

Д. С. Тасенко¹, М. Б. Каган², Е. А. Скрипчинская³, Н. А. Позднякова⁴, Т. А. Андреева⁵,
М. В. Нефедова⁶, Д. С. Водопьянова⁷

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И ГРАДО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГОРОДА-КУРОРТА ПЯТИГОРСКА

АННОТАЦИЯ

Международное сообщество с прошлого века обеспокоено изменением климата, усиливающимся антропогенным воздействием, однако до настоящего момента эффективные методы минимизации негативного влияния не разработаны. Статья посвящена разработке методологии геоинформационного мониторинга пространственного распределения поверхностных температурных полей г. Пятигорска Кавказских Минеральных Вод и выявлению корреляционных зависимостей между полями температуры поверхности земли и градо-экологическими показателями (озелененности и застроенности). Цель исследования — оценка влияния антропогенных факторов на формирование микроклиматических условий городской среды и выявление наиболее уязвимых зон с точки зрения теплового комфорта населения. Получены карты пространственной динамики поверхностных температурных аномалий и выявлены закономерности изменения температурных режимов городских территорий в зависимости от уровня урбанизации и степени озелененности. Результаты исследования имеют важное значение для оптимизации градостроительной политики, повышения качества жизни горожан и сохранения уникального природного потенциала региона Кавказские Минеральные Воды. Использованы методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), картографического анализа и статистической обработки данных. Современные технологии ДЗЗ упрощают анализ показателей, предоставляя объективные данные и сокращая ресурсоемкость проводимых исследований. Несмотря на установленную относительно невысокую статистическую достоверность выявляемых корреляционных связей между температурой поверхности земли и уровнями озелененности и застроенности, целесообразность применения методов геоинформационного мониторинга подтверждается вследствие наличия спутниковых снимков, обеспечивающих детальное изучение отдельных фрагментов городской местности и регистрацию динамики пространственной реорганизации зеленых массивов, их трансформацию в зоны застройки в пределах заданного хронологического периода.

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, факультет международных отношений, ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, Россия, 355017, *e-mail*: dimitri.tasenko@yandex.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, *e-mail*: kagan.mikko@gmail.com

³ Северо-Кавказский федеральный университет, факультет международных отношений, ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, Россия, 355017, *e-mail*: gerdtea@yandex.ru

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, *e-mail*: n.pozdnyakova@spbu.ru

⁵ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, *e-mail*: t.andreeva@spbu.ru

⁶ Северо-Кавказский федеральный университет, факультет международных отношений, ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, Россия, 355017, *e-mail*: mnefedova@ncfu.ru

⁷ Северо-Кавказский федеральный университет, факультет международных отношений, ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, Россия, 355017, *e-mail*: darina_000023@rambler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температурные поля поверхности земли, геоинформационный мониторинг, пространственная организация урбоэкосистем, озелененность, градостроительная нагрузка, градо-экологический каркас территории

Dmitriy S. Tsenko¹, Mikhail B. Kagan², Evgeniya A. Skripchinskaya³, Natalia A. Pozdnyakova⁴, Tatyana A. Andreeva⁵, Maria V. Nefedova⁶, Darya S. Vodopyanova⁷

GEOINFORMATION MONITORING OF SPATIAL DYNAMICS OF SURFACE TEMPERATURE FIELDS AND URBAN AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE RESORT CITY OF PYATIGORSK

ABSTRACT

The international community has been concerned about climate change and the increasing anthropogenic impact since the last century, however, effective methods to minimize the negative impact have not yet been developed. The article is devoted to the development of a methodology for geoinformation monitoring of the spatial distribution of surface temperature fields in the resort city of Pyatigorsk of the Caucasian Mineral Waters and the identification of correlations between the fields of surface temperature and urban and environmental indicators (landscaping and built-up areas). The aim of the study is to assess the influence of anthropogenic factors on the formation of microclimatic conditions of the urban environment and identify the most vulnerable areas in terms of thermal comfort of the population. Maps of the spatial dynamics of surface temperature anomalies have been obtained and patterns of changes in the temperature regimes of urban areas depending on the level of urbanization and the degree of landscaping have been identified. The results of the study are important for optimizing urban planning policy, improving the quality of life of citizens and preserving the unique natural potential of the Caucasus Mineral Waters Region. The methods of remote sensing of the Earth, cartographic analysis and statistical data processing are used. Modern remote sensing technologies simplify the analysis of indicators by providing objective data and reducing the resource intensity of ongoing research. Despite the established relatively low statistical reliability of the revealed correlations between the temperature of the earth's surface and the levels of landscaping and built-up, the use of geoinformation monitoring methods confirms the expediency due to the availability of remote satellite images that provide a detailed study of individual fragments of urban areas and record the dynamics of spatial reorganization of green areas, their transformation into built-up areas within a given chronological period.

¹ North Caucasus Federal University, Faculty of International Relations, 1, Pushkina str., Stavropol, 355017, Russia, *e-mail*: dimitri.tsenko@yandex.ru

² St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail*: kagan.mikko@gmail.com

³ North Caucasus Federal University, Faculty of International Relations, 1, Pushkina str., Stavropol, 355017, Russia, *e-mail*: gerdtea@yandex.ru

⁴ St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail*: n.pozdnyakova@spbu.ru

⁵ St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail*: t.andreeva@spbu.ru

⁶ North Caucasus Federal University, Faculty of International Relations, 1, Pushkina str., Stavropol, 355017, Russia, *e-mail*: mnefedova@ncfu.ru

⁷ North Caucasus Federal University, Faculty of International Relations, 1, Pushkina str., Stavropol, 355017, Russia, *e-mail*: darina_000023@rambler.ru

KEYWORDS: temperature fields of the earth's surface, geoinformation monitoring, spatial organization of urban ecosystems, landscaping, urban planning load, urban and ecological framework of the territory

ВВЕДЕНИЕ

Адверсивные метеорологические явления оказывают значительное воздействие на городские системы, причем интенсивность и частота данного воздействия возрастают вследствие глобальных климатических изменений [Masson et al., 2020]. Застройка городского пространства существенно влияет на отклонение локальных температурных характеристик от региональных климатологических нормативов [Oke et al., 2017]. Городская среда существенно трансформирует ключевые характеристики атмосферы, оказывая значимое воздействие на местные метеоусловия путем модификации и зачастую усиления неблагоприятных погодных явлений [Knight et al., 2010].

С развитием спутниковых технологий и появлением дистанционного зондирования (ДЗ) возникла возможность анализа состояния территории городов с использованием многозональных съемок [Чандра, Гош, 2008]. Кроме того, существенно расширились возможности определения использования территории и исследования компонентов природной и техногенной среды городов [Mason, Fragkias, 2018].

Цели настоящего исследования:

- расчет количественных показателей застроенности территории, озелененности территории и температуры поверхности земли;
- проведение анализа пространственно-территориальной локализации застройки, зеленых насаждений, а также зон повышенных температур («островов тепла») посредством методов геоинформационного мониторинга;
- выявление взаимосвязей между уровнем застроенности, площадью озелененных участков и температурой поверхности земли с применением статистического метода оценки — коэффициента корреляции Пирсона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовательская проблема связана с изучением влияния антропогенных факторов на изменение температуры поверхности земли в условиях городской среды. Основная цель исследования состоит в создании эффективной методологии геоинформационного мониторинга пространственного размещения, динамики и корреляции поверхностных температурных полей с градоэкологическими показателями (уровнем озелененности и плотностью застройки).

Несмотря на существующие в мире и России публикации, рассматривающие отдельные аспекты проблемы, большинство исследований недостаточно глубоко освещают комплексный подход к взаимодействию факторов урбанизации и экологии. Предлагаемая методология, основанная на выявлении корреляционных зависимостей с использованием статистических методов, позволит повысить качество анализа и минимизировать риск неверных выводов. Исследование станет фундаментальной основой для дальнейшего детального локального изучения причинно-следственных связей различных компонентов городской среды и особенностей формирования температурных полей.

Зарубежные исследователи Т. Р. Оке, Р. А. Voogt с соавторами изучали применение дистанционного зондирования Земли для анализа температурных различий в городах [Oke et al., 2017; Masson et al., 2020]. В работе А. Иванова с соавторами¹ представлен иннова-

¹ Ivanov A., Kadygrov E., Miller E. Remote Sensing system for Urban Heat Islands Study. Электронный ресурс: <http://rpoattex.com/pdf/PUBLICATIONS/Ivanov%20-%20REMOTE%20SENSING%20SYSTEM%20FOR%20URBAN%20HEAT%20ISLAND%20STUDY.pdf> (дата обращения 10.02.2025)

ционный подход к мониторингу теплофизической обстановки города посредством использования технологий дистанционного контроля (беспилотных летательных аппаратов и спектральной съемки).

Концептуальная основа исследования предполагает выделение двух основных влияющих факторов — уровня озелененности и степени застроенности территории, рассматриваемых как независимые переменные, воздействующие на свойства поверхности земли. Основным инструментом сбора данных служат материалы дистанционного зондирования Земли (ДДЗ), обеспечивающие получение объективной информации о состоянии земной поверхности и ее динамике. Важнейшим этапом методологии является проведение статистического корреляционного анализа, направленного на установление количественных зависимостей между показателями озелененности-застроенности и состоянием поверхностных температурных полей. Учитывая вероятность случайных отклонений, вызванных погодными аномалиями, надежность конечных выводов повышается путем привлечения долгосрочных рядов наблюдений.

При общей направленности выявленных зависимостей между исследуемыми показателями, количественное сопоставление, осуществленное посредством статистического корреляционного анализа, демонстрирует отсутствие абсолютного совпадения значений. Это свидетельствует о наличии множественности определяющих факторов, что обуславливает необходимость дальнейшего углубленного поиска дополнительных причин, влияющих на указанные показатели.

В качестве предмета исследования выбрана территория г. Пятигорска, являющегося административным центром Северо-Кавказского федерального округа Российской Федерации. Общая площадь исследуемой города равна 97 км², население насчитывает 143 428 жителей [Черкасов, Махмудов, 2022].

Для изыскания определен временной интервал продолжительностью 24 года (2000–2024 гг.). В пределах обозначенного временного интервала осуществлен выбор следующего ряда репрезентативных годов: 2000, 2005, 2008, 2011, 2016, 2020 и 2024. Выбор дат обусловлен подбором космических снимков с требованиями определенных параметров — отсутствия облачности, дыма над городом и хорошей сопоставимости по погодным условиям, что исключает искажение исследуемых процессов в вегетационный период. В ходе выполненного исследования применялись данные, полученные с орбитальных спутников серии Landsat, включая аппараты Landsat-5, Landsat-7 и Landsat-8. Данные предоставляются в открытом доступе на сайте Геологической службы США (USGS)¹. Пространственное разрешение в видимом и инфракрасном диапазоне — 30 м, в тепловом — 100 м у Landsat-5 и Landsat-8 и 60 м у Landsat-7. Применение в работе различных спутников влияет на точность получаемых данных и делает исследование объективным и репрезентативным. Снимки взяты с геопортала с первым уровнем обработки данных, который не включает в себя атмосферную коррекцию [Оленьков и др., 2020]. Выведены средние значения данных за летний период каждого года, что позволяет компенсировать искажения, возникающие при использовании одиночных спутниковых снимков. Такой подход снижает влияние атмосферных эффектов и сезонной вариабельности, повышая достоверность результатов анализа (2000 г. (10.07; 26.07) / 2024 г. (04.07; 13.07; 29.07)).

В исследовании рассматриваются показатели температуры земной поверхности, уровень озелененности и степень застроенности территории в пределах установленного хронологического диапазона [Furberg et al., 2019].

¹ United States Geological Survey. Электронный ресурс: <https://www.usgs.gov/> (дата обращения 12.03.2025)

Озелененная территория — это территория, предназначенная для отдыха или пешеходного транзита, открытое пространство, более половины поверхности которого занято растительностью (деревьями, кустарниками, газонами) [Тасенко и др., 2022].

Озеленение г. Пятигорска представлено следующими породами древесно-кустарниковой растительности: дуб, клен, ясень, липа, бук, граб, ива, ольха, боярышник, орешник, бузина, бересклет, терн, барбарис, кизил, дикие яблони и груши, а также травянистой растительностью: ковыль, типчак, пырей, вероника, тонконог, дубовник беловойлочный, девясил, зопник, крымская полынь, кермек, кохия, костер пестрый, полевица, скабиоза кавказская, горечавка, эспарцет, вероника горечавковая, макротомия синявковидная, лабазник, ковыль, клевер, лядвенец, катран сердцелистный.

Первостепенное значение зеленых зон состоит в стабилизации микроклиматических показателей, в частности в уменьшении термической нагрузки на поверхность за счет образования затененных пространств в теплый сезон года. Озеленение городской среды способствует улучшению экологических условий, снижает негативное воздействие техногенной нагрузки, повышает качество воздуха, уменьшает шумовую нагрузку и позитивно воздействует на физическое и психологическое состояние жителей.

Застроенные территории — это территории с расположенными на них объектами капитального строительства.

Градостроительная инфраструктура г. Пятигорска состоит из жилых массивов различной этажности, административных зданий, рекреационно-лечебных учреждений, объектов социальной инфраструктуры, промышленных предприятий и транспортных коммуникаций, формирующих сложную структуру урбанизированного ландшафта с дифференцированными функциональными зонами. Градостроительная инфраструктура формирует специфический облик городской среды, способствуя интенсификации антропогенной нагрузки на территорию городского ландшафта, изменению микроклимата, увеличению концентрации загрязняющих веществ и созданию акустически дискомфортных зон, что негативно отражается на здоровье жителей.

Температура поверхности земли (Land Surface Temperature, LST) — это температура поверхности, определяемая на основе измерений теплового излучения, зафиксированного спутниковыми сенсорами. Она отражает тепловое состояние верхнего слоя земной поверхности (почвы, воды, растительности, снега и др.).

На температуру поверхности земли влияют факторы: солнечное излучение, время года, географическое положение, покрытие поверхности, влажность воздуха и атмосферные условия, человеческая деятельность, морские течения.

Городской остров тепла (ГОТ) — это метеорологическое явление с быстрой изменчивостью, которое в значительной степени определяется суточным циклом солнечной радиации, меняющийся изо дня в день [Скрипчинская и др., 2024].

Анализ пространственных данных и построение карт осуществлялось в программе QGIS. Карты озелененности созданы с использованием метода количественной оценки зеленой растительности, основанного на расчете нормализованного дифференцированного вегетационного индекса (NDVI). Значение указанного индекса определяется по формуле (1):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1),$$

где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра,
RED — отражение в красной области спектра.

В инфракрасной области спектра (0,7–1,1 мкм) наблюдается область максимального отражения клеточных структур листа, а в красной области (0,6–0,7 мкм) наблюдается максимальное поглощение солнечного излучения хлорофиллом высших сосудистых растений, т. е. высокая фотосинтетическая активность (обычно связанная с густой растительностью) приводит к меньшему отражению в области видимого спектра и большему отражению в инфракрасном диапазоне. Соотношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от других природных объектов и анализировать ее [Шовенгердт, 2010].

По рассчитанному индексному изображению проведена переклассификация растра на два класса: травянисто-кустарниковую и древесную растительность. Нижней границей назначено значение индекса 0,3, для которого характерны значения кустарников и травянистого покрова, а свыше 0,5 — древесной растительности. Следующим этапом производится подсчет с помощью модуля зональной статистики количества пикселей растительности, которые потом переводятся в процент площади города.

Создание карт застройки территории города происходило с помощью метода количественной оценки урбанизированной территории по значению NDBI (нормализованный дифференцированный индекс застройки). Индекс рассчитан по формуле (2):

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (2),$$

где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра,
SWIR — отражение в коротковолновой инфракрасной области спектра.

Рассматриваемый индекс характеризует степень застройки произвольной географической области, обеспечивая выявление антропогенных покрытий поверхности (городская застройка, дорожная сеть, промышленные объекты) и эффективно отличая их от природных ландшафтов (растительного покрова и водных объектов).

Методика построения карт температуры поверхности земли заключается в расчете температуры земной поверхности по термальным спектральным каналам сенсора. Оптимальным выбором для аналитических целей в 2016, 2020 и 2024 гг. представляется использование десятого канала спутника Landsat-8 ввиду меньшей восприимчивости к эффектам световых бликов и засветок. Спутники Landsat-5 и Landsat-7 оснащены одним тепловым каналом. Сначала необходимо рассчитать спектральную яркость по формуле (3):

$$L_A = M_L * Band\ 10 + A_L \quad (3),$$

где L_A — спектральная яркость,
 M_L — мультипликативный масштабный коэффициент яркости для канала (RADIANCE_MULT_BAND_10), где данные берутся из метафайла,
 A_L — коэффициент аддитивного масштабирования яркости для канала (RADIANCE_ADD_BAND_10), где данные берутся из метафайла.

Яркостная температура рассчитана по формуле (4):

$$T = \left(\frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_A} + 1\right)} \right) \quad (4),$$

где K_1 и K_2 — тепловые константы из файла метаданных (K1_CONSTANT_BAND_10 и K2_CONSTANT_BAND_10).

Третьим этапом производится расчет значения NDVI по формуле (1). Далее NDVI рассчитывается для получения доли растительности по формуле (5):

$$Pv = \left(\frac{(NDVI - |NDVI_{min}|)}{(NDVI_{max} - |NDVI_{min}|)} \right)^2 \quad (5),$$

где $NDVI$ — индекс растительности,
 $NDVI_{min}$ — минимальное значение NDVI,
 $NDVI_{max}$ — максимальное значение NDVI.

Следующим шагом производится расчет отражательной способности на основе NDVI по формуле (6):

$$e = 0,004 * Pv + 0,986 \quad (6),$$

Последним шагом является вычисление температуры поверхности по формуле (7). Итоговое значение получается в °C [Dissanayake et al., 2019].

$$LST = \frac{T}{\left(1 + \left(\lambda * \frac{T}{C^2} \right) * \ln(e) \right)} - 273,15 \quad (7),$$

где T — яркостная температура поверхности,
 λ — длина волны, из метафайла,
 e — отражательная способность земной поверхности, из расчетов выше,
 $C^2 = h * s / c = 14\,388$, где:
 h — постоянная Планка, $6,626070 \times 10^{-34}$ кг \times м² \times с⁻¹(Дж \times с),
 c — постоянная Больцмана, $1,380649 \times 10^{-23}$ Дж / К,
 s — скорость света, 3×10^8 м/с.

При создании карт температуры поверхности следует принять во внимание, что данные выражаются в Кельвинах, поэтому необходим перевод в градусы Цельсия. Необходимо также учитывать, что понятие температуры поверхности и температуры воздуха не равны между собой [Балдина и др., 2015].

Для количественной оценки взаимосвязей между ключевыми параметрами произведен расчет коэффициента корреляции Пирсона.

Корреляция — статистическая взаимосвязь двух или более случайных величин. Математической мерой корреляции двух случайных величин служит коэффициент корреляции.

В исследовании в процессе проведения корреляционного анализа отдельные признаки выполняют роль факторных переменных, оказывающих влияние, тогда как остальные признаки являются результирующими, подверженными данному воздействию. Влияющими факторами будут следующие показатели: застроенность и озелененность. В роли результирующего признака выступит показатель температуры поверхности земли.

Зависимости между признаками могут быть функциональными и корреляционными. Функциональные связи характеризуются полным соответствием между изменением факторного признака и изменением результирующей величины. Каждому значению признака-фактора соответствует определенное значение результирующего признака. В корреляционных связях между изменением факторного и результирующего признака нет полного

соответствия. При исследовании влияния озелененности на температуру поверхности земли наблюдаются корреляционные признаки; величины не имеют полного соответствия, но четко прослеживается траектория трансекты [Malik, 2019].

Корреляционный анализ используется при установлении тесноты зависимости между явлениями, процессами, объектами. Классификация корреляции:

- По направлению:
 - 1) прямая;
 - 2) обратная.

- По характеру:
 - 1) функциональная;
 - 2) статистическая.

- По величине:
 - 1) слабая ($0 \pm 0,4$);
 - 2) средняя ($0,4$ до $\pm 0,7$);
 - 3) сильная ($\pm 0,7$ до ± 1).

- По форме:
 - 1) линейная;
 - 2) нелинейная.

- По количеству корреляционных признаков:
 - 1) парная;
 - 2) множественная.

Z-преобразование Фишера используется в корреляции для преобразования коэффициента корреляции Пирсона в значение, которое можно использовать для расчета доверительного интервала. Формула z-преобразования Фишера (8) выглядит следующим образом:

$$zr = \ln ((1 + r) / (1 - r)) / 2 \quad (8).$$

Без расчета z-преобразования Фишера не представляется допустимым рассчитать доверительный интервал для коэффициента корреляции Пирсона. Именно благодаря z-преобразованию становится возможным обоснованно утверждать о достоверности и точности полученных данных по корреляционному анализу [Каган и др., 2024].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные материалы ДЗЗ были использованы для составления карт за 24-летний период по показателям «озелененность», «застроенность» и «температура поверхности земли» (рис. 1–6).

Коэффициент озелененности на территории г. Пятигорска в 2000 г. составил 72,8 %, при этом озелененные участки распределены равномерно по всей городской территории, исключая акватории водоемов.

В г. Пятигорске озелененность в 2024 г. достигает 60,7 %. Площадь, занимаемая древесной растительностью, составляет 29,6 %, травянисто-кустарниковой — 31,1 %.

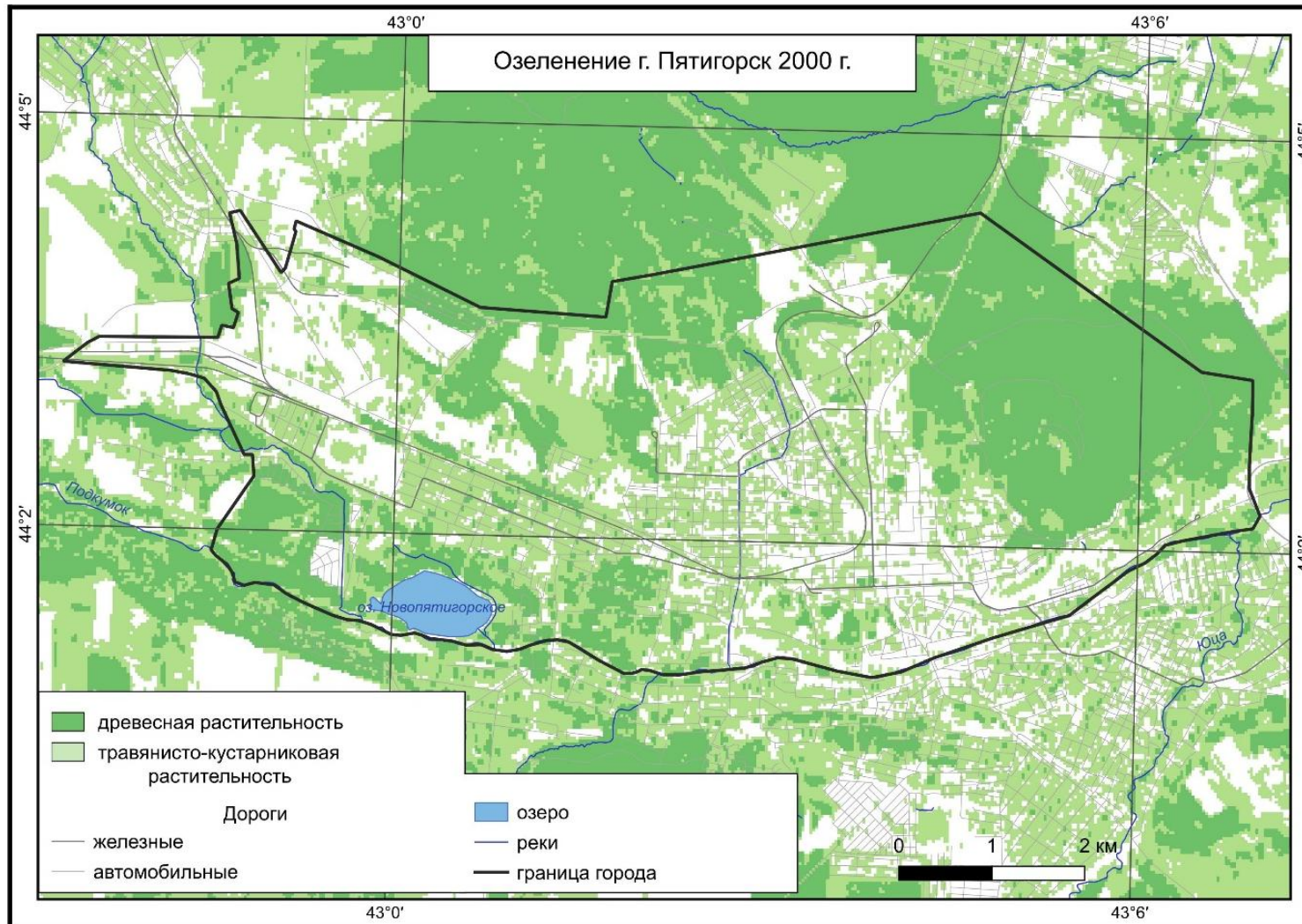


Рис. 1. Пространственное распределение озеленения г. Пятигорска (лето, 2000 г.)
 Fig. 1. Spatial distribution of landscaping in Pyatigorsk (summer, 2000)

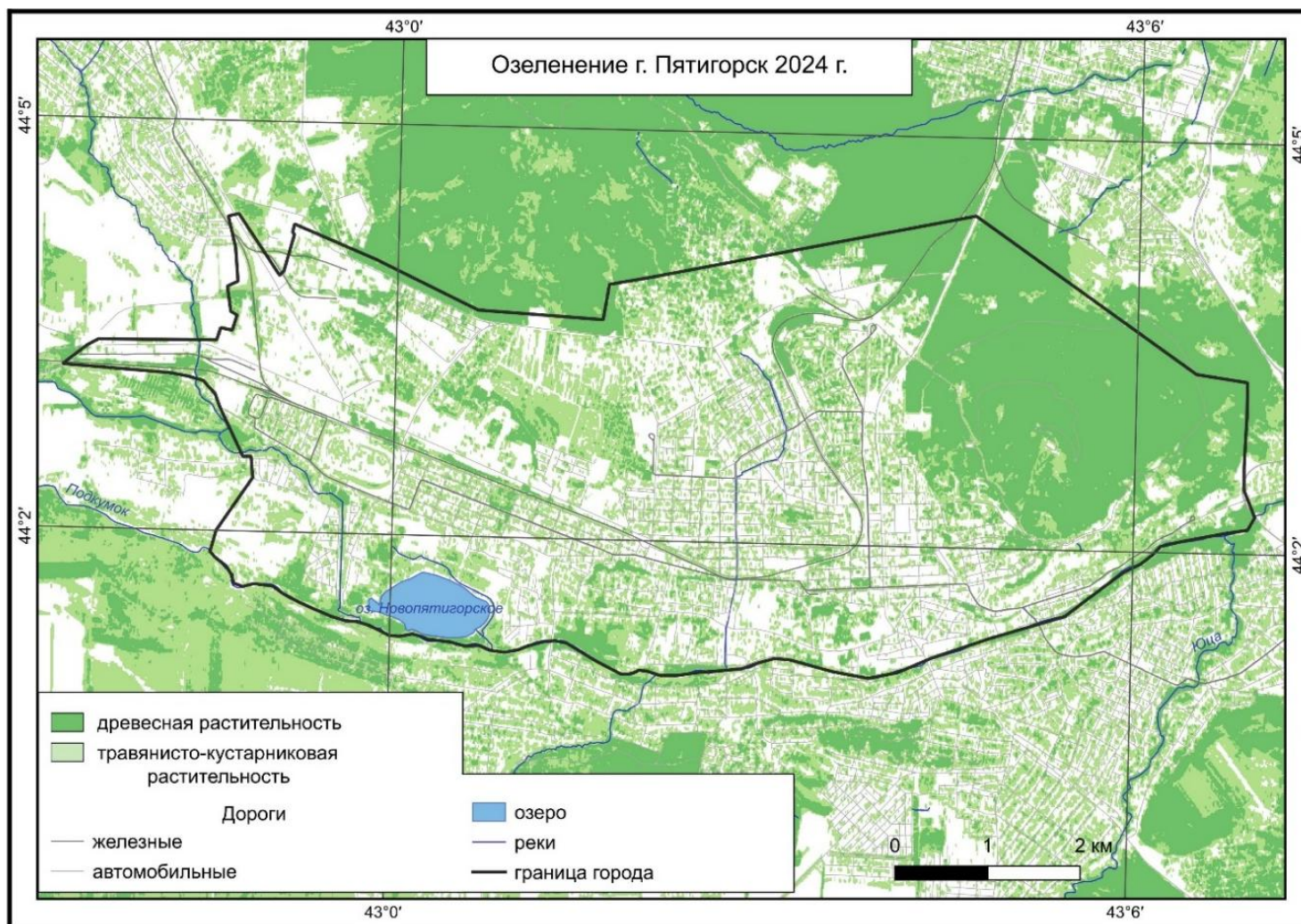


Рис. 2. Пространственное распределение озеленения г. Пятигорска (лето, 2024 г.)
 Fig. 2. Spatial distribution of landscaping in Pyatigorsk (summer, 2024)

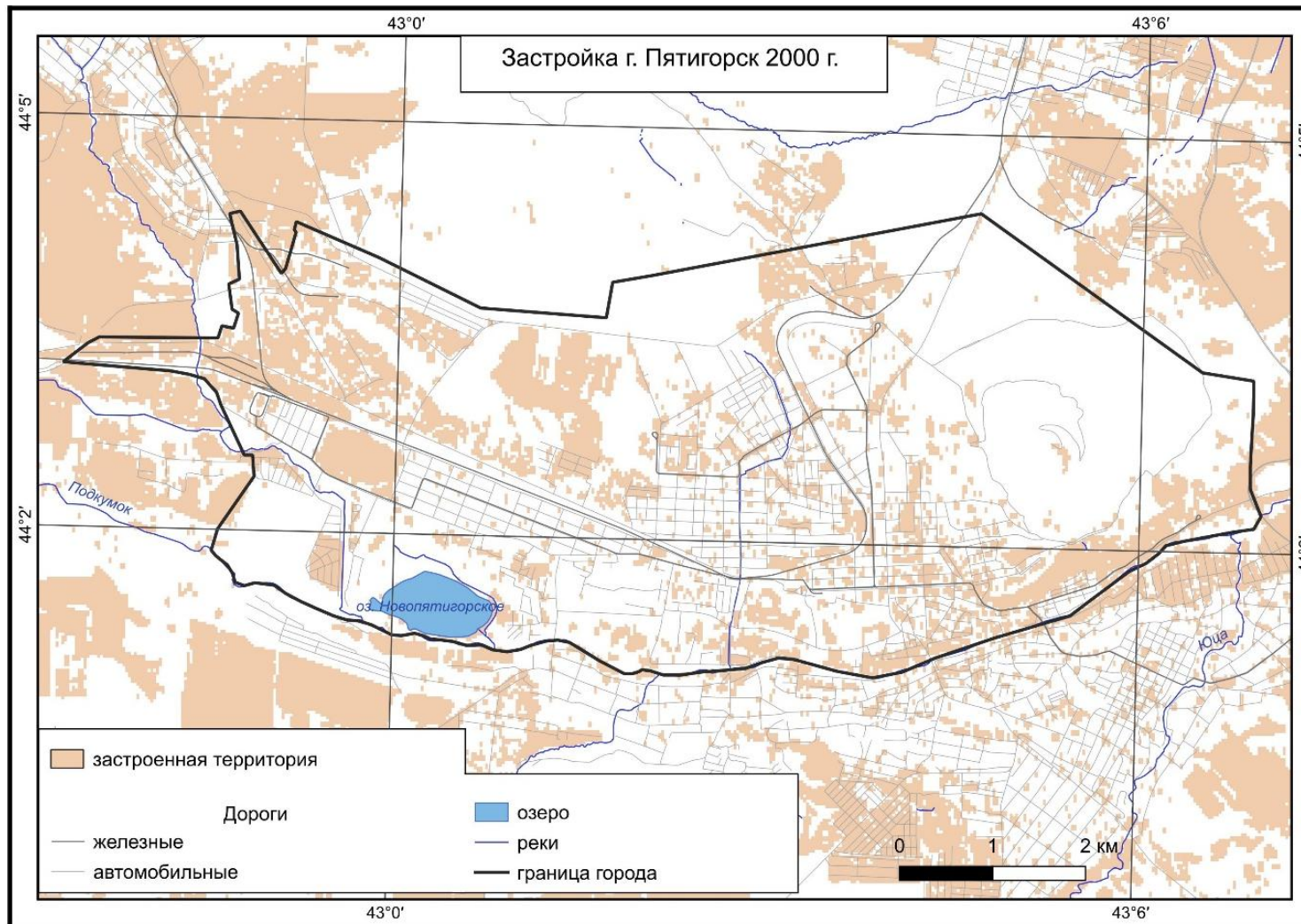


Рис. 3. Пространственное распределение застройки г. Пятигорска (лето, 2000 г.)
 Fig. 3. Spatial distribution of buildings in Pyatigorsk (summer, 2000)

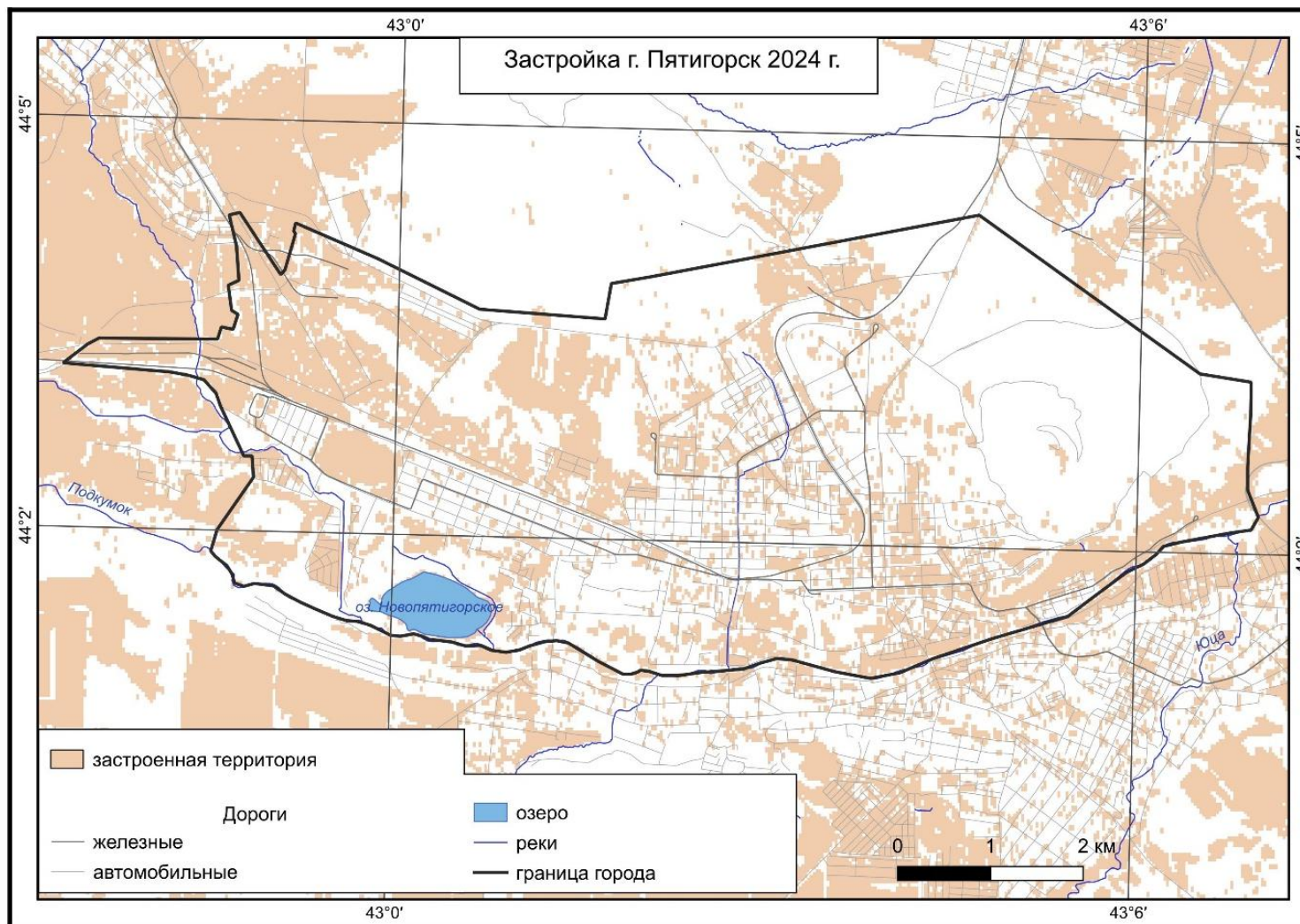


Рис. 4. Пространственное распределение застройки г. Пятигорска (лето, 2024 г.)
 Fig. 4. Spatial distribution of buildings in Pyatigorsk (summer, 2024)

За 24-летний период озелененность г. Пятигорска уменьшилась на 12,1 % (с 72,8 % до 60,7 %). Древесно-кустарниковая растительность сократилась на 5,3 %, а травянисто-кустарниковая — на 6,8 %. Сокращение растительности города-курорта обусловлено:

- интенсивной урбанизацией и увеличением площадей жилой и коммерческой застройки, сопровождающейся вырубкой деревьев и кустарников;
- уменьшением доли зеленых зон вследствие расширения транспортной инфраструктуры и строительства дорог;
- недостаточным финансированием мероприятий по благоустройству и озеленению территории города-курорта;
- старением и деградацией существующих зеленых насаждений, вызванных неблагоприятными условиями окружающей среды и недостатком ухода.

Уровень застроенности территории г. Пятигорска в 2000 г. составил 27,2 %. Пространственная структура городской застройки характеризуется расположением промышленной зоны преимущественно в западной части населенного пункта, при этом незначительная часть индустриальной инфраструктуры размещается также в северных и юго-восточных секторах. Жилые постройки распределены равномерно по всей территории города, преобладает преимущественно малоэтажный тип застройки.

Застроенность города-курорта за исследуемый период увеличилась с 27,2 до 39,3 %. Процесс активного строительства в городе начался с 2010 г. и продолжается по настоящее время. Наиболее востребованными объектами строительства являются частные жилые и многоэтажные жилые дома.

Карта температуры поверхности земли г. Пятигорска за 2000 г. построена на основе космических снимков со спутника Landsat-7 за 10 и 26 июля 2000 г. (рис. 5).

Карта температуры поверхности земли г. Пятигорска за 2024 г. построена на основе космоснимков со спутника Landsat-8 за 4, 13 и 29 июля 2024 г. (рис. 6).

Динамика показателя средней температуры поверхности земли города-курорта за исследуемый период составила +1,97 °C (с 29,27 °C до 31,24 °C). Показатель минимальной температуры поверхности земли города-курорта с 2000 по 2024 гг. изменился на +1,51 °C (с 22,34 °C до 23,85 °C). Показатель максимальной температуры поверхности земли вырос на 0,54 °C (с 40,46 °C до 41 °C).

Согласно данным службы изменения климата Европейского союза «Коперник» (Copernicus Climate Change Service)¹, ведущей европейской программы мониторинга окружающей среды, 2024 г. является самым теплым годом в истории.

Количественные показатели, полученные методом геоинформационного мониторинга на основании данных дистанционного космического зондирования, приведены в табл. 1.

Установленные закономерности и зафиксированная динамика пространственной перестройки зеленых зон, характеризующаяся их трансформацией в урбанизированные территории в рамках заданного хронологического периода, подтверждают высокую информативность методов геоинформационного мониторинга, основанных на детализированном картографическом анализе спутниковых снимков.

¹ Copernicus Climate Change Service. Электронный ресурс: <https://climate.copernicus.eu/> (дата обращения 12.03.2025)

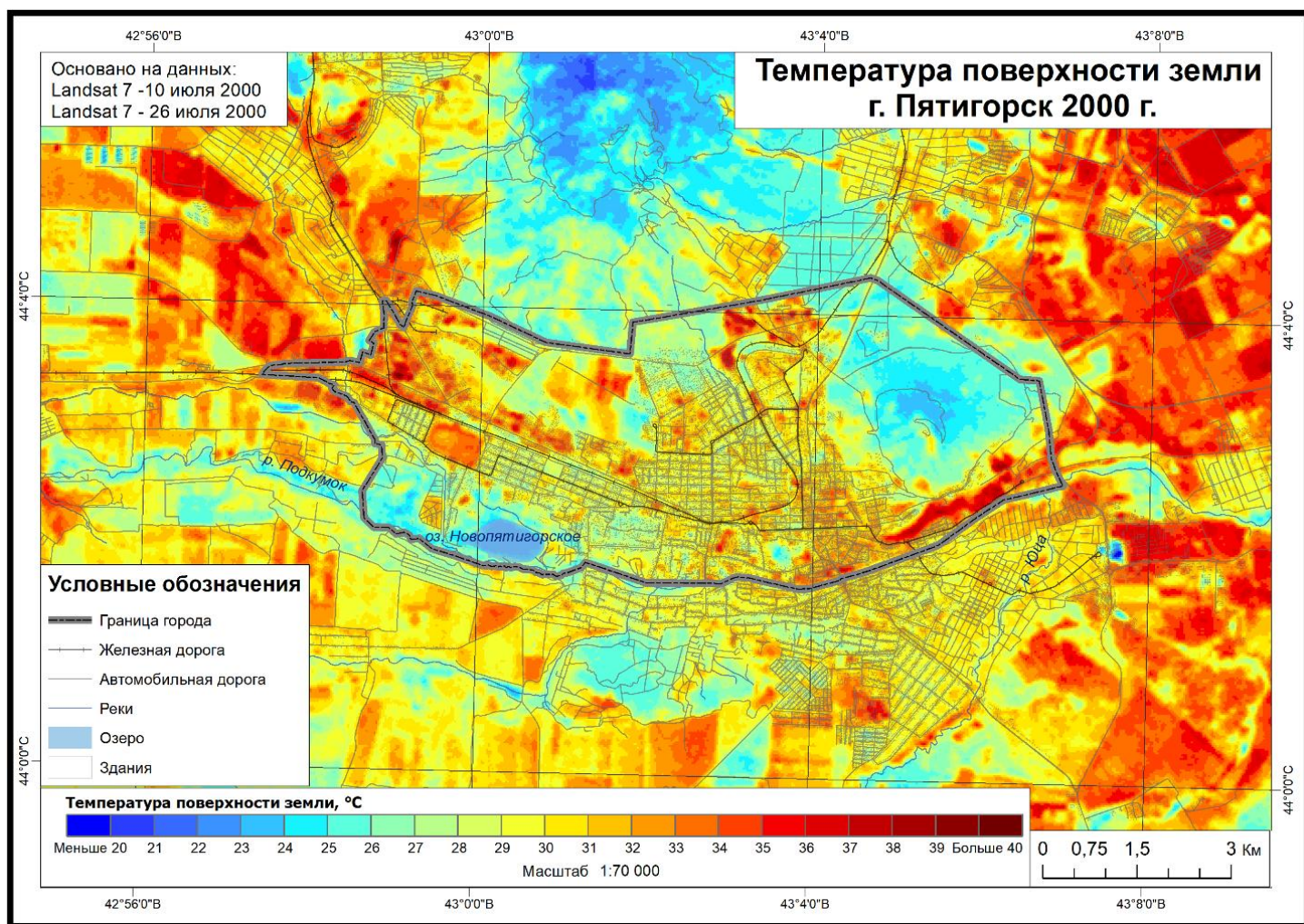
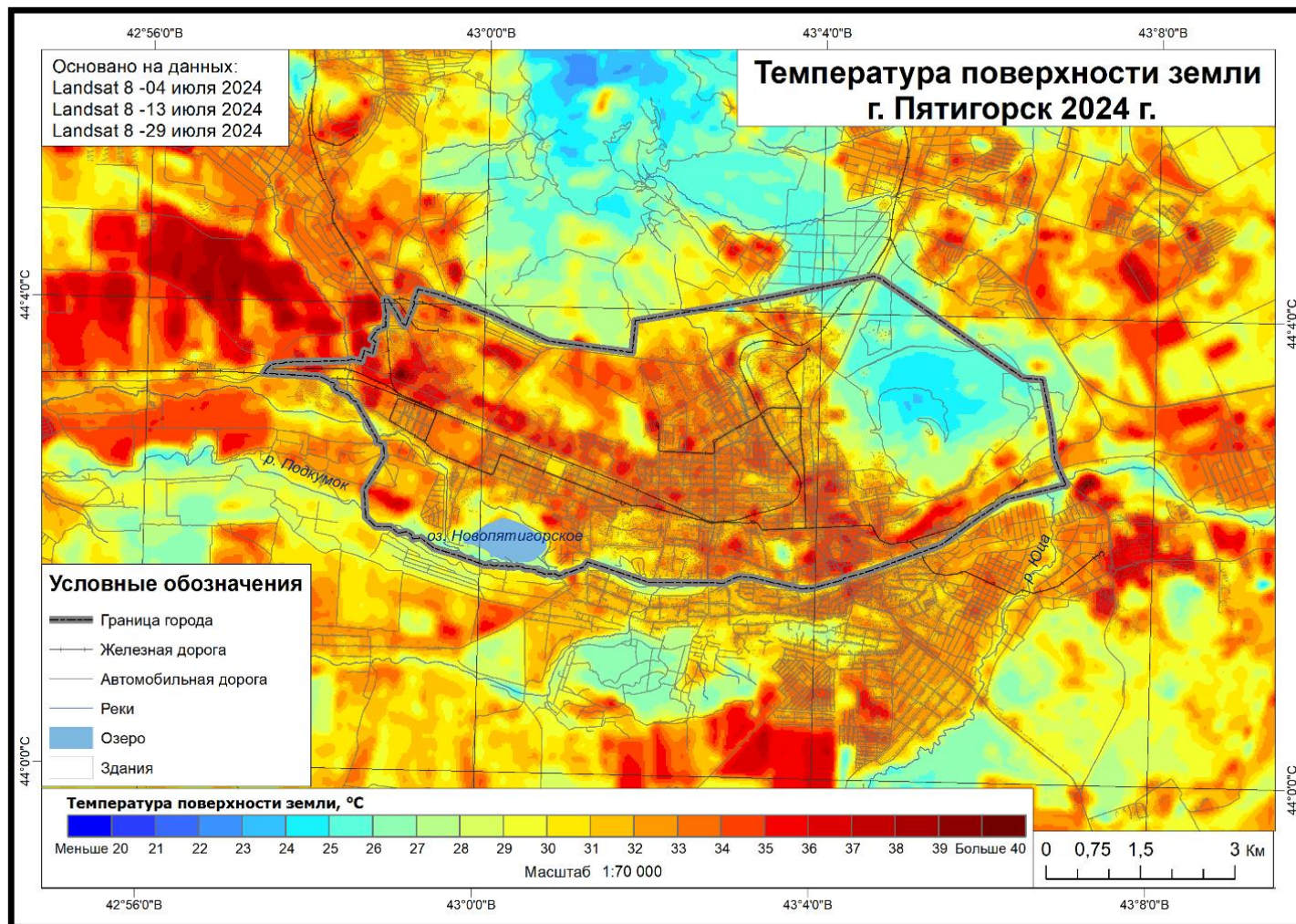


Рис. 5. Пространственное распределение температуры поверхности земли г. Пятигорска (лето, 2000 г., °С)
Fig. 5. Spatial distribution of the earth surface temperature in Pyatigorsk (summer, 2000, °C)



*Рис. 6. Пространственное распределение температуры поверхности земли
г. Пятигорска (лето, 2024 г., °С)*

*Fig. 6. Spatial distribution of the earth surface temperature
in Pyatigorsk (summer, 2024, °C)*

Табл. 1. Количественные значения исследуемых показателей
г. Пятигорска за 2000–2024 гг.

Table 1. Quantitative values of the studied indicators
of the resort city of Pyatigorsk for 2000–2024

Показатель Год	Температура поверхности земли, °С			Озелененность, %		Застроенность, %
	Максимальное значение, °С	Минимальное значение, °С	Среднее значение, °С	Травянисто- кустарниковая растительность, %	Древесная растительность, %	
2000	35,34	22,59	26,25	72,8		27,2
				37,9	34,9	
2005	31,04	20,76	23,49	70,1		29,9
				36,3	33,8	
2008	33,55	23,25	25,97	67,2		32,8
				34,1	33,1	
2011	32,49	22,79	24,78	65,1		34,9
				33,3	31,8	
2016	33,22	24,29	24,29	63,0		37,0
				32,3	30,7	
2020	36,03	23,25	26,34	61,6		38,4
				31,6	30,0	
2024	35,02	23,82	27,1	60,7		39,3
				31,1	29,6	

Для подтверждения обоснованности полученных выводов применен математический метод статистической обработки данных, в частности процедура корреляционного анализа.

Исходя из полученных данных (табл. 1) проведен корреляционный анализ Пирсона. При расчете корреляционной матрицы исключены такие показатели, как максимальная и минимальная температуры поверхности земли. Значения коэффициентов корреляции Пирсона представлены в табл. 2.

Табл. 2. Коэффициент корреляции Пирсона
Table 2. Pearson correlation coefficient

Переменные Значения	Температура поверхности земли – озелененность	Температура поверхности земли – застроенность
Коэффициент корреляции Пирсона	–0,301	0,301
n (объем выборки)	7	7
z	–0,311	0,311
se	0,05	0,05
c_95 %	1,959	1,959
Нижняя 95 % граница zL	–1,291	–0,668
Верхняя 95 % граница zU	0,668	1,291
Нижняя 95 % граница rL	–0,859	–0,584
Верхняя 95 % граница rU	0,584	0,859

Корреляция показателей «температура поверхности земли – озелененность» по направлению является обратной, по величине слабой — $-0,301$. Z-статистика составляет $-0,311$, а критическое значение для уровня значимости $0,05$ составляет $1,959$. Выявлено наличие слабой отрицательной линейной зависимости, т. е. с увеличением одной переменной другая уменьшается и наоборот. На рис. 7 представлена корреляционная прямая с верхними и нижними пределами.

Корреляция же показателей «температура поверхности земли – застроенность» по направлению является прямой, по величине слабой — $0,301$. Z-статистика — $0,311$, критическое значение для уровня значимости $0,05$ — также $1,959$. Выявлено наличие слабой положительной линейной зависимости, т. е. с увеличением одной переменной, другая также увеличивается и наоборот. Корреляционная прямая с нижними и верхними пределами отображена на рис. 8.

Исходя из значений Z-статистики, а также нижней и верхней границ доверительного интервала, можно сделать вывод о статистической значимости полученного коэффициента корреляции.

Комплексное сочетание задействованных методов, включающее дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), картографическое моделирование и статистическую обработку данных, позволило сформировать аргументированное представление о фактическом состоянии городской среды. Выполненные интегративные аналитические процедуры дают понимание о характере взаимовлияния ключевых параметров — степени озелененности, уровня застроенности и температуры поверхности земли, подчеркивая присутствие иных факторов, оказывающих дополнительное воздействие на городскую среду.

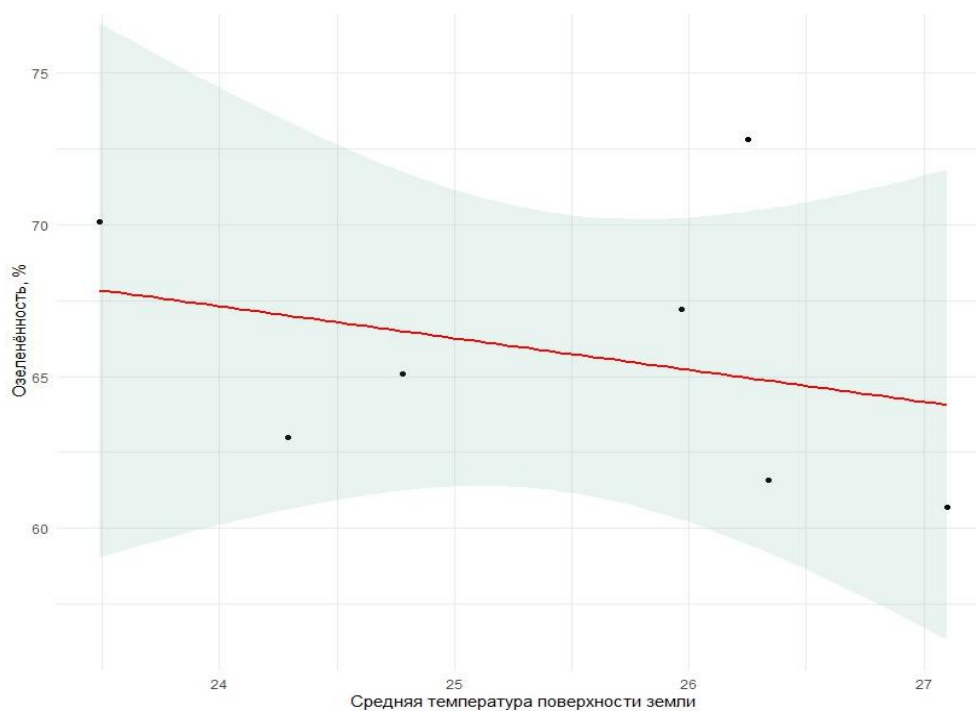


Рис. 7. Зависимость озелененности и температуры поверхности земли (г. Пятигорск, 2000–2024 гг.)

Fig. 7. Dependence of greening and temperature of the earth surface (Pyatigorsk, 2000–2024)

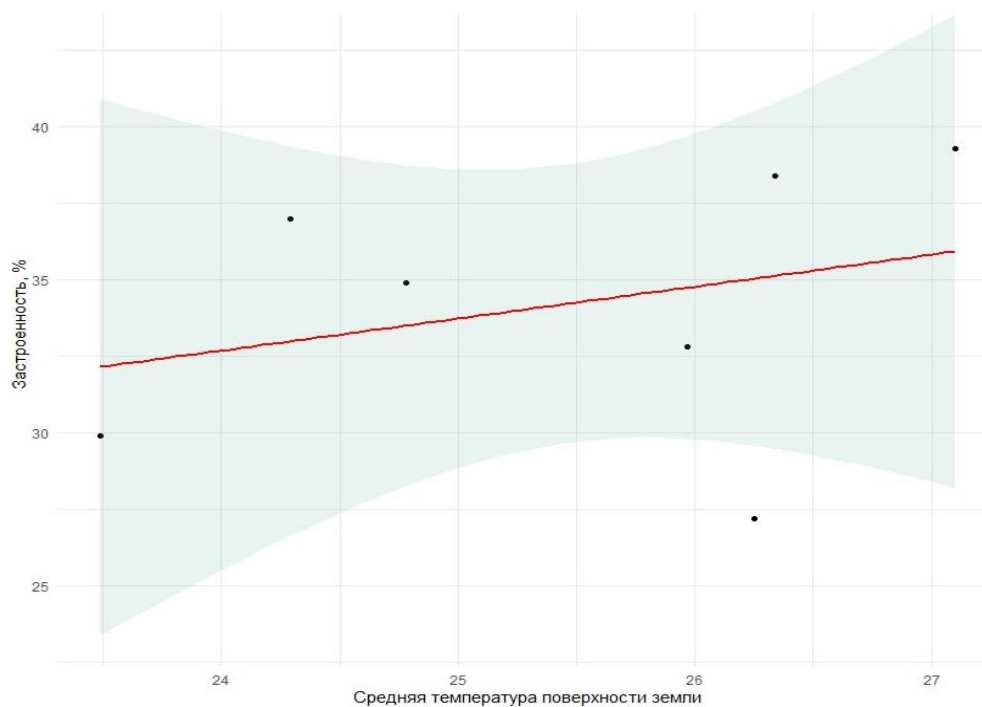


Рис. 8. Зависимость застроенности и температуры поверхности земли (г. Пятигорск, 2000–2024 гг.)

Fig. 8. Dependence of the built-up area and temperature of the earth surface (Pyatigorsk, 2000–2024)

Применительно к городской среде Пятигорска дополнительными переменными величинами, влияющими на температуру поверхности земли, являются:

- 1) архитектурно-градостроительные особенности, включающие плотность размещения многоэтажных строений, ориентацию улично-дорожной сети и внутриквартальных пространств относительно солнечной инсоляции, а также конфигурацию дворового пространства;
- 2) инженерно-техническая городская инфраструктура, включающая систему подземных коммуникаций, сеть канализации, магистральные теплотрассы и дождевую систему водоотвода;
- 3) орографические характеристики территории города, характеризующиеся гористым рельефом, наклонными поверхностями возвышенностей, присутствием террасированных участков, оказывающих существенное влияние на процессы обмена теплом между поверхностью и атмосферой;
- 4) гидрологические объекты естественного и искусственного происхождения, такие как малые водотоки, ирригационные каналы и искусственные водоемы, что способствуют формированию охлаждающего эффекта на прилегающие территории путем снижения температуры приземного слоя воздуха;
- 5) транспортные магистрали, характеризующиеся выделением тепла от автотранспорта, аккумуляцией избыточного тепла асфальтобетонным покрытием дорожного полотна и формированием застойных зон воздушных масс вдоль крупных трасс;
- 6) туристско-рекреационный фактор, проявляющийся в повышении сезонной интенсивности эксплуатации инфраструктурных объектов, приводящей к образованию локальных зон повышенной температуры вокруг отелей, лечебно-оздоровительных учреждений и популярных туристских маршрутов.

ВЫВОДЫ

Исследование, проведенное с использованием методов дистанционного зондирования Земли и геоинформационного анализа, выявило пространственно-временные изменения уровня озелененности, застроенности и температурных характеристик поверхности земли в г. Пятигорске за период с 2000 по 2024 гг. Установлено, что за этот период произошло снижение уровня озелененности и рост застроенности, что сопровождалось увеличением средней температуры поверхности земли на 1,97 °С.

Показатель застроенности отражает постепенное увеличение уровня застройки, что связано с урбанизацией и ростом населения. Показатель травянисто-кустарниковой растительности показывает снижение, что связано с увеличением застройки и сокращением зеленых зон. Показатель древесной растительности демонстрирует незначительное снижение, обусловленное вырубкой лесов и заменой их на другие типы растительности.

Средний темп роста застроенности и снижения озелененности составляют порядка 10 %. Учитывая темпы роста застроенности и снижения озелененности, важно внедрить системы мониторинга и управления городской средой. Это позволит своевременно реагировать на изменения и принимать меры для сохранения баланса между урбанизацией и экологией.

Корреляционный анализ показал слабую отрицательную зависимость между уровнем озелененности и температурой поверхности земли, а также слабую положительную зависимость между температурой и уровнем застроенности. Эти данные подтверждают, что снижение озелененности и увеличение застроенности способствуют повышению температуры в городе, что выражается в создании т. н. «островов тепла».

Существует корреляция между увеличением застройки и изменением температуры поверхности земли, что подтверждает гипотезу о влиянии урбанизации на микроклимат

города. Снижение площади зеленых насаждений (как травянистой, так и древесной растительности) связано с ростом застройки и изменением климатических условий.

При выявленных зависимостях общей направленности трансекты между исследуемыми показателями — уровнем озелененности, степенью застроенности и температурой поверхности земли — количественное сопоставление, проведенное с использованием статистического корреляционного анализа, не демонстрирует абсолютного совпадения и очевидной идентичности значений. Это свидетельствует о наличии множественности определяющих факторов, что позволяет сделать вывод о целесообразности поиска дополнительных причин и обуславливает необходимость дальнейшего углубленного изучения.

Помимо изученных факторов, на формирование температурных аномалий влияют орографические особенности местности, гидрологическая характеристика территории, архитектурно-градостроительная планировка и инженерная инфраструктура. Эти аспекты также способствуют повышению температуры в некоторых частях города, создавая дополнительные локальные аномалии.

Результаты исследования подчеркивают необходимость комплексного подхода к градостроительству и экологическому планированию для смягчения микроклиматических рисков и повышения устойчивости городской среды к изменениям климата. Для обеспечения устойчивого развития и улучшения микроклиматических условий в г. Пятигорске необходимо принимать меры по увеличению озелененности и оптимизации градостроительных процессов.

Методологический подход демонстрирует применимость к другим населенным пунктам, обеспечивая основу для выявления пространственной неоднородности температуры поверхности земли. Предложенный подход создает условия для дальнейшего локального исследования конкретных причин и разработки целевых мер, направленных на снижение негативного воздействия и улучшение городской среды.

Необходимо проведение дополнительных исследований для выявления причин и механизмов этих изменений, а также для разработки мер по улучшению экологической ситуации в городе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балдина Е. А., Константинов П. И., Грищенко М. Ю., Варенцов М. И. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном диапазоне. Земля из космоса, 2015. № 5. С. 38–42.

Каган М. Б., Позднякова Н. А., Андреева Т. А., Тасенко Д. С., Скрипчинская Е. А., Ракова А. И. Взаимосвязь сезонного изменения светового загрязнения и вегетационного индекса на примере города Санкт-Петербург. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов в условиях кризиса. Материалы Международной конференции. М.: МГУ, Географический факультет, 2024. Т. 30. Ч. 2. С. 482–497. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-482-497.

Оленьков В. Д., Бирюков А. Д., Сухоруков В. А. Использование данных дистанционного зондирования земли для построения карты городского острова тепла. Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году. Сборник научных трудов РААСН. Москва: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2020. С. 286–294.

Скрипчинская Е. А., Тасенко Д. С., Каган М. Б. Пространственно-временная динамика теплового загрязнения среды г. Эссентуки. Наука. Инновации. Технологии, 2024. № 2. С. 63–96. DOI: 10.37493/2308-4758.2024.2.3.

Тасенко Д. С., Скрипчинская Е. А., Водопьянова Д. С., Нефедова М. В. Озелененность, градостроительная нагрузка и свободная территория как ведущие показатели современного состояния городской среды в Предгорном районе Ставропольского края (на примере г. Ессентуки). Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 2022. Т. 16. № 4. С. 100–106.

Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.

Черкасов А. А., Махмудов Р. К. Атласная информационная система «население Ставропольского края». Геодезия и картография, 2022. Т. 83. № 12. С. 31–39.

Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

Dissanayake D., Morimoto T., Ranagalage M., Murayama Y. Land-Use/Land-Cover Changes and Their Impact on Surface Urban Heat Islands: Case Study of Kandy City, Sri Lanka. *Climate*, 2019. V. 7. Art. 99. DOI: 10.3390/cli7080099.

Furberg D., Ban Y., Nascetti A. Monitoring of Urbanization and Analysis of Environmental Impact in Stockholm with Sentinel-2A and SPOT-5 Multispectral Data. *Remote sensing*, 2019. V. 11. Iss. 20. Art. 2408. DOI: 10.3390/rs11202408.

Knight S., Smith C., Roberts M. J. Mapping Manchester's Urban Heat Island. *Weather*, 2010. V. 65. Iss. 7. P. 188–193. DOI: 10.1002/wea.542.

Malik M. S., Shukla J. P., Mishra S. N. Relationship of LST, NDBI and NDVI using Landsat-8 Data in Kandaihimmat Watershed, Hoshangabad, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2019. V. 48. Iss. 1. P. 25–31.

Mason S. G., Fragkias M. Metropolitan Planning Organizations and Climate Change Action. *Urban Climate*, 2018. V. 25. P. 37–50. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.04.004.

Masson V., Lemonsu A., Hidalgo J., Voogt J. Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 2020. V. 45. Iss. 1. P. 411–444. DOI: 10.1146/annurev-environ-012320-083623.

Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A. *Urban Climate*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017. 546 p.

REFERENCES

Baldina E. A., Konstantinov P. I., Grishchenko M. Y., Varentsov M. I. Exploring Urban Heat Islands using Infrared Remote Sensing Data. *Earth from Space*, 2015. No. 5. P. 38–42 (in Russian).

Chandra A. M., Ghosh S. K. *Remote Sensing and Geographic Information Systems*. Moscow: Technosphaera, 2008. 312 p. (in Russian).

Cherkasov A. A., Makhmudov R. K. Atlas Information System “Population of the Stavropol Territory”. *Geodesy and Cartography*, 2022. V. 83. No. 12. P. 31–39 (in Russian).

Dissanayake D., Morimoto T., Ranagalage M., Murayama Y. Land-Use/Land-Cover Changes and Their Impact on Surface Urban Heat Islands: Case Study of Kandy City, Sri Lanka. *Climate*, 2019. V. 7. Art. 99. DOI: 10.3390/cli7080099.

Furberg D., Ban Y., Nascetti A. Monitoring of Urbanization and Analysis of Environmental Impact in Stockholm with Sentinel-2A and SPOT-5 Multispectral Data. *Remote sensing*, 2019. V. 11. Iss. 20. Art. 2408. DOI: 10.3390/rs11202408.

Kagan M. B., Pozdnyakova N. A., Andreeva T. A., Tasenko D. S., Skripchinskaya E. A., Rakova A. I. The Relationship Between Seasonal Changes in Light Pollution and the Vegetation Index

on the Example of the City of St. Petersburg. InterCarto. InterGIS. GI Support of Sustainable Development of Regions in Crisis Conditions. Proceedings of the International Conference. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2024. V. 30. Part 2. P. 482–497 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-482-497.

Knight S., Smith C., Roberts M. J. Mapping Manchester's Urban Heat Island. *Weather*, 2010. V. 65. Iss. 7. P. 188–193. DOI: 10.1002/wea.542.

Malik M. S., Shukla J. P., Mishra S. N. Relationship of LST, NDBI and NDVI using Landsat-8 Data in Kandaihimmat Watershed, Hoshangabad, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2019. V. 48. Iss. 1. P. 25–31.

Mason S. G., Fragkias M. Metropolitan Planning Organizations and Climate Change Action. *Urban Climate*, 2018. V. 25. P. 37–50. DOI: 10.1016/j.uclim.2018.04.004.

Masson V., Lemonsu A., Hidalgo J., Voogt J. Urban Climates and Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 2020. V. 45. Iss. 1. P. 411–444. DOI: 10.1146/annurev-environ-012320-083623.

Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A. *Urban Climate*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017. 546 p.

Olenkov V. D., Biryukov A. D., Sukhorukov V. A. Using Earth Remote Sensing Data to Build a Map of an Urban Heat Island. *Fundamental, Exploratory and Applied Research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the Construction Industry of the Russian Federation in 2019*. Collection of scientific papers of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Moscow: Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 2020. P. 286–294 (in Russian).

Shovengerdt R. A. *Remote Sensing. Models and Methods of Image Processing*. Moscow: Technosphaera, 2010. 560 p. (in Russian).

Skripchinskaya E. A., Tasenko D. S., Kagan M. B. Spatial-Temporal Dynamics of Thermal Pollution of the Environment in Essentuki. *Science. Innovations. Technologies*, 2024. No. 2. P. 63–96 (in Russian). DOI: 10.37493/2308-4758.2024.2.3.

Tasenko D. S., Skripchinskaya E. A., Vodopyanova D. S., Nefedova M. V. Landscaping, Urban Planning Load and Free Territory as Leading Indicators of the Current State of the Urban Environment in the Foothill Area of the Stavropol Territory (on the Example of Essentuki). *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*, 2022. V. 16. No. 4. P. 100–106 (in Russian).
