

УДК: 911.9

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-3-31-195-211

В. А. Добрякова¹, Ю. В. Белова², Л. Д. Черемных³**ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКОГО
ОСТРОВА ТЕПЛА НА ПРИМЕРЕ Г. ТЮМЕНИ****АННОТАЦИЯ**

В статье представлены результаты исследования и моделирования городского острова тепла в г. Тюмени на основе анализа космических снимков Landsat-8 и картографических данных OpenStreetMap. Построена регрессионная модель, описывающая зависимость температурных характеристик от ключевых пространственных факторов городской среды, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,627$. Выявлено, что наиболее значимыми факторами, определяющими интенсивность городского острова тепла, являются площадь зданий, площадь водных объектов, площадь пашни, а также расстояния до открытой воды, основных автодорог и промышленных объектов. Установлена отрицательная корреляция между температурой поверхности и наличием объектов водно-зеленой инфраструктуры. Анализ пространственного распределения температур позволил выявить четыре ярко выраженные зоны с повышенной температурой внутри городского острова тепла: крупная область повышенной температуры на правом берегу р. Туры, охватывающая центральную часть города и районы новой многоэтажной застройки; зона на левом берегу реки, распространившаяся вдоль ул. Щербакова и Тобольского тракта; зона, связанная с распаханной сельскохозяйственными угодьями за объездной дорогой; зона, охватывающая аэропорт Рошино с прилегающим поселком. Построены два температурных профиля через центр города, подтверждающие значительную протяженность городского острова тепла (более 50 км вдоль реки и более 40 км в перпендикулярном направлении) и выраженное охлаждающее воздействие водно-зеленой инфраструктуры. Несмотря на статистическую значимость модели, выявлена пространственная кластеризация невязок, что указывает на необходимость дальнейшего ее совершенствования. Результаты исследования имеют практическую значимость для жизнестойкого городского планирования и разработки мер по снижению термического стресса населения, особенно в районах с высокой плотностью застройки и недостаточным количеством водно-зеленой инфраструктуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городской остров тепла, пространственный анализ, регрессионная модель

¹ Тюменский государственный университет, Школа естественных наук, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail*: v.a.dobryakova@utmn.ru

² Тюменский государственный университет, Школа естественных наук, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail*: y.v.belova@utmn.ru

³ Тюменский государственный университет, Школа естественных наук, ул. Володарского, д. 6, Тюмень, Россия, 625003, *e-mail*: sulkarnaeva1992@mail.ru

Valentina A. Dobryakova¹, Julia V. Belova², Liliya D. Cheremnykh³

STUDY AND MODELING OF THE URBAN HEAT ISLAND: THE CASE OF TYUMEN CITY

ABSTRACT

The article presents the results of research and modeling of the urban heat island in Tyumen based on the analysis of Landsat-8 satellite imagery and OpenStreetMap cartographic data. A regression model has been developed that describes the dependence of temperature characteristics on key spatial factors of the urban environment, with a determination coefficient $R^2 = 0.627$. It was revealed that the most significant factors determining the intensity of the urban heat island are the area of buildings, the area of water bodies, the area of arable land, as well as distances to open water, major roads, and industrial facilities. A negative correlation was established between surface temperature and the presence of blue-green infrastructure objects. Analysis of the spatial distribution of temperatures revealed four distinct zones with elevated temperatures within urban heat island territory: a large zone with elevated land surface temperature on the right bank of the Tura River, covering the central part of the city and areas of new multi-story development; a zone on the left bank of the river, spreading along Shcherbakova Street and the Tobolsk Highway; a zone associated with plowed agricultural land beyond the bypass road; and a zone covering Roshchino Airport with the adjacent settlement. Two temperature profiles were constructed through the city center, confirming the significant extent of the urban heat island (more than 50 km along the river and more than 40 km in the perpendicular direction) and the pronounced cooling effect of blue-green infrastructure. Despite the statistical significance of the model, spatial clustering of residuals was identified, indicating the need for further model improvement. The research results have practical significance for resilient urban planning and the development of measures to reduce thermal stress for the population, especially in areas with high building density and insufficient blue-green infrastructure.

KEYWORDS: urban heat island, spatial analysis, regression model

ВВЕДЕНИЕ

Явление повышенных температур в урбанизированных районах относительно окружающих сельских территорий, известное как эффект городского острова тепла (Urban Heat Island, УИ), приобретает все большую актуальность в контексте глобальных климатических изменений [Климанова и др., 2018; Оке, 1982; Arnfield, 2003]. В условиях глобального изменения климата и интенсивной урбанизации эффект УИ становится значимым фактором, влияющим на здоровье населения, особенно уязвимых групп — пожилых людей, детей и лиц с хроническими заболеваниями [Bowler et al., 2010].

Городская среда представляет собой сочетание водно-зеленой (водоемы, леса, парки, пашни) и серой (дороги, здания, промышленные объекты) инфраструктуры [Mell et al., 2013]. Объекты серой инфраструктуры усиливают городской остров тепла через поглощение солнечной радиации материалами с низким альбедо, высокую теплоемкость строительных материалов и изменение воздушной циркуляции [Arnfield, 2003]. Напротив,

¹ University of Tyumen, School of Natural Sciences, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia, e-mail: v.a.dobryakova@utmn.ru

² University of Tyumen, School of Natural Sciences, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia, e-mail: y.v.belova@utmn.ru

³ University of Tyumen, School of Natural Sciences, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia, e-mail: sulkarnaeva1992@mail.ru

водно-зеленая инфраструктура оказывает охлаждающий эффект через затенение, эвапотранспирацию и модификацию воздушных потоков [Bowler et al., 2010; Santamouris, 2014].

К ключевым факторам формирования городского острова тепла относятся плотность застройки [Stewart Oke, 2012], характеристики подстилающей поверхности [Zhao et al., 2014], соотношение запечатанных и природных поверхностей [Yuan Bauer, 2007], площадь зеленых насаждений [Bowler et al., 2010] и антропогенная эмиссия тепла [Ichinose et al., 1999].

Термический стресс, возникающий вследствие повышенных температур, может проявляться от легкого дискомфорта до серьезных патологических состояний и обострения хронических заболеваний [Kovats, Hajat, 2008]. Выявление городских территорий с повышенным риском термического стресса позволяет целенаправленно планировать профилактические мероприятия и оптимизировать распределение медицинских ресурсов в периоды экстремальной жары [Bowler et al., 2010].

Тюмень представляет собой репрезентативный объект для изучения городского острова тепла в условиях континентального климата Западной Сибири. Город характеризуется резко-континентальным климатом с годовой амплитудой температур до 38 °С. Тюмень активно развивается, ее население выросло с 544 тыс. в 2010 г. до более 816 тыс. в 2022 г. Интенсивное строительство новых жилых кварталов приводит к значительному увеличению площадей с твердым покрытием и изменению теплового баланса территории.

Особенностью городской структуры г. Тюмени является наличие исторического центра с плотной застройкой на правом берегу р. Туры, новых районов на левом берегу и значительных промышленных зон. Неравномерное распределение зеленых насаждений и водных объектов создает предпосылки для формирования острова тепла с неоднородной структурой [Добрякова, Сулкарнаева, 2021].

В контексте смягчения эффекта городского острова тепла особое значение приобретает экосистемная услуга «Охлаждающий эффект», предоставляемая объектами водно-зеленой инфраструктуры [Norton et al., 2015]. Понимание вклада различных типов таких объектов имеет высокую практическую значимость для городского планирования.

Актуальность исследования обусловлена:

- глобальным потеплением;
- демографическими тенденциями, ведущими к увеличению доли уязвимого населения [Щербакова, 2019];
- интенсивным развитием г. Тюмени;
- недостаточной изученностью УИ в городах Сибири;
- необходимостью разработки научно обоснованных подходов к организации профилактических мероприятий в системе здравоохранения и соответствием исследования целям национальных проектов «Экологическое благополучие», «Инфраструктура для жизни», «Продолжительная и активная жизнь».

Цель этого исследования — создать регрессионную модель городского острова тепла г. Тюмени для выявления ключевых факторов, определяющих распределение температур, идентификации зон с повышенным риском термического стресса и прогнозирования изменений теплового режима при различных сценариях развития территории.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки мер по снижению термической нагрузки на население, планирования городской среды с учетом потребностей в экосистемной услуге «Охлаждающий эффект», а также для организации профилактических мероприятий в сфере здравоохранения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе использовалась регрессионная модель, описывающая зависимость температурных характеристик от пространственных параметров городской среды.

Тематические данные

Зависимая переменная — температура поверхности. Данные получены в результате агрегирования значений температуры поверхности, определенных на основе обработки космических снимков Landsat-8 (тепловой канал инструмента — TIRS, Band 10, диапазон канала 10,6–11,19 нм). В данном исследовании мы использовали снимки Landsat-8 Collection 2, уровня обработки Level-1 (L1TP), сделанные 22.06.2015, 08.06.2016, 16.07.2018, 06.08.2020, 06.06.2021, 08.07.2021 и 08.07.2024.

Отбор снимков производится по следующим критериям:

1. Снимки получены с одного витка и кадра пролета спутника, чтобы обеспечить совпадение пикселей всего набора снимков при вычислении среднего значения температуры всего набора снимков. Это также критически важно для проведения точного анализа и минимизации ошибок при интерпретации данных.
2. Облачность снимка не более 1 % на территорию исследования.
3. Подходящие климатические условия для проведения исследования включают продолжительную жаркую безоблачную погоду без осадков с температурой воздуха выше 23 °С. Такие условия позволяют выявить значительные и стабильные температурные различия на поверхности, что в свою очередь позволяет обнаружить факторы, оказывающие влияние на формирование городского острова тепла, а также подобрать независимые переменные для включения в модель.
4. Приоритет отдается снимкам, сделанным в летний сезон, особенно в июле и августе в полуденные часы [Газимов, Кужевская, 2021]. В этот период городская поверхность достигает максимальной температуры, что обеспечивает более выраженные температурные контрасты. В мае, например, поверхность нагревается медленнее, что делает данные менее информативными.

Существуют различные алгоритмы расчета для получения температуры поверхности Земли — LST (Land Surface Temperature). Одни более простые, основанные на линейной зависимости между количеством приходящего на сенсор излучения и температурой объекта. Другие алгоритмы являются более сложными, используют NDVI или классификацию типов земной поверхности, а также данные о состоянии атмосферы.

В нашем исследовании извлечение из космических снимков температур земной поверхности проводилось в модуле для обработки данных ДЗЗ Semi-Automatic Classification Plugin программы QGIS. Расчет температуры земной поверхности выполняется по формуле (1)¹:

$$TB = \frac{K_2}{\ln \left[\left(\frac{K_1}{L\lambda} \right) + 1 \right]} \quad (1),$$

где TB — температурная яркость на ТОА (К),
 $L\lambda$ — спектральная яркость ТОА (Вт / (м² * срад * мкм)),
 K_1, K_2 — константа теплового преобразования, указанная в файле метаданных, значения которых равны 774,8853 и 1 321,0789 соответственно.

¹ Документация плагина полуавтоматической классификации 8.3 (Semi-Automatic Classification Plugin Documentation). Электронный ресурс: https://semiautomaticclassificationmanual.readthedocs.io/en/latest/remote_sensing.html#conversion-to-temperature (дата обращения 10.02.2025)

Результатом вычислений будет яркостная температура, близкая к значениям физической температуры поверхности.

В ряде исследований далее проводится коррекция полученных значений температуры с учетом излучательной способности объектов поверхности, которую определяют на основе индекса NDVI. Подробный алгоритм расчета значений LST на основе показателя NDVI рассмотрен в работе [Ermida, 2020].

На основе данного алгоритма были рассчитаны значения LST по снимкам с датами съемки 08.06.2016 и 16.07.2018. Различия между LST и значениями температуры поверхности, полученными с помощью модуля Semi-Automatic Classification Plugin, оказались незначительными и составляли лишь десятые доли градуса. Кроме того, наше исследование фокусируется на относительных температурных показателях, которые хорошо различимы на снимках без необходимости учета излучательной способности объектов.

Для получения значений независимых переменных использовались векторные слои OpenStreetMap (административные границы, здания, дороги, леса и т. д.) за февраль 2025 г. (см. описание структуры данных¹). Данные векторные слои были частично верифицированы на основе снимков высокого пространственного разрешения с открытых картографических источников, а также снимков среднего пространственного разрешения со спутника Sentinel-2. Независимые переменные, включенные в регрессионную модель, делятся на два типа: «площади» и «расстояния».

Тип переменных «площади» включает данные по площадям:

- лесов;
- земельных участков;
- лесопарков и парков;
- водных объектов (открытая вода);
- болот;
- зданий (всего);
- многоэтажных зданий;
- пашни;
- гаражей;
- торговых центров;
- промышленных объектов.

В тип «расстояния» входят данные о расстояниях до:

- промышленных объектов;
- основных автодорог;
- водных объектов (открытая вода);
- болот.

Исследуемая территория — г. Тюмень в границах городского округа.

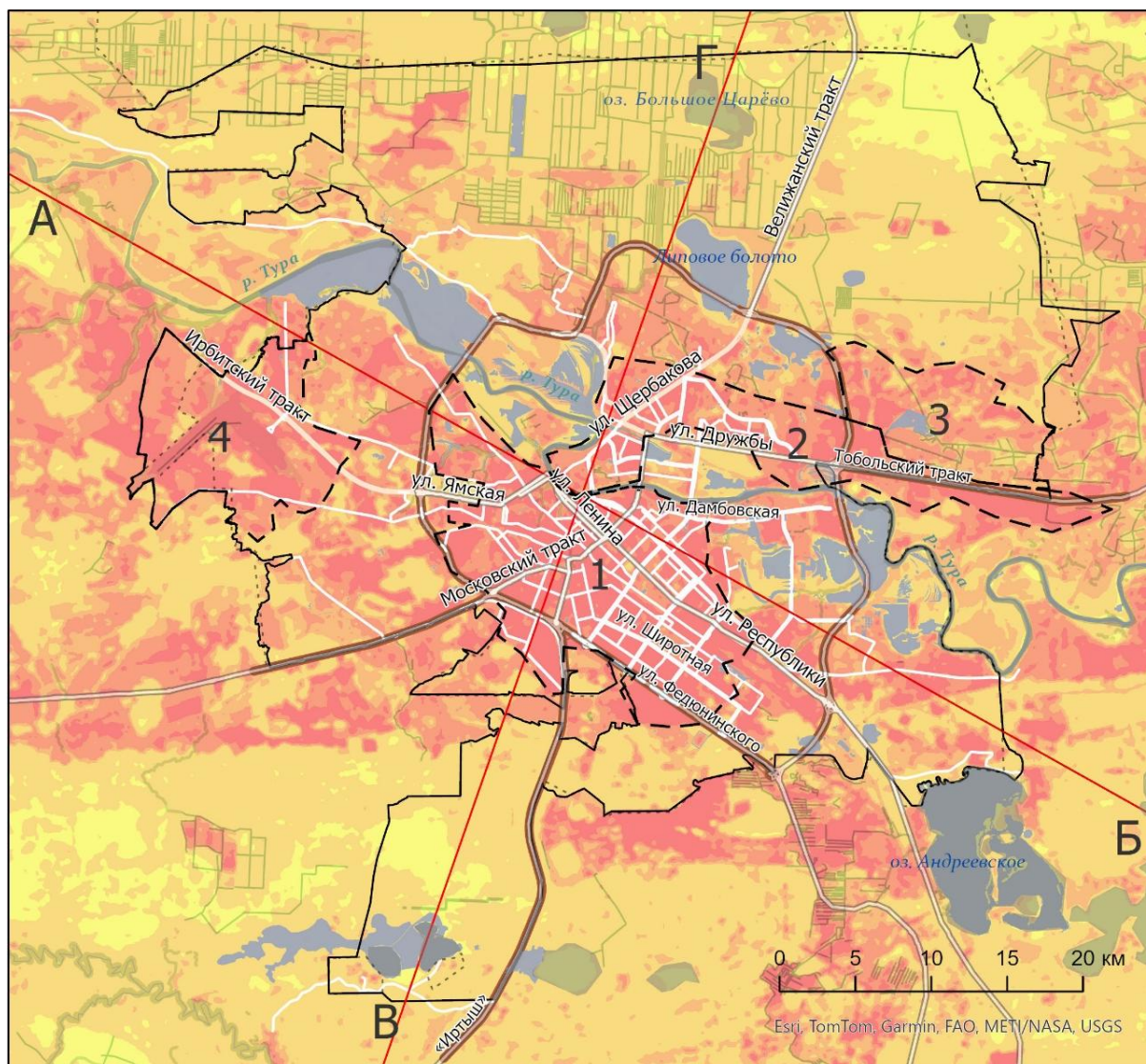
Городская территория была накрыта гексагональной сеткой с радиусом шестиугольника 500 м. Операционными единицами исследования являются ячейки (бины) построенной гексагональной сетки.

Перечисленные выше показатели площади рассчитывались в процентах в пределах бина, расстояния — как обратные ближайшие расстояния в метрах от бина до указанных объектов по прямой.

В качестве основного инструмента для расчетов, анализа и визуализации результатов использовалась программа ArcGIS Pro.

¹ Описание структуры данных OpenStreetMap. Электронный ресурс: <https://data.nextgis.com/ru/region/custom/base/> (дата обращения 10.02.2025)

Исходные данные распределения температур на исследуемой территории представлены на рис. 1. Дополнительно были построены два температурных профиля через центр города (рис. 2).



Условные обозначения




-  граница городского округа Тюмень
-  профильная линия
-  зоны повышенных температур



Рис. 1. Распределение среднего значения температуры по данным снимков Landsat-8 (22.06.2015, 08.06.2016, 16.07.2018, 06.08.2020, 06.06.2021, 08.07.2021, 08.07.2024)

Fig. 1. Distribution of mean temperature according to Landsat-8 imagery data (22.06.2015, 08.06.2016, 16.07.2018, 06.08.2020, 06.06.2021, 08.07.2021, and 08.07.2024)

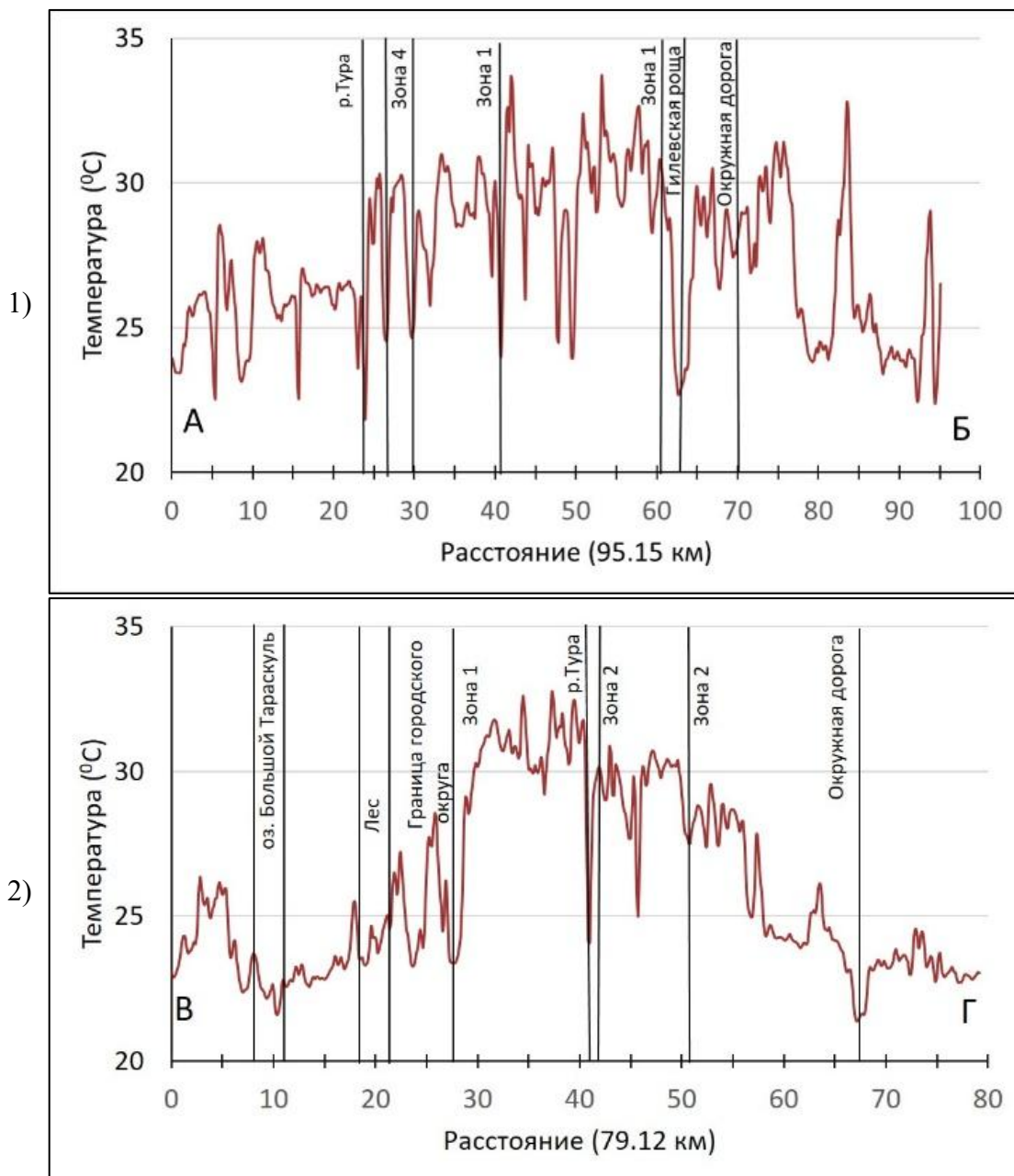


Рис. 2. Температурные профили через центр г. Тюмени: 1) А–Б, 2) В–Г
 Fig. 2. Temperature cross-section through the center of Tyumen: 1) А–Б, 2) В–Г

Формирование городского острова тепла обусловлено комплексным взаимодействием различных типов поверхностей с неоднородными термическими свойствами, что приводит к значительным изменениям энергетического баланса территории [Oke, 1982; Arnfield, 2003]. Ключевыми физическими характеристиками, определяющими термический режим городских поверхностей, являются их теплоемкость, теплопроводность, альbedo и излучательная способность [Taha, 1997; Santamouris, 2014]. Объекты серой инфраструктуры (дороги, здания, промышленные объекты и т. д.) характеризуются высокой теплоемкостью и низким альbedo, что способствует аккумуляции тепла в дневное время и его медленному высвобождению в ночные часы [Krayenhoff et al., 2018].

Анализ пространственного распределения температур на территории г. Тюмени (рис. 1) позволил выявить четыре ярко выраженные зоны с повышенной температурой внутри городского острова тепла, конфигурация которых существенно изменилась по сравнению с ситуацией, описанной в исследовании Добряковой и Сулкарнаевой [2021]:

1. Самая крупная и интенсивная тепловая аномалия расположена на правом берегу р. Туры. За последние годы эта зона значительно увеличилась в размерах, распространившись на северо-запад от ул. Перекопской до ул. Комбинатской, а также на юг и юго-восток, выйдя за пределы объездной дороги вдоль ул. Широтной и ул. Республики до ул. Монтажников. Расширение этой зоны пространственно коррелирует с районами новой многоэтажной застройки. В этой зоне проживает большая часть населения, что говорит о том, что именно эта зона в первую очередь создает значимые риски термического стресса.
2. Вторая тепловая зона, расположенная на левом берегу реки, также претерпела существенные изменения, став более интенсивной и распространившись на северо-восток вдоль ул. Щербакова и на восток вдоль Тобольского тракта.
3. Третья зона, начинающаяся за объездной дорогой на левом берегу р. Туры, связана с распаханными сельскохозяйственными угодьями. Согласно исследованиям [Zhao et al., 2014], открытые почвы без растительного покрова могут значительно нагреваться в летний период, формируя локальные тепловые аномалии.
4. Четвертая зона на западе охватывает аэропорт Рошино с прилегающим поселком. Высокие температуры в этом районе обусловлены наличием обширных бетонированных поверхностей аэропорта и распаханых полей, что подтверждается в работе [Ichinose et al., 1999] о влиянии антропогенно измененных поверхностей на тепловой режим территории.
5. Для более детального анализа пространственной структуры городского острова тепла были построены два температурных профиля через центр города (рис. 2). Профиль А–Б протяженностью 95,15 км проложен вдоль русла р. Туры. Температура вдоль этого профиля варьируется от 23 до 33,5 °С. По мере движения от точки А к точке Б наблюдается общий тренд роста температуры с резкими понижениями в местах пересечения р. Туры. Особенно заметный рост температуры отмечается после пересечения границы городского округа, что связано с прохождением через северную часть 4-й зоны. Максимальные значения температуры характерны для области 1, где наблюдаются резкие понижения (более чем на 6 °С) в местах пересечения реки и крупного массива древесной растительности (лесопарк «Гилевская роща»). После пересечения ул. Монтажников температура постепенно снижается по направлению к оз. Андреевскому. Локальные повышения температуры соответствуют промышленным зонам к востоку от города. Общая протяженность городского острова тепла вдоль реки превышает 50 км.

Профиль В–Г протяженностью 79,12 км построен перпендикулярно р. Туре. По мере движения от точки В к точке Г наблюдается постепенный рост температуры (за исключением понижения при пересечении оз. Большой Тараскуль). Следующее снижение температуры связано с прохождением через крупный лесной массив. Резкий рост температуры начинается после пересечения границы городского округа и зоны 1. В зоне 1 зафиксированы максимальные значения — до 33 °С, с резким понижением до 24 °С в месте пересечения р. Туры и последующим ростом в зоне 2. Протяженность городского острова тепла по этому профилю составляет более 40 км, что подтверждает его вытянутую форму вдоль р. Туры, соответствующую конфигурации городской застройки.

Анализ городского острова тепла и профилей показывает, что объекты водно-зеленой инфраструктуры создают значимый охлаждающий эффект.

Подбор модели представляет собой итерационный процесс с поиском эффективных независимых переменных, постоянным уточнением их атрибутов и геометрии и контролем эффективности результатов моделирования.

В качестве основного инструмента для расчетов, анализа и визуализации результатов, а также для построения регрессионной модели использовался инструмент «Обобщенная линейная регрессия» в программе ArcGIS Pro. Качество модели оценивалось по следующим статистическим показателям:

- информационный критерий Акаике (AICc);
- скорректированный R^2 ;
- F-статистика и статистика Вальда (для оценки статистической значимости);
- статистика Жака-Бера (JB) и статистика Кенкера K(BP) (для оценки распределения невязок).

Для анализа пространственного распределения невязок применялись:

- пространственная автокорреляция (глобальный индекс Морана I);
- анализ горячих точек (локальный индекс Getis-Ord G_i^*);
- локальные бивариантные отношения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Итоговая модель включает в себя следующие независимые переменные:

1. Площади водно-зеленой инфраструктуры (%):
 - лесов,
 - земельных участков,
 - водных объектов (открытая вода),
 - болот,
 - пашни.
2. Площади серой инфраструктуры (%):
 - зданий (всего).
3. Параметры пространственной конфигурации, расстояния (ближайшие, обратные) до:
 - водных объектов (открытая вода),
 - промышленных объектов,
 - основных автодорог.

Табл. 1. Диагностика модели
Table 1. Model diagnostics

№	Параметр	Значение
1	Зависимая переменная	температура
2	Число наблюдений	3 472
3	Акаике (AICc)	13 642,61
4	выровненный R^2	0,627
5	F-статистика	статистически значимое
6	статистика Вальда	статистически значимое
7	статистика Жака-Бера (JB)	статистически значимое
8	статистика Кенкера K(BP)	статистически значимое

Уравнение модели (2):

$$y = 25,92 + 0,01x_1 - 0,06x_2 - 0,01x_3 + 0,23x_4 + 0,55x_5 + 0,95x_6 + 1,72x_7 + 0,04x_8 - 0,02x_9 \quad (2),$$

где y — температура поверхности,
 x_1 — площадь земельных участков,
 x_2 — площадь водных объектов (открытая вода),
 x_3 — площадь болот,
 x_4 — площадь зданий,
 x_5 — обратное расстояние до открытой воды,
 x_6 — обратное расстояние до основных автодорог,
 x_7 — обратное расстояние до промышленных объектов,
 x_8 — площадь пашни,
 x_9 — площадь лесов.

Отобранные независимые переменные значимы, моделируемые отношения линейны, переменные не являются избыточными.

Не пройдены диагностические тесты Жака-Бера (JB) и Кенкера К(ВР), поэтому результаты такой модели не могут считаться статистически надежными. Наблюдается пространственная кластеризация в отклонениях (рис. 3–4). Пространственные процессы, создавшие данную структуру, носят неслучайный характер.

Причин отклонений между наблюдаемыми и рассчитанными значениями зависимой переменной может быть несколько, и достаточно сложно определить, что влияет на распределение невязок:

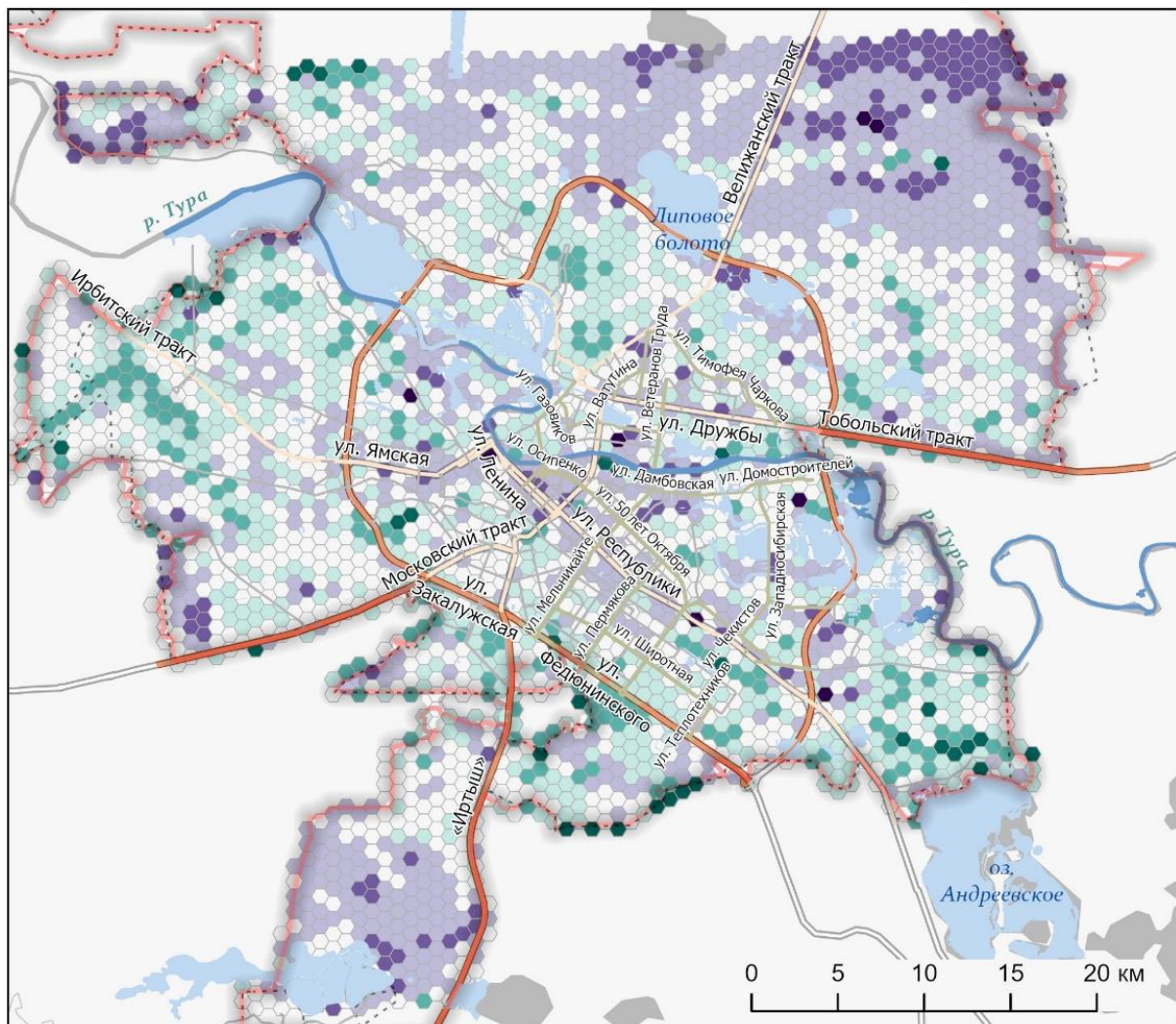
1. Вероятно, существуют неизвестные, не учтенные нами факторы, определившие рисунок отклонений модели от наблюдаемых значений.
2. Отношения, которые мы моделируем, являются нелинейными.
3. Наличие некорректной геометрии или просто отсутствие объектов в переменных исходного набора, разнородная структура данных внутри одного набора.
4. Кроме того, вероятно, необходимо увеличить точность построения модели, что позволит выявить более тонкую структуру теплового взаимодействия.

Для идентификации и визуализации пространственной кластеризации невязок использовался анализ горячих точек (рис. 5), в основе которого — расчет локального индекса Getis-Ord G_i^* [Getis, 1992].

Главное преимущество статистики Getis-Ord G_i^* состоит в том, что она учитывает значение всех соседних объектов и выявляет горячие и холодные точки с различными уровнями статистической значимости. Локальная статистика Getis-Ord G_i^* сравнивает локальную сумму отклонений от среднего для окрестности объекта с аналогичными суммами других объектов. Метод рассчитывает z- и p-оценку каждой суммы в исследуемой области, показывая, являются ли статистически значимыми различия между локальными и глобальными средними значениями [Haque et al., 2012].

Результаты анализа горячих точек (рис. 5) демонстрируют статистически значимую кластеризацию невязок, связанную с уже обсуждаемыми нами ранее областями 3 и 4 (рис. 1). Горячие точки (области положительных отклонений фактической температуры от модельной) сконцентрированы преимущественно в районе сельскохозяйственных полей на северо-западе и западе городского округа, приурочены к распаханым полям и территории аэропорта, а также к промышленной зоне к западу от города. Значительные кластеры горячих точек также обнаружены к югу и юго-востоку от центра города, где

расположены пригородные деревни с распаханными полями и промышленная зона к юго-востоку от городской черты.



Условные обозначения




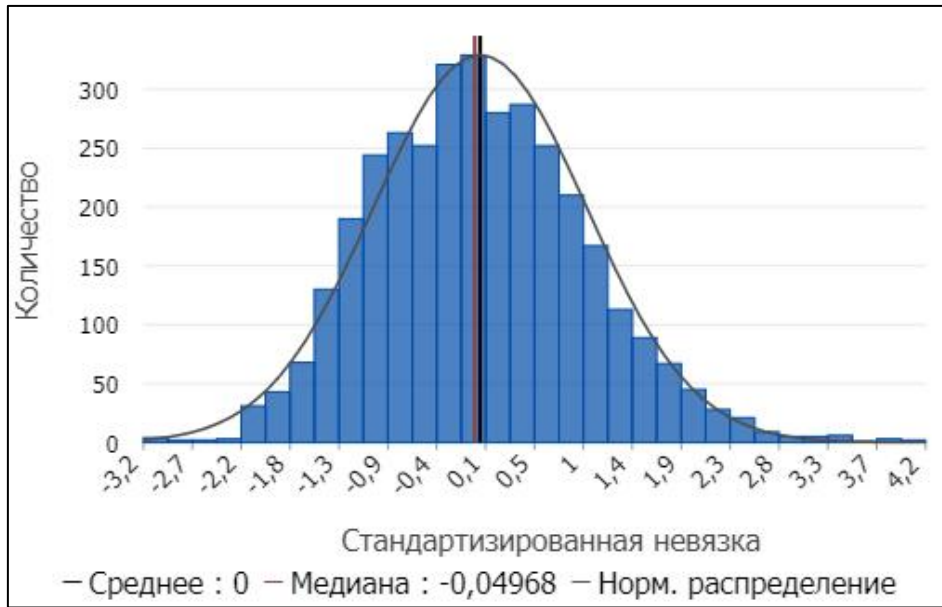
Невязки (StdResid)		
	< -2,5	 0,5 - 1,5
	-2,5 - -1,5	 1,5 - 2,5
	-1,5 - -0,5	 > 2,5
	-0,5 - 0,5	

Рис. 3. Результаты ОЛР: слой невязок между наблюдаемой и рассчитанной значениями зависимой переменной
 Fig. 3. GLR results: layer of residuals between the observed and calculated values of the dependent variable

Холодные точки (области отрицательных отклонений, где модель переоценивает температуру) статистически значимо кластеризованы на северо-востоке, где преобладают заболоченные территории (заболоченные торфяники), а также на юге в районе санатория Тараскуль, окруженного лесными массивами.

1)



2)

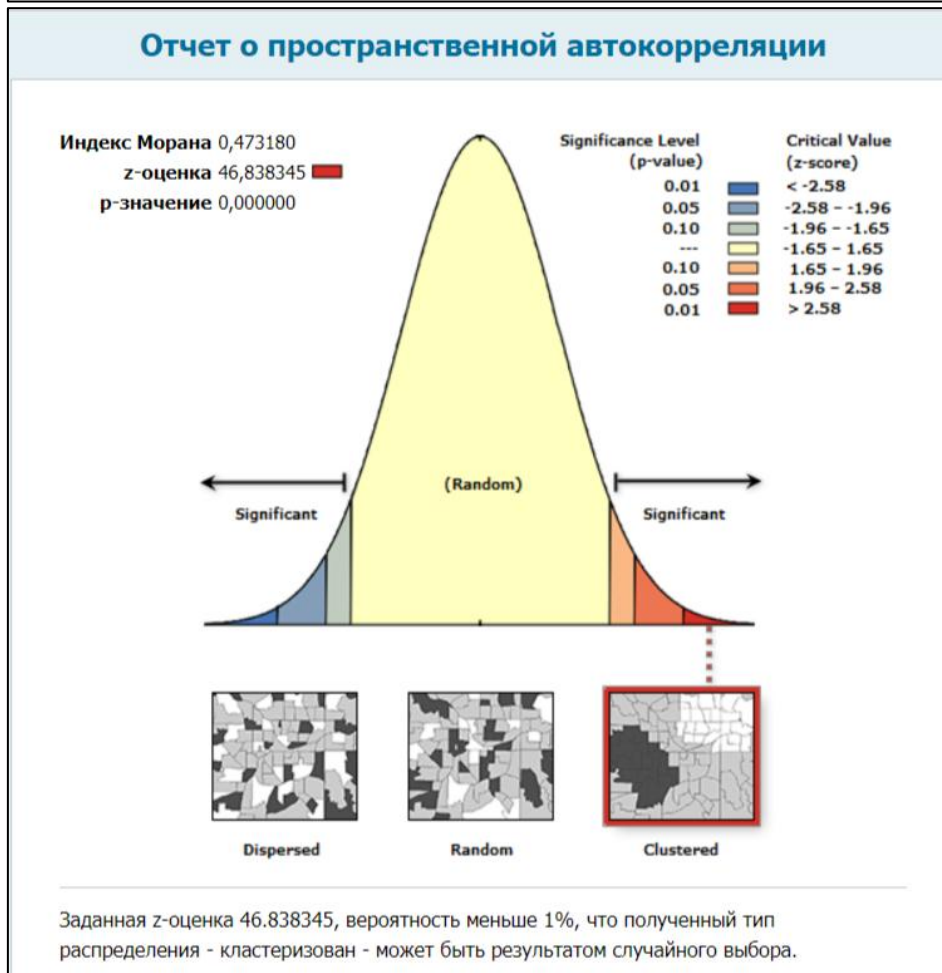
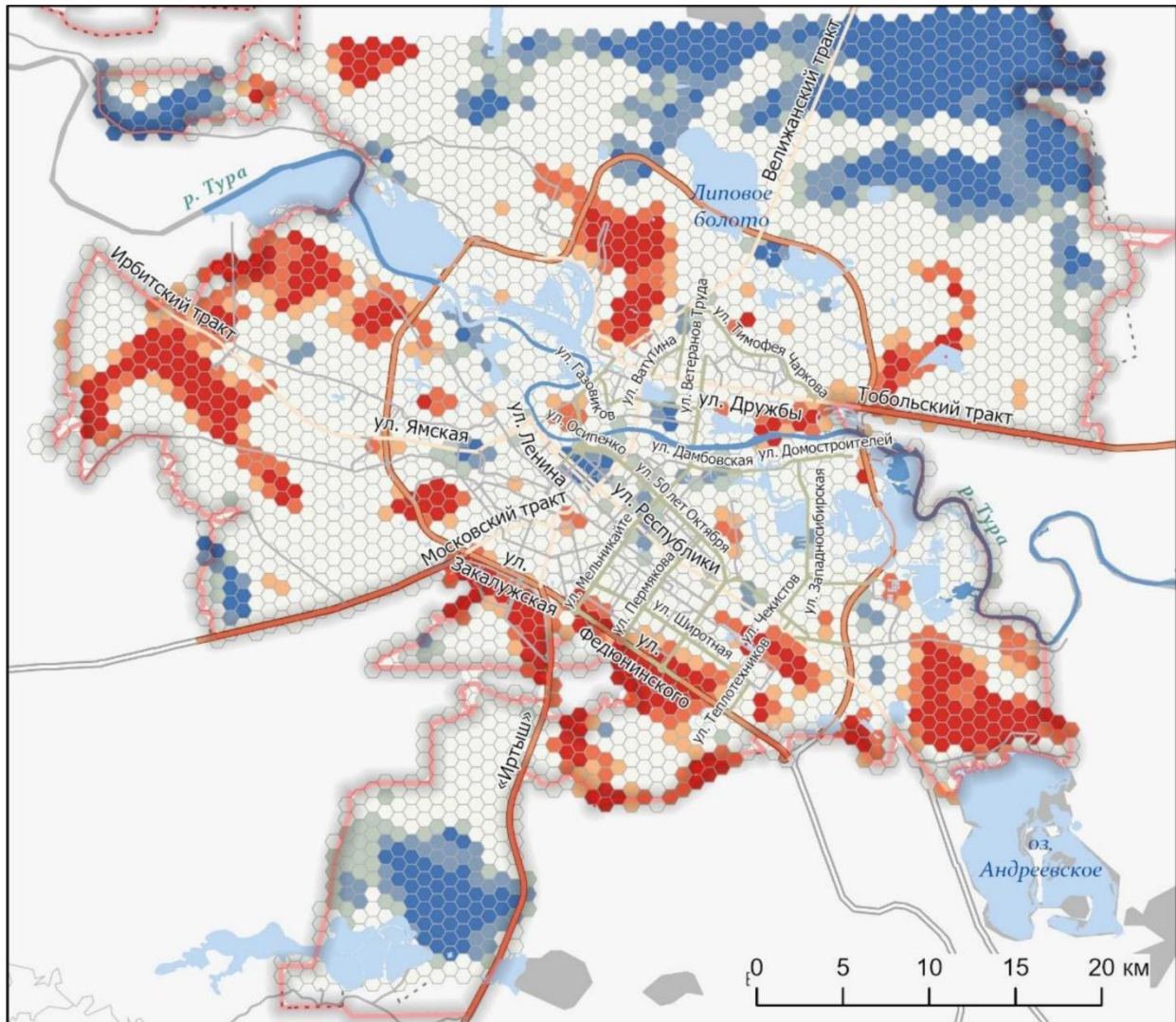


Рис. 4. Оценка структурных закономерностей в распределении невязок:
 1) гистограмма распределения невязок; 2) результаты работы инструмента «Пространственная автокорреляция»
 Fig. 4. Assessment of structural regularities in the distribution of residuals: 1) histogram of residual distribution; 2) the results of the tool “Spatial autocorrelation”



Условные обозначения
Анализ горячих точек

Достоверность, % (Gi_Bin)		
■	Холодная точка - 99%	■ Горячая точка - 90%
■	Холодная точка - 95%	■ Горячая точка - 95%
■	Не значима	■ Горячая точка - 99%
■	Холодная точка - 90%	

Рис. 5. Результаты анализа горячих точек
Fig. 5. Hot spot analysis results

По нашему мнению, наблюдаемая кластеризация невязок по окраинам города связана с менее точными векторными данными OpenStreetMap для периферийных территорий.

ВЫВОДЫ

Распределение параметров городского острова тепла представляет весьма неоднородную картину. Тем не менее, в результате проведенного исследования определена линейная зависимость от ряда факторов (перечислены выше).

Для сравнительной оценки влияния каждого фактора на результат уравнение (2) приводим к стандартизированному виду (3):

$$y = 25,92 + 0,01x_1 - 0,06x_2 - 0,01x_3 + 0,23x_4 + 0,55x_5 + 0,95x_6 + 1,72x_7 + 0,04x_8 - 0,02x_9 \quad (3).$$

Формулы перехода от натурального уравнения множественной регрессии к стандартизированному подробно описаны в учебниках по статистике [Колде, 1991; Теория статистики, 2005].

Отобранные независимые переменные значимы, переменные не являются избыточными. Согласно уравнению (3), самые «сильные» переменные — обратное расстояние до открытой воды (x_5), обратное расстояние до основных автодорог (x_6) и обратное расстояние до промышленных объектов (x_7). Последние два работают на охлаждение, первый — на нагревание поверхности.

Считаем, что сильной стороной регрессионной модели является возможность оценки качества ее построения.

Полученный результат не является окончательным, поскольку наблюдается значимая кластеризация невязок, однако данный результат значительно лучше по сравнению с полученным ранее [Добрякова, Сулкарнаева, 2021]. К примеру, z-оценка невязок в данной статье уменьшилась практически на 30 %, с 66,673541 до 46,838345 (рис. 4). Полученную локализацию горячих точек следует рассматривать как основу для поиска, корректировки, расчета и включения новых эффективных независимых переменных.

Результаты исследования имеют практическую значимость для жизнестойкого городского планирования и разработки мер по снижению термического стресса населения. На территориях с высоким риском теплового стресса рекомендуется создавать, ревитализировать или улучшать объекты водно-зеленой инфраструктуры, отдавая приоритет водным объектам как наиболее эффективным элементам охлаждения городской среды. Это позволит не только повысить комфортность городской среды, но и снизить риски для здоровья населения, связанные с воздействием высоких температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Добрякова В. А., Сулкарнаева Л. Д. Построение модели предоставления экосистемной услуги «охлаждающий эффект» на примере г. Тюмень. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий. Материалы Международной конференции. М.: МГУ, Географический факультет, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 196–209. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-196-209.

Климанова О. А., Колбовский Е. Ю., Илларионова О. А. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 2018. № 63(2). С. 127–146.

Колде Я. К. Практикум по теории вероятностей и математической статистике. М.: Высшая школа, 1991. 157 с.

Теория статистики: учебник. 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: Инфра, 2005. 476 с.

- Щербакова Е. М.* Старшие поколения населения России. Демоскоп Weekly, 2019. № 797–798. Электронный ресурс: <http://demoscope.ru/weekly/2019/0797/barom01.php> (дата обращения 01.03.2025).
- Arnfield A. J.* 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. V. 23. No. 1. P. 1–26. DOI: 10.1002/joc.859.
- Bowler D. E., Buyung-Ali L., Knight T. M., Pullin A. S.* Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010. V. 97. No. 3. P. 147–155. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.
- Ermida S. L., Soares P., Mantas V., Göttsche F.-M., Trigo I. F.* Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. Iss. 9. Art. 1471. DOI: 10.3390/rs12091471.
- Getis A., Ord J. K.* The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, 1992. V. 24. P. 191–206. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.
- Haque U., Scott L. M., Hashizume M., Fisher E., Haque R., Yamamoto T., Glass G. E.* Modelling Malaria Treatment Practices in Bangladesh using Spatial Statistics. *Malaria Journal*, 2012. V. 11. P. 63. DOI: 10.1186/1475-2875-11-63.
- Ichinose T., Shimodozono K., Hanaki K.* Impact of Anthropogenic Heat on Urban Climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, 1999. V. 33. No. 24–25. P. 3897–3909. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00132-6.
- Kovats R. S., Hajat S.* Heat Stress and Public Health: A Critical Review. *Annual Review of Public Health*, 2008. V. 29. P. 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.
- Krayenhoff E. S., Moustauoui M., Broadbent A. M., Gupta V., Georgescu M.* Diurnal Interaction Between Urban Expansion, Climate Change and Adaptation in US Cities. *Nature Climate Change*, 2018. V. 8. No. 12. P. 1097–1103. DOI: 10.1038/s41558-018-0320-9.
- Mell I. C., Henneberry J., Hehl-Lange S., Keskin B.* Promoting Urban Greening: Valuing the Development of Green Infrastructure Investments in the Urban Core of Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013. V. 12. No. 3. P. 296–306. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.04.006.
- Norton B. A., Coutts A. M., Livesley S. J., Harris R. J., Hunter A. M., Williams N. S.* Planning for Cooler Cities: A Framework to Prioritise Green Infrastructure to Mitigate High Temperatures in Urban Landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2015. V. 134. P. 127–138. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.018.
- Oke T. R.* The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982. V. 108. No. 455. P. 1–24. DOI: 10.1002/qj.49710845502.
- Santamouris M.* Cooling the Cities — A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments. *Solar Energy*, 2014. V. 103. P. 682–703. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.003.
- Stewart I. D., Oke T. R.* Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012. V. 93. No. 12. P. 1879–1900. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- Taha H.* Urban Climates and Heat Islands: Albedo, Evapotranspiration, and Anthropogenic Heat. *Energy and Buildings*, 1997. V. 25. No. 2. P. 99–103. DOI: 10.1016/S0378-7788(96)00999-1.

Yuan F., Bauer M. E. Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007. V. 106. No. 3. P. 375–386. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003.

Zhao L., Lee X., Smith R. B., Oleson K. Strong Contributions of Local Background Climate to Urban Heat Islands. *Nature*, 2014. V. 511. No. 7508. P. 216–219. DOI: 10.1038/nature13462.

REFERENCES

Arnfield A. J. 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. V. 23. No. 1. P. 1–26. DOI: 10.1002/joc.859.

Bowler D. E., Buyung-Ali L., Knight T. M., Pullin A. S. Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence. *Landscape and Urban Planning*, 2010. V. 97. No. 3. P. 147–155. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.

Dobryakova V. A., Sulkarnaeva L. D. Modelling of Ecosystem Services “Cooling Effect” Supply in the City of Tyumen. *InterCarto. InterGIS. GI Support of Sustainable Development of Territories. Proceedings of the International Conference. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*, 2021. V. 27. Part 3. P. 196–209 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-196-209.

Ermida S. L., Soares P., Mantas V., Götsche F.-M., Trigo I. F. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. Iss. 9. Art. 1471. DOI: 10.3390/rs12091471.

Gazimov T. F., Kuzhevskaya I. V. Assessment of the Summer Surface Urban Heat Island of Novosibirsk According to Landsat 8 Data. *Geographical Bulletin*, 2021. No. 4(59). P. 84–98 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2021-4-84-98.

Getis A., Ord J. K. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, 1992. V. 24. P. 191–206. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.

Haque U., Scott L. M., Hashizume M., Fisher E., Haque R., Yamamoto T., Glass G. E. Modelling Malaria Treatment Practices in Bangladesh using Spatial Statistics. *Malaria Journal*, 2012. V. 11. P. 63. DOI: 10.1186/1475-2875-11-63.

Ichinose T., Shimodozono K., Hanaki K. Impact of Anthropogenic Heat on Urban Climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, 1999. V. 33. No. 24–25. P. 3897–3909. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00132-6.

Klimanova O. A., Kolbovsky E. Yu., Illarionova O. A. Ecological Framework of the Largest Cities of the Russian Federation: Modern Structure, Territorial Planning and Development Problems. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, 2018. No. 63(2). P. 127–146 (in Russian).

Kolde Ya. K. Training Materials on the Theory of Probability and Mathematical Statistics. Moscow: Vysshaya Shkola (Higher School), 1991. 157 p. (in Russian).

Kovats R. S., Hajat S. Heat Stress and Public Health: A Critical Review. *Annual Review of Public Health*, 2008. V. 29. P. 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.

Krayenhoff E. S., Moustauoui M., Broadbent A. M., Gupta V., Georgescu M. Diurnal Interaction Between Urban Expansion, Climate Change and Adaptation in US Cities. *Nature Climate Change*, 2018. V. 8. No. 12. P. 1097–1103. DOI: 10.1038/s41558-018-0320-9.

Mell I. C., Henneberry J., Hehl-Lange S., Keskin B. Promoting Urban Greening: Valuing the Development of Green Infrastructure Investments in the Urban Core of Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013. V. 12. No. 3. P. 296–306. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.04.006.

- Norton B. A., Coutts A. M., Livesley S. J., Harris R. J., Hunter A. M., Williams N. S.* Planning for Cooler Cities: A Framework to Prioritise Green Infrastructure to Mitigate High Temperatures in Urban Landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2015. V. 134. P. 127–138. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.018.
- Oke T. R.* The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982. V. 108. No. 455. P. 1–24. DOI: 10.1002/qj.49710845502.
- Santamouris M.* Cooling the Cities — A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments. *Solar Energy*, 2014. V. 103. P. 682–703. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.003.
- Shcherbakova E. M.* Older Generations of the Russian Population. *Demoscope Weekly*, 2019. No. 797–798. Web resource: <http://demoscope.ru/weekly/2019/0797/barom01.php> (accessed 01.03.2025) (in Russian).
- Stewart I. D., Oke T. R.* Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012. V. 93. No. 12. P. 1879–1900. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- Taha H.* Urban Climates and Heat Islands: Albedo, Evapotranspiration, and Anthropogenic Heat. *Energy and Buildings*, 1997. V. 25. No. 2. P. 99–103. DOI: 10.1016/S0378-7788(96)00999-1.
- Theory of Statistics: A Textbook.* 2nd edition, revised and expanded. Moscow: Infra, 2005. 476 p. (in Russian).
- Yuan F., Bauer M. E.* Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007. V. 106. No. 3. P. 375–386. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003.
- Zhao L., Lee X., Smith R. B., Oleson K.* Strong Contributions of Local Background Climate to Urban Heat Islands. *Nature*, 2014. V. 511. No. 7508. P. 216–219. DOI: 10.1038/nature13462.
-