

Ф.Г. Агаев<sup>1</sup>, Х.Г. Асадов<sup>1</sup>, Э.А. Мамедова<sup>1</sup>, Ю.Г. Данилов<sup>2 1</sup><sup>1</sup> Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика<sup>2</sup> СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

## МЕТОД ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОДНОРОДНОСТИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

*Аннотация.* Пространственное разрешение обычно понимается как способность различить рядом стоящие пиксели на поверхности. Вместе с тем, если поверхность гомогенна, возможно потребуется дополнительный признак гомогенности для подтверждения факта равенства оценок пикселей.

В статье рассмотрена возможность формирования новой экстремальной спектральной сигнатуры, характеризующей степень температурной гомогенности поверхности земной поверхности на базе измерения поверхностной температуры спутниковыми средствами. Температурно-гомогенным участком принято называть те участки, в которых яркостная температура на верхней границе ( $TC$ ) атмосферы не зависит от излучательности. Вместе с тем, равенство  $TC(E) = C$ ;  $C = const$  возможно в двух случаях: (а) если  $E$  изменяется от  $E_{min}$  до  $E_{max}$ , однако,  $TC$  при этом не изменяется; (б) если  $E$  неизменяется и равно постоянной величине то  $TC$  также не изменяется. Предложен метод оценки температурной однородности исследуемой поверхности земли. Сформирован новый показатель температурной однородности исследуемых участков земной поверхности. С применением метода вариационной оптимизации показано, что если яркостная температура на верхней границе атмосферы постоянна в принятых пределах излучательности исследуемого участка, то предлагаемый показатель гомогенности достигает максимума при некотором принятом ограничительном условии. При условии соблюдения этого ограничения факт максимума принятого показателя может быть использован в качестве признака температурной однородности участка.

*Ключевые слова:* температурная однородность, тепловые потоки, подстилающая поверхность, верхняя граница атмосферы, дистанционное зондирование Земли, инфракрасный сенсор, Landsat, спектральная радиация, спектральная сигнатура, спектрорадиометр, эвапотранспирация.

*АГАЕВ* Фахраддин Гюльали оглы – д.т.н., проф., дир. института Космических исследований природных ресурсов. Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку. Азербайджанская Республика. E-mail: direktor.tekti@mail.ru

*АГАЕВ* Fakhrraddin Gyulali oglu – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Space Research of Natural Resources. National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: direktor.tekti@mail.ru

*АСАДОВ* Хикмет Гамид оглы – д.т.н., проф., нач. отд. НИИ Аэрокосмической информатики. Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку. Азербайджанская Республика. E-mail: asadzade@rambler.ru

*АСАДОВ* Hikmet Hamid oglu – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of a department, Research Institute of Aerospace Informatics. National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: asadzade@rambler.ru

*МАМЕДОВА* Эсьмира Амиль гызы – с.н.с. Института Космических исследований природных ресурсов. Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку. Азербайджанская Республика. E-mail: esimemmedova1985@mail.ru

*МАМЕДОВА* Esmira Amil gizi – Senior Researcher, Institute of Space Research of Natural Resources. National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: esimemmedova1985@mail.ru

*ДАНИЛОВ* Юрий Георгиевич – к.г.н., проф. Эколога-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова. E-mail: iug.danilov@s-vfu.ru

*ДАНИЛОВ* Yury Georgievich – Candidate of Geographical Sciences, Professor, Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University. E-mail: iug.danilov@s-vfu.ru

F.G. Agaev<sup>1</sup>, H.H. Asadov<sup>1</sup>, E.A. Mammadova<sup>1</sup>, Yu. G. Danilov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

<sup>2</sup>M.K Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

## METHOD FOR ESTIMATING THE DEGREE OF TEMPERATURE HOMOGENEITY OF THE UNDERLYING SURFACE FROM SATELLITE DATA

*Abstract.* Spatial resolution is usually understood as the ability to distinguish nearby pixels on a surface. At the same time, if the surface is homogeneous, an additional sign of homogeneity may be required to confirm the fact of equality of pixel estimates. The article considers the possibility of forming a new extreme spectral signature characterizing the degree of temperature homogeneity of the surface of the Earth's surface based on the measurement of surface temperature by satellite means. A temperature-homogeneous area is usually called those areas in which the brightness temperature at the upper boundary of the atmosphere does not depend on the emissivity, i.e. the TC(E) function is equal to a constant value. However, the equality  $TC(E)=C$ ;  $C=const$  is possible in two cases: (a) if E changes from  $E_{min}$  to  $E_{max}$ , however, TC does not change; (b) if E is unchanged and is equal to a constant value, then TC also does not change. A method for estimating the temperature homogeneity of the studied surface of the earth is proposed. A new indicator of the temperature uniformity of the studied areas of the Earth's surface has been formed. Using the variational optimization method, it is shown that if the brightness temperature at the upper boundary of the atmosphere is constant within the radiance of the studied area then the proposed new indicator reaches a maximum with the some accepted restriction. The fact of maximum of newly accepted indicator can be used as a sign of the temperature uniformity of the site.

*Keywords:* temperature uniformity, heat fluxes, underlying surface, upper boundary of the atmosphere, Earth remote sensing, infrared sensor, Landsat, spectral radiation, spectral signature, spectroradiometer, evapotranspiration.

### Введение

Исследованию степени температурной гомогенности земной поверхности посвящено значительное количество работ (см., например [1-6]). Тепловая радиация, измеренная сенсором преобразуется в температуру земной поверхности путем использования уравнения переноса оптической радиации. Температура земной поверхности (LST) является показателем состояния земной поверхности и характеризует перенос тепла между земной поверхностью и пограничным слоем атмосферы [1-3]. Этот показатель позволяет оценить ощутимые и латентные тепловые потоки, а также эвапотранспирацию [4-6]. LST является важным показателем для моделирования экосистемы на локальном, региональном и глобальном уровнях. Анализ и оценка LST осуществляется на локальном уровне, используя контактные методы, однако на региональном и глобальном уровнях оценка LST осуществляется методами дистанционного зондирования. В настоящее время функционируют несколько спутников вырабатывающих сведения о температуре поверхности Земли в разных регионах. Например, спектрорадиометры MODIS и SEVIRI, установленные на различных спутниках позволяли определить LST низким пространственным, однако высоким временным разрешением. LANDSAT8 запущенный в 2013-м году, имея термальный радиометрический канал позволил несколько повысить пространственное разрешение измерения LST. Пространственное разрешение обычно понимается как способность различить рядом стоящие пиксели на поверхности. Вместе с тем, если поверхность гомогенна, возможно потребуются дополнительный признак гомогенности для подтверждения факта равенства оценок пикселей.

В настоящей статье мы рассмотрим возможность формирования новой экстремальной спектральной сигнатуры, характеризующей степень температурной гомогенности поверхности земной поверхности на базе измерения поверхностной температуры спутниковыми средствами.

### Предлагаемый метод

Предлагаемый метод базируется на методологии проекта Landsat по измерению температуры поверхности Земли. Отметим, что температурные измерения по проекту LANDSAT начались со спутника LANDSAT4, на борту которого была установлена аппаратура TM (тематический картопостроитель). На спутнике LANDSAT7 была установлена аппаратура ETM+ (Усиленный тематический картопостроитель), а на спутнике LANDSAT8 – аппаратура TIRS (термальный инфракрасный сенсор) и аппаратура OLI (формирователь изображений Земли). Все спутники типа LANDSAT функционируют на гелиосинхронной и околополярной орбите с номинальной высотой 705 км, с орбитальным наклоном 98,2°, с периодом возврата 16 дней. Более подробная информация об этой серии спутников приведена в [7-9].

Кратце изложим метод измерения температуры поверхности Земли, применяемый в спутниковой аппаратуре LANDSAT. Для вычисления поверхностной температуры Земли (LST) используются данные NIR и RED уровня 1 и данные термального диапазона уровня 2 [10]. Для вычисления спектральной радиации ( $L\lambda$ ) на верхней поверхности атмосферы используется следующая формула [11]

$$L\lambda = (ML) \cdot (Q_{cal}) + AL \quad (1)$$

где:  $L\lambda$  – спектральная радиация на верхней поверхности атмосферы;  $ML$  – мультипликативный коэффициент канала, из числа метаданных канала;  $Q_{cal}$  – калиброванные значения пикселей;  $AL$  – аддитивные коэффициенты канала из числа метаданных канала.

Для преобразования  $L\lambda$  на яркостную температуру (TK) используется следующая формула [12].

$$TK = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

где:  $TK$  – яркостная температура (K) на верхней границе атмосферы;  $k_1, k_2$  – специфические постоянные канала.

Отметим, что учет излучательности при определении LST осуществляется по-разному. Например, согласно модели, применяемой в ERDAS IMAGIN, используется следующий порядок [13]:  
при:

$$NDVI < -0,185 \quad E = 0,995 \quad (3)$$

$$-0,185 \leq NDVI < 0,157 \quad E = 0,970 \quad (4)$$

$$0,157 \leq NDVI < 0,728 \quad E = 1,0094 + 0,0047 \cdot \ln NDVI \quad (5)$$

$$NDVI \geq 0,727 \quad E = 0,990 \quad (6)$$

Вместе с тем, согласно [14], в проекте LANDSAT излучательность ( $E$ ) определяется как

$$E = 0,004 \cdot PV + 0,986 \quad (7)$$

где:  $PV$  – Долевой коэффициент вегетации, определяемый как [15].

$$PV = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{1/2} \quad (8)$$

где:  $NDVI$  – нормализованный разностный вегетационный индекс [16];  $NDVI_{max}, NDVI_{min}$  – соответственно, максимальное и минимальное значения  $NDVI$ .

С учетом вышеизложенного, формула для вычисления LST имеет вид [11].

$$LST = \frac{TC}{1 + \frac{\lambda \cdot TC}{\rho} \cdot \ln E} \quad (9)$$

где:  $\lambda$  – длина волны излучаемой радиации;  $E$  – излучательность;

$$\rho = \frac{h \cdot c}{\sigma} \quad (10)$$

где:  $\sigma$  – постоянная Больцмана;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света.

С учетом вышеизложенного, далее в настоящей статье формируется новый показатель гомогенности оптических свойств отдельных участков земной поверхности.

Допустим, что имеем земельные участки в количестве  $n$ , где каждый  $i$ -й участок характеризуется излучательностью  $E_i$ . Температурно-гомогенным участком будем называть те участки, в которых яркостная температура  $TC$  на верхней границе атмосферы не зависит от излучательности, т. е. функция  $TC(E)$  равна постоянной величине. Вместе с тем, равенство

$$TC(E) = const \quad (11)$$

возможно в двух случаях:

1. Если  $E$  изменяется от  $E_{min}$  до  $E_{max}$ , однако,  $TC$  при этом не изменяется.
2. Если  $E$  не изменяется и равно постоянной величине.  $TC$  также не изменяется (или  $E$  изменяется незначительно, также  $TC$  меняется незначительно).

Здесь наиболее правдоподобным является второй вариант, т.к. по первому варианту изменение излучательности неизбежно приводит к изменению LST.

Сформируем обобщенный экстремальный показатель, характеризующий температурную гомогенность полей. Из выражения (9) имеем

$$LST^{-1} = \frac{1 + \frac{\lambda \cdot TC}{\rho} \cdot \ln E}{TC} \quad (12)$$

Проинтегрируем (10) в малом интервале  $E_{min} \div E_{max} = \Delta E$ . Перед интегрированием введем на рассмотрение следующую функцию

$$TC = f(E) \quad (13)$$

Интегрирование (12) в интервале  $E_{min} \div E_{max}$  дает

$$\kappa = \int_{E_{min}}^{E_{max}} LST^{-1} dE = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{1 + \frac{\lambda \cdot f(E)}{\rho} \cdot \ln E}{f(E)} dE \quad (14)$$

На функцию  $f(E)$  наложим следующее ограничение

$$\int_{E_{min}}^{E_{max}} f(E) dE = const \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) сформируем следующую вариационную задачу на экстремум типа неклассической задачи Лагранжа с целевым функционалом  $F(f(E))$ ,

$$\text{где } F(f(E)) = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{1 + \lambda \cdot f(E) \cdot \ln E}{f(E)} dE + \gamma \left[ \int_{E_{min}}^{E_{max}} f(E) dE - C \right] \quad (16)$$

где:  $\gamma$  – множитель Лагранжа.

Для исследования функционала  $F(f(E))$  на экстремум вычислим производную интегранта в (16) по  $f(E)$ , и приравним результат к нулю. Имеем:

$$\frac{\lambda \ln E \cdot f(E) - (1 + \lambda \cdot f(E) \cdot \ln E)}{f^2(E)} + \gamma = 0 \quad (17)$$

Из (17) получим:

$$\frac{1}{f^2(E)} = \gamma \quad (18)$$

Или

$$f(E) = \sqrt{\frac{1}{\gamma}} \quad (19)$$

Таким образом, при  $f(E) = const = c_2$  функционал (16), т.е. показатель  $\kappa = \int_{E_{min}}^{E_{max}} LST^{-1} dE$  достигает экстремума. Чтобы определить, является ли этот экстремум максимумом или минимумом, вычислим вторую производную интегранта в (14) по  $f(E)$ .

Имеем

$$\frac{d^2 \left\{ \frac{1 + \lambda \cdot f(E) \cdot \ln E}{f(E)} \right\}}{df(E)^2} = \frac{(\lambda \ln E - \lambda \ln E) f^2(E) - 2f(E)}{f^4(E)} \quad (20)$$

Как видно из (20) вторая производная всегда отрицательная величина, т.е. при решении (19)

$F(f(E)) = \kappa = \int_{E_{min}}^{E_{max}} LST^{-1} dE$  всегда достигает максимума.

Вычислим значение  $\gamma$  используя геометрическое представление, показанное на рис. 1.

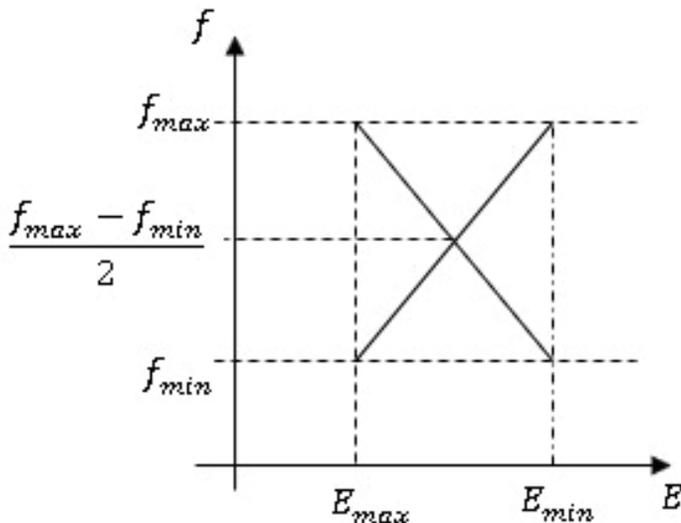


Рис. 1. Геометрическая интерпретация условия (15)

С учетом (15) и (19) получим

$$\int_{E_{min}}^{E_{max}} \sqrt{\frac{1}{\gamma}} dE = C, C=const \quad (21)$$

или

$$\sqrt{\frac{1}{\gamma}} (E_{max} - E_{min}) = C \quad (22)$$

Из (22) получаем

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{C^2}{(E_{max} - E_{min})^2} \quad (23)$$

Так как

$$C = \frac{(f_{max} - f_{min})(E_{max} - E_{min})}{2} \quad (24)$$

из (23) и (24) получим

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{(f_{max} - f_{min})^2}{4} \quad (25)$$

или

$$\sqrt{\frac{1}{\gamma}} = \frac{f_{max} - f_{min}}{2} \quad (26)$$

Таким образом, согласно (26) при изменении  $E$  в диапазоне  $(E_{max} - E_{min})$  величина  $f$  остается постоянной величиной, равной

$$f = \frac{f_{max} - f_{min}}{2} \quad (27)$$

и при таких условиях функционал (16) достигает максимума. Следовательно, предлагаемая сигнатура

$$\kappa = \int_{E_{min}}^{E_{max}} LST^{-1} dE \quad (28)$$

может быть использована в качестве показателя гомогенности участка по температуре, т. к. При  $TC = f(E) = \frac{f_{max} - f_{min}}{2}$ , показатель  $\kappa$  достигает максимума.

#### Заключение

Сформулирована и решена задача формирования нового показателя температурной гомогенности исследуемых участков земной поверхности. Показано, что если показатель  $TC$  (яркостная температура на верхней границе атмосферы) не изменяется в пределах эмиссивности участка

$(E_{min} - E_{max})$  и равна  $\frac{TC_{max} - TC_{min}}{2}$ , то предлагаемый показатель  $\kappa = \int_{E_{min}}^{E_{max}} LST^{-1} dE$

достигает максимума при ограничении  $\int_{E_{min}}^{E_{max}} TC(E) dE = C; C = const.$

Следовательно, при условии соблюдения этого ограничения факт  $\kappa \rightarrow max$  может быть использован в качестве признака температурной гомогенности участка.

Литература

1. Li Z.L., Tang B.H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives// *Remote Sens. Environ.* – 2013. – vol. 131. – P. 14-37.
2. Barsi J.A., Barker J.L., Schott J.R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument // In proceedings of the 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 03. Melbourne, Australia. 21 – 25 July 2003. – vol. 5. – P. 3014-3016.
3. Tang H., Li Z.L. Introduction // In quantitative remote sensing in thermal infrared. – Springer: Germany, 2014. – P. 1-4.
4. Li Z.L., Wu H., Wang N., Qiu S., Sobrino J.A., Wan Z., Tang B.H., Yan G. Land surface emissivity retrieval from satellite data // *Int. J. Remote Sens.* – 2013. – vol. 34. – P. 3084-3127.
5. Walker J.J., De Beurs K.M., Wynne R.H., Gao F. Evaluation of landsat and MODIS data fusion products for analysis of dryland forest phenology // *Remote Sens. Environ.* – 2012. – vol. 117. – P. 381-393.
6. Copertino V.A., Di Pietro M., Scavone G., Telesca V. Comparison of algorithms to retrieve land surface temperature from Landsat-7 ETM+IR data in the Basilicata Ionian band // *Tethys*. – 2012. – vol. 9. – P. 25-34.
7. US Geological Survey Landsat Missions. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-5?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-5?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con) (дата обращения: 12.09.2021).
8. US Geological Survey Landsat Missions. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con) (дата обращения: 12.09.2020).
9. US Geological Survey Landsat Missions. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con) (дата обращения: 12.09.2020).
10. Guillevic P., Göttsche F., Nickeson J., Hulley G., Ghent D., Yu Y., Trigo I., Hook S., Sobrino J.A., Remedios J., Roman M., Camacho F. Land surface temperature product validation best practice protocol version 1.1 // Good Practices for Satellite-Derived Land Product Validation. Land Product Validation Subgroup. – 2018. – vol. 58, DOI: 10.5067/doc/ceoswgcv/lpv/1st.001.
11. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data // *J. Sensors*. – vol. 2016. – 8 p., DOI:10.1155/2016/1480307.
12. US Geological Survey Using the USGS Landsat Level-1 data product. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product> (дата обращения: 25.07.2021).
13. Qin Z., Karnieli A., Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM data and its application to the Israel – Egypt border region // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – vol. 22(18). – P. 3719-3746.
14. Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // *Remote Sens. Environ.* – 1997. vol. 62. -P. 241-252, DOI:10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
15. Sobrino J.A., Jimenez-Munoz J.C., Paolinin L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5 // *Remote. Sens. Environ.* – 2004. – vol. 90. – P. 434-440, DOI:10.1016/j.rse.2004.02.003.
16. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Sestems in the Great Plains with ERTS // NASA: Washington, DC, 1974. – Pp. 309-317.

References

1. Li Z.L., Tang B.H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I.F., Sobrino J.A. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives// *Remote Sens. Environ.* – 2013. – vol. 131. – P. 14-37.
2. Barsi J.A., Barker J.L., Schott J.R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument // In proceedings of the 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 03. Melbourne, Australia. 21 – 25 July 2003. – vol. 5. – P. 3014-3016.

3. Tang H., Li Z.L. Introduction // In quantitative remote sensing in thermal infrared. – Springer: Germany, 2014. – P. 1-4.
4. Li Z.L., Wu H., Wang N., Qiu S., Sobrino J.A., Wan Z., Tang B.H., Yan G. Land surface emissivity retrieval from satellite data // *Int. J. Remote Sens.* – 2013. – vol. 34. – P. 3084-3127.
5. Walker J.J., De Beurs K.M., Wynne R.H., Gao F. Evaluation of landsat and MODIS data fusion products for analysis of dryland forest phenology // *Remote Sens. Environ.* – 2012. – vol. 117. – P. 381-393.
6. Copertino V.A., Di Pietro M., Scavone G., Telesca V. Comparison of algorithms to retrieve land surface temperature from Landsat-7 ETM+IR data in the Basilicata Ionian band // *Tethys.* – 2012. – vol. 9. – P. 25-34.
7. US Geological Survey Landsat Missions. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-5?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-5?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con) (data obrashhenija: 12.09.2021).
8. US Geological Survey Landsat Missions. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con) (data obrashhenija: 12.09.2020).
9. US Geological Survey Landsat Missions. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con) (data obrashhenija: 12.09.2020).
10. Guillevic P., Göttsche F., Nickeson J., Hulley G., Ghent D., Yu Y., Trigo I., Hook S., Sobrino J.A., Remedios J., Roman M., Camacho F. Land surface temperature product validation best practice protocol version 1.1 // *Good Practices for Satellite-Derived Land Product Validation. Land Product Validation Subgroup.* – 2018. – vol. 58, DOI: 10.5067/doc/ceoswgc/lpv/lst.001.
11. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data // *J. Sensors.* – vol. 2016. – 8 p., DOI:10.1155/2016/1480307.
12. US Geological Survey Using the USGS Landsat Level-1 data product. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product> (data obrashhenija: 25.07.2021).
13. Qin Z., Karnieli A., Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM data and its application to the Israel – Egypt border region // *International Journal of Remote Sensing.* – 2010. – vol. 22(18). – P. 3719-3746.
14. Carlson T.N., Ripley D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index // *Remote Sens. Environ.* – 1997. vol. 62. -P. 241-252, DOI:10.1016/S0034-4257(97)00104-1.
15. Sobrino J.A., Jimenez-Munoz J.C., Paolinin L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5 // *Remote. Sens. Environ.* – 2004. – vol. 90. – P. 434-440, DOI:10.1016/j.rse.2004.02.003.
16. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Sestems in the Great Plains with ERTS // *NASA: Washington, DC, 1974.* – Pp. 309-317.