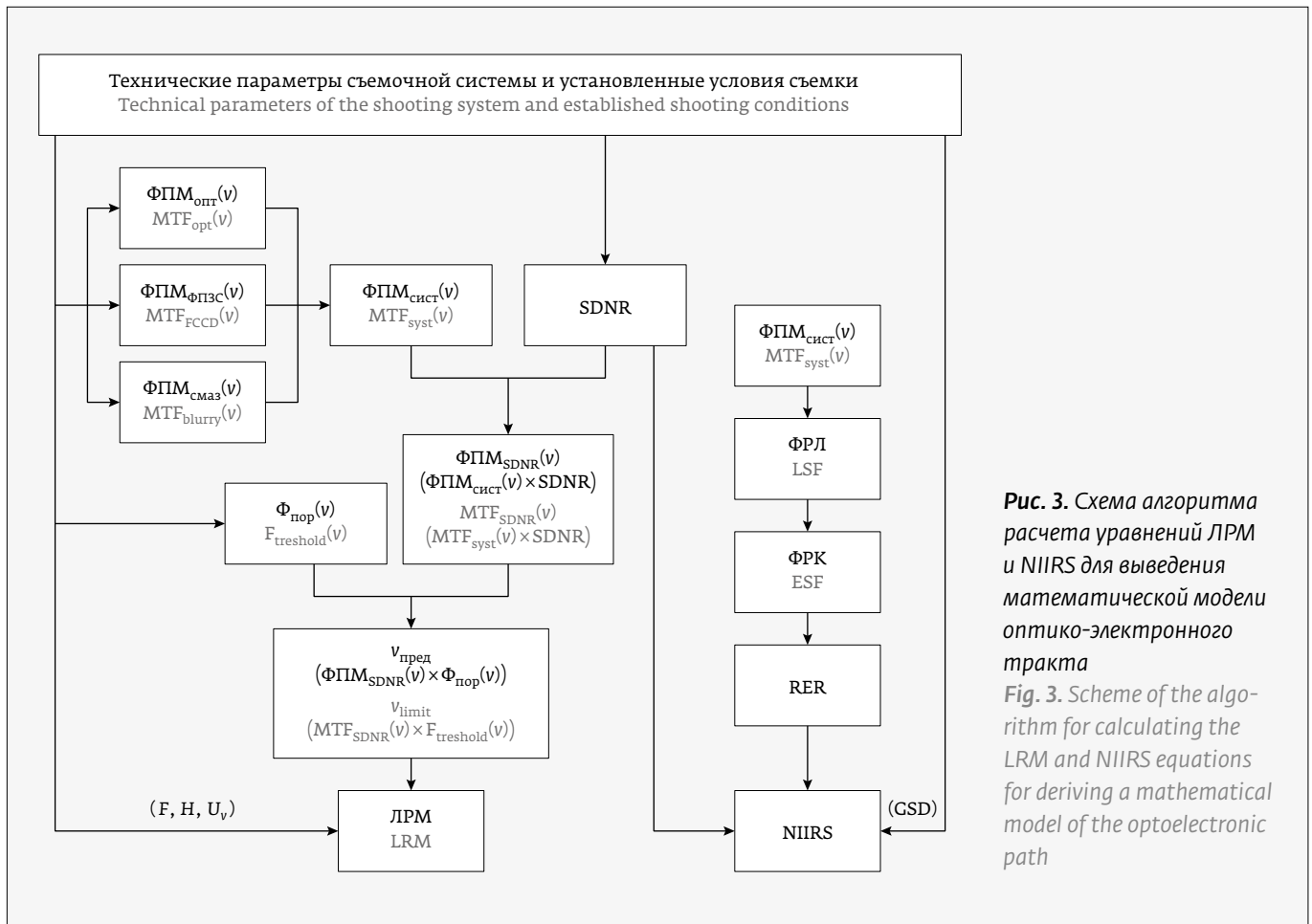
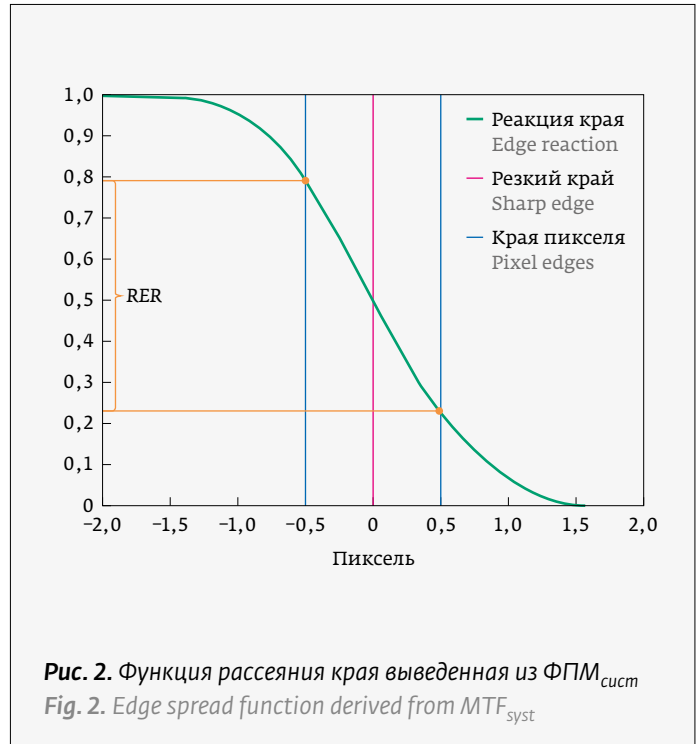


Для расчета и прогнозирования NIIRS применяется Общее уравнение качества снимков (GIQE) [5]:

$$NIIRS = c_0 + c_1 \cdot \log(GSD) + c_2 \cdot \log_{10}(RER) + c_3 \cdot \frac{G}{SDNR} + c_4 \cdot Hg,$$

где c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 – добавочные коэффициенты, значения которых приведены в справочных таблицах и зависят от того, какая версия уравнения NIIRS применяется для расчета и в каких единицах GSD [6]; RER – среднегеометрическое значение величины переходной функции изображения резкого края (ФПК) с учетом ФПМ_{сист} (рис. 2); G – усиление шума, вызванное фильтрацией изображения; Hg – превышение высоты резкого края, вызванное фильтрацией изображения (в [2, 5, 6] термин пишется как H).

В последующих расчетах и исследовании параметры Hg и G не будут учитываться, так как фильтрация изображений не применяется (Hg = 0, G = 1).



В расчетном программном пакете Mathcad реализован алгоритм расчета критериев ЛРМ и уровня NIIRS (рис. 3). Были приняты три основных передающих звена системы, такие как оптическое звено (объектив), звено приемника излучения (ПЗС или ФПЗС) и звено искажения изображения (звено «смаза»).

Для расчета ЛРМ необходимо решить уже рассмотренное сквозное частотно-энергетическое уравнение для нахождения $v_{\text{пред}}$. ФПМ_{сист} рассчитывается как произведение ФПМ основных передающих звеньев системы [7]:

$$\text{ФПМ}_{\text{сист}}(v) = \prod_{i=1}^n \text{ФПМ}_i(v).$$

Для оптического звена (ФПМ_{опт}) рассчитываем безабберационную функцию рассеяния точки (ФРТ), а после – через взятие интеграла по пределам интегрирования краевых значений ФРТ – выводим функция рассеяния линии (ФРЛ). Выведенную ФРЛ преобразуем в оптическую передаточную функцию (ОПФ) через дискретное преобразование Фурье (ДПФ), а после, взяв по ОПФ модуль, получаем ФПМ_{опт} [8].

Для ФПЗС (ФПМ_{ФПЗС}) необходимо вывести ФПМ его ограничивающих элементов: ФПМ геометрии активной части, ФПМ эффективности переноса носителей заряда и ФПМ диффузии носителей в подложке [9]. Каждая ФПМ выводится отдельно, и после берется их общее произведение.

Для звена «смаза» (ФПМ_{смаз}) существует уже выведенное формульное выражение [10]:

$$\text{ФПМ}_{\text{смаз}}(v) = \left| \text{sinc}(\pi \cdot v \cdot b) \right|,$$

где b – величина смещения изображения, в нашем случае $b = a$ (м).

Отношение сигнал/шум (SDNR) рассчитываем по выведенной математической модели, имитирующей среду распространения излучения от Солнца до приемника излучения [11] при пассивном режиме ДЗЗ. Пороговую частотно-энергетическую характеристику ($\Phi_{\text{пор}}$) выбираем для квадратной трехшпальной штриховой миры [4]. После выведения всех неизвестных порогового частотно-энергетического уравнения рассчитываем и выводим $n_{\text{пред}}$, а после и само значение ЛРМ по уже известной формуле.

Для NIIRS необходимо рассчитать такие параметры, как GSD и RER (SDNR уже рассчитано). GSD рассчитывается по известной нам формуле и техническим параметрам системы съемки, а RER нам необходимо вывести из ФРК передающей системы.

parameters as the system modulation transfer function (MTF_{sys}), SDNR – signal-to-noise ratio for Lambertian surfaces with reflection coefficients of 7% and 15% and the threshold frequency-energy characteristic ($F_{\text{threshold}}$), characterized by the test object under consideration:

$$\frac{4}{\pi} \text{SDNR} \cdot \text{MTF}_{\text{sys}}(v) = F_{\text{threshold}}(v).$$

To calculate and predict NIIRS, the General Image Quality Equation (GIQE) [6] is used:

$$\text{NIIRS} = c_0 + c_1 \cdot \log_{10}(\text{GSD}) + c_2 \cdot \log_{10}(\text{RER}) + c_3 \cdot \frac{G}{\text{SDNR}} + c_4 \cdot Hg,$$

where c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 – are additional coefficients, the values of which are given in the reference tables and depend on version of the NIIRS equation used for the calculation, and selected GSD units [7]; RER – the geometric mean value of the transition function of the sharp edge image (FRF) taking into account the MTF_{sys} (Fig. 2); G – the noise gain caused by image filtering; Hg – the excess height of the sharp edge caused by image filtering (written H in [2, 3, 6, 7]).

In subsequent calculations and research, the Hg and G parameters will not be taken into account, since image filtering is not applied ($Hg = 0, G = 1$).

The calculation software package Mathcad implements an algorithm for calculating LRM criteria and NIIRS levels (Fig.3).

Four main transmission links of the system were adopted, such as the radiation transmission link (atmosphere), optical link (objective), the radiation receiver link (CCD or FCCD), and the image distortion link (“blur”). To calculate the LRM, it is necessary to solve the already considered through frequency-energy equation to find v_{limit} . MTF_{sys} is calculated as the product of the MTF of the main transmission links of the system [8]:

$$\text{MTF}_{\text{sys}}(v) = \prod_{i=1}^n \text{MTF}_i(v).$$

To determine the MTF of the atmospheric link (MTF_{Atm}), we use the following equation [9]:

$$\text{MTF}_{\text{Atm}}(v) = e^{-\Lambda\tau + \frac{\Lambda\tau}{\sqrt{(2\pi zv)^2 + 1}}}.$$

where $\Lambda\tau = \frac{\sigma(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}$ – is the probability of photon survival,

$\tau = \varepsilon(\lambda)z$ – s the optical thickness of the medium layer; z – is the path length, (m); $\sigma(\lambda)$ – is the scattering index; $\varepsilon(\lambda)$ – is the attenuation index.



Для выведения ФРК нам необходимо знать цельное значение ОПФ системы (его действительную и мнимую части) для применения обратного ДПФ (получение ФРЛ), и после – для взятия производной (получение ФРК). Но так как у нас имеется только его действительная часть ($\Phi\text{ПМ}_{\text{сист}}$), то данный алгоритм является не осуществимым для данного расчета.

Было принято решение для восстановления мнимой части ОПФ использовать имитацию $\Phi\text{ПМ}_{\text{сист}}$ при помощи функции распределения Гаусса ($\Phi\text{РТ}_{\text{Гаусса}}$):

$$\Phi\text{РТ}_{\text{Гаусса}}(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – среднее квадратичное отклонение (в нашем случае – весовой коэффициент). Так как $\Phi\text{ПМ}_{\text{сист}}$ может иметь сложную форму, используется два или три распределения Гаусса и их последующее нормирование. Используется такой же алгоритм выведения ФПМ, как для оптического звена системы. Путем подбора коэффициентов σ добиваемся сходимости графиков $\Phi\text{ПМ}_{\text{Гаусса}}$ и $\Phi\text{ПМ}_{\text{сист}}$, и после из выведенной ФРЛ_{Гаусса}, беря производную и нормируя, получаем ФРК_{сист}.

После выведения ФРК_{сист} рассчитываем RER и уже по известным значениям GSD, SDNR, RER и рассмотренной ранее формуле рассчитываем предсказываемый уровень NIIRS.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения расчетов исследуемых критериев информативности была принята ОЭА высокого (GSD=1-10 м) и сверхвысокого (GSD=менее 1 м) разрешения с высотой орбиты съемки 500 км, размером пиксела 7,4 мкм и следующими условиями съемки:

- съемка в надири;
- высота Солнца над местным горизонтом – не менее 30 град;
- коэффициент пропускания атмосферы – не менее 0,85 (интегральный) или метеорологическая дальность виденья (МДВ) не хуже – 20 км;
- минимальный коэффициент отражения подстилающей поверхности 0,07;
- максимальный коэффициент отражения тест – объекта 0,15;
- альbedo фона 0,07;
- вероятность обнаружения не менее 0,8.

Проведены исследования по моделированию и расчету вышеуказанных критериев информативности в соответствии со снимками разного пространственного разрешения [12] и варьируемыми

For the optical link (MTF_{opt}), we calculate the aberration-free point spread function (PSF), and then, by taking the integral over the limits of integration of the edge values of the PSF, we derive the line spread function (LSF). We transform the derived LSF into an optical transfer function (OTF) through the discrete Fourier transform (DFT), and then, taking the modulus from the OTF, we obtain the MTF_{opt} [10].

For the FCCD (MTF_{FCCD}), it is necessary to derive the MTF of its limiting elements: the MTF of the geometry of the active part, the MTF of the efficiency of charge carrier transfer, and the MTF of diffusion of carriers in the substrate [11]. Each MTF is derived separately and then their total product is taken:

For the “blur” link (MTF_{blur}), there is already a derived formula expression [12]:

$$\text{MTF}_{\text{blur}}(v) = \left| \text{sinc}(\pi \cdot v \cdot b) \right|,$$

where b – the image displacement value, in our case $b = a(m)$.

The signal-to-noise ratio (SDNR) is calculated using the derived mathematical model that simulates the medium of radiation propagation from the Sun to the radiation receiver [13] in the passive mode ERS. The threshold frequency-energy characteristic ($F_{\text{threshold}}$) is chosen for a square 3-bar test target [5]. After deriving all the unknowns of the threshold frequency-energy equation, we calculate and derive v_{limit} , and then the value of the LRM itself after the already known formula.

For NIIRS, parameters such as GSD and RER need to be calculated (SDNR has already been calculated). GSD is calculated according to the formula known to us and the technical parameters of the survey system, and we need to derive RER from the edge spread function (ESF) of the transmitting system.

To derive the ESF, we need to know the integral value of the OTF of the system (its real and imaginary parts), to apply the inverse DFT (obtaining the LDF), and after taking the derivative (obtaining the ESP). But, since we have only its real part (MTF_{sys}), then this algorithm is not feasible for this calculation.

It was decided to simulate MTF_{sys} using a Gaussian distribution function ($\text{PSF}_{\text{Gauss}}$) to recover the imaginary part of the OTF:

$$\text{PSF}_{\text{Gauss}}(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}},$$

where σ – the standard deviation (in our case, the weighting factor).

Since MTF_{sys} can have a complex shape, two or three Gaussian distributions are used and their subsequent

техническими параметрами съемки, такими как фокусное расстояние объектива и относительное отверстие.

Численные расчеты значений ЛРМ (рис. 4) и уровней NIIRS (рис. 5) проводились при $F=400-70\,000$ мм и $F/D=10-16$. На графике (см. рис. 4) можно наблюдать постепенное стремление значений ЛРМ и значений GSD к величине близкое к нулю, что может говорить о характере экспоненциального распределения. При величине фокусного расстояния объектива равном 20 м все значения ЛРМ и значения GSD практически сливаются в одну линию.

При уменьшении диафрагменных чисел графики зависимостей ЛРМ будут менять свою форму и значения ЛРМ будут увеличивать свое значение, что говорит об ухудшении качества получаемого изображения.

Общее соотношение рассчитанных GSD и ЛРМ варьируется в диапазоне от 1,1 до 1,4, что соответствует величине соотношения тех же параметров для спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения, работающих на данный момент.

Расчетные значения ЛРМ имеют свои особенности применения:

- для спутников высокого и сверхвысокого разрешения приемлемыми являются значения F в диапазоне от 4 до 20 м;
- спутниковые системы ДЗЗ с F больше 20 м на данный момент уже не используются, так как рабочие размеры активных элементов ФПЗ и ПЗС линеек и матриц имеют малые размеры, что компенсируют значения общего увеличения и улучшают значения GSD;
- спутниковые системы ДЗЗ с F меньше 4 м применяются, в частности, для метеорологии и панорамной съемки.

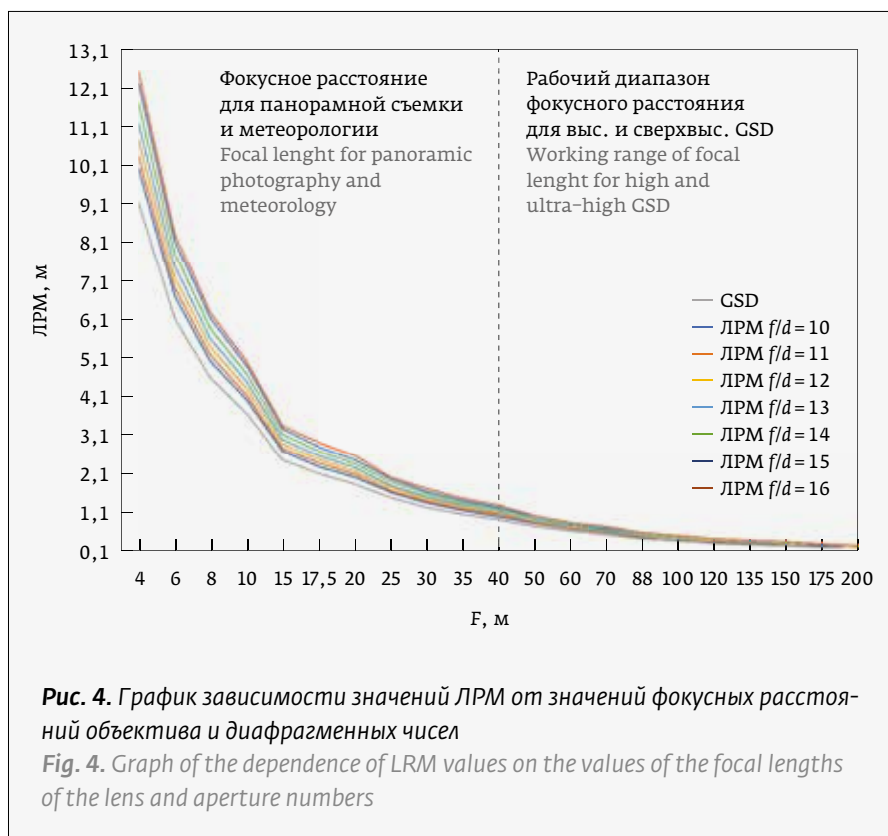


Рис. 4. График зависимости значений ЛРМ от значений фокусных расстояний объектива и диафрагменных чисел

Fig. 4. Graph of the dependence of LRM values on the values of the focal lengths of the lens and aperture numbers

normalization. The same MTF derivation algorithm is used as for the optical link of the system. By selecting the coefficients σ , we achieve the convergence of the PSF_{Gauss} and MTF_{syst} plots, and after taking the derivative from the derived FRL_{Gauss} and normalizing, we obtain ESP_{syst} .

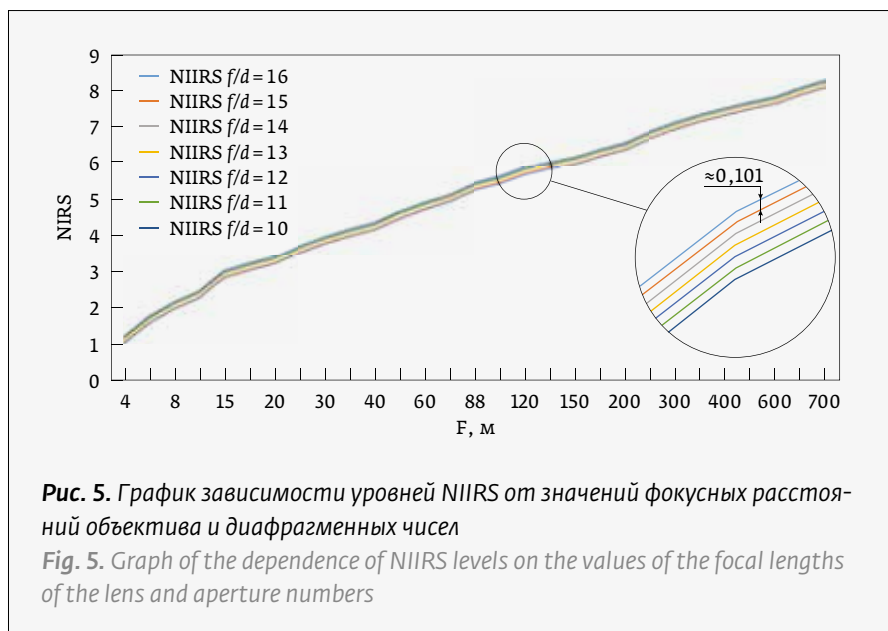


Рис. 5. График зависимости уровней NIIRS от значений фокусных расстояний объектива и диафрагменных чисел

Fig. 5. Graph of the dependence of NIIRS levels on the values of the focal lengths of the lens and aperture numbers

На графике (см. рис. 5) можно наблюдать постепенное увеличение уровней NIIRS при увеличении фокусного расстояния объектива, а сами графики NIIRS фактически имеет линейную зависимость NIIRS от F , что говорит о большом вкладе параметра GSD на выходное значение NIIRS уравнения GIQE.

При уменьшении значений диафрагменных чисел графики уровней NIIRS постепенно смещаются вниз на определенную величину без искажения своей формы. При выбранном диапазоне F/D данное смещение является статичным и составляет 0,101 уровня NIIRS. Само же смещение вниз по уровню NIIRS говорит об ухудшении качества формируемого изображения системой ДЗЗ.

Расчетные уровни NIIRS в соответствии с рассмотренными значениями ЛРМ по варьируемым фокусным расстояниям объектива имеют следующие первичные соответствия:

- для спутников ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения уровни NIIRS принимаются от 3 до 7;
- для спутников ДЗЗ с F больше 20 м уровни NIIRS принимается от 7 и выше;
- для спутников ДЗЗ по метеорологии и панорамной съемки уровни NIIRS принимаются от 4 и ниже.

Была проведено округление уровней NIIRS по официальному стандарту NATO [13] для систематизации рассчитанных величин ЛРМ и последующем объединении их в диапазоны значений (табл. 1).

По выведенным диапазонам значений ЛРМ и округленным уровням NIIRS можно рассчитать ошибку распознавания и вероятность обнаружения интересующего нас объекта. Ошибка распознавания характеризует различия в диапазонах значений ЛРМ при крайних величинах F/D и рассчитывается как:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \cdot 100,$$

где

$$\sigma_{\max} = \frac{(LRM_{16})_{\max}}{(GSD_{NIIRS})_{\max}} - \frac{(LRM_{10})_{\max}}{(GSD_{NIIRS})_{\max}},$$

$$\sigma_{\min} = \frac{(LRM_{16})_{\min}}{(GSD_{NIIRS})_{\min}} - \frac{(LRM_{10})_{\min}}{(GSD_{NIIRS})_{\min}}.$$

Вероятность обнаружения на прямую зависит от ошибки распознавания рассматриваемого объекта и рассчитывается как:

$$\eta = 100 - \sigma.$$

After removing ESP_{sys} , we calculate RER and, using the already known GSD, SDNR, RER and the formula considered earlier, we calculate the predicted level of NIIRS.

NUMERICAL STUDIES

To calculate the information content criteria under study, a high-resolution ($GSD=1-10$ m) and ultra-high ($GSD =$ less than 1 m) resolution EEA was adopted with a survey orbit height of 500 km, a pixel size of $7.4 \mu\text{m}$, and the following survey conditions:

- shooting in nadir;
- the height of the Sun above the local horizon - not less than 30 degrees;
- atmospheric transmittance - not less than 0.85 (integral) or meteorological optical range (MOR) not worse - 20 km;
- the minimum reflection coefficient of the underlying surface is 0.07;
- maximum reflection coefficient of target object - 0.15;
- background albedo 0.07;
- the probability of detection is not less than 0.8.

Studies have been carried out on modeling and calculating the above informative criteria in accordance with images of different spatial resolution [14] and varying technical parameters of the survey, such as the focal length of the lens and relative aperture.

Numerical calculations of LRM values (Figure 4) and NIIRS levels (Figure 5) were carried out at $F=400-70\,000$ mm, and $F/D=10-16$. On the graph (see Fig. 4), one can observe the gradual tendency of the LRM and GSD values in a smaller direction, which may indicate the nature of the exponential distribution. With a lens focal length of 20 m, all LRM and GSD values practically merge into one line.

With a decrease in f -numbers, the LRM dependence graphs will change their shape and the LRM values will increase their value, which indicates a deterioration in the quality of the resulting image. The total ratio of the calculated GSD and LRM varies in the range from 1.1 to 1.4, which corresponds to the ratio of the same parameters for high and ultra-high resolution remote sensing satellites currently operating.

The calculated values of LRM have their own application features:

- for high-resolution and ultra-high resolution satellites, F values in the range from 4 to 20 m are acceptable;
- satellite remote sensing systems with F greater than 20 m are no longer common at the moment, since the working dimensions of the active elements of the FCCD and CCD of the arrays and matrices are small, which compensates for the



Для округленных значений *NIIRS* вероятности обнаружения и ошибки распознавания расчетных значений представлены в табл. 2. Минимальная вероятность присвоена четвертому уровню *NIIRS* и равна 95,5%, что говорит о небольшом разбросе соответствующих диапазонов значений *LRM*. Для определения вероятностей обнаружения объектов при объединении уровней *NIIRS* в группу значений берется среднее значений из всех вероятностей, соответствующих уровням *NIIRS*, входящих в эту группу.

АНАЛИЗ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для последующего проведения исследования и выведения критериев соответствия *LRM* и *NIIRS* для практического использования было принято решение сопоставить критерии информативности по возможным сферам применения снимков ДЗЗ. Для этого каждой сфере деятельности присвоим диапазон минимальных размеров распознаваемых объектов (табл. 3). Также выведем соответствия критериев информативности *LRM* и *NIIRS* по выполнению соответствующих задач интерпретируемости (табл. 4) [12]. На основе полученных результатов (табл. 1-4) были определены требова-

Таблица 2. Вероятности обнаружения и ошибки распознавания объектов съемки

Table 2. Probabilities of detection and recognition errors of surveyed objects

NIIRS	$\sigma_{\min}, \%$	$\sigma_{\max}, \%$	$\sigma, \%$	$\eta, \%$
3	3,3	1,1	2,2	97,8
4	5,6	3,3	4,5	95,5
5	2,5	5,6	4,1	95,9
6	0	2,5	1,3	98,7
7	1,3	2,4	1,8	98,1
8	2	1,3	1,6	98,4

Таблица 1. Итоги округления уровней *NIIRS* и систематизации значений *LRM*
Table 1. Results of rounding *NIIRS* levels and systematization of *LRM* values

Сопоставление значений <i>LRM</i> и уровней <i>NIIRS</i> Comparison of <i>LRM</i> values and <i>NIIRS</i> levels					
<i>F/D</i> = 10		<i>F/D</i> = 13		<i>F/D</i> = 16	
<i>LRM</i> , м <i>LRM</i> , m	<i>NIIRS</i> <i>NIIRS</i>	<i>LRM</i> , м <i>LRM</i> , m	<i>NIIRS</i> <i>NIIRS</i>	<i>LRM</i> , м <i>LRM</i> , m	<i>NIIRS</i>
2,8–5,7	3	2,9–5,8	3	2,95–5,8	3
1,4–2,8	4	1,4–2,9	4	1,48–2,95	4
0,67–1,34	5	0,67–1,4	5	0,7–1,48	5
0,32–0,67	6	0,32–0,67	6	0,32–0,7	6
0,155–0,32	7	0,16–0,32	7	0,16–0,338	7
0,075–0,155	8	0,077–0,16	8	0,079–0,16	8

values of the total increase and improves the *GSD* values;

- satellite remote sensing systems with *F* less than 4 m are used, in particular, for meteorology and panoramic photography.

In the graph (see Fig. 5), one can observe a gradual increase in *NIIRS* levels with increasing lens focal length, and the *NIIRS* graphs themselves actually have a linear dependence of *NIIRS* on *F*, which indicates a large contribution of the *GSD* parameter to the *NIIRS* output value of the *GIQE* equation.

When the *f*-stop values decrease, the *NIIRS* level graphs gradually shift down by a certain amount

Таблица 3. Размеры распознаваемых объектов по сферам применения снимков ДЗЗ

Table 3. Dimensions of recognizable objects by areas of application of remote sensing images

Сфера применения снимков ДЗЗ Scope of remote sensing images	Диапазон размеров, м Size range, m
Военная сфера Military sphere	0,1–1
Гражданская сфера Civil sphere	1–1,5
Сельскохозяйственная сфера Agricultural sector	1,5–3
Сфера МЧС Scope of the Ministry of Emergency Situations	1,5–4

ния к ОЭА по критериям ЛРМ и уровню NIIRS для различных сфер применения (табл. 5).

Выведенная таблица соответствия позволяет связать критерии информативности, используемые в странах СНГ и за рубежом, с небольшим процентом отклонения по точности расчетов, а сам переход между ними осуществляется в соответствии с выбранным минимальным размером снимаемого объекта распознавания или при определении сферы применения снимков КА ДЗЗ.

На основе выведенных критериев соответствия и в зависимости от поставленных задач по применению ОЭА можно сформировать технический облик аппаратуры или техническое задание (ТЗ) для потенциального пользователя по следующему выведенному алгоритму (рис. 6).

Первоначально выбирается возможная сфера деятельности, для которой и будет разрабатываться будущая КА ДЗЗ. После выбора сферы применения снимков ДЗЗ выбираем первичные значение ЛРМ

Таблица 4. Соответствие уровней NIIRS к ЛРМ по задачам интерпретируемости

Table 4. Correspondence of NIIRS levels to LRM in terms of interpretability tasks

Видимый объект Visible object	Уровень NIIRS Level NIIRS	ЛРМ, м LRM, m
Идентификация по общему типу гусеничных машин, полевой артиллерии, группы транспортных средств Identification of group of vehicles	4	1,56–3,25
Обнаружение автомобиля на стоянке Parking lot detection	5	0,97–1,56
Различаемость моделей малых/средних вертолетов Distinguishability of models of small/medium helicopters	6	0,56–0,97
Идентификация железнодорожных путей Railroad Track Identification	7	0,28–0,56
Идентификация стеклоочистителей на транспортном средстве Identification of windshield wipers on a car	8	0,14–0,28

without distorting their shape. With the F/D range selected, this offset is static at 0.101 NIIRS levels. The very shift down in the NIIRS level indicates a deterioration in the quality of the image formed by the remote sensing system.

The calculated levels of NIIRS in accordance with the considered LRM values for variable focal lengths of the lens have the following primary correspondences:

- for remote sensing satellites of high and ultra-high resolution NIIRS levels are accepted from 3 to 7;
- for remote sensing satellites with F greater than 20 m, NIIRS levels are taken from 7 and above;
- for remote sensing satellites for meteorology and panoramic imaging, NIIRS levels are accepted from 4 and below.

The NIIRS levels were rounded according to the official NATO standard [15] to systematize the calculated LRM values and then combine them into ranges of values (Table 1).

Based on the derived ranges of LRM values and rounded NIIRS levels, we can calculate the recognition error and the probability of detecting an object of interest to us. The recognition error characterizes the differences in the ranges of LRM values at extreme F/D values and is calculated as:

$$\sigma = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \cdot 100,$$

where

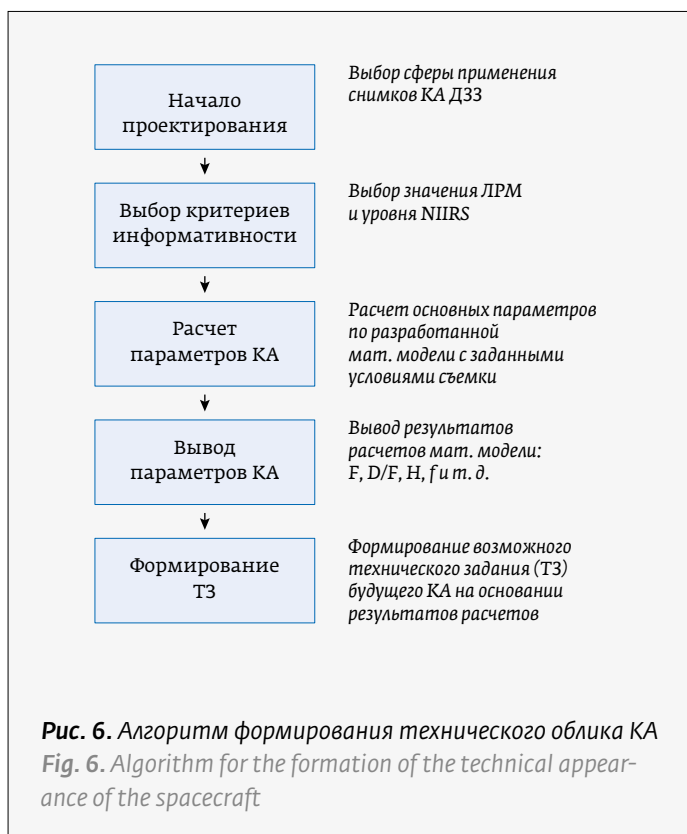
$$\sigma_{max} = \frac{(LRM_{16})_{max}}{(GSD_{NIIRS})_{max}} - \frac{(LRM_{10})_{max}}{(GSD_{NIIRS})_{max}},$$

$$\sigma_{min} = \frac{(LRM_{16})_{min}}{(GSD_{NIIRS})_{min}} - \frac{(LRM_{10})_{min}}{(GSD_{NIIRS})_{min}}.$$

The detection probability directly depends on the recognition error of the object in question and is calculated as:

$$\eta = 100 - \sigma.$$

For rounded NIIRS values, the detection probabilities and recognition errors of calculated values are presented in Table 2. The minimum probability is assigned to the fourth level of NIIRS and is equal to 95.5%, which indicates a small spread in the corresponding ranges of LRM values. To determine the probabilities of detecting objects when combining NIIRS levels into a group of values, the average of all probabilities corresponding to the NIIRS levels included in this group is taken.



и уровни NIIRS, по которым и будет проводиться расчет основных технических параметров съемки КА ДЗЗ по выведенной математической модели.

Само же формирование ТЗ или формирование возможного технического исполнения КА ДЗЗ осуществляется на основе расчетных технических параметров съемки, а именно: фокусного расстояния (F), относительного отверстия (D/F), рабочего размера пиксела ФПЗС или ПЗС (a), высоты зондирования (H) и других параметров съемки.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм и математическая модель для расчета и сравнительного анализа критериев ЛРМ и уровней NIIRS. Критерии ЛРМ более предпочтительно использовать при проектировании и расчете новой ОЭА ДЗЗ, а критерии NIIRS предпочтительней использовать для оценки качества снимков, получаемых с КА для ДЗЗ.

Для представленной математической модели проведены численные исследования и получены результаты, подтверждающие ее работоспособность.

Определены критерии соответствия между ЛРМ и NIIRS по возможным сферам применения спутников ДЗЗ. Вероятность обнаружения объектов по сферам применения составляет: военная

Таблица 5. Сферы применения

Table 5. Applications

Сфера применения Scope of application	ЛРМ, м LRM, m	Уровень NIIRS Level NIIRS	η , %
Военное дело Warfare	0,08–0,7	6, 7, 8	98,4
Гражданский сектор Civil sector	0,7–1,4	5	95,9
Сельское хозяйство Agriculture	1,56–2,9	4	95,5
МЧС Ministry of Emergency Situations	1,56–5,7	4,3	96,7

ANALYSIS AND COMPARISON OF THE OBTAINED RESULTS

For subsequent research and development of LRM and NIIRS compliance criteria for practical use, it was decided to compare the information content criteria for possible areas of application of remote sensing images. To do this, we assign a range of minimum sizes of recognizable objects to each area of activity (Table 3).

Also, we derive the correspondence between the LRM and NIIRS informativity criteria for the implementation of the corresponding interpretability tasks (Table 4) [14]. Based on the results obtained (Tables 1–4), the requirements for OEA were determined according to the LRM criteria and the level of NIIRS for various applications (Table 5).

The resulting correspondence table makes it possible to link the informativeness criteria used in the CIS countries and abroad with a small percentage of deviation in the accuracy of calculations, and the transition between them is carried out in accordance with the selected minimum size of the recognition object being filmed or when determining the scope of ERS images.

Based on the derived compliance criteria and depending on the tasks set for the use of OEA, it is possible to form the technical appearance of the equipment or the technical specifications (TS) for a potential user according to the following derived algorithm (Fig. 6).

Initially, a possible field of activity is selected, for which the future remote sensing satellite will be developed. After choosing the scope of remote sensing images, we select the primary LRM value and NIIRS levels, which will be used to calculate the main tech-

сферы – 98,4%, гражданская сфера – 95,9%, сфера С/Х – 95,5%, МЧС – 96,7%.

Предложен алгоритм расчета параметров оптической системы для формирования ТЗ при проектировании новых КА.

REFERENCES

1. GOST R 59475-78 «Earth remote sensing data from space. The quality of Earth remote sensing data from space. List of indicators of the quality of Earth remote sensing data from space received from optical-electronic observation spacecraft in the visible and near infrared range.
2. Irvine J. M. *National Imagery Interpretability Rating Scale (NIIRS): Overview and Methodology*. SPIE. Nov 2011; 3128:14 1.
3. Leachtenauer J. C., Malila W., Irvine J. M., Colburn L., Salvaggio N. General Image-Quality Equation: GIQE. *Applied Optics*. 1997; 36: 8322–8328.
4. John Johnson. *Analysis of Imaging Systems. Image Intengfier Symposium*. 1958; AD 220160: 244–273. (Warfare Electric Engineering Department. US Army Research and Development Laboratories, Ft. Belvoir, W., 1958).
5. Sikorsky D. A. A method for estimating the threshold frequency-energy characteristic of an optical-electronic path. *Electronic journal «researched in Russia»*. 2003; 6:1355–1368.
6. Garma Rey Jan D. *Image Quality Modeling and Characterization of Nyquist Sampled Framing Systems with Operational Considerations for Remote Sensing*. 2015. Thesis. Rochester Institute of Technology. Accessed from.
7. Karasik V. E., Orlov V. M. *Laser vision systems*. – M.: Bauman MSTU. 2001. 352 p.
8. Ryzhikov M. B. *Image formation and processing in laser vision systems: textbook*. Stipend. – St. Petersburg: GUAP, 2013. 210 p.
9. Domnenko V. M., Bursov M. V. *Simulation of optical imaging*. – St. Petersburg: ITMO. 2005. 128 p.
10. Bychkov A. N. On the influence of the frequency-contrast characteristics of the lens and the spectral composition of the radiation source on the resolution of the television sensor. *News of higher educational institutions. Instrumentation*. 2008;51(5): 52–55.
11. Ezhova K. V. *Modeling and image processing*. – St. Petersburg: ITMO. 2011. 93 p.
12. Fiete D. R., Tantaló T. Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems. *Opt. Eng.* 2001;40 (4): 574–585.
13. URL: http://www.fas.org/irp/imint/niirs_c/guide.htm, accessed March 12. 2003. Civil NIIRS Reference Guide (1996). *Imagery Resolution Assessment and Reporting Standards Committee (IRARS Committee)*
14. STANAG 7194 – NATO IMAGERY INTERPRETABILITY RATING SCALE (NIIRS) / Published by NATO on March 4.2009.

nical parameters of remote sensing satellite imagery using the derived mathematical model.

Drawing up the technical specifications (TS) or the formation of a possible technical design of the remote sensing spacecraft is carried out on the basis of the calculated technical parameters of the survey, namely: focal length (F), relative aperture (D/F), working pixel size of the FCCD or CCD (a), orbit altitude (€) and other shooting parameters.

CONCLUSIONS

1. An algorithm and a mathematical model have been developed for the calculation and comparative analysis of LRM criteria and NIIRS levels. It is more preferable to use the LRM criteria when designing and calculating a new EEA remote sensing, and it is preferable to use the NIIRS criteria to assess the quality of images obtained from a spacecraft for remote sensing.
2. For the presented mathematical model, numerical studies were carried out and results were obtained confirming its performance.
3. Criteria of correspondence between LRM and NIIRS on possible spheres of application of remote sensing satellites are determined. The probability of detecting objects by areas of application is: the military sphere – 98.4%, the civil sphere – 95.9%, the sphere of agriculture – 95.5%, the Ministry of Emergency Situations – 96.7%.
4. An algorithm for calculating the parameters of the optical system for the formation of technical specifications in the design of new spacecraft is proposed.

Диагностика и компоненты

- Фотоприемники с усилителем, лавинные, балансные
- Изоляторы Фарадея 400-1250 нм, до 60 дБ, до 15 мм
- Селекторы импульсов на 250-2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- Электроника ФАПЧ для синхронизации
- Спектрометры 190-3450 нм



Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 200-9000 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030-1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 20 ТВт

