

УДК 528.8; 629.78
DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-1-40-46

ТОЧНОСТЬ СПУТНИКОВОЙ ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ

ACCURACY OF SATELLITE ESTIMATION OF SURFACE TEMPERATURE OF HETEROGENEOUS URBANIZED AREAS



Э. А. Мамедова, Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, г. Баку
esimemmedova1985@mail.ru

E. Mammadova, Institute of Space Research of Natural Resources of the National Aerospace Agency, Baku

Температура в городских зонах всегда выше, чем в сельской местности, «городские тепловые островки» заметно влияют на городской климат, что ставит нашу тему в разряд острых экологических проблем. Автор рассматривает возможность точной спутниковой оценки температуры поверхности гетерогенных урбанизированных участков. *Объектом исследования* являются поверхности урбанизированных участков. *Предметом исследования* является спутниковая оценка температуры «городских тепловых островков». Цель исследования: научно обосновать вероятность точной спутниковой оценки температуры поверхности гетерогенных урбанизированных участков. Реализация цели предполагает решение ряда задач, основными из них являются: – выявить зависимость глубины проводимой коррекции влияния изменчивости излучательности на измеренную величину степени и характера изменения излучательности от длины волны; – рассмотреть излучательные свойства нового и старого асфальтового покрытия. Методология исследования: применялся экологический подход, структурно-функциональный подход. Цель исследования и задачи определили необходимость использования следующих методов: анализ, синтез, индукция, дедукция, сравнение, объяснение. Сформулирована и решена задача повышения точности дистанционного зондирования тепловых островков, появляющихся в урбанизированных территориях путем учета спектральной зависимости показателя излучательности объектов, находящихся на поверхности земляного покрытия от длины волны. Определено, что оптимальной является обратная зависимость коэффициента излучательности от длины волны. Рассмотрены излучательные свойства нового и старого асфальтового покрытия, на основании проведенного анализа сделан вывод о важности учета температуры такого покрытия. Определено, что если, согласно семейству кривых Планка, асфальтовое покрытие при соответствующей температуре излучает в диапазоне 9...11 мкм максимум энергии, то требование к проводимой коррекции может ослабеть и погрешность из-за неучета влияния спектральной изменчивости излучательности может уменьшиться

Ключевые слова: погрешность измерения, тепловой островок, излучательность, оптимизация, функционал, урбанизированные участки, дистанционное зондирование, асфальтовое покрытие, городской климат, радиация атмосферы

Temperatures in urban areas are always higher than in rural areas, “urban heat islands” noticeably affect the urban climate, which puts the theme under discussion in the category of acute environmental problems. The author suggests a possibility of accurate satellite-based estimation of surface temperature of heterogeneous urbanized areas. *The object of the study* is surfaces of urbanized areas. *The subject of the study* is satellite temperature estimation of “urban heat islands”. *The aim of the study* is to scientifically substantiate the probability of an accurate satellite assessment of surface temperature of heterogeneous urbanized areas. The realization of the aim involves solving a number of tasks, the main ones of which are: – to reveal the dependence of the depth of the carried out correction of the emissivity variability influence on the measured value of the degree and character of emissivity change from the wavelength; – to consider the emissivity properties of new and old asphalt pavement. The research methodology is presented by the ecological approach and structural-functional approach. The aim

of the study and its objectives has determined the need to use the following methods: analysis, synthesis, induction, deduction, comparison, explanation.

The task of increasing the accuracy of remote sensing of heat islands appearing in urbanized areas by taking into account the emissivity index spectral dependence of objects on the surface of the ground cover on the wavelength has been formulated and solved. It is determined that the optimum is the inverse dependence of the emissivity coefficient on wavelength. Emission properties of new and old asphalt pavement have been considered, and on the basis of the analysis the author has made a conclusion about the importance of taking into account the temperature of such a pavement. It has been found that if, according to the Planck curve family, asphalt pavement emits at an appropriate temperature in the 9...11 μm range at the maximum energy, the requirement for the correction may weaken, and, consequently, the error due to the failure to consider the influence of spectral variability in emissivity may diminish

Key words: measurement error, heat island, emissivity, optimization, functional, urbanized areas, remote sensing, asphalt pavement, urban climate, atmospheric radiation

Введение. Хорошо известно, что “городские тепловые острова” (urban heat island) значительно влияют на городской климат, т. к. температура в городских зонах оказывается выше, чем в сельской местности [2; 7; 8].

Объектом исследования являются поверхности урбанизированных участков.

Предметом исследования является спутниковая оценка температуры «городских тепловых островков».

Цель исследования: научно обосновать вероятность точной спутниковой оценки температуры поверхности гетерогенных урбанизированных участков. Реализация цели предполагает решение ряда *задач*, основными из них являются:

– выявить зависимость глубины проводимой коррекции влияния изменчивости излучательности на измеренную величину степени и характера изменения излучательности от длины волны;

– рассмотреть излучательные свойства нового и старого асфальтового покрытия.

Методология исследования: применялся экологический подход, структурно-функциональный подход. Цель исследования и задачи определили необходимость использования следующих методов: анализ, синтез, индукция, дедукция, сравнение, объяснение.

Различные объекты, имеющиеся на исследуемой поверхности, по-разному излучают электромагнитную энергию. Для их обнаружения используются термальные сенсоры, или ИК радиометры, работающие в диапазоне волн 8...12 мкм. Спутниковые ИК радиометры измеряют радиацию, достигающую верхней границы атмосферы: (а) радиацию, поступающую из Земли; (б) нисходящую радиацию атмосферы; (с) отраженную с по-

верхности Земли радиацию атмосферы. При преобразовании измеренной величины указанной радиации в температуру поверхности Земли учитываются такие факторы, как ослабление радиации в атмосфере; влияние углов обзора; спектральная излучательность объектов на поверхности Земли [4]. Согласно [3], трудности определения поверхностной температуры с помощью спутниковых радиометров заключаются в следующем: (а) в пределах одного пикселя поверхность исследуемого объекта обычно негомогенна; (б) разница между температурами поверхности и воздуха на суше намного выше, чем на море; (с) излучательность объектов на земной поверхности зависит от длины волны. Как отмечается в работе [3], основными источниками появления погрешности в определении температуры поверхности с помощью спутниковых радиометров являются: 1) неточная калибровка бортовых радиометров; 2) неточная оценка коэффициента спектрального поглощения атмосферы; 3) отсутствие знаний о спектральной излучательности исследуемой поверхности.

Как отмечается в работе [10], разница в температурах городской и сельской местности, или так называемая интенсивность эффекта теплового островка, в дневное время больше, чем в ночное, в летнее время достигает 3 $^{\circ}\text{C}$, зимой 0,5 $^{\circ}\text{C}$.

Указанная интенсивность является функцией размеров городов и при увеличении размера города вдвое растет на 0,4 $^{\circ}\text{C}$ (рис. 1а). При этом интенсивность “теплового островка” также растет с увеличением фрактальной размерности, так что более компактные города имеют более высокую интенсивность (рис. 1б).

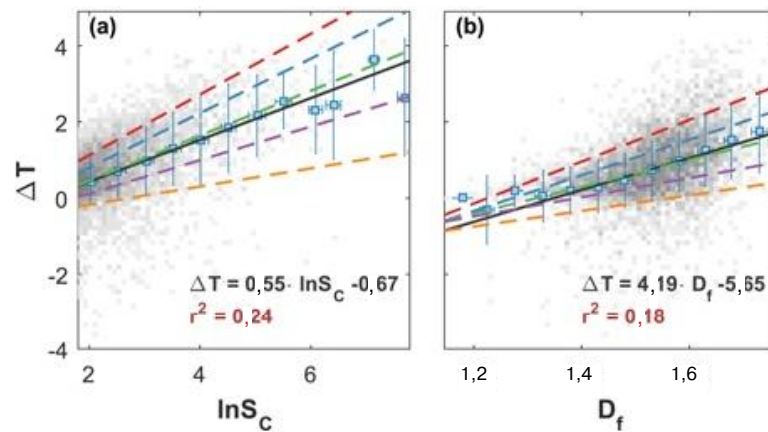


Рис. 1. График зависимости интенсивности теплового островка от размера города (S) и фрактального размера (D) [6] / Fig. 1. Graph of the dependence of the heat island intensity on the size of the city (S) and the fractal size (D) [6]

При значениях квантиля 0,1 и 0,9 получены следующие значения наклонов: (a) 0,24 и 0,8 (b) 2,05 и 5,50 [6]. Излучательность поверхности объектов зависит от содержания воды; химического состава, структуры и шероховатости поверхности. Излучательность зависит от длины волны [9] и именуется спектральной излучательностью. В случае отсутствия данных об излучательности возможно появления погрешности в измерении температуры от 0,2 до 1,2 К в летнее время и от 0,8 до 1,4 К в зимнее время [9]. Рассмотрим существующую методику учета излучательности при определении интенсивности “теплового островка” в урбанизированных зонах.

Согласно [7], в первую очередь осуществляется преобразование DN чисел LANDSAFT ETM+ TIR в спектральную радиацию по формуле

$$L_{\lambda} = 0,0370588 \cdot DN + 3,2. \quad (1)$$

Далее спектральная радиация превращается в яркостную температуру при спутнике по формуле

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}, \quad (2)$$

где T_B – эффективная температура при спутнике, К;

L_{λ} – спектральная радиация, Вт/м² стер. мкм;

K_2 и K_1 – являются предполетными калибрационными постоянными.

Для Landsat – 7 ETM+, $K_1 = 138,371\text{К}$, $K_2 = 666,09 \text{ мВт см}^{-2} \text{ стер.}^{-1} \text{ мкм}^{-1}$.

Далее осуществляется коррекция температуры с учетом влияния излучательности

$$S_T = \frac{T_B}{1 + (\lambda \cdot T_B / \rho) \cdot \ln \varepsilon}, \quad (3)$$

где λ – длина волны излучаемой радиации;

$$\rho = h \cdot \frac{c}{\sigma};$$

σ – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

c – скорость света; ($2,998 \cdot 10^8$ м/с).

Рассмотрим зависимость глубины проводимой коррекции влияния изменчивости излучательности на измеренную величину степени и характера изменения излучательности от длины волны. Для решения данного вопроса предлагаем следующий метод.

Введем на рассмотрение новый показатель, именуемый далее как *глубина коррекции влияния изменчивости излучательности*, определяемый как

$$\chi = \frac{S_t}{T_B}. \quad (4)$$

Из выражения (3) получаем

$$S_t + \frac{S_t \cdot \lambda \cdot T_B \cdot \ln \varepsilon}{\rho} = T_B. \quad (5)$$

Из (5) находим

$$T_B \left(1 - \frac{S_t \cdot \lambda \cdot \ln \varepsilon}{\rho}\right) = S_t. \quad (6)$$

Из (6) окончательно имеем

$$\chi = 1 - \frac{S_t \cdot \lambda \cdot \ln \varepsilon}{\rho}. \quad (7)$$

Так как нас интересует зависимость χ от типа и характера функции $\varepsilon(\lambda)$, то имеет смысл исследовать интегральный показатель

$$\chi_{\text{инт}} = \int_{\lambda_{\text{max}}}^{\lambda_{\text{max}}} \chi d\lambda, \tag{8}$$

или

$$\chi_{\text{инт}} = \int_{\lambda_{\text{max}}}^{\lambda_{\text{max}}} \left[1 - \frac{S_{\tau} \cdot \lambda \cdot \ln \varepsilon(\lambda)}{\rho} \right] d\lambda. \tag{9}$$

Что касается характера и типа волновой зависимости $\varepsilon(\lambda)$, то, согласно информации, приведенной в [6], эта зависимость различна для разных материалов (рис. 2) [6].

С учетом такой разнотипности волновой зависимости функции $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$ можно сфор-

мулировать следующую оптимизационную задачу выбора оптимального типа функции $\varepsilon(\lambda)$, при котором $\chi_{\text{инт}}$ достиг бы максимальной величины, т. е. потребовалась бы вне-сение минимальной коррекции по излу-чательности. Для решения указанной задачи оптимизации примем следующее ограни-чительное условие применительно к функ-ции $\varepsilon(\lambda)$:

$$\int_{\lambda_{\text{max}}}^{\lambda_{\text{max}}} \varepsilon(\lambda) d\lambda = C; C = \text{const}. \tag{10}$$

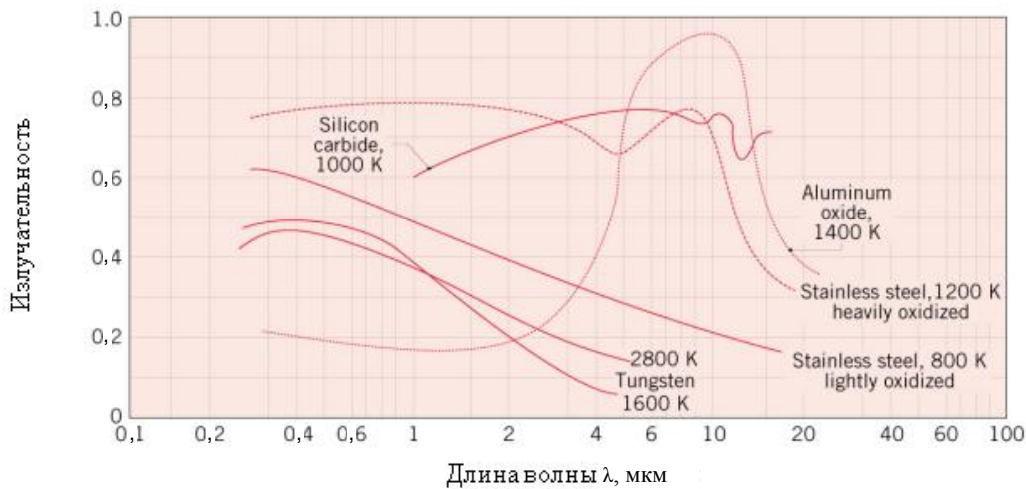


Рис. 2. Кривые зависимости излучательности различных материалов от длины волны [8] / Fig. 2. Curves of dependence of the various materials emissivity on the wavelength [8]

Смысл ограничительного условия (10) заключается в том, что (а) зависимость $\varepsilon(\lambda)$, в принципе, может иметь как монотонно возрастающий, так и спадающий характер по длине волны, имея при этом равные друг другу интегральные значения; (б) зависи-мость $\varepsilon(\lambda)$ может иметь зеркально симме-тричный характер относительно центральной оси координатной системы $\{x, y\}$.

С учетом выражений (9) и (10) сформи-руем целевой функционал безусловной ва-риационной оптимизации $F(\lambda)$:

$$F(\lambda) = \int_{\lambda_{\text{max}}}^{\lambda_{\text{max}}} \left[1 - \frac{S_{\tau} \cdot \lambda \cdot \ln \varepsilon(\lambda)}{\rho} \right] d\lambda + \gamma \left[\int_{\lambda_{\text{max}}}^{\lambda_{\text{max}}} \varepsilon(\lambda) d\lambda - C \right], \tag{11}$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение задачи (11), согласно [9], долж-но удовлетворить условию

$$\frac{\partial \left\{ 1 - \frac{S_{\tau} \cdot \lambda \cdot \ln \varepsilon(\lambda)}{\rho} + \gamma \varepsilon(\lambda) \right\}}{\partial \varepsilon(\lambda)} = 0. \tag{12}$$

Из (12) получаем

$$-\frac{S_{\tau} \cdot \lambda}{\rho \varepsilon(\lambda)} + \gamma = 0. \tag{13}$$

Из (13) находим

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{S_{\tau} \cdot \lambda}{\rho \cdot \gamma}. \tag{14}$$

С учетом выражений (10) и (14) имеем

$$\int_{\lambda_{\text{max}}}^{\lambda_{\text{max}}} \frac{S_{\tau} \cdot \lambda}{\rho \cdot \gamma} d\lambda = \frac{S_{\tau} \cdot \lambda}{2 \rho \cdot \gamma} (\lambda_{\text{max}}^2 - \lambda_{\text{min}}^2). \tag{15}$$

$$\text{С учетом } \frac{S_{\tau} \cdot \lambda}{2 \rho \cdot \gamma} (\lambda_{\text{max}}^2 - \lambda_{\text{min}}^2) = C$$

находим

$$\gamma = \frac{S_T(\lambda_{max}^2 - \lambda_{min}^2)}{2\rho C} \quad (16)$$

Из выражений (14) и (16) находим

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{2\lambda \cdot C}{(\lambda_{max}^2 - \lambda_{min}^2)} \quad (17)$$

Очевидно, что при решении (17) целевой функционал $F(\lambda)$ достигает минимума, т. к. приведенный далее показатель оказывается положительной величиной, т. е.

$$\alpha_1 = \frac{\partial^2 \left\{ 1 - \frac{S_T \lambda \cdot \ln \varepsilon(\lambda)}{\rho} + \gamma \varepsilon(\lambda) \right\}}{\partial \varepsilon(\lambda)^2} > 0.$$

Таким образом, при линейно возрастающем характере функции $\varepsilon(\lambda)$ показатель $\chi_{инт}$ достигает минимума. Отсюда можно сделать эвристический вывод о том, что наибольшее значение $\chi_{инт}$ может быть достигнуто при обратной зависимости ε и λ , т. е. при росте λ значение ε должно уменьшаться.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в следующем. Как известно, излучательность старого и нового асфальтового покрытия резко различается [5]. В качестве примера на рис. 3 приведены кривые их спектральной зависимости.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 3, спектральная зависимость нового асфальта в тепловом диапазоне 8...12 мкм имеет почти монотонно растущий характер. Следовательно, при исследовании "тепловых островков" в городской зоне со свеженакатанным асфальтом учет излучательности является обязательным. Однако, что касается старого асфальта, то здесь монотонность кривой $\varepsilon(\lambda)$ на участке 9...11 мкм резко нарушается и $\varepsilon(\lambda)$ имеет спадающий характер по λ . Отсюда можно сделать следующий вывод: если температура асфальтового покрытия такова, что на диапазоне 9...11 мкм асфальт излучает максимальную энергию, то требование к учету излучательности можно несколько ослабить.

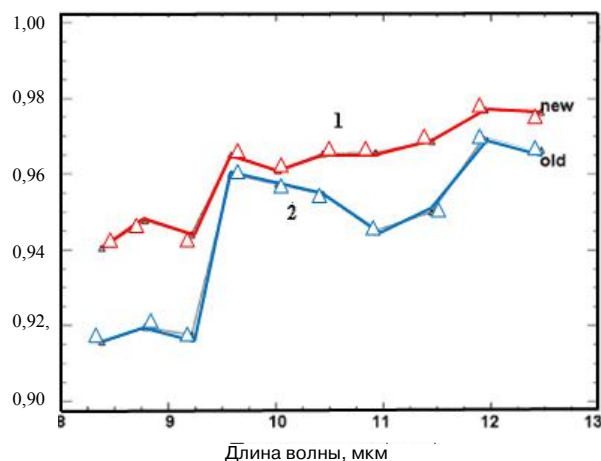


Рис. 3. Кривые волновой зависимости излучательности старого и нового асфальтового покрытия [5]: 1 – новый асфальт; 2 – старый асфальт / Fig. 3. Waveform curves of emissivity of old and new asphalt pavement [5]: 1 – new asphalt; 2 – old asphalt

Заключение. Проанализирована задача точного дистанционного зондирования тепловых островков, появляющихся в урбанизированных территориях в плане необходимости учета спектральной зависимости показателя излучательности объектов, находящихся на поверхности земляного покрытия от длины волны. Показано, что при обратной зависимости коэффициента излучательности от длины волны требование к проведению такой коррекции ослабевает. Рассмо-

трены излучательные свойства нового и старого асфальтового покрытия и на основании проведенного анализа сделан вывод о том, что если, согласно семейству кривых Планка, асфальтовое покрытие при соответствующей температуре излучает в диапазоне 9...11 мкм максимум энергии, то требование к проводимой коррекции может ослабеть и, соответственно, погрешность из-за неучтенного влияния спектральной изменчивости излучательности может уменьшиться.

Список литературы

1. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. С. 432.
2. Arnfield A. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water and the urban heat island // *International Journal of Climatology*. 2003. Vol. 23. P. 1–26.
3. Rizwan A., Dennis L., Liu C. A review on the generation determination and mitigation of urban heat island // *Journal of Environmental Sciences*. 2008. Vol. 20. P. 120–128.
4. Stewart I. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature // *International Journal of Climatology*. 2010. Vol. 21. P. 200–217.
5. Charlie J. T., Chapman L., Thornes J. E. Baker C. Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review // *Meteorological Application*. 2011. Vol. 18. P. 296–306.
6. Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite // *International Journal of Remote Sensing*. 1987. Vol. 8. No. 10. P. 1509–1522.
7. Zhou B., Rybski, D. & Kropp, J. P. The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Sci Rep* 7, 4791 (2017). URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04242-2> (дата обращения: 15.01.2022). Текст: электронный.
8. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89. P. 467–483.
9. Radiation: emissivity. Representative spectral variations. URL: https://www3.nd.edu/~sst/teaching/AME60634/lectures/AME60634_F13_lecture27.pdf (дата обращения: 15.01.2022). Текст: электронный.
10. Pascucci S., Bassani C., Palombo A., Poscolieri M., Cavalli R. Road asphalt pavements analyzed by airborne thermal remote sensing: preliminary results of the Venice highway // *Sensors*. 2008. Vol. 8. P. 1278–1296.

References

1. Elsgolts L. E. *Differentsialnye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye* (Differential Equations and the Calculus of Variations). Moscow: Nauka, 1974. S. 432.
2. Arnfield A. *International Journal of Climatology* (International Journal of Climatology), 2003, vol. 23, pp. 1–26.
3. Becker F. *International Journal of Remote Sensing* (International Journal of Remote Sensing), 1987, vol. 8, no. 10, pp. 1509–1522.
4. Charlie J. T., Chapman L., Thornes J. E. Baker C. *Meteorological Application* (Meteorological Application), 2011, vol. 18, pp. 296–306.
5. Pascucci S., Bassani C., Palombo A., Poscolieri M., Cavalli R. *Sensors* (Sensors), 2008, vol. 8, pp. 1278–1296.
6. *Radiation: emissivity. Representative spectral variations* (Radiation: emissivity. Representative spectral variations). Available at: https://www3.nd.edu/~sst/teaching/AME60634/lectures/AME60634_F13_lecture27.pdf (date of access: 15.01.2022). Text: electronic.
7. Rizwan A., Dennis L., Liu C. *Journal of Environmental Sciences* *Journal of Environmental Sciences*. 2008. Vol. 20. P. 120–128.
8. Stewart I. *International Journal of Climatology* (International Journal of Climatology), 2010, vol. 21, p. 200–217.
9. Weng Q., Lu D., Schubring J. *Remote Sensing of Environment* (Remote Sensing of Environment), 2004, vol. 89, pp. 467–483.
10. Zhou B., Rybski, D. & Kropp, J. P. *The role of city size and urban form in the surface urban heat island. Sci Rep* 7, 4791. 2017 (The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Sci Rep* 7, 4791. 2017). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04242-2> (date of access: 15.01.2022).

Информация об авторе**Information about the author**

Мамедова Эсмירה Амилъ гызы, старший научный сотрудник, Институт космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика. Область научных интересов: природные ресурсы
esimemmedova1985@mail.ru

Mameadova Esmira Amil gizi, senior researcher, Institute of Space Research of Natural Resources of the National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. Scientific interests: natural resources

Для цитирования

Мамедова Э. А. Точность спутниковой оценки температуры поверхности гетерогенных урбанизированных участков // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 1. С. 40–46. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-1-40-46.

Accuracy of satellite estimation of surface temperature of heterogeneous urbanized areas // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 40–46. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-1-40-46.

Статья поступила в редакцию: 27.12.2021 г.

Статья принята к публикации: 20.01.2022 г.