

ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ СИСТЕМАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

В. Ф. ЗЕМСКОВ¹, В. А. ЗАИЧКО², Ю. В. ЗАЙЧЕНКО³

¹ ООО „Центр инновационных технологий“, 119121, Москва, Россия
E-mail: zvf1157@mail.ru

² Государственная корпорация по космической деятельности „Роскосмос“,
129110, Москва, Россия
E-mail: oroi@roscosmos.ru

³ „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“,
141091, Московская область, г. Королев, Россия
E-mail: zaychenko@niiks.com

Для оценки достоверности материалов космических изображений необходимо проводить специальные исследования измерительных и изобразительных свойств снимков, полученных съемочными системами космических аппаратов в различных диапазонах электромагнитного спектра. Необходимость геометрической обработки исходных („сырых“) материалов космической съемки для получения высокоточной продукции обусловлена влиянием искажений, которые возникают в процессе формирования изображений под воздействием различных факторов. Рассмотрены особенности оценивания геометрической точности материалов космической съемки. Приводится математическое описание основ методики оценки координатно-измерительных характеристик изображений, получаемых целевой аппаратурой космических систем дистанционного зондирования Земли. Рассматриваются проблемы, возникающие при оценке геометрической точности изображений, ограничения и особенности выбранной для реализации методики. Предлагаются пути преодоления проблем оценки координатно-измерительных характеристик. Описывается метод определения достаточности выборки тестовых объектов. Приводятся рекомендации и требования к выбору опорных точек. Указываются дальнейшие пути развития технологии оценки координатно-измерительных характеристик.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, оценка качества изображений, электромагнитный спектр, координатно-измерительные характеристики, опорные точки, статистические методы

В настоящее время потребителей космических изображений — снимков поверхности Земли, полученных целевой аппаратурой (ЦА) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в различных диапазонах электромагнитного спектра, — не удовлетворяют простые изображения объектов земной поверхности. Космические снимки должны обеспечивать возможность достоверного выявления топологических признаков и детального исследования свойств интересующих объектов, давать точную информацию об их спектральных характеристиках, служить высокоточной измерительной основой для проведения топогеодезических работ и разработки геоинформационных систем различного назначения. Поэтому в мировой отрасли космического ДЗЗ сформировались и устойчиво реализуются подходы, связанные с обеспечением материалов наблюдения необходимыми сертификационными документами по основным параметрам их качества. В этой связи весьма актуально придание отечественным космическим комплексам ДЗЗ статуса измерительных систем с объективным подтверждением точности получаемых результатов [1].

Важная роль в общей системе получения требуемой информации по материалам ДЗЗ принадлежит процессам объективного контроля и оценки характеристик качества исходных космических снимков и производной продукции, так как от них зависит эффективность использования данных ДЗЗ. По результатам таких оценок вырабатываются рекомендации по дальнейшему применению материалов космической съемки.

Основы научно-методического подхода к оценке качества космических снимков, получаемых ЦА космических аппаратов ДЗЗ, их пространственно-частотных, спектрорадиометрических и координатно-измерительных характеристик, на основе измерений, выполненных по изображениям, содержащим специальные тест-объекты, рассмотрены в работе [2].

В качестве тест-объектов для измерения линейного разрешения на местности изображений, полученных в видимом и ближнем ИК-диапазонах, могут быть использованы линейно-протяженные элементы и изображения резких краев.

В радиолокационном диапазоне для этих целей могут использоваться изображения точечных объектов. При определении радиометрических характеристик изображений, полученных в видимом и ближнем ИК-диапазонах, могут применяться изображения площадок с равномерной яркостью. Для определения геометрической точности во всех диапазонах спектра могут использоваться изображения контрольных точек с известными координатами.

В настоящей статье рассматривается проблематика выбора опорных точек для оценки координатно-измерительных характеристик (КИХ).

При картографировании основная часть затрат приходится на определение координат опорных точек. Стоимость привязки космического снимка зависит от количества необходимых опорных точек с известными геодезическими координатами. В настоящее время для их определения применяются спутниковые навигационные системы. В качестве опорных точек на космическом снимке могут быть выбраны как естественные (углы малоэтажных зданий, элементы дорожной разметки, основания деревьев), так и специально созданные объекты. Видимое (запланированное) положение опорной точки на снимке отличается от истинного из-за геометрических искажений снимка.

Научно-методическая база оценки координатно-измерительных характеристик космических снимков обеспечивает определение следующих показателей качества:

а) среднеквадратическое отклонение (СКО) геодезической привязки изображения — определяет точность координат для всего космического снимка в системе координат выбранной географической проекции;

б) СКО внутренних расстояний — определяет степень искажения снимка по набору опорных точек;

в) систематическое смещение — смещение координат снимка относительно геодезической опоры, имеющее неслучайный характер;

г) эмпирически вычисленные вероятностные круговые ошибки 90 и 95 % (Circular Error, CE90 и CE95 соответственно) — это величина, которую с заданной вероятностью (90 или 95 %) не превзойдет отклонение характеризуемой оценки запланированного положения опорной точки на снимке от истинного. Иначе говоря, с заданной вероятностью точка окажется в круге радиусом CE, центр которого совпадает с истинным положением точки [3].

Космические снимки могут быть использованы для оценки координатно-измерительных характеристик, если разрешающая способность, спектральный диапазон, информативность сцены и сюжет позволяют оператору распознать опорную точку на снимке по абрису или описанию.

Теоретической основой методики определения КИХ являются общие статистические методы оценки случайных величин. Согласно этой методике, проверяемое изображение принимается как генеральная совокупность пикселей (дискретной ограниченной случайной величины) в пространстве географических координат [4, 5]. При оценивании случайной

величины формируется выборка соответствующих координат точек изображения, для которых в дальнейшем рассчитываются статистические показатели, такие как СКО, систематическая ошибка, СЕ90 и СЕ95.

На точность координатной привязки космических снимков влияет множество факторов, некоторые носят систематический характер, и их можно записать в виде функциональной зависимости, другие имеют стохастическую природу и могут быть представлены в виде случайной величины.

При оценке КИХ можно описать ошибку привязки как сумму систематической и случайной ошибок:

$$\Delta = \Delta_{\text{сист}} + \Delta_{\text{случ.}} \quad (1)$$

В связи с широким объемом возможных данных, по которым можно проводить контроль КИХ, было выдвинуто предположение о том, что систематическая ошибка измерений является постоянным вектором, а случайная ошибка описывается случайной величиной, распределенной по нормальному закону и плотностью вероятности [6]:

$$p(x_i) = \frac{1}{k\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i-m)^2}{2k^2}}, \quad x_i \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (2)$$

Величины $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ совместно независимы, коэффициент сдвига $m = 0$, масштабный коэффициент k зависит от применяемой проекции.

Систематическая ошибка оценивается по формуле:

$$\Delta_{\text{сист}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i, \quad (3)$$

где Δ_i — общая ошибка каждого измерения.

Для описания случайной части ошибки также необходимо выяснить дисперсию D ошибки:

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 p_i, \quad (4)$$

где M_x — математическое ожидание.

Дисперсия и математическое ожидание полностью описывают нормальное распределение, однако в практических целях традиционно используется среднеквадратическое отклонение G :

$$G = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}. \quad (5)$$

Точность оценки расстояния между объектами на космическом снимке зависит от точности географической привязки, поэтому для описания влияния ошибки привязки на ошибку измерения расстояний применяется СКО внутренних расстояний снимка:

$$G_d = \sqrt{\frac{2}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^n \Delta d_{ij}^2}, \quad (6)$$

где d_{ij} — расстояние между точками i и j .

По существу формула (6) выражает среднеквадратическую разность длин ребер двух полных графов на n точках.

Расчет указанных параметров зависит не только от истинных параметров ошибки, но и от выбора контрольных точек, на которых оценивается точность привязки. Очевидно, выбираемые точки должны обеспечивать наибольшую достоверность.

Опираясь на гипотезу (1) о свойствах ошибки географической привязки изображений, можно сделать вывод: математическое ожидание систематической составляющей ошибки примет истинное значение $\Delta_{\text{сист}}$, а математическое ожидание случайной составляющей $\Delta_{\text{случ}}$ будет равно нулю при бесконечном количестве измерений n :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} M(\Delta_{\text{случ}}) = 0 \text{ и } \lim_{n \rightarrow \infty} M(\Delta_{\text{сист}}) = \Delta_{\text{сист}}. \quad (7)$$

Таким образом, необходимо решить две задачи: определить достаточное количество измерений и их пространственное распределение. Первая в явном виде решается как задача определения размера выборки:

$$n = \left(\frac{Z\sigma}{e} \right)^2, \quad (8)$$

где Z — доверительный уровень стандартизированной нормально распределенной величины; σ — дисперсия генеральной совокупности, e — мера неточности выборочного исследования, показывающая, какой процент выборки заведомо неверен, т.е. вносит дополнительную ошибку в расчет стохастических параметров.

Сложность такого расчета состоит в том, что требуется заранее знать параметры нормального распределения, которым описывается ошибка привязки снимка (генеральной совокупности), что не представляется возможным. Для того чтобы обойти данную сложность, задачу можно поставить следующим образом: требуется определить число измерений, принадлежащих выборке, которые с вероятностью p позволят достоверно вычислить ошибку привязки, и вероятность ошибки выборки не будет превышать e .

Преобразованная задача записывается как:

$$n = \left(\frac{Z\sqrt{p(1-p)}}{e} \right)^2, \quad (9)$$

где Z определяется как интервал, в который входит заданный процент Q значений случайной величины (рис. 1):

$$Q = \int_{-Z}^Z p(x)d(x). \quad (10)$$

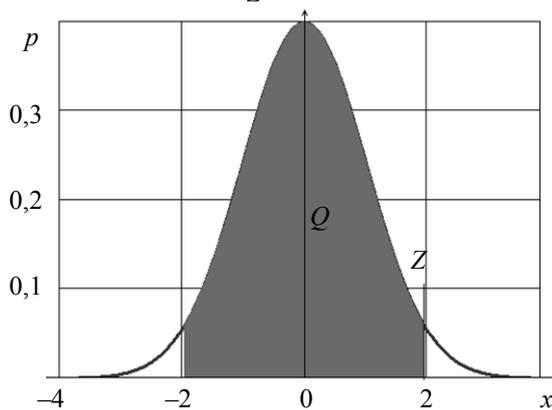


Рис. 1

На рис. 2—4 приведена зависимость количества измерений от доверительного уровня Z и вероятности достоверного расчета ошибки p при различной величине неточности измерения e (рис. 2 — $e = 0,05$; 3 — $0,1$; 4 — $0,15$). Можно заметить, что при увеличении требования к достоверности исследования Z значение n квадратично возрастает, а при увеличении меры неточности выборочного исследования e — снижается без потери точности расчета быстрее, чем при увеличении Z . Представленные графики позволяют сделать вывод о характере поведения функции (9), что дает возможность интуитивно оценить необходимое количество

измерений при проведении исследований по выборке. Таким образом, при переходе от 80 %-го к 90 %-му доверительному интервалу наблюдается рост количества измерений примерно в два раза, такое же изменение наблюдается при переходе от 90 %-го к 95 %-му доверительному интервалу. Аналогично, в области $e=5—15\%$ наблюдается уменьшение числа необходимых измерений в среднем в три раза на каждые 5 %. Показанные изменения мало зависят от средней вероятности достоверного расчета.

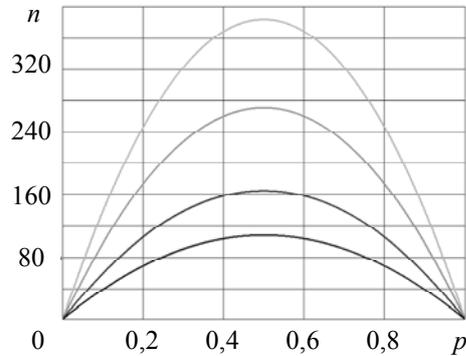
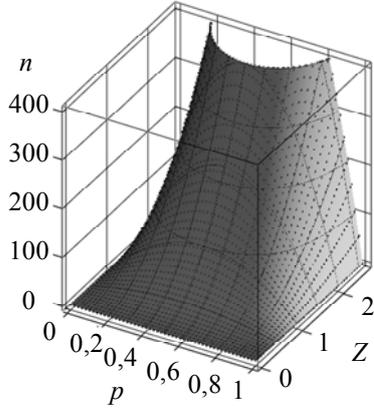


Рис. 2

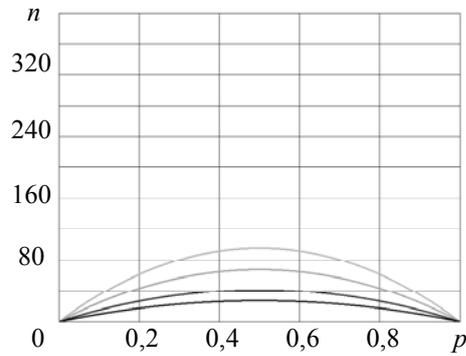
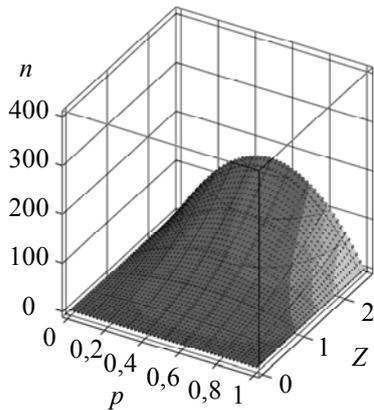


Рис. 3

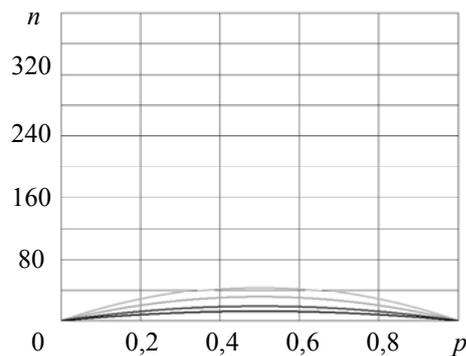
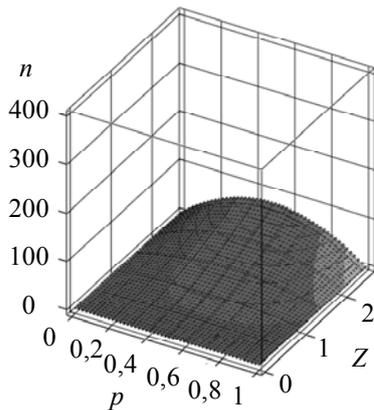


Рис. 4

Выражение (9) верно для бесконечной генеральной совокупности или для совокупности, которую можно считать близкой к бесконечности. Для малых совокупностей можно дополнить формулу, уменьшив число измерений, следующим образом:

$$n' = \frac{nN}{n + (N - 1)}, \tag{11}$$

где N — объем генеральной совокупности.

На практике такое преобразование позволяет уменьшить количество измерений, если разбить область снимка на группу областей, например, по километровой сетке.

Осложняет задачу выбора контрольных точек их пространственное расположение — существует множество плохо формализуемых случайных факторов, но исходя из природы оцениваемых материалов следует принять следующие критерии выбора контрольных точек:

- а) контрольные точки должны располагаться на наземных или неподвижных относительно суши объектах;
- б) покрытие контрольными точками должно быть равномерным;
- в) контрольные точки должны находиться на углах и в центре изображения;
- г) если одна из сторон изображения намного больше другой, область снимка необходимо разбить на области с отношением сторон, примерно равным единице, и поступать соответственно критерию (в).

Процесс анализа генеральной совокупности (пространства снимка) для материалов космической съемки имеет следующие особенности:

— распознавание объектов генеральных совокупностей эталонного и оцениваемого снимков зависит от условий съемки (разрешение, сезон съемки и др.), что изменяет объем и достоверность участков генеральной совокупности, пригодных для формирования выборки;

— при автоматизированном формировании выборки точек коррелятором может быть внесена систематическая ошибка, ее влияние необходимо исключать во время оценки точности географической привязки изображения, однако мера корреляции, возвращаемая для каждой точки, позволяет скорректировать объем выборки, таким образом, чтобы компенсировать влияние систематической ошибки, внесенной коррелятором;

— при формировании выборки точек географической привязки оператором может быть внесена дополнительная несистематическая ошибка, численно определить влияние которой на погрешность оценки КИХ возможно лишь экспертным путем, что снижает точность измерений, по сравнению с автоматизированным формированием выборки точек.

В статье рассмотрены пути преодоления проблем при оценке координатно-измерительных характеристик, описан подход к расчету необходимого размера выборки точек географической привязки для достижения заданной точности получаемых оценок, сформулированы требования к формированию набора опорных точек. Программный модуль оценки координатно-измерительных характеристик, разработанный как составная часть программного комплекса оценки качества космических снимков, функционирует под управлением программного комплекса Image Media Center.

Апробация программного модуля оценки координатно-измерительных характеристик проведена на снимках, полученных с российских и зарубежных космических аппаратов — носителей съемочной аппаратуры, таких как Ресурс-П, Канопус-В, Landsat-8, TerraSAR-X в рамках Программы Союзного государства „Мониторинг–СГ“.

В настоящее время продолжаются работы по созданию коррелятора, подключению и использованию внешних баз данных опорных точек, что позволит выполнять оценку КИХ в автоматизированном режиме. В дальнейшем планируется провести отработку программного модуля оценки координатно-измерительных характеристик на космических снимках, более разнообразных как по условиям съемки, так и по способам получения материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заичко В. А., Борисов К. В., Хайлов М. Н. Российская космическая система ДЗЗ из космоса: состояние, перспективы развития, пути решения проблемных вопросов // Матер. XII Всерос. открытой конф. „Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса“. М., ноябрь 2014 [Электронный ресурс]: <http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/presentation/2014/plenar/haylov-plenar.pdf>.
2. Земсков В. Ф. Совершенствование метода оценивания характеристик фотосистем и показателей качества изображений для решения прикладных задач космического фотографического наблюдения. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МО, 1989.

3. Титаров П. С. Характеристики точности СЕ и LE. М.: Ракурс, 2008 [Электронный ресурс]: <<http://www.racurs.ru/?page=169>>.
4. Русяева Е. А. Теория математической обработки геодезических измерений: Учеб. пос. Ч. I. Теория ошибок измерений. М.: МИИГАиК, 2016. 56 с.
5. Петухов Г. Б. Статистические методы обработки результатов измерений. Л.: МО СССР, 1984. 563 с.
6. Венцель Е. С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.

Сведения об авторах

- Владимир Федорович Земсков** — ООО „Центр инновационных технологий“; руководитель проектов; E-mail: zvf1157@mail.ru
- Валерий Александрович Заичко** — Госкорпорация „Роскосмос“; департамент навигационных космических систем (ГЛОНАСС); заместитель директора; E-mail: opoi@roscosmos.ru
- Юрий Викторович Зайченко** — „НИИ КС имени А. А. Максимова“ – филиал АО „ГКНПЦ им. М. В. Хруничева“; начальник отдела; E-mail: zaychenko@niiks.com

Поступила в редакцию
26.02.18 г.

Ссылка для цитирования: Земсков В. Ф., Заичко В. А., Зайченко Ю. В. Оценка геометрической точности космических снимков, получаемых системами дистанционного зондирования Земли в различных диапазонах электромагнитного спектра // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 7. С. 576—583.

ASSESSMENT OF GEOMETRIC ACCURACY OF SATELLITE IMAGES OBTAINED BY THE EARTH REMOTE SENSING SYSTEMS IN VARIOUS RANGES OF THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

V. F. Zemskov¹, V. A. Zaichko², Yu. V. Zaychenko³

¹ Center for Innovative Technologies Ltd, 119121, Moscow, Russia
E-mail: zvf1157@mail.ru

² State Space Corporation ROSCOSMOS, 129110, Moscow, Russia
E-mail: opoi@roscosmos.ru

³ A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Joint-stock company Khrunichev State Research and Production Space Center JSC, 141091, Moscow Region, Korolev, Russia
E-mail: zaychenko@niiks.com

To assess the reliability of space images, special studies should be made of the measurement and visual properties of images obtained by spacecraft surveying systems in various ranges of the electromagnetic spectrum. The need for geometric processing of raw space survey materials to produce high-precision products is due to the influence of distortions that arise during the formation of images under the influence of various factors. Features of estimation of geometrical accuracy of space survey materials are considered. A mathematical description of the fundamentals of the methodology used for estimating the coordinate-measuring characteristics of images obtained by the target equipment of space remote sensing systems of the Earth is given. Several problems arising in the estimation of geometrical accuracy of images, limitations and features of the methodology chosen for implementation are considered. Ways of overcoming the problems of estimating the coordinate-measuring characteristics are proposed. A method for determining sufficiency of a sample of test objects is described. Recommendations and requirements for reference points selection are given. The ways of further development of the technology of coordinate-measuring characteristics estimation are specified.

Keywords: remote sensing, image quality assessment, electromagnetic spectrum, coordinate-measuring characteristics, reference points, statistical methods

REFERENCES

1. Zaichko V.A., Borisov K.V., Hylov M.N. *Materials of the XII All-Russian Open Conference "Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space"*, Moscow, November 2014, http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/presentation/2014/plenar/haylov-plenar.pdf. (in Russ.)
2. Zemskov V.F. *Sovershenstvovanie metoda ocenivaniya kharakteristik fotosistem i pokazateley kachestva izbragreniy dlya resheniya prikladnyh zadach kosmicheskogo fotograficheskogo nabludeniya* (Improvement of the Method of the Photographic Systems Performance and the Image Quality

- Parameters Evaluation for Space Photographic Surveillance Applied Problems Solution), Candidate's thesis, Moscow, 1989. (in Russ.)
3. Titarov P.S. *Kharakteristiki tochnosti CE i LE* (Characteristic Accuracy CE and LE), Moscow, 2008, <http://www.racurs.ru/?page=169>. (in Russ.)
 4. Rusyaeva E.A. *Teoriya matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmereniy. Ch. 1. Teoriya oshibok izmereniy* (The Theory of Mathematical Processing of Geodetic Measurements. P. I. Measurements Error Theory), Moscow, 2016, 56 p. (in Russ.)
 5. Petukhov G.B. *Statisticheskie metody obrabotki rezultatov izmereniy* (Statistical Methods of Measurement Results Processing), Leningrad, 1984, 563 p. (in Russ.)
 6. Ventcel E.S. *Teoriya veroyatnostey* (Probability Theory), Moscow, 1999, 576 p. (in Russ.)

Data on authors

- Vladimir F. Zemskov** — Center for Innovative Technologies Ltd., Project Manager;
E-mail: zvf1157@mail.ru
- Valery A. Zaichko** — State Space Corporation ROSKOSMOS, Department of Navigation Space Systems (GLONASS); Deputy Director of the Department;
E-mail: opoi@roscosmos.ru
- Yury V. Zaychenko** — A. A. Maksimov Space Systems Research Institute – Branch of Khrunichev State Research and Production Space Center JSC; Head of Department; E-mail: zaychenko@niiks.com

For citation: Zemskov V. F., Zaichko V. A., Zaychenko Yu. V. Assessment of geometric accuracy of satellite images obtained by the Earth remote sensing systems in various ranges of the electromagnetic spectrum. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 7. P. 576—583 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-7-576-583