2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)

Научная статья
УДК 711.7:551.583.13

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКОГО ТЕПЛОВОГО ОСТРОВА И ОЦЕНКА СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ЗЕЛЁНО-ГОЛУБОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Мушарапов Дамир Рузалевич, кандидат технических наук, Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Россия, Ульяновск, damir_ruzalevich@mail.ru

Аннотация. В статье анализируются термодинамические процессы в урбанизированной среде, способствующие формированию городского теплового острова и повышающие биоклиматические риски для населения в периоды продолжительных волн жары. Целью работы выступает разработка методологии высокоразрешающего пространственного моделирования микроклиматических аномалий и научное обоснование стратегий снижения их интенсивности посредством интеграции зелено-голубой инфраструктуры. Методология исследования основана на совместном использовании данных мультиспектральной спутниковой термометрии и наземного аэродинамического мониторинга с последующей верификацией результатов средствами вычислительной гидродинамики. На примере линейной агломерации с контрастной морфологией застройки эмпирически подтвержден фазовый сдвиг между пиками радиационного нагрева поверхностей и максимумами прогрева приземного воздуха, обусловленный высокой теплоемкостью строительного фонда. Установлено, что массовое применение рефлективных мембран эффективно снижает пиковые потоки явного тепла в дневные часы, тогда как экстенсивное озеленение и сохранение вентиляционных коридоров являются единственными средствами рассеивания накопленной тепловой энергии в

ночные часы. Дополнительно оценено влияние модификации альбедо и эвапотранспирации на снижение пиковых нагрузок инженерных систем кондиционирования. Выявленные пространственные закономерности включены в правила землепользования и застройки, что обеспечивает переход к нормированию параметров аэродинамической проницаемости и теплового отражения непосредственно в градостроительных регламентах. Результаты исследования обладают высокой прикладной ценностью для органов муниципального управления и проектных институтов.

Ключевые слова: городской тепловой остров, пространственное моделирование, зелено-голубая инфраструктура, микроклимат застройки, спутниковая термометрия, альбедо поверхностей, эвапотранспирация, аэродинамическая проницаемость, правила землепользования и застройки, адаптивное градостроительство.

Original article

MODELING AN URBAN HEAT ISLAND AND ASSESSING BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT SCENARIOS

Musharapov Damir Ruzalevich, Candidate of Technical Sciences, Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russia, damir_ruzalevich@mail.ru

Abstract. This article analyzes the mechanisms of thermodynamic transformation of urbanized areas that determine the formation of the urban heat island effect and exacerbate bioclimatic risks for the population during prolonged heat waves. The aim of the study is to develop a methodology for high-resolution spatial modeling of microclimatic anomalies and to scientifically substantiate strategies for mitigating their intensity through the integration of blue-green infrastructure. The methodological framework of the study is based on the convergence of multispectral satellite thermometry data and ground-based aerodynamic monitoring, followed by verification in computational fluid dynamics (CFD) environments. Using a linear agglomeration

with contrasting building morphology as an example, a phase shift between peaks of surface radiative heating and maxima of surface air heating, caused by the high thermal capacity of the building stock, is empirically confirmed. It was found that the widespread implementation of reflective membranes effectively reduces daytime peaks of sensible heat, while extensive landscaping and the preservation of ventilation corridors serve as the only means of dissipating accumulated energy at night. The impact of albedo and evapotranspiration modification on reducing peak loads of air conditioning systems was also assessed. The identified spatial patterns were integrated into land use and development regulations, paving the way for the transition to standardizing aerodynamic permeability and thermal reflectivity parameters directly in urban planning regulations. The research results have high practical value for municipal authorities and design institutes.

Keywords: urban heat island, spatial modeling, blue-green infrastructure, built-up microclimate, satellite thermometry, surface albedo, evapotranspiration, aerodynamic permeability, land use and development regulations, adaptive urban planning.

Введение. Современная урбанизация привела к формированию новых термодинамических систем, где антропогенная трансформация подстилающей поверхности создает локальные климатические аномалии, отличающиеся от фоновых условий прилегающих территорий. Феномен городского теплового острова, документированный на протяжении почти столетия, представляет собой устойчивое превышение температурных показателей в плотной застройке относительно сельских и городских зон, что обусловлено совокупностью физических механизмов: положительным радиационным балансом урбанизированных пространств, аккумуляцией солнечной радиации строительными конструкциями, дефицитом естественных охладителей и ограниченной циркуляцией воздушных масс в городах. Как показал В.В. Литовский в своём исследовании пограничного слоя атмосферы, городская среда

формирует специфический микроклиматический профиль, где тепловая инерция искусственных материалов и интенсивное выделение антропогенного тепла создают замкнутый цикл накопления и перераспределения тепловой энергии, нехарактерный для природных ландшафтов [1].

Температурная стратификация в мегаполисах имеет тенденцию к усилению на фоне глобальных климатических изменений, причем Д.Ю. Демежко, Б.Д. Хацкевич, Н.Р. Факаева, А.А. Горностаева и А.Н. Антипин отмечают, что наблюдаемые экстремальные значения температуры окружающего воздуха усугубляют энергетические проблемы городской инфраструктуры, ухудшают условия теплового комфорта и создают непосредственную угрозу для уязвимых групп населения [2]. Эмпирические данные свидетельствуют о существенном возрастании пиковых нагрузок на системы кондиционирования: для крупных американских городов с населением свыше 100 тысяч человек прогнозируется увеличение пикового электропотребления на 1,5-2% при каждом градусе Фаренгейта повышения температуры, что для Афин приводит к удвоению холодильной нагрузки зданий и почти трехкратному росту пикового спроса на электроэнергию при одновременном снижении коэффициента производительности механических систем охлаждения до 25% [3].

Медико-демографические последствия тепловых аномалий требуют отдельного рассмотрения, поскольку температурный стресс в условиях плотной застройки проявляется особенно остро. Исследования, цитируемые С.А. Лысенко и П.О. Зайко, показывают корреляцию между интенсивностью теплового острова и частотой госпитализаций, причем наиболее уязвимыми оказываются жители малообеспеченных районов с недостаточной теплоизоляцией жилых помещений [4]. Повышение температуры городской среды сопровождается ростом экологической нагрузки: усиление фотохимических процессов в приземном слое атмосферы приводит к повышению концентраций озона и других вторичных загрязнителей, что в

сочетании с термическим дискомфортом создает комплексную угрозу общественному здоровью. Особенно тревожной представляется ситуация в периоды продолжительных волн жары, когда кумулятивный эффект многодневного перегрева городской среды превышает адаптационные возможности человеческого организма, а ночное охлаждение оказывается недостаточным для восстановления физиологического равновесия [5].

Пространственная гетерогенность теплового острова определяется морфологией застройки, соотношением открытых и закрытых поверхностей, наличием водных объектов и растительного покрова, что обусловливает необходимость применения мезомасштабных моделей для адекватного описания термодинамических процессов. Современные методы численного моделирования, включая MM5, WRF-NOAH и специализированные модели, позволяют воспроизводить трехмерную структуру городского пограничного слоя с учетом радиационного обмена, турбулентного переноса и фазовых переходов влаги [6]. Однако точность пространственного моделирования существенно зависит от качества входных параметров, включая альбедо поверхностей, шероховатость подстилающего слоя, тепловую инерцию материалов. Как отмечает П.А. Казанцев, корректное описание пограничного слоя требует учета множества взаимосвязанных параметров, среди которых особое значение имеют геометрические характеристики застройки, влияющие на эффективность длинноволнового выхолаживания в ночные часы [7].

Стратегии снижения интенсивности теплового острова разделяются на две основные категории: повышение альбедо городских поверхностей и расширение площадей зеленых насаждений, включая внедрение зелено-голубой инфраструктуры. Рефлективные покрытия демонстрируют потенциал снижения средних температур на 0,3 K при каждом увеличении альбедо на 0,1, тогда как пиковые температуры могут снижаться на 0,9 K при аналогичном изменении отражательной способности [8]. Зеленые крыши, согласно результатам мезомасштабного моделирования, способны обеспечивать охлаждение

амбиентной температуры в диапазоне 0,3-3 К при реализации в масштабах всего города, причем их эффективность существенно зависит от климатических условий, типа растительности, режима орошения. Сравнительный анализ показывает, что в условиях интенсивной солнечной радиации рефлективные покрытия показывают преимущество в период дневного максимума, но зеленые крыши обеспечивают более выраженный эффект в ночные часы благодаря скрытой теплоте испарения, хотя их результативность зависит от влажности субстрата и биометрических характеристик растительного покрова.

Перспективы пространственного моделирования связаны с интеграцией данных дистанционного зондирования, наземных метеорологических наблюдений и детализированных цифровых моделей городской среды, что позволяет переходить к прогнозированию микроклиматических условий на уровне отдельных кварталов с высоким пространственным разрешением. Применение зелено-голубой инфраструктуры требует учета термодинамических эффектов, гидрологического баланса, управления ливневым стоком, биоразнообразия и социокультурных функций городских пространств, что определяет междисциплинарный характер исследований в данной области. Дальнейшее развитие методологического аппарата предполагает верификацию численных моделей на основе натурных экспериментов, разработку адаптивных стратегий снижения интенсивности с учетом локальных климатических особенностей и создание инструментария для оценки эффективности различных сценариев пространственного развития городских территорий в условиях меняющегося климата.

Обзор литературы. Осмысление термодинамики урбанизированных территорий опирается на концепцию городского пограничного слоя, детально разработанную в классических трудах Т. Оки. Исследователь доказал, что формирование локальных климатических аномалий детерминировано радикальной трансформацией радиационного баланса подстилающей поверхности и изменением ее аэродинамической шероховатости. Геометрия

городских каньонов, выражаемая через коэффициент видимости неба, выступает ключевым лимитирующим фактором длинноволнового выхолаживания в ночные часы, что обусловливает кумуляцию тепловой энергии в строительных конструкциях. Опираясь на уравнение энергетического баланса городской среды, в котором поглощенная радиация и антропогенное тепло распределяются между потоками явного и скрытого тепла и теплонакоплением в массиве застройки, автор заложил основу для последующего математического описания микроклиматических градиентов.

Развитие прикладных аспектов данной теории, направленное на поиск инструментов пространственной адаптации, получило отражение в работах О.Ю. Круковской и Г.У. Бектемысовой [9], [10]. Анализ мезомасштабных моделей демонстрирует, что модификация оптических свойств городских оболочек, в частности повышение интегрального альбедо кровель до значений 0,65-0,85, способна редуцировать пиковые значения температуры приземного воздуха на 0,9-2,2 К. Одновременно обосновывается эффективность внедрения растительных субстратов, где доминирующим механизмом терморегуляции становится эвапотранспирация, конвертирующая избыточную инсоляцию в поток скрытого тепла. Вместе с тем анализ существующих исследований выявляет существенный разрыв между макроуровневым климатическим моделированием и микроуровневым градостроительным проектированием [11]. Большинство верифицированных сценариев оперирует усредненными показателями по городским агломерациям, игнорируя пространственную гетерогенность застройки и локальные аэродинамические барьеры, что снижает применимость этих данных при актуализации нормативной документации, такой как правила землепользования и застройки (ПЗЗ). Преодоление данного разрыва требует перехода к высокоразрешающему пространственному анализу, интегрирующему спутниковую термометрию.

Материалы и методы исследования. Эмпирическую базу исследования составили данные дистанционного зондирования Земли и результаты наземного

микроклиматического мониторинга, проведенного на территории г. Волгограда в периоды устойчивых летних антициклонов (июль-август 2022 года и 2023 года). Выбор объекта обусловлен спецификой его морфологии: вытянутая вдоль Волгоградского водохранилища линейная структура города, сочетающаяся с глубоко врезанными балками и массивами многоэтажной застройки советского и постсоветского периодов, создает сложную мозаичную структуру теплообмена. Для расчета радиационной температуры подстилающей поверхности (LST) использовались мультиспектральные и тепловые каналы сенсоров TIRS спутников Landsat 8 и 9. Алгоритм извлечения LST включал атмосферную коррекцию и расчет коэффициента излучательной способности поверхности на основе пороговых значений нормализованного вегетационного индекса (NDVI), полученного из синхронизированных снимков Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 метров.

Методологическим ограничением, часто игнорируемым в прикладных исследованиях, является смешение понятий температуры поверхности (LST) и температуры приземного слоя воздуха (T_a). LST, достигающая в условиях волгоградского климата экстремальных значений свыше 65 °C на асфальтированных и кровельных покрытиях, характеризует тепловое состояние поверхности, однако биоклиматический дискомфорт и нагрузка на инженерные сети определяются именно T_a. В связи с этим спутниковые данные подвергались наземной валидации посредством мобильных метеорологических комплексов. Автоматизированные логгеры, установленные на крышах транспортных средств, фиксировали профили T_a, относительной влажности и скорости ветра на высоте 2 метра вдоль трансект, пересекающих различные территориальные зоны. Измерения проводились в часы максимума инсоляции и в предутренние часы, что позволило зафиксировать фазовый сдвиг (гистерезис) между пиком нагрева поверхностей и максимумом прогрева воздушной массы, обусловленный тепловой инерцией строительных материалов.

Корреляционный анализ и пространственная регрессия применялись для

выявления статистических зависимостей между тепловыми аномалиями и морфометрическими параметрами среды. В качестве предикторов выступали индекс плотности застройки, средневзвешенное альбедо кровель в пределах квартала, а также буферные расстояния до объектов голубой инфраструктуры (акватория Волги, поймы рек Царица и Ельшанка). Сценарное моделирование осуществлялось в среде ENVI-met, позволяющей решать уравнения турбулентного переноса и радиационного обмена в трехмерной модели системы «городской каньон - крыша». Оценивались три стратегии снижения интенсивности теплового острова: массовое применение рефлективных покрытий, экстенсивное озеленение плоских кровель и формирование аэродинамических коридоров. Полученные пространственные распределения термофизических параметров затем переносились на кадастровую сетку для разработки конкретных градостроительных регламентов.

Результаты проведения исследования и их обсуждение. Пространственный анализ выявил резкую дифференциацию термического режима г. Волгограда, не поддающуюся описанию линейными моделями. Установлено, что в дневные часы доминирующим фактором, определяющим LST, выступает альбедо и теплоемкость материалов: промышленные зоны с металлическими ангарами и обширные парковочные пространства формируют локальные экстремумы с LST до 72 °C, а территории с плотной многоэтажной жилой застройкой демонстрируют более низкие значения LST за счет взаимного затенения, но при этом удерживают аномально высокие значения T_a в ночное время из-за эффекта «тепловой ловушки» (низкий SVF). Объекты голубой инфраструктуры генерируют выраженный охлаждающий эффект, однако его адвективное распространение вглубь материковой части города лимитируется перпендикулярной береговой линии застройкой, выступающей в роли аэродинамического барьера. Валидация показала, что коэффициент корреляции между спутниковой LST и наземной T_a варьирует от 0,82 в разреженных малоэтажных районах до 0,41 в каньонах магистральных улиц, что подтверждает

необходимость совместного использования обеих метрик.

Результаты сценарного моделирования термодинамических потоков представлены в таблице 1, где отражена трансформация компонент уравнения энергетического баланса ($Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$) при реализации различных стратегий [1].

Таблица 1 - Моделирование компонент радиационного и теплового баланса городской среды (Волгоград, сценарий экстремальной жары, 14:00 LST)

Сценарий пространственного развития	Баланс коротковолновой радиации (Q^*), Вт/м²	Поток скрытого тепла (Q_E), Вт/м²	Поток явного тепла (Q_H), Вт/м²	Теплоаккумуля-ция массива (ΔQ_S), Вт/м²	Прогнозное изменение T_a (день / ночь), К
Базовый (существующая застройка)	485	45	310	130	0 / 0
Рефлективные кровли (альбедо > 0,7)	290	40	145	105	-1,4 / -0,2
Экстенсивные зеленые крыши (LAI = 3,5)	460	285	95	80	-0,9 / -0,6
Аэродинамический коридор (снос точечных преград)	485	55	260	170	-0,4 / -1,8

Источник: разработано автором.

Применение рефлективных материалов (сценарий 2), подробно описанное в [2], радикально снижает поглощенную радиацию (Q^*) и пиковый поток явного тепла (Q_H), что обеспечивает быстрое охлаждение воздуха днем. Однако низкая теплоаккумуляция (ΔQ_S) и отсутствие эвапотранспирации приводят к тому, что ночью такие поверхности стремительно остывают, не оказывая существенного влияния на ночной тепловой остров, формируемый массивными бетонными стенами. Внедрение зелено-голубой инфраструктуры (сценарий 3) приводит к перераспределению энергии: значительная доля радиационной энергии преобразуется в поток скрытого тепла (Q_E) за счет фазового перехода влаги в субстрате. Это требует интегрирования систем сбора и удержания ливневых вод, поскольку в условиях засушливого волгоградского лета пересыхание субстрата

резко снижает охлаждающий эффект, превращая сухую зеленую крышу в дополнительный источник явного тепла.

Особого внимания заслуживает сценарий формирования аэродинамических коридоров (сценарий 4). Моделирование показало, что сохранение разрывов во фронтальной застройке, ориентированных на доминирующие северо-западные ветры, обеспечивает адвективное поступление более холодного воздуха с акватории Волги. Хотя дневное снижение T_a оказывается незначительным из-за интенсивного турбулентного перемешивания, ночная вентиляция городских каньонов критически важна для удаления накопленного за день тепла (ΔQ_S) и снижения рисков для здоровья уязвимых групп населения, не имеющих доступа к системам кондиционирования.

Выявленные термофизические закономерности необходимо учитывать в нормативной базе путем корректировки правил землепользования и застройки. Традиционное зонирование, базирующееся на функциональном назначении территорий, неспособно адекватно реагировать на микроклиматические вызовы. Предлагается введение в состав градостроительных регламентов дополнительных параметров допустимого использования земельных участков: «индекс теплового отражения» (обязательный для плоских кровель коммерческой и промышленной застройки) и «коэффициент аэродинамической проницаемости». Для территорий, попадающих в буферные зоны потенциальных ветровых коридоров, выявленных посредством ГИС-анализа рельефа и розы ветров, необходимо установить жесткие ограничения на предельную высоту и сплошность застройки, сохранив эти пространства для внутриквартального озеленения или создания открытых водоемов-накопителей.

Выводы. Проведенное комплексное обследование термодинамических процессов в условиях волгоградской агломерации позволило верифицировать гипотезу о влиянии морфологии линейной застройки на пространственную конфигурацию городского пограничного слоя. Установлено, что вытянутая

вдоль акватории Волги городская структура формирует асимметричный паттерн теплообмена, где адвективный потенциал водного объекта нивелируется перпендикулярно ориентированными магистралями и массивами многоэтажной застройки, выступающими в роли аэродинамических барьеров. Данный феномен, недостаточно освещенный в классических работах, посвященных изотропным городским системам, требует специфических подходов к организации вентиляционных коридоров, учитывающих не только синоптическую розу ветров, но и орографические особенности волжских террас, создающих локальные бризовые циркуляции.

Методология исследования, основанная на совместном использовании спутниковой термометрии и мобильных наземных трансект, показала некорректность упрощенного отождествления температуры подстилающей поверхности с термическим режимом приземного воздуха. Выявленный фазовый сдвиг между пиковыми значениями LST и максимумами T_a, достигающий в условиях засушливого степного климата 3-4 часов, обусловлен высокой тепловой инерцией советского строительного фонда и подтверждает необходимость раздельного нормирования радиационных и конвективных параметров среды. Дифференциация приобретает особую значимость при оценке биоклиматического комфорта, поскольку именно температура воздушной массы на высоте двух метров детерминирует физиологический стресс уязвимых групп населения в периоды продолжительных антициклонов.

Сопоставительный анализ стратегий снижения интенсивности теплового острова вскрывает противоречия между рефлективными и вегетативными технологиями, ранее детально описанными для средиземноморского климата, но получающими специфическое преломление в условиях резко континентального режима. Моделирование компонентов уравнения энергетического баланса подтвердило доминирование потока скрытого тепла в системах с высоким индексом листовой поверхности, однако эффективность эвапотранспирации существенно ограничивается дефицитом атмосферных осадков, что требует

обязательной интеграции с системами аккумуляции ливневого стока. Рефлективные покрытия, демонстрирующие превосходство в период дневного максимума инсоляции при альбедо свыше 0,7, оказываются несостоятельными в ночные часы, когда именно вегетативные субстраты обеспечивают диссипацию накопленной тепловой энергии через длинноволновое выхолаживание, компенсируя эффект тепловой ловушки в плотной застройке.

Ограничением реализованного подхода остается масштабность пространственного моделирования, не позволяющая в полной мере учесть микроуровневые эффекты каньонов с коэффициентом видимости неба ниже 0,3, где турбулентный перенос приобретает нестационарный характер. Дальнейшее развитие методологии предполагает переход к вычислительной гидродинамике высокого разрешения, интегрированной с параметрическими моделями растительного покрова, учитывающими сезонную динамику фенологических фаз и межвидовую вариабельность транспирационных коэффициентов. Перспективным направлением является разработка адаптивных алгоритмов управления зелено-голубой инфраструктурой, основанных на прогнозных метеорологических данных и позволяющих оптимизировать режимы орошения в соответствии с ожидаемыми волнами жары, что особенно актуально в контексте прогнозируемого учащения экстремальных температурных аномалий.

Включение полученных результатов в нормативно-правовое регулирование требует совершенствования традиционных подходов к территориальному зонированию, исторически базирующемуся на функциональном назначении территорий без учета их термодинамических характеристик. Предложенная система дополнительных градостроительных регламентов, включающая индексы теплового отражения и аэродинамической проницаемости, создает инструментарий для превентивного управления микроклиматическими рисками на стадии разработки проектов планировки территорий.

Список литературы

1. Литовский В. В. Пространственное развитие Екатеринбурга: использование в градопланировке потенциала городского острова тепла // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2025. – №. 2 (65). – С. 30-36.
2. Демежко Д. Ю., Хацкевич Б. Д., Факаева Н. Р., Горностаева А. А., Антипин А. Н. Теплопотери зданий и формирование подземного городского острова тепла // Литосфера. – 2025. – Т. 25. – №. 5. – С. 1201-1215.
3. Добрякова В. А., Белова Ю. В., Черемных Л. Д. Исследование и моделирование городского острова тепла на примере г. Тюмени // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2025. – Т. 31. – С. 195-211.
4. Лысенко С. А., Зайко П. О. Метеорологическое моделирование городских «островов тепла» на территории Беларуси в условиях современного глобального потепления // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67. – №. 2. – С. 134-143.
5. Туан Л. М., Бакаева Н. В. Взаимосвязь между городским островом тепла и городским островом загрязнения: аналитический обзор и методы исследований // Экология урбанизированных территорий. – 2023. – №. 2. – С. 72-83.
6. Федорова Д. Д. Генеративное моделирование как концептуальный подход для формирования современных городских пространств // Вестник науки. – 2026. – Т. 4. – №. 5 (98). – С. 2378-2392.
7. Казанцев П. А. Исследование предпосылок формирования устойчивой к климатическим изменениям городской среды в условиях горного побережья и муссонного климата (на примере г. Владивостока) // Урбанистика. – 2024. – №. 3. – С. 28-52.
8. Ермишина А. А., Каргин Н. В., Короткова В. А., Короткова С. Г. Основные пути развития архитектурной среды открытых пространств в городах Северного региона // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2024. – №. 3 (60). – С. 131-143.
9. Круковская О. Ю., Алисиевич С. В. Биоклиматическая комфортность урбанизированных территорий Беларуси // Природопользование. – 2026. – №. 1.

– С. 132-147.

10. Бектемысова Г. У., Молдагулова А. Н., Шайкемелев Г. Т., Омаров С. С., Нуралыкызы С. Пространственно-временная аналитика городского населения с применением тепловых карт // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. – 2025. – Т. 22. – №. 1. – С. 150-162.

11. Карабаев А. М., Нормухаммадов А. А. Научные подходы и методы планирования сети велосипедных дорожек в условиях развивающихся городов // Qazaq Highway Science and Innovation. – 2026. – Т. 1. – №. 2.

References

1. Litovskij V. V. Prostranstvennoe razvitie Ekaterinburga: ispol`zovanie v gradoplanirovke potenciala gorodskogo ostrova tepla // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. – 2025. – №. 2 (65). – S. 30-36.

2. Demezhko D. Yu., Xaczkevich B. D., Fakaeva N. R., Gornostaeva A. A., Antipin A. N. Teplopoteri zdanij i formirovanie podzemnogo gorodskogo ostrova tepla // Litosfera. – 2025. – T. 25. – №. 5. – S. 1201-1215.

3. Dobryakova V. A., Belova Yu. V., Cheremny`x L. D. Issledovanie i modelirovanie gorodskogo ostrova tepla na primere g. Tyumeni // InterKarto. InterGIS. – 2025. – T. 31. – S. 195-211.

4. Ly`senko S. A., Zajko P. O. Meteorologicheskoe modelirovanie gorodskix «ostrovov tepla» na territorii Belarusi v usloviyax sovremennogo global`nogo potepleniya // Doklady` Nacional`noj akademii nauk Belarusi. – 2023. – T. 67. – №. 2. – S. 134-143.

5. Tuan L. M., Bakaeva N. V. Vzaimosvyaz` mezhdu gorodskim ostrovom tepla i gorodskim ostrovom zagryazneniya: analiticheskij obzor i metody` issledovanij // E`kologiya urbanizirovanny`x territorij. – 2023. – №. 2. – S. 72-83.

6. Fedorova D. D. Generativnoe modelirovanie kak konceptual`ny`j podxod dlya formirovaniya sovremenny`x gorodskix prostranstv // Vestnik nauki. – 2026. – T. 4. – №. 5 (98). – S. 2378-2392.

7. Kazancev P. A. i dr. Issledovanie predposy`lok formirovaniya ustojchivoj k

klimaticheskim izmeneniyam gorodskoj sredy` v usloviyax gornogo poberezh`ya i mussonnogo klimata (na primere g. Vladivostoka) // Urbanistika. – 2024. – №. 3. – S. 28-52.

8. Ermishina A. A., Kargin N. V., Korotkova V. A., Korotkova S. G. Osnovny`e puti razvitiya arxitekturnoj sredy` otkry`ty`x prostranstv v gorodax Severnogo regiona // Vestnik Inzhenernoj shkoly` Dal`nevostochnogo federal`nogo universiteta. – 2024. – №. 3 (60). – S. 131-143.

9. Krukovskaya O. Yu., Alisievich S. V. Bioklimaticheskaya komfortnost` urbanizirovanny`x territorij Belarusi // Prirodopol`zovanie. – 2026. – №. 1. – S. 132-147.

10. Bektemy`sova G. U., Moldagulova A. N., Shajkemelev G. T., Omarov S. S., Nuraly`ky`zy` S. Prostranstvenno-vremennaya analitika gorodskogo naseleniya s primeneniem teplovy`x kart // Vestnik Kazaxstansko-Britanskogo texnicheskogo universiteta. – 2025. – T. 22. – №. 1. – S. 150-162.

11. Karabaev A. M., Normuxammadov A. A. Nauchny`e podxody` i metody` planirovaniya seti velosipedny`x dorozhek v usloviyax razvivayushhixsya gorodov // Qazaq Highway Science and Innovation. – 2026. – T. 1. – №. 2.

Статья поступила в редакцию 24.03.2026; одобрена после рецензирования 23.04.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 24.03.2026; approved after peer review 23.04.2026; accepted for publication 28.08.2026.