

ЦИФРОВАЯ УРБАНИСТИКА

УДК 711.4:004.94

Научная статья

Александр Юрьевич Зуев✉

начальник отдела территориального планирования, ООО «ГеоКлевер». Россия,
400002, Волгоград, ул. им. Сухова, 17;
e-mail: Zuev34W@yandex.ru

Наталья Петровна Садовникова

д-р техн. наук, профессор каф. цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: npsn1@ya.ru

Андрей Леонидович Алексеев

техник каф. цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Россия, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: andrey.al.rabota@gmail.com

Артём Николаевич Колядов

техник каф. цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Россия, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: artemkoladov75@yandex.ru

Виталий Витальевич Жалалов

студент, Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). Россия, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1;
e-mail: zhalalov9@mail.ru

АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГОРОДСКИХ ОСТРОВОВ ТЕПЛА В ЛЕТНИЙ И ЗИМНИЙ СЕЗОНЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ LANDSAT 9

В рамках работы произведен отбор снимков Landsat 9 за лето 2024 г. и зиму 2024—2025 гг., определена температура поверхности земли в границах г. Волгограда и проведена оценка и сравнение показателей интенсивности летнего и зимнего городских островов тепла двумя подходами: UHI-driven и land-cover-driven. Полученные результаты свидетельствуют о наличии городского острова тепла в Волгограде как в летний, так и в зимний периоды, в то же время его локализация отличается в зависимости от времени года. Также выявлено, что пахотные земли приводят к получению отрицательной интенсивности городского острова тепла как в летнее, так и в зимнее время, а на интенсивность зимнего поверхностного городского острова тепла влияние водных объектов минимально.

Ключевые слова: городской остров тепла, поверхностный городской остров тепла, температура поверхности земли, Land Surface Temperature, зимний городской остров тепла, Landsat.

Для цитирования: Зуев А. Ю., Садовникова Н. П., Алексеев А. Л., Колядов А. Н., Жалалов В. В. Анализ интенсивности поверхностных городских островов тепла в летний и зимний сезоны на основе данных Landsat 9 // Социология города. 2025. № 2. С. 73—83. DOI: 10.35211/19943520_2025_2_73

Введение

Эффект городского острова тепла — это наиболее заметная модификация городского климата, возникающая при урбанизации (Газимов, Кужевская, 2021).

Городские острова тепла описываются как феномен повышенной температуры на городских территориях в сравнении с их сельским или природным окружением, а интенсивность городских островов тепла оказывает значительное влияние на здоровье человека, энергопотребление и качество городской среды (Oke, 1982).

Городские острова тепла подразделяются как минимум на два типа: поверхностный и атмосферный (Korniyenko, Dikareva, 2021). Главное отличие между ними в том, что поверхностный определяется с помощью температуры поверхности земли, а атмосферный — через температуру атмосферного воздуха.

Цель работы — сравнение подходов к определению поверхностных городских островов тепла в г. Волгограде в разные сезоны с помощью спутниковых данных о температуре поверхности земли за летний и зимний периоды. В качестве сравнения использованы UHI-driven и land-cover-driven индикаторы городских островов тепла, которые широко используются для метода количественной оценки интенсивности городских островов тепла на основе спутниковых данных о температуре поверхности земли (Voogt, Oke, 2003).

На момент написания статьи авторами обнаружено сравнительно небольшое количество работ, связанных с оценкой интенсивности городских островов тепла в городах России. В данной работе впервые для Волгограда проводится сравнительный сезонный анализ поверхностных островов тепла с использованием двух методов оценки интенсивности: UHI-driven и land-cover-driven.

Материалы, область исследования, методы и исходные данные

Областью исследования является территория городского округа город-герой Волгоград в его административных границах (48°42'42" с. ш. 44°30'50" в. д.) общей площадью 865 км², расположенная на юго-востоке европейской части России. Численность населения города составляет 1,012 млн человек. Территория прилегает к Волге на протяжении около 65 км, а высота над уровнем моря колеблется от 0 до 140 м, климат умеренно-континентальный («Dfa» по международной классификации Кеппена).

В качестве исходных данных использовались снимки Landsat 9 от 12.07.2024 (время съемки 07:53) и Landsat 9 от 21.02.2025 (время съемки 07:54), а также данные о типе подстилающей поверхности за 2024 г., подготовленные в рамках международной программы «Copernicus».

Выбор снимков Landsat за указанные даты обусловлен минимальной облачностью в эти дни, показатель CLOUD_COVER для летнего снимка равнялся 0, а для зимнего 0,39, причем общая часть облаков в последнем располагалась за границами Волгограда.

Температура воздуха 12.07.2024 по состоянию на 08:00 в Волгограде фиксировалась 26 °С, влажность воздуха 36 %, скорость ветра 6,4 м/с, снежный покров отсутствует.

Температура воздуха 21.02.2025 по состоянию на 08:00 — -12 °С, влажность воздуха 81 %, скорость ветра 4,4 м/с.

Все расчетно-экспериментальные задачи и визуализация результатов производились на «Вычислительном комплексе высокой производительности», внедренном на кафедре цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве ВолГТУ в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030». Для расчетов использовалось программное обеспечение QGIS 3.40.

Определение температуры поверхности с помощью спутниковых снимков Landsat 9

Для определения температуры поверхности земли использовались спутниковые снимки Landsat 9 по методике, представленной в работе «Algorithm for automated mapping of land surface temperature using Landsat 8 Satellite Data» (Avdan, Kaplan, 2016), адаптированной под характеристики спутника Landsat 9, связанные с более современным его материально-техническим оснащением, в частности с улучшенным сенсором TIRS-2, используемым при выполнении снимка 10-го канала, который позволяет определять температуру без использования коэффициента коррекции рассеянного света¹.

Для расчета температуры поверхности использовался следующий ряд последовательных формул:

$$L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL,$$

¹ Landsat 9 Data Users Handbook. Version 1.0 / Department of the Interior U.S. Geological Survey. February 2022. URL: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-2082_L9-Data-Users-Handbook_v1.pdf (accessed: 10.04.2025).

Интенсивность поверхностных городских островов тепла летом и зимой по данным Landsat 9

где $L\lambda$ — спектральная энергетическая яркость; ML — мультипликативный коэффициент пересчета 10-го канала снимка Landsat; Q_{cal} — значение пикселя 10-го канала снимка Landsat; AL — дополнительный коэффициент пересчета 10-го канала снимка Landsat.

$$BT = \frac{K2}{\ln[(K1/L\lambda) + 1]} - 273,15,$$

где BT — яркостная температура; $K1$ и $K2$ — тепловые константы 10-го канала снимка Landsat.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R},$$

где $NDVI$ — нормализованный вегетационный индекс; NIR — значение ближнего инфракрасного канала 5-го спутникового снимка Landsat; R — значение красного канала 4-го спутникового снимка Landsat.

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2,$$

где Pv — доля вегетации; $NDVI_s$ — значение нормализованного вегетационного индекса почвы, принятое равным 0,2; $NDVI_v$ — значение нормализованного вегетационного индекса вегетационной растительности, принятое равным 0,5.

Излучательная способность земной поверхности ε определялась по следующей формуле (Sobrino, Jiménez-Muñoz, Paolini, 2004).

$$\varepsilon = 0,004 \times Pv + 0,986.$$

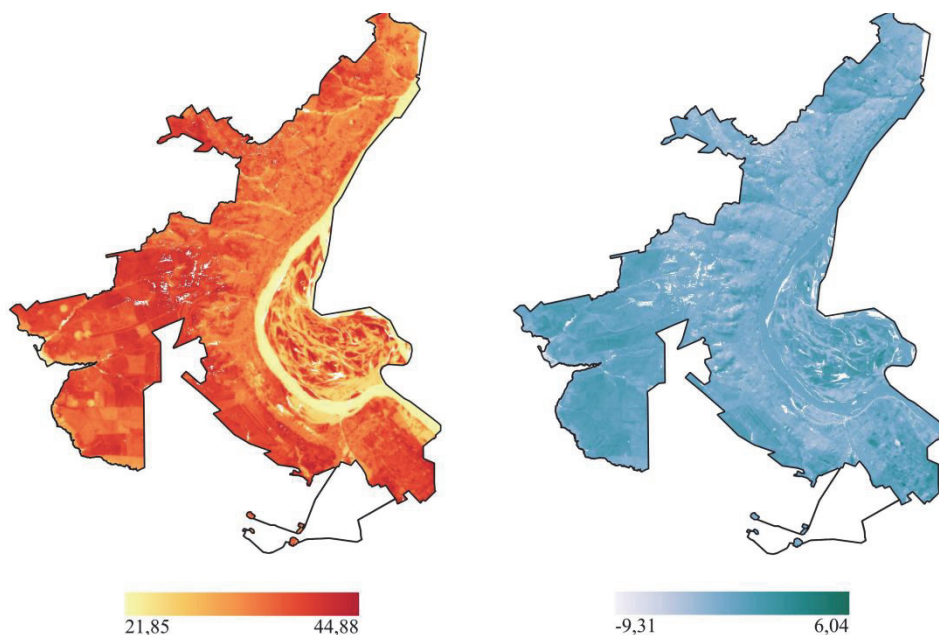
Температура поверхности (LST) в градусах Цельсия вычисляется по формуле:

$$LST = \frac{BT}{1 + (\lambda BT / \rho) \ln \varepsilon},$$

где λ — длина волны излученной радиации, среднее значение которой принято 10,895; ρ — постоянная, равная 14388 мК.

При расчете значения следующих переменных берутся из метаданных конкретного снимка Landsat: ML , AL , $K1$, $K2$.

Результаты определения температуры поверхности земли представлены на рис., сопоставимы и не противоречат данным о температуре атмосферного воздуха на дату и время подготовки спутниковых снимков Landsat, используемых в работе.



Температура поверхности земли, определенная по спутниковым данным Landsat в летнее (слева) и зимнее (справа) время, °C

Определение интенсивности поверхностного городского острова тепла

Для определения интенсивности городского острова тепла использовались подходы UHI-driven и land-cover-driven:

1. UHI-driven-подход считается простым. При нем оценивается различие температуры, в частности температуры поверхности земли, в районе исследования. Распределение на городские и внегородские территории происходит на основании разницы температур.

2. Land-cover-driven-подход основывается на определении городских и внегородских территорий в зависимости от типа подстилающей поверхности, за городские территории принимаются застроенные территории, а внегородские — естественные объекты либо сельскохозяйственные угодья.

Методики расчета указанных показателей представлена в табл. 1, расчеты производились с использованием программного обеспечения QGIS 3.40.

При расчете показателей исключались пиксели, расположенные в границах исследования, но закрытые облаками на снимке Landsat 9 от 21.02.2025, для лучшего сопоставления расчетов по летнему и зимнему городским островам тепла. Информация об облаках представлена на слое QA_PIXEL космического снимка Landsat, который содержит оценку качества пикселей.

При использовании подхода land-cover-driven в качестве городских территорий использовались пиксели класса 7 (Build Area), в качестве сельскохозяйственных территорий — пиксели класса 5 (Crops), в качестве водных территорий — пиксели класса 1 (Water).

Интенсивность поверхностных городских островов тепла летом и зимой по данным Landsat 9

Таблица 1. Индикаторы городского острова тепла Волгограда, использованные в работе

Подход	Индикатор	Формула
UHI-driven	Магнитуда	Максимальная ТПЗ всех пикселей — среднеарифметическая ТПЗ всех пикселей (Rajasekar, Weng, 2009)
UHI-driven	Диапазон	Максимальная ТПЗ всех пикселей — минимальная ТПЗ всех пикселей (Schwarz, Schlink, Franck, Grossmann, 2012)
UHI-driven	Площадь ГОТ	Площадь территории, для которой ТПЗ больше, чем среднеарифметическая ТПЗ + 1 стандартное отклонение (Zhang, Wang, 2008)
Land-cover-driven	Городские — сельскохозяйственные территории	Среднеарифметическая ТПЗ всех пикселей — среднеарифметическая ТПЗ сельскохозяйственных пикселей (Jin, Dickinson, Zhang, 2005)
Land-cover-driven	Городские — водные территории	Среднеарифметическая ТПЗ всех пикселей — среднеарифметическая ТПЗ водных пикселей (Chen Zhao, Li, Yin, 2006)

Сравнение результатов

В табл. 2 приведены результаты расчетов индикаторов летнего и зимнего городских островов тепла Волгограда.

Таблица 2. Рассчитанные значения индикаторов летнего и зимнего городских островов тепла г. Волгограда

Подход	Индикатор	Летний остров	Зимний остров
UHI-driven	Магнитуда	9,66	8,30
UHI-driven	Диапазон	23,03	15,35
UHI-driven	Площадь ГОТ	13185,36	16199,19
Land-cover-driven	Городские — сельскохозяйственные территории	–3,1	–0,83
Land-cover-driven	Городские — водные территории	10,92	0,02

Результаты работы в летнее время сопоставимы с ранее опубликованными исследованиями: в Новосибирске, в частности при UHI-driven-подходе, диапазон летнего городского острова тепла варьировал от 12,9 до 23 °С, а в Ханчжоу (Китай) при UHI-driven-подходе диапазон температур поверхности земли колебался от 21 до 25 °С (Sheng, Tang, You et al., 2017). При land-cover-driven-подходе также результаты сопоставимы со значениями летнего городского острова тепла: различия температур между городскими и сельскохозяйственными территориями в Новосибирске варьировал от +2,7 до –1,6 °С (Газимов, Кужевская, 2021).

Аналогичных исследований зимних городских островов тепла значительно меньше, чем летних, но найденные авторами работы демонстрируют схожие результаты. Так, в Чанчуне (Китай) интенсивность зимнего городского острова тепла в утренние часы (с 10 до 11 утра) достигала 1,55 °C (Yang, Yan, Zhang, 2020). При исследовании зимнего городского острова тепла в Апатитах тепловая аномалия температуры земной поверхности с использованием данных спутниковых снимков Modis достигала в пределах городской застройки 3 °C, что также сопоставимо с полученными результатами (Varentsov, Konstantinov, Baklanov et al., 2018).

В результате одновременного использования двух подходов (UHI-driven и land-cover-driven) можно говорить о завышенных значениях диапазона городского острова тепла при использовании UHI-driven-подхода. Это связано с повышенной температурой поверхности пахотных земель, которая выше, чем у городских территорий. В зимнее время этот нагрев меньше, что свидетельствует о том, что UHI-driven-подход дает более объективные результаты об интенсивности городского острова тепла в границах территорий с неоднородной подстилающей поверхностью.

Перегрев искусственных поверхностей внутри города относительно естественных поверхностей является значительным в летнее время, но в зимнее время температурные различия значительно меньше. Кроме того, в летнее время температура поверхности водоемов существенно ниже температуры искусственных поверхностей и сельскохозяйственных угодий, но в зимнее время эта разница минимальна и может свидетельствовать о том, что водные объекты, даже такие значительные, как река Волга, не имеют существенного влияния на формирование поверхностного городского острова тепла в зимнее время. Это также подтверждается в исследовании влияния сезонных эффектов на температуру поверхности земли в Чанчуне (Yang, Yan, Lei et al, 2020).

В пространственной структуре поверхностного острова тепла можно отметить, что в летнее время его наибольшая интенсивность фиксируется в районах промышленной застройки и торговых центрах. В зимнее время интенсивность выражена гораздо слабее и чаще локализуется вблизи некоторых торговых центров. В то же время наибольшие температуры поверхности земли в зимний период зафиксированы на территориях пашен и местах понижения рельефа в виде балок и оврагов, где вероятно накопление тепла либо скорость охлаждения ниже, чем на других территориях.

Заключение

Результаты исследования подтвердили, что выбор метода определения интенсивности городского острова тепла влияет на его количественные характеристики, что может создавать искаженные представления о характере явления.

Использование метода land-cover-driven для оценки интенсивности городских островов тепла, как в летнее, так и в зимнее время, показывает, что значения интенсивности городских островов тепла могут быть завышены, особенно в условиях сильно нагретых пашен, в то же время выраженность городского острова тепла в зимний период ниже, чем в летний.

Зафиксировано, что сельскохозяйственные угодья, в частности пашни, как в летний, так и в зимний периоды имеют большую температуру поверх-

ности земли, чем городская застройка, а изменчивость температуры поверхности водных объектов в зимнее время может практически не отличаться от температуры поверхности застроенных территорий. Все это подтверждает необходимость сравнения температурных характеристик, а исследование степени влияния различных явлений на температуру поверхности земли следует проводить для относительно однородных по характеру застройки и использования земли территорий. В то же время при классификации территорий для таких целей в зимнее время, возможно, не потребуются полного отделения водных поверхностей от застройки, в отличие от пашен, в связи с несущественным отличием температуры поверхности.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке «Центра цифровых научно-образовательных проектов и разработок в сфере промышленного искусственного интеллекта» Ц2RED-ИИ ВолгГТУ, созданного в рамках реализации образовательных программ топ-уровня в сфере искусственного интеллекта (Соглашение № 70-2025-000756). Авторы выражают благодарность коллегам по кафедре цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве ИАиС ВолгГТУ, принимавшим участие в разработке проекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Газимов Т. Ф., Кужевская И. В. Оценка летнего поверхностного городского острова тепла города Новосибирск по данным Landsat 8 // Географический вестник. 2021. № 4 (59). С. 84—98. DOI: 10.17072/2079-7877-2021-4-84-98
- Avdan U., Kaplan G. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data // Journal of Sensors. 2016. Vol. 2016. Article ID 1480307. Pp. 1—8. DOI: 10.1155/2016/1480307
- Chen X. L., Zhao H. M., Li P. X., Yin Z. Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 104. P. 133—146.
- Jin M. L., Dickinson R. E., Zhang D. L. The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS // Journal of Climate. 2005. Vol. 18. Pp. 1551—1565.
- Korniyenko S. V., Dikareva E. A. Generation, Development, and Mitigation of the Urban Heat Island: A Review // AlfaBuild. 2021. № 16. Article ID 1605. DOI: 10.34910/ALF.16.5
- Oke T. R. The energetic basis of the urban heat-island // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1982. Vol. 108. Pp. 1—24.
- Rajasekar U., Weng Q. H. Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: a case study of Indianapolis // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. Vol. 64. Pp. 86—96.
- Schwarz N., Schlink U., Franck U., Grossmann K. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators — An application for the city of Leipzig (Germany) // Ecological Indicators. 2012. Vol. 18. Pp. 693—704.
- Sheng L., Tang X., You H., Gu Q., Hu H. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China // Ecological Indicators. 2017. Vol. 72. Pp. 738—746.
- Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 90. No. 4. Pp. 434—440.

Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018. Vol. 18. Pp. 17573—17587. DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018

Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climates // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. No. 3. Pp. 370—384. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Yang C., Yan F., Lei X. et al. Investigating seasonal effects of dominant driving factors on urban land surface temperature in a snow-climate city in China // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 18. Article ID: 3006. DOI: 10.3390/rs12183006

Yang C., Yan F., Zhang S. Comparison of land surface and air temperatures for quantifying summer and winter urban heat island in a snow climate city // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 266. Article ID: 110563. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110563

Zhang J. Q., Wang Y. P. Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM plus data // *Sensors*. 2008. Vol. 8. Pp. 7453—7468.

Research Article

Alexander Yu. Zuev ✉

Head of Territorial Planning Department, “GeoClever” LLC. 17, Sukhova st., Volgograd, 400002, Russia;
e-mail: Zuev34W@yandex.ru

Natalya P. Sadovnikova

Doctor of Engineering Sciences, Professor of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: npsn1@ya.ru; ORCID: 0000-0002-7214-9432

Andrey L. Alekseev

Technician of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: andrey.al.rabota@gmail.com

Artyom N. Kolyadov

Technician of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: artemkoladov75@yandex.ru

Vitaliy V. Zhalalov

Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia;
e-mail: zhalalov9@mail.ru

**ANALYSIS OF SURFACE URBAN HEAT ISLAND INTENSITY
IN SUMMER AND WINTER SEASONS BASED ON LANDSAT 9 DATA**

Abstract. As part of this study, Landsat 9 images were selected for the summer of 2024 and the winter of 2024—2025. Land surface temperature (LST) was calculated within

the administrative boundaries of Volgograd, and the intensity of summer and winter urban heat islands was assessed and compared using two approaches: UHI-driven and land-cover-driven. The results indicate the presence of an urban heat island in Volgograd during both summer and winter seasons; however, its spatial localization may differ depending on the time of year. It was also found that cropland areas lead to negative UHI intensity values in both seasons, whereas the influence of water bodies on winter surface UHI intensity may be minimal.

Key words: urban heat island, surface urban heat island, earth surface temperature, Land Surface Temperature, winter urban heat island, Landsat.

For citation: Zuev A. Yu., Sadovnikova N. P., Alekseev A. L., Kolyadov A. N., Zhala-lov V. V. (2025) Analysis of surface urban heat island intensity in summer and winter seasons based on Landsat 9 data. *Sotsiologiya Goroda* [Urban Sociology] 2025, no. 2, pp. 73—83 (in Russian). DOI: 10.35211/19943520_2025_2_73

Acknowledgement. The study was carried out with the support of the Center for Digital Scientific and Educational Projects and Developments in the Field of Industrial Artificial Intelligence (C2RED-AI) of Volgograd State Technical University, created as part of the implementation of top-level educational programs in the field of artificial intelligence (Agreement No. 70-2025-000756). The authors express gratitude to colleagues from the Department of Digital Technologies for Urban Studies, Architecture and Civil Engineering, VSTU involved in the development of the project.

REFERENCES

- Avdan U., Kaplan G. (2016) Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, vol. 2016, article ID 1480307, pp. 1—8. DOI: 10.1155/2016/1480307
- Chen X. L., Zhao H. M., Li P. X., Yin Z. Y. (2006) Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, vol. 104, pp. 133—146.
- Gazimov T. F., Kuzhevskaya I. V. (2021) Estimation of summer surface urban heat island of Novosibirsk from LANDSAT 8 satellite images. *Geograficheskii vestnik* [Geographical bulletin], no. 4, pp. 84—98 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2021-4-84-98
- Jin M. L., Dickinson R. E., Zhang D. L. (2005) The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS. *Journal of Climate*, vol. 18, pp. 1551—1565.
- Korniyenko S. V., Dikareva E. A. (2021) Generation, Development, and Mitigation of the Urban Heat Island: A Review. *AlfaBuild*, no. 16, article ID 1605. DOI: 10.34910/ALF.16.5
- Oke T. R. (1982) The energetic basis of the urban heat-island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, pp. 1—24.
- Rajasekar U., Weng Q. H. (2009) Urban heat island monitoring and analysis using a non-parametric model: a case study of Indianapolis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, pp. 86—96.
- Schwarz N., Schlink U., Franck U., Grossmann K. (2012) Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators — An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators*, vol. 18, pp. 693—704.
- Sheng L., Tang X., You H., Gu Q., Hu H. (2017) Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, vol. 72, pp. 738—746.
- Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L. (2004) Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, vol. 90, no. 4, pp. 434—440.

Varentsov M., Konstantinov P., Baklanov A., Esau I., Miles V., Davy R. (2018) Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 18, pp. 17573—17587. DOI: 10.5194/acp-18-17573-2018

Voogt J. A., Oke T. R. (2003) Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, no. 3, pp. 370—384. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Yang C., Yan F., Lei X. et al. (2020) Investigating seasonal effects of dominant driving factors on urban land surface temperature in a snow-climate city in China. *Remote Sensing*, vol. 12, no. 18, article ID: 3006. DOI: 10.3390/rs12183006

Yang C., Yan F., Zhang S. (2020) Comparison of land surface and air temperatures for quantifying summer and winter urban heat island in a snow climate city. *Journal of Environmental Management*, vol. 266, article ID: 110563. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110563

Zhang J. Q., Wang Y. P. (2008) Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM plus data. *Sensors*, vol. 8, pp. 7453—7468.

Поступила в редакцию 15.06.2025

Принята в печать 30.06.2025

Received 15.06.2025

Accepted for publication 30.06.2025