



Generation, Development, and Mitigation of the Urban Heat Island: A Review

Korniyenko, Sergey Valeryevich^{1*} 
Dikareva, Ekaterina Aleksandrovna¹ 

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; svkorn2009@yandex.ru (K.S.V.); ea.dikareva@gmail.ru (D.E.A.);

Correspondence:* email svkorn2009@yandex.ru; contact phone [+79884912459](tel:+79884912459)

Keywords:

Concretes; Calibration; Computer simulation; Constitutive models; Strength; Stress-strain curves; Static loads; Finite element method; Plasticity Urbanization; Urban planning; Urban heat island (UHI); Climate; Thermal comfort; Environment; Green construction; HVAC

Abstract:

Data on the Urban Heat Island (UHI) phenomenon are systematized. The main causes of the UHI and its possible consequences have been researched. The main reason for the increase in urban air temperature is the formation of fundamentally different temperature-humidity and air conditions in the urban development due to a change in the land use structure compared to the adjacent territory. Heat and mass transfer processes in the urban environment are closely interconnected. As settlements grow, the UHI effect is increased. In a temperate climate with hot, dry summers, the mechanisms of the UHI are not sufficiently studied. It is shown that a new paradigm of urban planning is needed, based on the harmonious relationship between man and the environment. Urban planning strategies aimed at the broad application of green infrastructure can significantly reduce the energy demand of cities in the summer while providing new green areas for people. The reduction is especially distinctly in megacities in which residential apartment buildings make up a significant part of the development. It is necessary to monitor the outdoor climate at various points in the city to determine the actual meteorological characteristics. The measurements serve as a baseline for mathematical simulation of the urban climate. Research to form a comfortable, energy-efficient environment for city residents is relevant and promising.

1 Introduction / Введение

Стратегия устойчивого развития предполагает комплексный подход к решению глобальных экологических проблем. Климатические воздействия подлежат обязательному учету, так как являются одним из важнейших средовых факторов, влияющих на жизнедеятельность человека [1].

Быстрый рост населения усиливает значение городов. Урбанизация приводит к изменению существующего ландшафта в связи со строительством зданий, сооружений, объектов транспортной инфраструктуры [2]. В результате таких преобразований появляются городские тепловые острова. Феномен городского теплового острова (Urban Heat Island, UHI) заключается в том, что внутри города происходит локализация тепловых потоков по сравнению с прилегающими территориями. Чем больше территория города и выше плотность застройки, тем сильнее проявляется эффект теплового острова. За счет образования городских тепловых островов температура воздуха повышается в течение года. Зимой тепловой остров снижает потребность в энергии для отопления зданий, однако летом существенно возрастают энергетические затраты на охлаждение. Тепловой остров оказывает влияние на комфортность среды обитания человека. Согласно экспертной оценке в общем количестве выбросов парниковых газов, связанных деятельностью человека, доля городов составляет около 60%, поэтому городские территории вносят существенный вклад в изменение климата. Неуклонное повышение средней температуры климатической системы Земли, связанное с природными факторами и человеческой



деятельностью, может привести к повышению уровня мирового океана, региональным изменениям осадков, более частым экстремальным погодным явлениям. В свою очередь, изменение климата требует защиты городских территорий от неблагоприятных климатических воздействий.

Одним из путей решения актуальной проблемы смягчения городского теплового острова является внедрение и развитие природных экосистем. Интерес к использованию природных экосистем для повышения устойчивости городской среды неуклонно возрастает [3]. По сравнению с традиционным подходом решения, основанные на законах природы, более эффективны [4], [5]. Благодаря применению элементов живой природы удается повысить комфортность городского пространства, улучшить здоровье и качество жизни людей, увеличить безопасность городской среды [6], [7]. Такие элементы, интегрированные в зеленую инфраструктуру города, снижают загрязненность окружающей среды, заметно уменьшают уровень шума, регулируют микроклимат, увеличивают производство кислорода, регулируют сток и фильтрацию воды, и в конечном итоге могут существенно повлиять на процесс смягчения городского теплового острова.

Следует отметить, что в настоящее время результаты исследований, связанных с формированием, развитием и смягчением городских тепловых островов, недостаточно систематизированы. Проблеме тепловых островов в России уделяется существенно меньше внимания, чем за рубежом. Это замедляет внедрение инновационных биопозитивных материалов, конструкций и технологий в современную отечественную практику градостроительства и архитектуры, снижает точность оценки энергетической эффективности зданий и потому требует детального рассмотрения и систематизации данных по городским тепловым островам.

Целью настоящего исследования является систематизация данных на основе обзора работ отечественных и зарубежных ученых, посвященных феномену теплового острова в урбанизированной среде.

2 Materials and Methods / Материалы и методы

Для исследования использованы общенаучные методы сопоставительного анализа. Выполнен поиск и отбор релевантной зарубежной и отечественной литературы с применением эффективных критериев подбора источников. Систематизированы данные по изучению феномена тепловых островов в урбанизированной среде. Изучены основные причины возникновения городского теплового острова и его возможные последствия. Показаны основные способы смягчения городских тепловых островов.

3 Results and Discussion / Результаты и обсуждение

3.1 Causes of the generation and development of the UHI / Причины формирования и развития городского теплового острова

Безусловно, урбанизация приводит к изменению типа землепользования. В результате на территории города образуются различные искусственные ландшафты, существенно отличающиеся от естественной среды, формируется особая, городская среда. Растущая урбанизация ставит перед архитекторами и градостроителями сложную задачу по защите от неблагоприятных климатических воздействий.

Известно, что под городской средой понимают совокупность условий, созданных человеком и природой (в границах населенного пункта), которые оказывают влияние на уровень и качество жизнедеятельности человека. При всей многогранности понятия «городская среда» наиболее важным, на наш взгляд, в этом определении является комплекс условий, обеспечивающих комфортность среды обитания. Термин «комфортность» можно раскрыть как степень благоприятности условий окружающей среды для жизни и хозяйственной деятельности, под которыми понимается совокупность физико-географических, экологических и социально-экономических факторов, позволяющих в полной мере удовлетворить индивидуальные и социальные потребности общества. Согласно определению, данному известным экологом И.И. Дедю, под экологической комфортностью понимают «диапазон интенсивности факторов окружающей среды, соответствующий экологическому оптимуму организма, в том числе человека. Определяется климатическими и другими природными особенностями данной



местности, меняется в зависимости от времени года и психофизиологических особенностей человека». Таким образом, одним из аспектов комфортности городской среды является оптимальное для организма человека сочетание температуры, влажности, скорости ветра, при котором его терморегулирующие функции находятся в состоянии покоя.

Большое внимание уделяется проблеме трансформации климата в крупных городах, в которых естественные процессы нагревания и увлажнения воздуха, а также ветровой режим могут заметно изменяться под влиянием деятельности человека. Новые приемы застройки с тенденцией увеличения этажности зданий, рост городского населения, развитие промышленности и транспорта оказывают существенное влияние на мезо- и микроклимат городов. Большие урбанизированные площади приводят к формированию городского климата. Всемирная метеорологическая организация в 1981 году дала определение «городского климата» как климата, формирующегося вследствие непрерывного взаимодействия воздушных масс с подстилающей поверхностью городской среды и под ее влиянием.

Влияние города на микроклиматические параметры окружающей среды изучается на протяжении длительного времени. Вопросам городской климатологии посвящено большое количество исследований, зачатки которых можно проследить в работах ученых Древнего Рима. Так, римский зодчий Витрувий (75-26 г. до н.э.) в работе «Город и климатические условия» впервые обратил внимание на застройку городов согласно климатическим условиям, его по праву называют «первым климатологом в архитектуре». На основе первых систематических метеонаблюдений британским метеорологом Люком Ховардом была написана монография, посвященная климату города, в которой были изложены особенности городского метеорежима, введены новые понятия о городском климате, даны характеристики и описания «городского тумана» [8]. Об отклонении метеопказателей в Париже по сравнению с сельской местностью писал французский ученый Э. Рено, в основу работы был положен многолетний ряд наблюдений, продолжавшийся с 1815 по 1902 год. В конце прошлого столетия написана известная среди специалистов монография Р. Леру «Экология человека – наука о жилище», в которой был поставлен вопрос об инженерном подходе к проектированию жилища на базе биоклиматических характеристик организма человека. В основе изучения климата городов в отечественной науке лежат работы советских ученых – климатологов и физико-географов Л.С. Берга, М.И. Будыко, А.И. Воейкова и др., посвященные географическим закономерностям распределения климатических ресурсов на территории земного шара и России, а также последствиям антропогенного вмешательства человека в естественные процессы окружающей среды. Особенно большое внимание климату городов и учету природно-климатических факторов окружающей среды при планировании городов среди отечественных ученых было обращено в послевоенные годы, когда восстанавливались разрушенные и создавались новые районы и города по всей России. В 50–70-е годы XX века закладывалась научно-методическая база архитектурно-климатического анализа, нового междисциплинарного направления на стыке климатологии, архитектуры и градостроительства. Формирование принципов архитектурно-климатического анализа осуществлялось в тесном сотрудничестве архитекторов (Былинкин Н.П., Давидсон Б.М., Лицкевич В.К., Серебровский Ф.Л., Чистякова С.Б.), инженеров (Васильев Б.Ф., Краснощекова Н.С., Реттер Э.И.), климатологов (Гербурт-Гейбович А.А., Конова Л.И., Климова Г.К., Семашко К.И., Чернавская М.М., Клименко В.В.) врачей-гигиенистов (Арнольди И.А., Бокша В.Г., Кандрор И.С., Кирьянова И.С. и др.). В результате были разработаны и внедрены теоретические основы учета фоновых климатических условий в архитектурном проектировании – климатическое районирование, погодно-временная оценка климата и методические основы учета местных климатических (микроклиматических) условий.

В 1958 году была переведена на русский язык и опубликована хорошо известная монография П.А. Кратцера, в которой были приведены результаты многолетних наблюдений за климатом городов Западной Европы, даны некоторые характерные температурно-влажностные и ветровые характеристики атмосферы крупных промышленных городов. В 1973 году в г. Москве было проведено Всесоюзное совещание градостроителей, архитекторов, метеорологов, географов и климатологов по теме «Климат – город – человек», на котором были рассмотрены актуальные вопросы развития междисциплинарных направлений в области городской климатологии. Несмотря на спад интереса к городской климатологии в 90-е годы XX века, вызванного более низкими темпами градостроительства в стране и отсутствием господдержки в этом направлении, в 1993 году было опубликовано базовое учебное пособие «Городская климатология» Коваленко П.П., адресованное студентам строительных специальностей, в

Korniyenko, S. V.; Dikareva, E. A.

Generation, Development, and Mitigation of the Urban Heat Island: A Review;
2021; *AlfaBuild*; 16 Article No 1605. doi: 10.34910/ALF.16.5

котором были систематизированы и изложены теоретические и практические знания о климате городов и рассмотрены возможности применения полученных знаний при строительстве и благоустройстве городских территорий.

В настоящее время классиком городской климатологии по праву можно считать американского метеоролога, профессора Университета Британской Колумбии (г. Ванкувер, Канада) и основателя Международной ассоциации городской климатологии Т.Р. Оке. Им было опубликовано более двухсот научных работ, посвященных исследованиям теплового и водного баланса городской среды; он является автором книги «Boundary Layer Climates» [9], [10]. Известны и другие работы Т.Р. Оке, посвященные исследованию актуальных проблем повышения качества городского климата [11]–[16].

Во многих исследованиях сообщалось о последствиях урбанизации, включая изменение городского климата [17], [15], формирование городских тепловых островов [16], [18], [19], [20], [21], [22–30], [4], [31], вклад городской среды в глобальное потепление [32], [33], изменение количества осадков [22], а также снижение влажности воздуха и интенсивности испарения в городах [16], [18], [19].

Многими авторами городской климат описывается как одна из разновидностей микроклимата. Факторами, определяющими микроклиматические различия, являются: экспозиция подстилающей поверхности, маломасштабные неровности рельефа, различное увлажнение почвы и характер растительного покрова. Под действием этих и других факторов происходят преобразования радиационного и теплового баланса подстилающей поверхности в так называемом деятельном слое атмосферы [13]. Городской климат влияет как на метеорологические параметры (температуру воздуха, влажность, солнечную радиацию и скорость ветра), так и на другие переменные, например, качество воздуха и уровень шума.

Среднегодовая температура воздуха в городе с населением один миллион и более человек может быть на 1,8–5,4 °F (1–3 °C) выше, чем в его окрестностях. В ясную ночь с незначительной скоростью ветра разность температуры может достигать 22 °F (12 °C) [12]. В жаркий летний день температура поверхности крыши или тротуара может быть на 50–90 °F (27–50 °C) выше по сравнению с окружающим воздухом, в то время как затененные или влажные поверхности в сельской местности остаются близкими к температуре воздуха [9]. Такое явление известно как поверхностные городские тепловые острова, которые в конечном итоге могут способствовать возникновению городских тепловых островов в атмосфере (рис. 1).

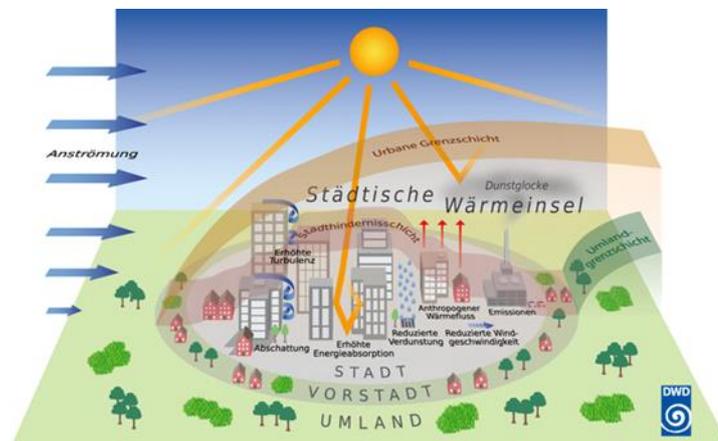


Рис. 1 – Формирование городского теплового острова [16]

Fig. 1 – Generation of the UHI [16]

В 2014 году 54% населения мира проживало в городских районах и ожидается, что к 2050 году это число вырастет до 66%, при этом самая быстрая урбанизация наблюдается в Азии и Африке [25], [33]–[35]. Урбанизация часто приводит к увеличению плотности городского населения. Полученные специалистами фактические данные свидетельствуют о том, что многие густонаселенные районы мира в перспективе станут непригодными для проживания из-за истощения ресурсов, изменения климата и растущей урбанизации, ведущей к изменениям микроклимата, которые напрямую влияют на пригодность для жизни [34], [36].

К настоящему времени накоплен достаточно большой объем исследований феномена городского острова теплоты. Известно, что температура воздуха в городе несколько выше по

сравнению с окружающей сельской местностью: на границе города существует сильный температурный градиент с последующим медленным повышением температуры к центральной его части [11], [15]. «Обрыв», ведущий к «острову», особенно отмечается на наветренной границе между городом и пригородом и довольно точно повторяет очертания застроенной территории на большей части периметра города. Большая часть остальной городской территории характеризуется более слабым горизонтальным градиентом температуры, но прерывается теплыми или прохладными пятнами, связанными с локализованными районами с аномально высокой или низкой плотностью застройки. Парк или озеро могут быть относительно прохладными, тогда как промышленная зона, жилой комплекс, торговый центр или центральная часть города могут быть относительно теплыми (рис. 2). При слабом ветре происходит смещение температурного поля по направлению ветра [13].

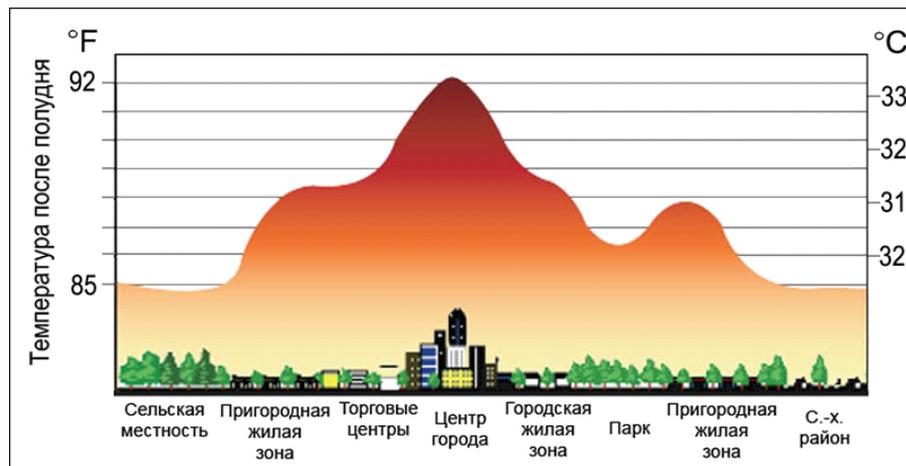


Рис. 2 – Городской тепловой остров (профиль температуры) [12]
Fig. 2 – Urban heat island (temperature profile) [12]

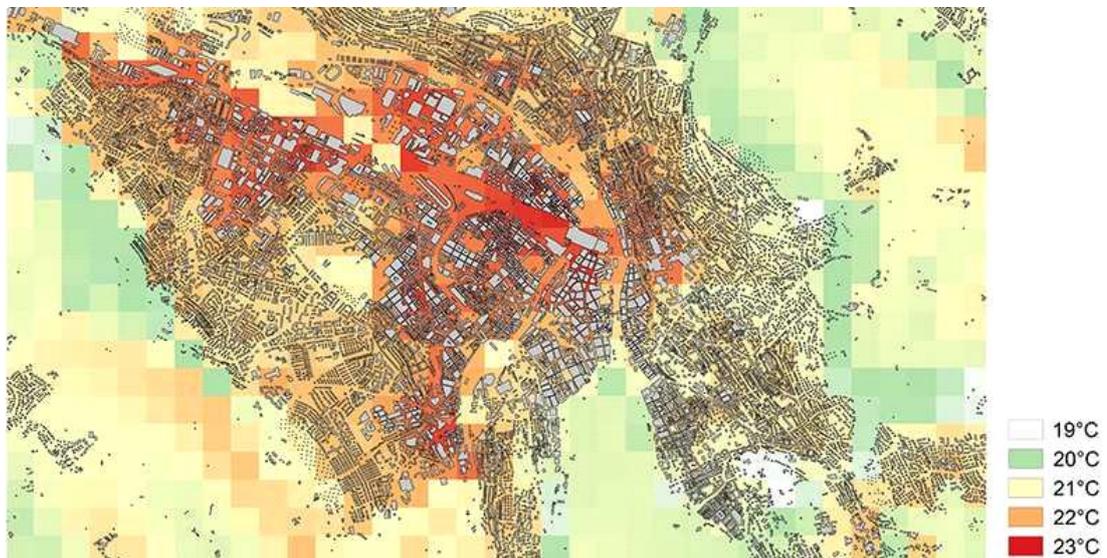


Рис. 3 – Эффект теплового острова в Цюрихе. Температуры воздуха вычислены на высоте двух метров над землей 22 июня 2017 года в 6 часов утра. Большое здание в центре рисунка – Hauptbahnhof (Источник: Empa / ETH Zurich / Gianluca Mussetti)

Fig. 3 – Effect of the UHI in Zurich. Air temperatures were calculated at an altitude of two meters above the ground on June 22, 2017 at 6 a.m. Large building in the center of the figure – Hauptbahnhof (Source: Empa/ETH Zurich/Gianluca Mussetti)

Характеристики городского теплового острова были определены для поселений различного типа и продолжают изучаться для различных городов и стран [12], [15]. В крупных городах разность температуры воздуха в городе и сельской местности может достигать 10 °С. Во многих городах США температура воздуха на 5,6 °С выше, чем в окружающем естественном

растительном покрове. Главной причиной повышения температуры воздуха является формирование принципиально иных температурно-влажностного и воздушного режимов на территории городской застройки вследствие изменения структуры землепользования по сравнению с прилегающей территорией. Процессы тепломассопереноса в городской среде тесно взаимосвязаны. По мере роста населенных пунктов эффект городского теплового острова усиливается (рис. 3).

Городской тепловой остров подразделяется на два типа: поверхностный (наземный) и атмосферный.

Поверхностный городской тепловой остров – это явление, при котором поверхности, такие как крыши и фасады зданий, а также улицы и дороги, нагреваются в дневное время под действием солнечного излучения. Городские поверхности более подвержены воздействию Солнца по сравнению с затененными поверхностями в сельской местности. Когда городской воздух становится теплее, чем в прилегающей сельской местности, формируется атмосферный городской остров теплоты. Интенсивное повышение температуры можно наблюдать в границах от земной поверхности до поверхности крыш, затем интенсивность роста температуры падает, и на некоторой высоте городской ландшафт не оказывает влияния на климат [37]. В ночное время тепловой остров сохраняется (а иногда и усиливается), что связано с менее выраженными по сравнению с прилегающими территориями процессами лучистого и конвективного теплообмена.

Ясное представление механизмов образования тепловых островов позволяет разработать принципы строительства устойчивых к климату городов [38].

Изменение структуры землепользования, вызванное урбанизацией, является основным фактором формирования тепловых островов в различных городах по всему миру [22], [30]. Например, в Берлине моделирование вариаций температуры воздуха и температуры поверхностей позволило уточнить механизм образования городского теплового острова [29]. В Бухаресте интенсивность дневных и ночных городских тепловых островов была выше в производственных зонах, чем в лесах и водоемах [39]. Похожая картина наблюдалась в районе реки Янцзы в Китае, где средняя температура застроенных территорий была выше, чем в зоне зеленых насаждений летом: днем на 3 °С, а ночью примерно на 2 °С [28].

Главная стратегия смягчения тепловых островов, на наш взгляд, должна быть направлена на снижение выбросов парниковых газов за счет уменьшения энергетических затрат на пассивное охлаждение зданий в летний период.

Изучение городского климата показывает устойчивое возникновение тепловых островов [15], [40], [41] за счет морфологии городской застройки, строительных материалов и конструкций, преобладающих метеорологических условий и выбросов загрязняющих веществ [40]. Основные факторы формирования теплового острова можно укрупнено разделить на две взаимовлияющие группы – антропогенные и климатогеографические (рис. 4).

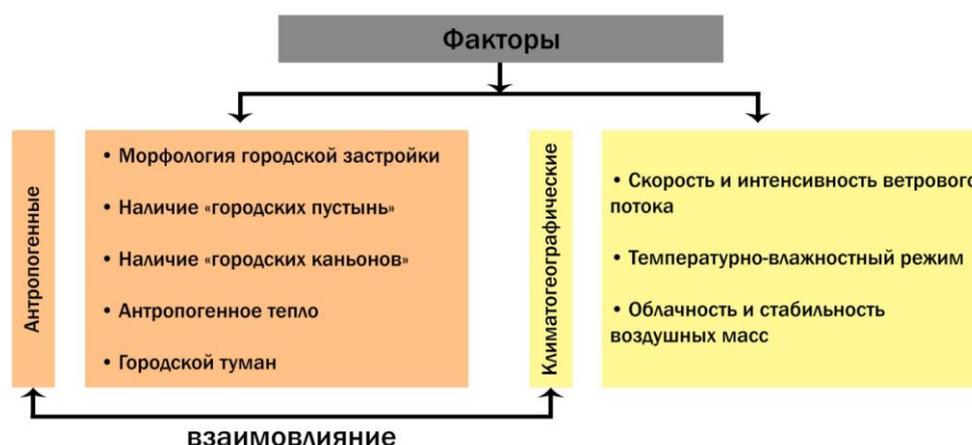


Рис. 4 – Факторы, влияющие на развитие городского острова теплоты

Fig. 4 – Factors that affect the development of the UHI

Антропогенные факторы, способствующие возникновению УИИ:

- Морфология городской застройки. Города имеют более сложную форму по сравнению с сельскими районами.

- Городские пустыни. Города можно рассматривать средой, где почти нет растительности. Замена зеленых насаждений объектами капитального строительства сводит к минимуму эффект, связанный с естественным затенением и испарительным охлаждением за счет процессов эвапотранспирации. Регулирование температуры на территории застройки посредством городской растительности дает возможность снизить потребность зданий в энергии.
- Городские каньоны. Это высокие «ущелья», образованные зданиями, улавливающими лучистую энергию. Высокие здания и узкие улицы нагревают прилегающий воздух и часто уменьшают воздушный поток. Сравнение «эффекта каньона» в городах Европы и Северной Америки показывает, что в районах с более плотной застройкой тепловые острова выражены сильнее.
- Антропогенное тепло. Выделение теплоты в результате сжигания ископаемого топлива также может повышать температуру воздуха в городе. Теплота от автомобилей, производственных зданий и кондиционеров усиливает эффект теплового острова. В типичный зимний день Манхэттен выделяет в четыре раза больше энергии от сжигания ископаемого топлива, чем количество энергии, поступающей в город от Солнца [12].
- Городской туман – скопление водяного пара в загрязненном воздухе. Такое явление часто образуется над многими городами и приводит к возникновению «локального парникового эффекта», предотвращая выход теплового излучения из городских районов.

Наиболее значимыми метеорологическими переменными, определяющими интенсивность теплового острова и относящимися к климатогеографическим факторам, являются скорость и интенсивность ветра, облачность и фактор стабильности воздушных масс. Ветровой режим и облачность тесно связаны с турбулентным и радиационным переносом тепловой энергии. Фактор стабильности воздушных масс коррелирует с интенсивностью теплового острова [13].

Обобщить факторы, влияющие на формирование городского острова теплоты, можно с помощью модели, показанной на рис. 5.

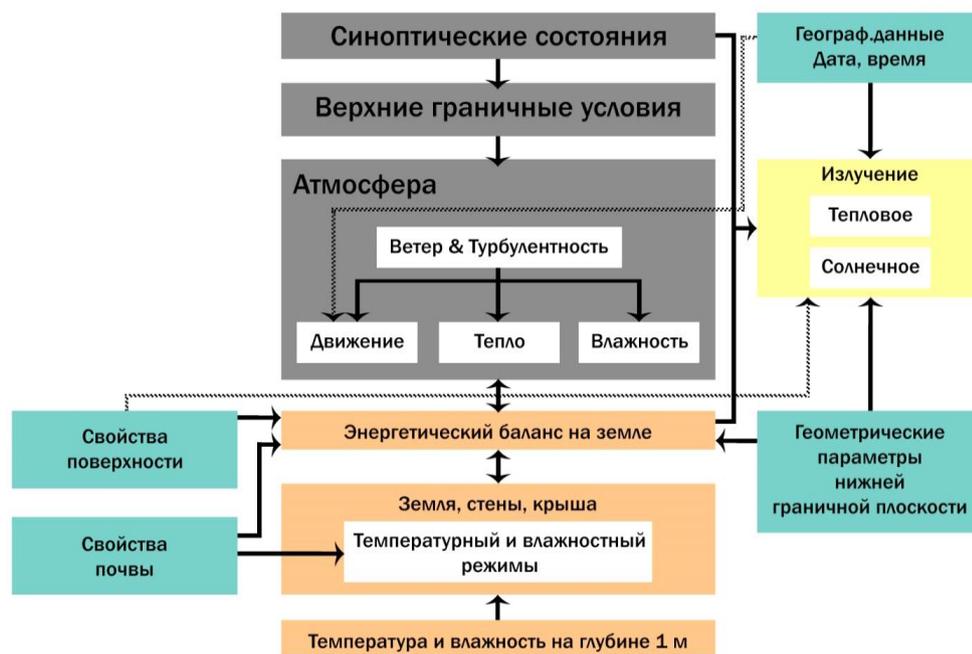


Рис. 5 – Микромасштабная модель городского климата
Fig. 5 – Micro-scale urban climate model

Таким образом, городской остров теплоты представляет собой тепловую аномалию, имеющую как пространственные (горизонтальные и вертикальные), так и временные характеристики, и наблюдаемую практически во всех исследованных населенных пунктах. В средних широтах эффект городского теплового острова наиболее изучен. Установлена связь его характеристик как с параметрами города (формой, размером, плотностью застройки, распределением землепользования), так и с внешними воздействиями (климатом,



преобладающей погодой, временем года) [13]. В условиях умеренного климата с жарким сухим летом механизмы городского теплового острова изучены недостаточно.

3.2 Mitigation of the UHI / Смягчение городского теплового острова

Ввиду ожидаемых климатических изменений необходимо, особенно для мегаполисов, разработать стратегии адаптации к последствиям таких изменений, в дополнение к мерам по защите климата. Только так можно свести к минимуму уязвимость городов и сохранить высокое качество жизни людей в будущем.

Крупномасштабный процесс урбанизации увеличивает вероятность возникновения эффекта городского «сухого» острова [42], городской жары, тумана и других явлений в городах [29], и эти явления могут вызвать серьезные проблемы в различных сферах жизнедеятельности человека.

Повышенные температуры из-за городских островов теплоты непосредственно влияют на качество жизни населения и могут отрицательно сказаться как на естественной, так и на искусственной среде. Их неблагоприятные воздействия включают:

- угрозу здоровью человека с повышенным риском респираторных заболеваний, теплового истощения, теплового удара и связанной с жарой смертности;
- повышенное потребление энергии, необходимое для кондиционирования зданий и сооружений, что приводит к увеличению выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу;
- увеличение затрат из-за использования систем охлаждения и кондиционирования воздуха.

Данные последствия приводят к необходимости исследований феномена городского острова теплоты и поиску путей по снижению его отрицательного воздействия. По мере развития городов сокращается количество зеленых насаждений. Поверхности зданий, особенно темные крыши и фасады, интенсивно поглощают теплоту солнечного излучения. По мере того, как здания нагреваются, увеличивается эффект городского острова теплоты и повышается потребность в кондиционировании воздуха.

В литературе особо подчеркивается необходимость смягчения городских тепловых островов во избежание перегрева в летний период года [43], [25], [44]–[50], [51]. Обычно предлагаемые меры включают посадку деревьев, использование озелененных крыш и общее увеличение площади зеленых насаждений [23], [48], применение светлых поверхностей крыш и фасадов зданий [47], [52]. Наиболее эффективны комплексные решения преобразования городской среды [53], [54], [55]–[57], [58].

Итак, эффект городского острова теплоты можно смягчить, совершенствуя городское планирование и стратегию городского развития. Для смягчения эффекта городского острова теплоты могут быть использованы следующие методы:

- повышение класса энергоэффективности зданий за счет внедрения повышенных требований по энергосбережению к новому строительству [59]–[62] и проведения термореновации существующих зданий;
- формирование благоприятных аэродинамических режимов в городской среде путем создания естественных вентилируемых «коридоров» в сетке улиц (природных кондиционеров), что обеспечит доступ свежего воздуха в каждую квартиру;
- запрет на дальнейшее уплотнение открытых городских пространств и мест общего пользования;
- городское и ландшафтное планирование, учитывающее максимальное внедрение природных компонентов, широкое применение биопозитивных строительных материалов, конструкций и технологий;
- ограничение применения темных бетонных покрытий на городских территориях;
- оптимизация вертикального и горизонтального расширения города с помощью методов имитационного моделирования, создание компактных городов;
- упорядочение функциональных городских зон с учетом аэродинамического режима региона;
- обеспечение и поддержание необходимой аэрации городской территории;
- развитие зеленого пояса в городской местности (с учетом климатических характеристик региона);



- озеленение крыш и фасадов зданий, ландшафтное орошение;
- повышение альбедо дорог за счет нанесения покрытий с высокой отражательной способностью;
- окрашивание поверхностей фасадов и крыш в белый цвет или другие светлые тона [59].

За последние десятилетия интенсивные процессы урбанизации привели к созданию искусственной среды с низкой энергоэффективностью и острой нехваткой зеленых насаждений. Зеленые насаждения играют важную роль в регулировании местного микроклимата [63]. Эффективные средства управления микроклиматом и зеленая инфраструктура появились почти одновременно и в некоторой степени были взаимозаменяемы в 1980-х годах. Начиная с 2012 года, они получили широкое применение. С этого времени возрастает интерес к междисциплинарным исследованиям. Под зеленой инфраструктурой понимают созданную человеком инфраструктуру с целью ослабления воздействия на окружающую среду. Концепция зеленой инфраструктуры является широкой и гибкой по своей природе и включает такие составляющие как сети открытых общественных пространств, кроны деревьев, водные угодья (естественные или искусственные), системы биофильтрации, зеленые стены и зеленые крыши [2], [5], [64], [65], [66]. Доказано, что зеленая инфраструктура формирует здоровый образ жизни, имеет множество экологических, экономических и социальных преимуществ [32], [33]. Она минимизирует риски локальных наводнений, смягчает городские острова теплоты и экстремальные погодные явления, такие как ливни и тепловые волны. Способы решения этих задач разнообразны и включают в себя: затенение поверхностей, испарительное охлаждение, увеличение влагопроницаемых территорий, например, парков и скверов. Зеленая инфраструктура является эффективным средством повышения устойчивости городов [33].

Роль городской зеленой инфраструктуры, с точки зрения смягчения последствий изменения климата, хорошо обоснована. Элементы зеленой инфраструктуры в городской среде, например, зеленые крыши, парки или скверы, уменьшают поверхностный сток воды и улучшают здоровье жителей. Они способствуют смягчению летних тепловых волн и создают комфортные территории для жизни.

Влияние растительности на регулирование климата имеет большое значение в городах, где естественные характеристики зеленой инфраструктуры способствуют смягчению эффекта городского теплового острова [45], [44], [25], [46]. Среди различных природных процессов, участвующих в регулировании климата, фундаментальную роль играет затенение зданий городской растительностью [6]. Создание тени растительными формами, особенно деревьями, способно уменьшить количество солнечной энергии, поглощаемой зданием, и, следовательно, может снизить потребность в энергии для охлаждения помещений [67], [46], [68]. Полученная экономия энергоресурсов может быть дополнительно увеличена за счет эффекта эвапотранспирации [69]. Однако общий положительный эффект зависит от множества различных характеристик городской среды, включая структуру и конфигурацию различных видов землепользования и конкретных микроклиматических условий [70], [71]. Недавние исследования показали [25], [35], [46], [48], [50], [54], [65], [72]–[75], что устойчивое будущее городов требует широкого применения озелененных крыш и фасадов. Такой подход может привести к снижению потребности в охлаждении на 84%.

Использование зеленой инфраструктуры (включая озеленение крыш), влагопроницаемых поверхностей, ограничение стока ливневых вод в канализационные системы – это некоторые из мер, принятых в рамках Плана адаптации городов к изменению климата до 2030 года [76]. Внедрение комбинированного решения (зеленые крыши и влагопроницаемые поверхности) позволяет улучшить качество городской территории в пределах от 18,6% до 22,1%.

Большое количество авторов изучает потенциальные возможности использования растительных форм для снижения энергопотребления зданий, более ограниченные исследования сосредоточены на сложных пространственных отношениях между зданиями и деревьями в городской среде [77], [6], [78], [5], [79]. Эти отношения включают взаимное расположение деревьев и зданий, виды деревьев, местные климатические условия.

Таким образом, необходима новая парадигма городского планирования, основанная на гармоничных отношениях между человеком и окружающей средой [74]. Стратегии городского планирования, нацеленные на широкое применение зеленой инфраструктуры, могут оказать значительное влияние на снижение потребности городов в энергии в летнее время, обеспечивая при этом новые зеленые зоны для человека. Это особенно актуально в мегаполисах, в которых жилые многоквартирные здания составляют значительную часть застройки [36], [17], [27].



Для определения фактических метеорологических характеристик необходимо проведение мониторинга наружного климата в различных точках города. Результаты измерений служат исходными данными для математического моделирования городского климата. По итогам исследований могут быть даны конкретные предложения по формированию комфортной энергоэффективной среды для жителей города.

4 Conclusions / Заключение

Систематизированы данные по изучению тепловых островов в урбанизированной среде. Феномен городского теплового острова заключается в том, что внутри города происходит локализация тепловых потоков по сравнению с прилегающими территориями. Чем больше территория города и выше плотность застройки, тем сильнее проявляется эффект теплового острова.

Изучены основные причины возникновения городского теплового острова и его возможные последствия. Главной причиной повышения температуры воздуха в городе является формирование принципиально иных температурно-влажностного и воздушного режимов на территории городской застройки вследствие изменения структуры землепользования по сравнению с прилегающей территорией. Процессы тепломассопереноса в городской среде тесно взаимосвязаны. По мере роста населенных пунктов эффект городского теплового острова усиливается. В условиях умеренного климата с жарким сухим летом механизмы городского теплового острова изучены недостаточно.

Показано, что необходима новая парадигма городского планирования, основанная на гармоничных отношениях между человеком и окружающей средой. Стратегии городского планирования, нацеленные на широкое применение зеленой инфраструктуры, могут оказать значительное влияние на снижение потребности городов в энергии в летнее время, обеспечивая при этом новые зеленые зоны для человека. Это особенно актуально в мегаполисах, в которых жилые многоквартирные здания составляют значительную часть застройки.

Для определения фактических метеорологических характеристик необходимо проведение мониторинга наружного климата в различных точках города. Результаты измерений служат исходными данными для математического моделирования городского климата. Исследования по формированию комфортной энергоэффективной среды для жителей города актуальны и перспективны.

References

1. Bhargava, A., Lakmini, S., Bhargava, S. Urban Heat Island Effect: It's Relevance in Urban Planning. *Journal of Biodiversity & Endangered Species*. 2017. 05(02). DOI:10.4172/2332-2543.1000187. URL: <https://www.omicsonline.org/open-access/urban-heat-island-effect-its-relevance-in-urban-planning-2332-2543-1000187.php?aid=89471>.
2. Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., de Boissezon, B., Vandewoestijne, S. Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*. 2017. 159. Pp. 509–518. DOI:10.1016/j.envres.2017.08.032. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013935117316080>.
3. Hansen, R., Pauleit, S. From Multifunctionality to Multiple Ecosystem Services? A Conceptual Framework for Multifunctionality in Green Infrastructure Planning for Urban Areas. *AMBIO*. 2014. 43(4). Pp. 516–529. DOI:10.1007/s13280-014-0510-2. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s13280-014-0510-2>.
4. Kim, G., Miller, P.A. The impact of green infrastructure on human health and well-being: The example of the Huckleberry Trail and the Heritage Community Park and Natural Area in Blacksburg, Virginia. *Sustainable Cities and Society*. 2019. 48. Pp. 101562. DOI:10.1016/j.scs.2019.101562. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221067071830831X>.
5. Calderón-Contreras, R., Quiroz-Rosas, L.E. Analysing scale, quality and diversity of green infrastructure and the provision of Urban Ecosystem Services: A case from Mexico City. *Ecosystem Services*. 2017. 23. Pp. 127–137. DOI:10.1016/j.ecoser.2016.12.004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212041616305381>.
6. Palme, M., Privitera, R., La Rosa, D. The shading effects of Green Infrastructure in private



- residential areas: Building Performance Simulation to support urban planning. *Energy and Buildings*. 2020. 229. Pp. 110531. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110531. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778820318697>.
7. Orimoloye, I.R., Mazinyo, S.P., Nel, W., Kalumba, A.M. Spatiotemporal monitoring of land surface temperature and estimated radiation using remote sensing: human health implications for East London, South Africa. *Environmental Earth Sciences*. 2018. 77(3). Pp. 77. DOI:10.1007/s12665-018-7252-6. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-018-7252-6>.
 8. Howard, L. *The Climate of London*. Cambridge, Cambridge University Press, 2012. ISBN:9781139226905.
 9. Garratt, J.R. Boundary layer climates. *Earth-Science Reviews*. 1990. 27(3). Pp. 265. DOI:10.1016/0012-8252(90)90005-G. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/001282529090005G>.
 10. Barry, R., Chorley, R., Barry, R.G., Chorley, T. late R. *Boundary layer climates*. Atmosphere, Weather and Climate. Routledge, 2004. Pp. 361–392.
 11. ROTH, M., OKE, T.R., EMERY, W.J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*. 1989. 10(11). Pp. 1699–1720. DOI:10.1080/01431168908904002. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431168908904002>.
 12. Oke, T.R. *URBAN CLIMATES AND GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE*. Applied Climatology. Routledge, 2013. Pp. 290–304.
 13. Oke, T.R. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 1988. 12(4). Pp. 471–508. DOI:10.1177/030913338801200401. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913338801200401>.
 14. Oke, T.R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*. 1976. 14(4). Pp. 268–277. DOI:10.1080/00046973.1976.9648422. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00046973.1976.9648422>.
 15. Arnfield, A.J., Grimmond, C.S.B. An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy and Buildings*. 1998. 27(1). Pp. 61–68. DOI:10.1016/S0378-7788(97)00026-1. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778897000261>.
 16. Unger, J., Sümeghy, Z., Zoboki, J. Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research*. 2001. 58(2). Pp. 117–127. DOI:10.1016/S0169-8095(01)00087-4. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809501000874>.
 17. Su, H.-D., Cao, X., Wang, D.-C., Jia, Y.-W., Ni, G., Wang, J., Zhang, M., Niu, C. Estimation of Urbanization Impacts on Local Weather: A Case Study in Northern China (Jing-Jin-Ji District). *Water*. 2019. 11(4). Pp. 797. DOI:10.3390/w11040797. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/4/797>.
 18. Müller, N., Kuttler, W., Barlag, A. Analysis of the subsurface urban heat island in Oberhausen, Germany. *Climate Research*. 2014. 58(3). Pp. 247–256. DOI:10.3354/cr01195. URL: <http://www.int-res.com/abstracts/cr/v58/n3/p247-256/>.
 19. Kuttler, W., Weber, S., Schonfeld, J., Hesselschwerdt, A. Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology*. 2007. 27(14). Pp. 2005–2015. DOI:10.1002/joc.1558. URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.1558>.
 20. Rizvan, A.M., Dennis, L.Y.C., Liu, C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*. 2008. 20(1). Pp. 120–128. DOI:10.1016/S1001-0742(08)60019-4. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1001074208600194>.
 21. Tomita, T., Kusaka, H., Akiyoshi, R., Imasato, Y. Thermal and Geometric Controls on the Rate of Surface Air Temperature Changes in a Medium-Sized, Midlatitude City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2007. 46(2). Pp. 241–247. DOI:10.1175/JAM2486.1. URL: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JAM2486.1>.
 22. Kaufmann, R.K., Seto, K.C., Schneider, A., Liu, Z., Zhou, L., Wang, W. Climate Response to Rapid Urban Growth: Evidence of a Human-Induced Precipitation Deficit. *Journal of Climate*. 2007. 20(10). Pp. 2299–2306. DOI:10.1175/JCLI4109.1. URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI4109.1>.
 23. Upreti, R., Wang, Z.-H., Yang, J. Radiative shading effect of urban trees on cooling the regional



- built environment. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2017. 26. Pp. 18–24. DOI:10.1016/j.ufug.2017.05.008. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866716303776>.
24. Wang, W. The Influence of Thermally-Induced Mesoscale Circulations on Turbulence Statistics Over an Idealized Urban Area Under a Zero Background Wind. *Boundary-Layer Meteorology*. 2009. 131(3). Pp. 403–423. DOI:10.1007/s10546-009-9378-2. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10546-009-9378-2>.
 25. Aflaki, A., Mirnezhad, M., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Omrany, H., Wang, Z.-H., Akbari, H. Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*. 2017. 62. Pp. 131–145. DOI:10.1016/j.cities.2016.09.003. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264275116305303>.
 26. Che, H.Z. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961–2000. *Geophysical Research Letters*. 2005. 32(6). Pp. L06803. DOI:10.1029/2004GL022322. URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/2004GL022322>.
 27. Zhong, S., Qian, Y., Zhao, C., Leung, R., Wang, H., Yang, B., Fan, J., Yan, H., Yang, X.-Q., Liu, D. Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. 17(8). Pp. 5439–5457. DOI:10.5194/acp-17-5439-2017. URL: <https://acp.copernicus.org/articles/17/5439/2017/>.
 28. Du, H., Wang, D., Wang, Y., Zhao, X., Qin, F., Jiang, H., Cai, Y. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Science of The Total Environment*. 2016. 571. Pp. 461–470. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.07.012. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969716314577>.
 29. Li, H., Wolter, M., Wang, X., Sodoudi, S. Impact of land cover data on the simulation of urban heat island for Berlin using WRF coupled with bulk approach of Noah-LSM. *Theoretical and Applied Climatology*. 2018. 134(1–2). Pp. 67–81. DOI:10.1007/s00704-017-2253-z. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-017-2253-z>.
 30. Li, H., Zhou, Y., Li, X., Meng, L., Wang, X., Wu, S., Sodoudi, S. A new method to quantify surface urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*. 2018. 624. Pp. 262–272. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.11.360. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717334186>.
 31. Kim, G., Miller, P.A. The impact of green infrastructure on human health and well-being: The example of the Huckleberry Trail and the Heritage Community Park and Natural Area in Blacksburg, Virginia. *Sustainable Cities and Society*. 2019. 48. Pp. 101562. DOI:10.1016/j.scs.2019.101562. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221067071830831X>.
 32. Parker, D.E. A Demonstration That Large-Scale Warming Is Not Urban. *Journal of Climate*. 2006. 19(12). Pp. 2882–2895. DOI:10.1175/JCLI3730.1. URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI3730.1>.
 33. Parker, J., Zingoni de Baro, M.E. Green Infrastructure in the Urban Environment: A Systematic Quantitative Review. *Sustainability*. 2019. 11(11). Pp. 3182. DOI:10.3390/su11113182. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/11/3182>.
 34. Lelieveld, J., Proestos, Y., Hadjinicolaou, P., Tanarhte, M., Tyrllis, E., Zittis, G. Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century. *Climatic Change*. 2016. 137(1–2). Pp. 245–260. DOI:10.1007/s10584-016-1665-6. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10584-016-1665-6>.
 35. Aleksandrowicz, O., Vuckovic, M., Kiesel, K., Mahdavi, A. Current trends in urban heat island mitigation research: Observations based on a comprehensive research repository. *Urban Climate*. 2017. 21. Pp. 1–26. DOI:10.1016/j.uclim.2017.04.002. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095517300263>.
 36. Ferwati, S., Skelhorn, C., Shandas, V., Makido, Y. A Comparison of Neighborhood-Scale Interventions to Alleviate Urban Heat in Doha, Qatar. *Sustainability*. 2019. 11(3). Pp. 730. DOI:10.3390/su11030730. URL: <http://www.mdpi.com/2071-1050/11/3/730>.
 37. Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C., Voogt, J. SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. *Urban Climate*. 2019. 28. Pp. 100451. DOI:10.1016/j.uclim.2019.01.005. URL: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.01.005>.



- <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095519300239>.
38. Lim, J., Skidmore, M. Heat Vulnerability and Heat Island Mitigation in the United States. *Atmosphere*. 2020. 11(6). Pp. 558. DOI:10.3390/atmos11060558. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/6/558>.
 39. Cheval, S., Dumitrescu, A. The summer surface urban heat island of Bucharest (Romania) retrieved from MODIS images. *Theoretical and Applied Climatology*. 2015. 121(3–4). Pp. 631–640. DOI:10.1007/s00704-014-1250-8. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-014-1250-8>.
 40. Souch, C., Grimmond, S. Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2006. 30(2). Pp. 270–279. DOI:10.1191/0309133306pp484pr. URL: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1191/0309133306pp484pr>.
 41. GRIMMOND, S. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *The Geographical Journal*. 2007. 173(1). Pp. 83–88. DOI:10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x. URL: http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x.
 42. Zhang, S., Huang, G., Qi, Y., Jia, G. Impact of urbanization on summer rainfall in Beijing–Tianjin–Hebei metropolis under different climate backgrounds. *Theoretical and Applied Climatology*. 2018. 133(3–4). Pp. 1093–1106. DOI:10.1007/s00704-017-2225-3. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-017-2225-3>.
 43. Gunawardena, K.R., Wells, M.J., Kershaw, T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*. 2017. 584–585. Pp. 1040–1055. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.01.158. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717301754>.
 44. Santamouris, M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. 207. Elsevier Ltd, 15-01-2020.
 45. Santamouris, M. Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*. 2007. 1(1). Pp. 123–150. DOI:10.1080/17512549.2007.9687272. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17512549.2007.9687272>.
 46. Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A.L., Rossi, F., Santamouris, M., Synnef, A., WONG, N.H., Zinzi, M. LOCAL CLIMATE CHANGE AND URBAN HEAT ISLAND MITIGATION TECHNIQUES – THE STATE OF THE ART. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*. 2015. 22(1). Pp. 1–16. DOI:10.3846/13923730.2015.1111934. URL: <http://journals.vgtu.lt/index.php/JCEM/article/view/2312>.
 47. Kyriakodis, G.-E., Santamouris, M. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates - Results from a large scale urban mitigation project. *Urban Climate*. 2018. 24. Pp. 326–339. DOI:10.1016/j.uclim.2017.02.002. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095517300081>.
 48. 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. 103. Pp. 682–703. DOI:10.1016/j.solener.2012.07.003. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X12002447>.
 49. Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*. 2011. 85(12). Pp. 3085–3102. DOI:10.1016/j.solener.2010.12.023. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X10004020>.
 50. Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., Synnefa, A. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*. 2017. 154. Pp. 14–33. DOI:10.1016/j.solener.2016.12.006. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X16306004>.
 51. Younger, M., Morrow-Almeida, H.R., Vindigni, S.M., Dannenberg, A.L. The Built Environment, Climate Change, and Health. *American Journal of Preventive Medicine*. 2008. 35(5). Pp. 517–526. DOI:10.1016/j.amepre.2008.08.017. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S074937970800682X>.
 52. Radhi, H., Sharples, S., Taleb, H., Fahmy, M. Will cool roofs improve the thermal performance of our built environment? A study assessing roof systems in Bahrain. *Energy and Buildings*. 2017. 135. Pp. 324–337. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.11.048. URL:



- <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816316036>.
53. Stovin, V., Vesuviano, G., Kasmin, H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*. 2012. 414–415. Pp. 148–161. DOI:10.1016/j.jhydrol.2011.10.022. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169411007347>.
 54. Willuweit, L., O’Sullivan, J.J., Shahumyan, H. Simulating the effects of climate change, economic and urban planning scenarios on urban runoff patterns of a metropolitan region. *Urban Water Journal*. 2016. 13(8). Pp. 803–818. DOI:10.1080/1573062X.2015.1036086. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2015.1036086>.
 55. Korniyenko, S. Complex analysis of energy efficiency in operated high-rise residential building: Case study. *E3S Web of Conferences*. 2018. 33. DOI:10.1051/e3sconf/20183302005.
 56. Korniyenko, S. V., Astafurova, T.N., Kozlova, O.P. Energy Efficient Major Overhaul in Residential Buildings of the First Mass Series. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 753. Pp. 042039. DOI:10.1088/1757-899X/753/4/042039. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/4/042039>.
 57. Korniyenko, S. V., Astafurova, T.N., Kozlova, O.P. Housing in a Smart City. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1079(2). Pp. 022050. DOI:10.1088/1757-899x/1079/2/022050.
 58. Tabunschikov, Y.A. Smart carbon-free buildings and zero energy buildings. *ABOK*. 2016. 8. Pp. 4–9. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6535.
 59. Korniyenko, S.V. Multifactorial forecast of thermal behavior in building envelope elements. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. (8(52)). Pp. 25–37. DOI:10.5862/MCE.52.4. URL: <https://engstroy.spbstu.ru/en/article/2014.52.4/>.
 60. Vatin, N., Korniyenko, S. V., Gorshkov, A.S., Pestryakov, I.I., Olshevskiy, V. Actual thermophysical characteristics of autoclaved aerated concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 96(4). Pp. 129–137. DOI:10.18720/MCE.96.11. URL: <https://engstroy.spbstu.ru/article/2020.96.11/> (date of application: 1.10.2020).
 61. Korniyenko, S. Advanced Hygrothermal Performance of Building Component at Reconstruction of S. Radonezhskiy Temple in Volgograd. *MATEC Web of Conferences*. 2016. 53. Pp. 01003. DOI:10.1051/matecconf/20165301003. URL: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/matecconf/20165301003>.
 62. Korniyenko, S.V., Vatin, N.I., Gorshkov, A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. 64(4). Pp. 10–25. DOI:10.5862/MCE.64.2.
 63. Faivre, N. Nature-based solutions in the EU: innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environment Research*. 2017. 159. Pp. 509–518. DOI:10.1016/j.envres.2017.08.032. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935117316080>.
 64. Allen, M., Voogt, J., Christen, A. Time-Continuous Hemispherical Urban Surface Temperatures. *Remote Sensing*. 2017. 10(2). Pp. 3. DOI:10.3390/rs10010003. URL: <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/1/3>.
 65. Norton, B.A., Coutts, A.M., Livesley, S.J., Harris, R.J., Hunter, A.M., Williams, N.S.G. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*. 2015. 134. Pp. 127–138. DOI:10.1016/j.landurbplan.2014.10.018. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204614002503>.
 66. Ramstein, G. Climates of the Earth and Cryosphere Evolution. *Surveys in Geophysics*. 2011. 32(4–5). Pp. 329–350. DOI:10.1007/s10712-011-9140-4. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10712-011-9140-4>.
 67. Simpson, J.R., McPherson, E.G. Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. *Atmospheric Environment*. 1998. 32(1). Pp. 69–74. DOI:10.1016/S1352-2310(97)00181-7. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231097001817>.
 68. Wong, N.H., Jusuf, S.K., Syafii, N.I., Chen, Y., Hajadi, N., Sathyanarayanan, H., Manickavasagam, Y.V. Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. *Solar Energy*. 2011. 85(1). Pp. 57–71. DOI:10.1016/j.solener.2010.11.002. URL:



- <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X10003294>.
69. Hsieh, C.-M., Li, J.-J., Zhang, L., Schwegler, B. Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Buildings*. 2018. 159. Pp. 382–397. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.10.045. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778817313294>.
70. Correa, E., Ruiz, M.A., Canton, A., Lesino, G. Thermal comfort in forested urban canyons of low building density. An assessment for the city of Mendoza, Argentina. *Building and Environment*. 2012. 58. Pp. 219–230. DOI:10.1016/j.buildenv.2012.06.007. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132312001667>.
71. Calcerano, F., Martinelli, L. Numerical optimisation through dynamic simulation of the position of trees around a stand-alone building to reduce cooling energy consumption. *Energy and Buildings*. 2016. 112. Pp. 234–243. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.12.023.
72. Ellis, J.B. Sustainable surface water management and green infrastructure in UK urban catchment planning. *Journal of Environmental Planning and Management*. 2013. 56(1). Pp. 24–41. DOI:10.1080/09640568.2011.648752. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09640568.2011.648752>.
73. Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C.H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., Sulaiman, M.Y. A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. 23. Pp. 155–168. DOI:10.1016/j.rser.2013.02.022. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211300124X>.
74. Jarosińska, E., Golda, K. Increasing natural retention – Remedy for current climate change in urban area. *Urban Climate*. 2020. 34. Pp. 100695. DOI:10.1016/j.uclim.2020.100695. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212095520302431>.
75. Ascione, F. Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling. *Solar Energy*. 2017. 154. Pp. 34–100. DOI:10.1016/j.solener.2017.01.022. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X17300427>.
76. Szpak, A. Climate change adaptation plans in Polish cities – comparative analysis. *European Planning Studies*. 2021. 29(3). Pp. 493–510. DOI:10.1080/09654313.2020.1744528. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09654313.2020.1744528>.
77. Farhadi, H., Faizi, M., Sanaieian, H. Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2019. 46. Pp. 101448. DOI:10.1016/j.scs.2019.101448. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221067071831271X>.
78. Privitera, R., La Rosa, D. Reducing Seismic Vulnerability and Energy Demand of Cities through Green Infrastructure. *Sustainability*. 2018. 10(8). Pp. 2591. DOI:10.3390/su10082591. URL: <http://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2591>.
79. Larondelle, N., Haase, D. Urban ecosystem services assessment along a rural–urban gradient: A cross-analysis of European cities. *Ecological Indicators*. 2013. 29. Pp. 179–190. DOI:10.1016/j.ecolind.2012.12.022. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X12004414>.