

Модель «острова тепла» урбанизированных территорий и его трансформация

Адхам Иминжанович Гиясов¹, Оксана Николаевна Сокольская²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ); г. Краснодар, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается вопрос формирования «острова тепла», отличающегося активной термо- и аэродинамической характеристикой в воздушной зоне городского приземного слоя атмосферы «острова тепла». Изучение теплового режима города, опирающееся на местные климатические и экологические данные, является наиболее актуальной задачей в вопросе формирования и трансформации городского «острова тепла». Условия комфортного пребывания человека в городах, расположенных в южных широтах, неразрывно связаны с радиационным воздействием под влиянием солнечной радиации, которое усугубляется влиянием «острова тепла». Составление модели трансформационных изменений воздушного купола «острова тепла», а также зависимость трансформации над различными видами морфотипов деятельной поверхности городской инфраструктуры — основная задача исследования.

Методы и материалы. На основе обобщения ряда результатов метеорологических, климатических, микроклиматических и теплофизических исследований разработан программный комплекс для изучения процесса формирования и трансформации «острова тепла». Использованы данные в виде спутниковых снимков с космического аппарата Landsat-8 с сенсором TIRS.

Результаты. Анализ результатов теоретических исследований и расчетов формирования и трансформации тепловой оболочки городской территории при помощи компьютерного моделирования показал зависимость качественных и количественных термодинамических и аэродинамических характеристик «острова тепла» и коэффициента турбулентности. Установлено, что коэффициент турбулентности напрямую влияет на трансформацию купола «острова тепла» в направлении перемещения основного потока ветра. При этом чем больше коэффициент, тем динамичнее трансформация купола по длине X и по высоте Z.

Выводы. Разработанная методика качественной и количественной оценки тепло-ветрового режима модели городского «острова тепла» и его трансформации позволяет предварительно прогнозировать и производить оценку температурного поля тепловой воздушной оболочки городской среды. Составлена модель трансформационных изменений воздушного купола «острова тепла» с разнообразными морфотипами деятельной поверхности городской инфраструктуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: остров, тепло, город, инсоляция, температура, застройка, ветер, турбулентность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гиясов А.И., Сокольская О.Н. Модель «острова тепла» урбанизированных территорий и его трансформация // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 180–192. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.180-192

Автор, ответственный за переписку: Адхам Иминжанович Гиясов, GiyasovAI@gic.mgsu.ru, adham52@mail.ru; Оксана Николаевна Сокольская, ons33@mail.ru.

The model of “heat island” of urbanized territories and its transformation

Adham I. Giyazov¹, Oksana N. Sokolskaya²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

² Kuban State Technological University (KubSTU); Krasnodar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The issue of the formation of a “heat island”, characterized by active thermal and aerodynamic characteristics in the air zone of the urban surface layer of the atmosphere of the “heat island” is considered. The study of the thermal regime of the city, based on local climatic and environmental data, is the most urgent task in the formation and transformation of the “urban heat island”. The conditions of a comfortable human stay in cities located in southern latitudes are inextricably linked with radiation exposure under the influence of solar radiation, which are aggravated by the influence of the “heat island”. Compilation of a model of transformational changes in the air dome of the “heat island”, as well as the dependence of transformation on various types of morphotypes of the active surface of urban infrastructure is the main objective of this study.

Methods and materials. Based on the generalization of a number of results of meteorological, climatic, microclimatic and thermophysical studies, a software package was developed to study the process of formation and transformation of the “heat island”. The data was used in the form of satellite images from the Landsat-8 spacecraft with a TIRS sensor.

Results. The analysis of the results of theoretical studies and calculations of the formation and transformation of the thermal envelope of an urban area using computer modelling showed the dependence of the qualitative and quantitative thermodynamic and aerodynamic characteristics of the “heat island” and the turbulence coefficient. It is established that the turbulence coefficient directly affects the transformation of the dome of the “heat island” in the direction of movement of the main wind flow. At the same time, the higher the coefficient, the more dynamic the transformation of the dome along the length X and height Z .

Conclusions. The developed methodology of qualitative and quantitative assessment of the heat and wind regime of the urban “heat island” model and its transformation allows preliminary forecasting and assessment of the temperature field of the thermal air envelope of the urban environment. A model of transformational changes in the air dome of the “heat island” with various morphotypes of the active surface of the urban infrastructure is compiled.

KEYWORDS: island, heat, city, insolation, temperature, building, wind, turbulence

FOR CITATION: Giyasov A.I., Sokolskaya O.N. The model of the “heat island” of urbanized territories and its transformation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(2):180-192. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.180-192 (rus.).

Corresponding authors: Adham I. Giyasov, GiyasovAI@gic.mgsu.ru, adham52@mail.ru; Oksana N. Sokolskaya, ons33@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Демографическое развитие и процесс урбанизации являются одними из характерных особенностей современной градоекологии. Степень воздействия человека при этом на окружающую среду сопоставима с естественными процессами. Корректная оценка данного воздействия — приоритетная в направлении экологии в целях ее регулирования. В связи с этим актуальный вопрос в градоекологии — изучение формирования городского «острова тепла» (ГОТ) и его трансформация.

Существует ряд научных исследований, которые доказывают, что значительное влияние на радиационно-тепловые характеристики воздушной зоны ГОТ оказывают неоднородные масштабные энергоактивные поверхности подстилающей городской застройки, в которой проживают тысячи, а иногда и миллионы горожан.

Данные исследования представлены такими научными институтами, как Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российский университет дружбы народов, Московский центр фундаментальной и прикладной математики совместно с Рурским университетом в Бохуме, Фрайбургским университетом и Берлинским техническим универ-

ситетом Германии. Установлено, что весомый вклад в ГОТ вносят неоднородные энергоактивные поверхности городской застройки большого масштаба, в которой проживают десятки миллионов людей (рис. 1). При этом города превращаются в накопители энергии за счет потребляемой $1,5 \cdot 10^{13}$ кДж/км²/год энергии, часть которой выделяется в окружающую среду, повышая температуру воздуха на 6–8 °С, иногда в безоблачные дни до 10–11 °С за счет техногенной деятельности и термического режима крупномасштабного энергоактивного подстилающего покрытия (рис. 2).

Интенсивность «острова тепла» и величина тепловой оболочки в нем зависят от антропогенных и техносферных факторов деятельности человека, а также от размеров города и численности населения. При численности населения 8–10 млн чел. контраст температуры между городом и пригородом составляет около 8–9 °С.

Один из ярких примеров научных исследований в этой области — работа Т.Р. Оке [1], в которой предпринята попытка связать разницу температур между городской и сельской местностью на основе численности населения города. Однако выяснилось, для того чтобы описать сложность зависимости температурных показателей и сравнить их между собой, требуются дополнительные результативные данные.

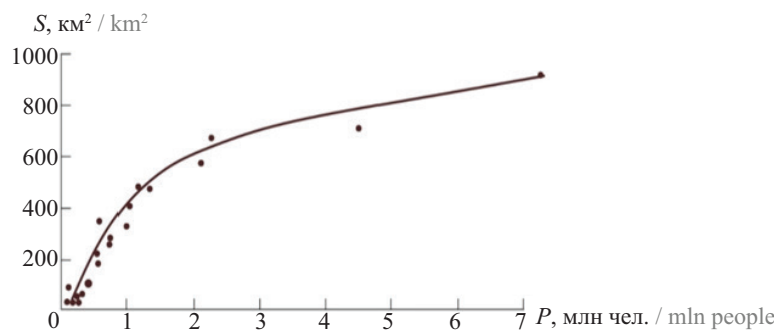


Рис. 1. Зависимость площади городской территории от численности населения

Fig. 1. Dependence of the urban area on the population

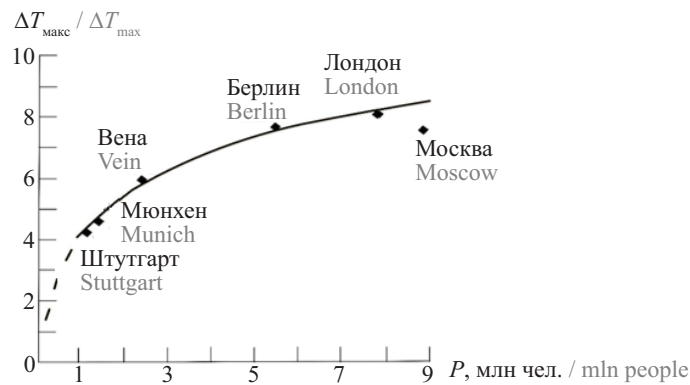


Рис. 2. Среднегодовая разность температуры воздуха в городе и пригороде в зависимости от численности населения (P)
Fig. 2. The average annual difference in air temperature in the city and suburbs, depending on the population (P)

Рассматриваемому вопросу посвящены классические труды зарубежных исследователей [2–8].
В нашей стране первые исследования о климате Москвы выполнены в 1826 г. Д.М. Перовшиковым. Далее они были продолжены в советский период и в настоящее время нашли отражение в работах ряда отечественных авторов [9–15].
Городской «остров тепла» в более континентальном климате при низкой скорости ветра и штиле более устойчив. В этот момент различие температуры воздуха между городом и окраиной в теплый период достигает максимальных величин, в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске до 8–12 °С, в Краснодаре, Ростове-на-Дону, Астрахани, Алматы, Ташкенте, Душанбе до 15 °С, в условиях зимнего антициклона может быть на 6–8 °С выше [16, 17].
При построении модели «острова тепла» городов модель следует рассматривать в двух характерных режимах — зимой и летом. Зимой основное воздействие на «остров тепла» оказывают городские тепловые выбросы, связанные с деятельностью жи-

телей. В летний период, когда общий расход топлива уменьшается, возрастает приток солнечной радиации, который в сочетании с тепловыми выбросами от населения, транспорта, промышленности, а также другими антропогенными тепловыми выбросами способствует концентрации большого количества энергии в городах (рис. 2).
На рис. 3 представлен процесс трансформации «острова тепла» над городом. Определение уровня трансформации над урбанизированной поверхностью при помощи компьютерных программ позволяет определить условия формирования климатических и экологических условий в атмосферной городской среде на макро-, мезо- и микроуровне градостроительного проектирования.
Установлено, что потоки коротковолновой радиации в городе на 5–10 % меньше, а потоки длинноволновой на 5–15 % больше, чем в пригороде.
Эффект формирования повышенных температурных показателей в воздушной зоне «теплового острова» над крупными территориальными арее-

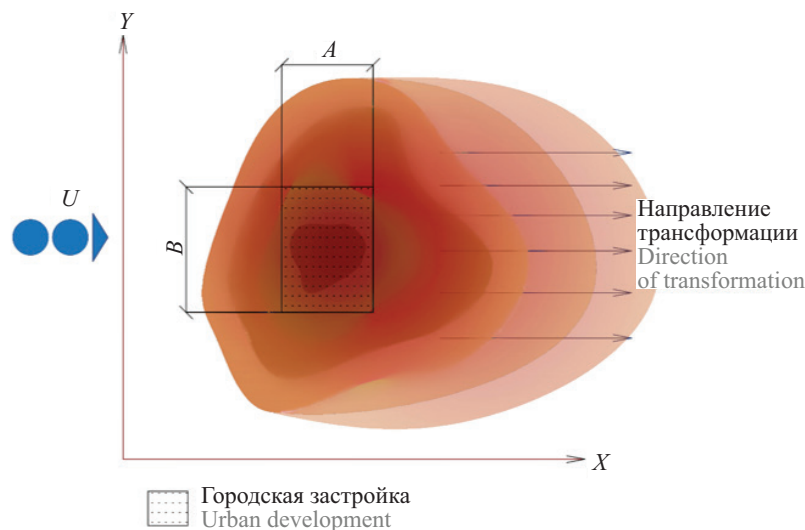


Рис. 3. Модель трансформации городского «острова тепла»
Fig. 3. Model of urban “heat island” transformation

лами проживания людей в последнее время приобрел особую остроту, хотя известен довольно давно, еще с XVIII в.

Доказано, что процесс урбанизации приводит к изменению характера градоклиматических условий атмосферной среды в крупных городах. Поскольку города способствуют повышению температурных показателей, «остров тепла» в повышенных слоях атмосферы ограничен так называемым «пузырем» тепловой оболочки. Это доказывают исследования, проведенные американскими научными специалистами в крупном городе на юго-востоке США в Атланте, а также учеными в России и на территории СНГ — в Краснодаре, Москве, Санкт-Петербурге, Ашхабаде. В целом исследования свидетельствуют о том, что в зависимости от величины города, а также индивидуальных свойств подстилающей поверхности температура в центральной части города в среднем на 6–10 °С выше, чем на окраинах [18–20].

При этом оценка и анализ теплового загрязнения городов выполняются за счет выделения тепла из источников теплового излучения — населения, транспорта, промышленных и коммунально-бытовых предприятий, ТЭЦ и др., которые под влиянием ветра трансформируются.

Одними из существенных факторов формирования городского «острова тепла» являются интенсивность солнечной радиации, теплоемкость деятельного слоя городов, отражательное и излучательное свойство, преобразуемое в тепло подстилающей поверхности застройки и атмосферы приземного слоя, впоследствии снижающие комфортные условия городской среды [21–23].

В городах южного региона, в которых интенсивность солнечной радиации в теплый период достигает до 980 Вт/м², температура воздуха в тени до +45 °С, на солнце до +50 °С, термический нагрев деятельной поверхности территории и застройки до +70 °С, доминирующую роль в тепловом загрязнении городов играют факторы климата.

В последние годы при помощи картографирования теплового поля появилась возможность его оценки, а также создания динамической модели изображения. При этом в таких науках, как градоэкология, геоэкология, биология и сельское хозяйство рассматриваются экологические задачи на макро-, мезо- и микроуровне городской среды [24–26].

Стоит учитывать, что качественные и количественные показатели воздушной зоны «острова тепла» влияют на ряд факторов качества проживания в городе. Экологическое загрязнение воздушной среды напрямую отображается на уровне заболевания и смертности населения. Повсеместное кондиционирование влечет за собой увеличение экономических затрат и влияет на количество парниковых газов, выбрасываемых в окружающую среду.

Именно поэтому в современном градостроительстве проблема определения поверхностной

температуры деятельного слоя городов, формируемой множеством факторов, таких как поступающая радиационно-тепловая энергия или индивидуальные антропогенные показатели, а также изучение влияния и трансформации «острова тепла» на прилегающую пригородную территорию и объекты городской инфраструктуры становятся все более востребованными.

Цель исследования — составление модели трансформационных изменений воздушного купола «острова тепла» с разнообразными морфотипами деятельной поверхности городской инфраструктуры.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Метод, использованный в статье, — разработка и применение программного комплекса для изучения процесса формирования и трансформации «острова тепла» на основе обобщения результатов метеорологических, климатических, микроклиматических и теплофизических исследований, проведенных в городах: Бишкек, Бука, Душанбе, Краснодар, Новороссийск и Ташкент. Эти города характеризуются плотной многоэтажной застройкой, мощением дорог и площадок асфальтовым и бетонным покрытием и другими энергоактивными материалами.

В основу методики исследования программно-го моделирования положены натурные масштабные инструментальные метеорологические исследования мезоклиматических, микроклиматических и аэродинамических процессов пограничного слоя воздуха. Применены данные Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института им. В.А. Бугаева.

Использованы методы оценки и анализа результатов научных исследований термического нагрева деятельной поверхности города Краснодара в виде спутниковых снимков с космического аппарата Landsat-8 с сенсором TIRS, а также представлены тепловизионные снимки, которые получены во время натурных исследований в городах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Города становятся все более уязвимыми под негативным воздействием жары на человека. В этой связи исследования, проводимые в аспекте «Тепловая безопасность в изменении климата» проблемы «Биосферная совместимость», являются приоритетными.

Отмечается, что в регионах южных географических широт в формировании температурного поля приземного слоя атмосферы «острова тепла» роль взаимодействия солнечной радиации с подстилающей городской поверхностью значительна. Существенным влиянием отличаются теплообменные и аэродинамические процессы между энергоактивными деятельными поверхностями городской застройки. В статье особое внимание уделено климатическим и теплофизическим факторам, формирующим город-



Рис. 4. Купол загрязнения городов Душанбе (а); Бишкек (b); Дели (с)
Fig. 4. Pollution dome of the cities of Dushanbe (a); Bishkek (b); Delhi (c)

ской воздушный купол «острова тепла» и его подвижность.

На основе теоретических исследований и анализа результатов натурных исследований метеорологических, теплофизических и аэродинамических факторов сформулирован ряд положений, имеющих большое значение в тепловом загрязнении городов.

«Остров тепла» разрушается при наличии ветра или под воздействием атмосферных осадков, но устойчив в маловетрие и штиль, способствующие образованию купола загрязнения воздуха над городом (рис. 4).

Помимо этого, на макромасштабе городского «острова тепла» тепловые пятна городской подстилающей поверхности микромасштаба влияют на циркуляцию воздушных масс атмосферы за счет формирующихся конвективных потоков и значительной вертикальной скорости воздушных масс до 10 м/с, поднимающихся вверх, что способствует рассеиванию экологических неблагоприятных загрязнений в атмосфере города.

В целом территория городской поверхности представляет собой своеобразное тепловое плато, где прослеживается зависимость концентрации тепловых пятен с высокой степенью температурных показателей и зависимость температурных показателей от объемно-планировочной структуры. Термическая неоднородность плато нарушается под влиянием «островов прохлады» (водных и озелененных поверхностей)

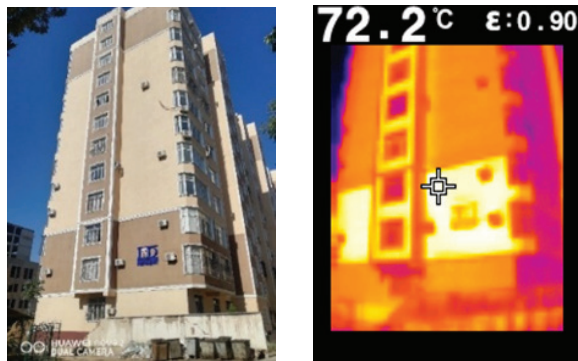


Рис. 5. Термический нагрев стен зданий в г. Ташкенте в летнее время года
Fig. 5. Thermal heating of the walls of buildings in the city of Tashkent in summer

и морфологии застройки гражданских и промышленных объектов.

В среднем в южных регионах термический нагрев деятельного слоя структуры городского ландшафта в зависимости от объемно-планировочной морфологии застройки составляет: стены зданий +72 °С и более, открытая территория жилой застройки +64 °С, нагрев плотной застройки +54 °С, территории общественного центра +68 °С, территория парковой зоны +36 °С, озеро +22 °С (рис. 5).

Высота солнца над горизонтом играет важную роль в поступлении природной энергии на города, в последующем поглощении и излучении тепла искусственной деятельной поверхностью урбанизированных территорий.

Наибольшее количество тепла за сутки поступает на стены зданий разной ориентации и на горизонтальные искусственные энергоактивные подстилающие поверхности в летние безоблачные дни, что приводит к нагреву подстилающих искусственных покрытий, а также тепломеханических конструкций стен зданий до 65–75 °С.

На рис. 6 представлен график модели суточного хода интенсивности солнечной радиации, поступающей на вертикальные и горизонтальные поверхности при безоблачном небе на территориях разных географических широт, которая является определяющим климатическим фактором термического режима энергоактивной деятельной поверхности городов и воздушного купола «острова тепла» над ними.

Установлено, что источником ГОТ является отраженная и излученная солнечная радиация от энергоактивных и энергоаккумулированных искусственных вертикальных и горизонтальных конструктивных поверхностей, которая в сочетании с антропогенными факторами образует температурную оболочку, отличающуюся по свойствам от пригорода.

На рис. 7 приведена карта термического нагрева деятельной поверхности г. Краснодара и его пригородных территорий. Разница температурных показателей достигает от 10 до 30 °С. Выделяются зоны особого нагрева как в самом городе, так и в ближайшем пригороде, что подтверждает концепцию формирования модели «острова тепла» (рис. 8, 9).

Характер воздействия температурного поля на окружающую городскую среду определяется сте-

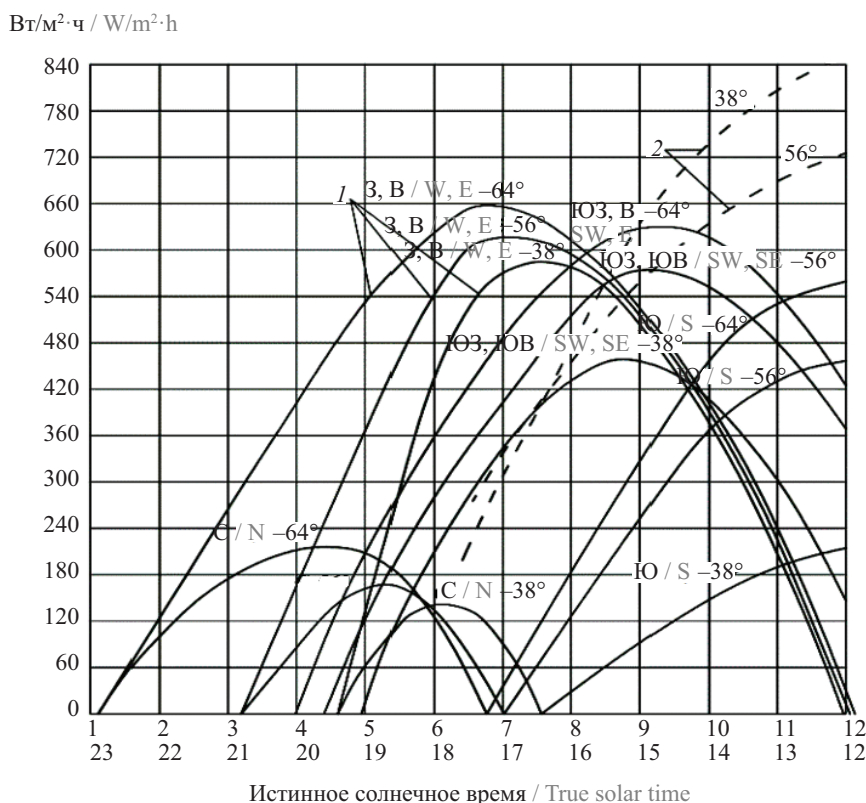


Рис. 6. Модель суточного хода интенсивности солнечной радиации, поступающей на вертикальные (1) и горизонтальные (2) поверхности при безоблачном небе территорий разных географических широт

Fig. 6. Model of daily variations of solar radiation intensity received on vertical (1) and horizontal (2) surfaces under cloudless sky of territories of different geographical latitudes

пению влияния на санитарно-гигиеническое состояние атмосферной среды, а также на тепловой комфорт нахождения человека.

Как правило, в центральной части города формируются максимально высокие температуры и образуется пик «острова тепла», где температура в приземном слое воздуха максимальна за счет нагрева искусственных строительных конструкций и матери-

алов. Наряду с метеорологическими условиями существенное влияние оказывают особенности города, его объемно-планировочное решение, а также направление развития города.

Летние натурные микроклиматические исследования, проведенные на территории южных городов СНГ, таких как Бишкек, Душанбе, Ташкент, Краснодар, Новороссийск и Бука, в летний максимально

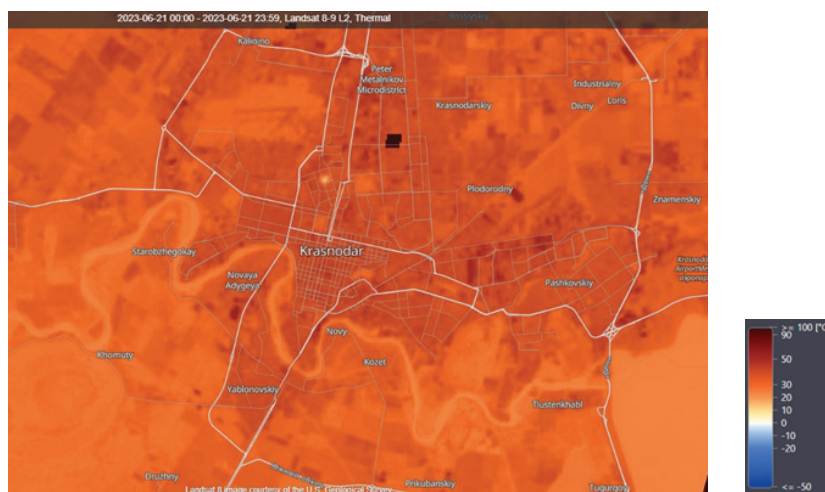
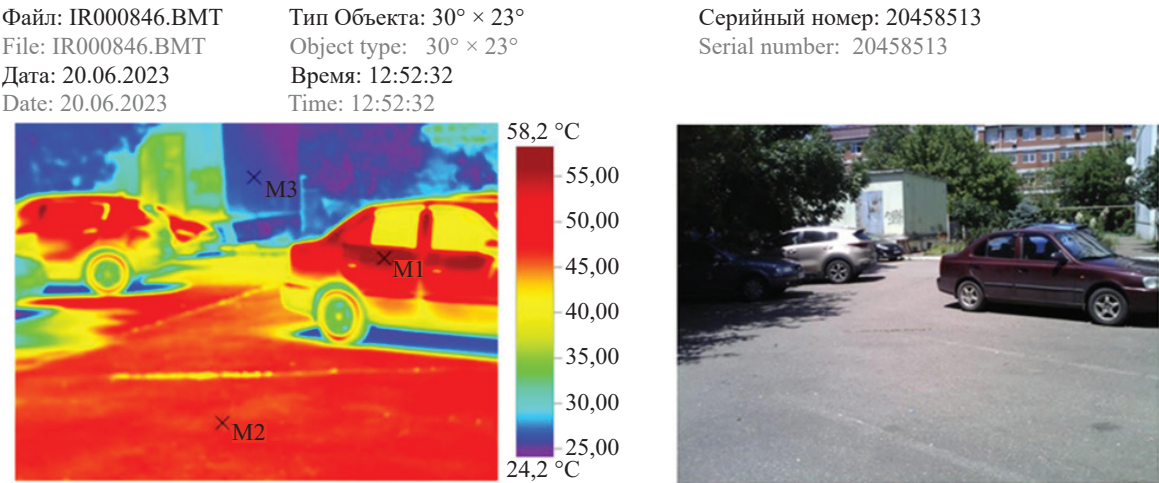


Рис. 7. Карта термического нагрева подстилающей поверхности г. Краснодара (фото со спутника Landsat 8-9 L2, Thermal)

Fig. 7. Map of thermal heating of the underlying surface of the city of Krasnodar (photo from Landsat 8-9 L2, Thermal satellite)



жаркий период показали, что на территории городов с численностью населения до 2 млн чел. и площадью от 5000 до 8000 га прогрев воздуха достигает +46–48 °С внутри города.

Ряд проведенных тепловизионных исследований подтверждает выводы о том, что максимальные температуры наблюдаются на участках застройки с большими площадями асфальтовых покрытий, на неозелененных пешеходных зонах, а также в районах с плотной высотной и многоэтажной застройкой с малой степенью озеленения. На рис. 5, 8, 9 ярко выражен термический нагрев асфальтированных поверхностей, который достигает значительных температурных показателей. К примеру, асфальтовое покрытие парковки для машин в Краснодаре было нагрето до 46,4 °С, при этом автомобиль нагрелся до 57,5 °С. Большие температурные показатели термического нагрева зафиксированы на детской спортивной площадке в г. Новороссийске, где температурный нагрев достиг 62,1 °С, в то время в теневой зоне температурные показатели в разы меньше и достигают 33,9 °С.

Как правило, верхняя граница воздушного купола «острова тепла» возвышается на 100–150 м над центральной частью городов в зонах максимального нагрева подстилающей поверхности застройки, а температура воздуха в приземной зоне нахождения человека достигает до +55 °С и более. Но, если посмотреть по карте термического нагрева на примере Краснодара (рис. 7), можно сделать вывод, что максимально нагретые очаги тепла смещены в восточную часть города, это связано с тем, что город активно развивается в этом направлении и именно здесь расположены новостройки с малой степенью озеленения и большими площадями нагрева. В итоге именно здесь отмечаются максимально активные конвективные потоки, а значит, «остров тепла» будет трансформироваться на восток. Проявляется такая аномалия в течение светового дня и ночью при слабом ветре, а также ясной теплой погоде.

В результате изучения теплового купола над городами выявлены факторы возникновения «острова тепла»:

- высокая интенсивность приходящей суммарной солнечной радиации до 980 Вт/м²;
- повышение степени поглощения коротковолновой радиации, связанной со сложной геометрией городских каньонов;
- способность излучения тепла искусственных горизонтальных и вертикальных покрытий городской морфозастройки до 160–200 Вт/м²;
- большой запас энергии при инсоляции за счет аккумуляирования деятельной поверхностью тепла;
- выделение объектами производственно-гражданского назначения тепла техногенного происхождения до 250 Вт/м²;
- снижение тепла на испарения за счет сокращения растительности и водоемов в городах.

При интенсивной инсоляции городской территории происходит нагрев искусственных энергоактив-

ных подстилающих поверхностей городских структур с последующим повышением их энергоемкости, что служит причиной формирования термической конвекции, определяющим фактором создания воздушного купола «острова тепла».

В физических процессах формирования воздушного купола «острова тепла» роль турбулентного потока тепла, зависящая от интенсивности турбулентного перемешивания и стратификации приземного слоя воздуха города, значительна. При этом основным источником городского тепла и его составной частью является солнечная радиация, большая часть которой достигает деятельной поверхности, создавая неустойчивую стратификацию воздуха и контраст между температурой поверхности и прилежащим приземным воздухом. Чем больше этот контраст, тем больше и активнее турбулентный поток.

Турбулентный поток тепла над «островом тепла» по вертикали можно выразить в виде:

$$Q_t = -C_p A \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -C_p k \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -C_p k \left(\frac{\partial T}{\partial Z} + \gamma_a \right), \quad (1)$$

где C_p — удельная теплоемкость воздуха, равная 1 кДж/(кг·°С); A — коэффициент турбулентного обмена или коэффициент перемещения; $\partial \theta / \partial Z$ — градиент потенциальной температуры; k — коэффициент турбулентности $k = A/\rho$, м²/с (ρ — плотность воздуха кг/м³); γ_a — удельный вес воздуха Н/м³.

В приземном слое воздуха до 100 м над городом коэффициент турбулентности при любых условиях развивается с высотой и зависит от свойства деятельной поверхности города.

Теплоотдача городской морфодетальной поверхности при инсоляции определяется уравнением:

$$Q_r = \bar{\alpha}_r \bar{F}_r \Delta t, \quad (2)$$

где $\bar{\alpha}_r$ — средний коэффициент теплоотдачи морфодетальной поверхности, Вт/м²·°С; $\bar{F}_r$ — усредненная площадь морфодетальной поверхности города, м²; Δt — усредненная разность температур поверхности деятельного слоя города и воздуха над ним, °С.

Тепловой поток от морфодетальной поверхности на приземный слой воздуха при турбулентном течении (критерии $GrPr > 2 \cdot 10^7$ и когда $Nu = 0,135(GrPr)^{1/3}$) определяется уравнением:

$$Q_r \approx a_r^2 \Delta t^{\frac{4}{3}}, \quad (3)$$

где a_r — характерный размер источника тепла городской территории.

Наиболее ярким экологическим следствием эффекта является формирование, смещение и трансформация воздушного купола «острова тепла» со своими климатическими характеристиками ветрового режима пограничного слоя тепловой оболочки городов, что изучалось путем программирования на ЭВМ.

Основная задача программы при составлении — учет ряда метеорологических факторов, таких как разность температуры между морфодетальной поверх-

ностью и слоем приземного воздуха, вертикальная турбулентность атмосферы приземного слоя, основные особенности и параметры «острова тепла» и средняя скорость господствующего ветра.

В таблице сведены результаты, произведенные программным комплексом при расчете двух составляющих: разная скорость ветра и коэффициент турбулентности. Данные таблицы позволяют установить

зависимость высоты пограничного слоя от степени трансформации тепла при разной скорости ветра и определить высоту пограничного слоя. При этом выявлено, что высота пограничного слоя «острова тепла» в процессе его трансформации будет на том уровне, где этот процесс прекратится (рис. 10).

Изучение воздушного теплового купола над «островом тепла» с целью выявления его трансформации

Зависимость высоты пограничного слоя от скорости ветра *U* и коэффициента турбулентности *k°*

Dependence of the boundary layer height on wind velocity *U* and turbulence coefficient *k°*

Высота пограничного слоя Z, м Boundary layer height Z, m		Длина X, м Length X, m						
		100	500	1000	2000	3000	4000	5000
Варианты Options	I $k^{\circ} = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}, U = 1 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.1 \text{ м}^2/\text{s}, U = 1 \text{ м/s}$	17	62	115	195	255	305	355
	II $k^{\circ} = 0,15 \text{ м}^2/\text{с}, U = 1 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.15 \text{ м}^2/\text{s}, U = 1 \text{ м/s}$	28	78	138	210	280	330	380
	III $k^{\circ} = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}, U = 2 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.1 \text{ м}^2/\text{s}, U = 2 \text{ м/s}$	7	25	58	95	170	205	240
	IV $k^{\circ} = 0,15 \text{ м}^2/\text{с}, U = 2 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.15 \text{ м}^2/\text{s}, U = 2 \text{ м/s}$	8	37	76	205	190	225	250
	V $k^{\circ} = 0,2 \text{ м}^2/\text{с}, U = 2 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.2 \text{ м}^2/\text{s}, U = 2 \text{ м/s}$	10	40	80	205	210	255	265
	VI $k^{\circ} = 0,3 \text{ м}^2/\text{с}, U = 2 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.3 \text{ м}^2/\text{s}, U = 2 \text{ м/s}$	15	50	100	165	220	275	325
	VII $k^{\circ} = 0,1 \text{ м}^2/\text{с}, U = 5 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.1 \text{ м}^2/\text{s}, U = 5 \text{ м/s}$	3	22	30	45	55	65	67
	VIII $k^{\circ} = 0,15 \text{ м}^2/\text{с}, U = 5 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.15 \text{ м}^2/\text{s}, U = 5 \text{ м/s}$	4	26	33	50	70	85	90
	IX $k^{\circ} = 0,3 \text{ м}^2/\text{с}, U = 5 \text{ м/с}$ $k^{\circ} = 0.3 \text{ м}^2/\text{s}, U = 5 \text{ м/s}$	5	30	35	62	95	110	130

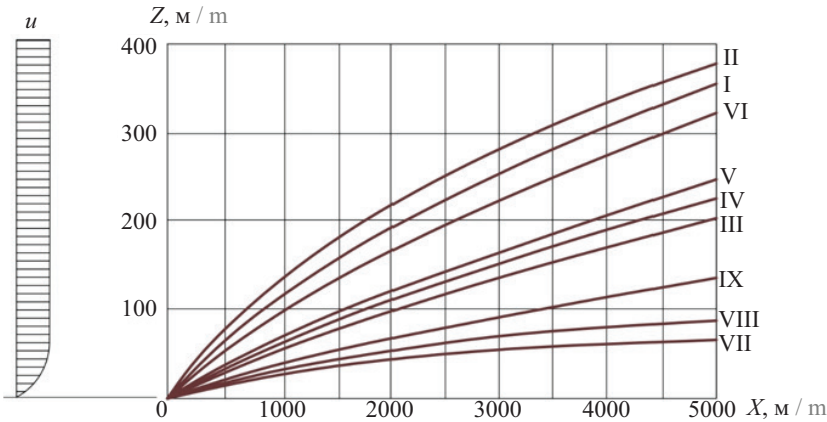


Рис. 10. Модель пограничного слоя «острова тепла» при его трансформации в пространстве

Fig. 10. Model of the boundary layer of the “heat island” during its transformation in space

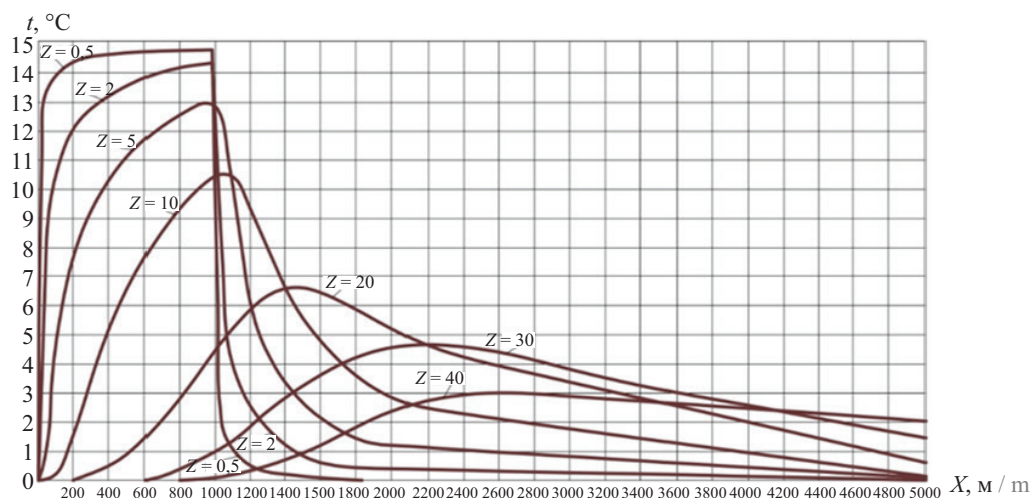


Рис. 11. Модель трансформационных изменений над «островом тепла» при значениях метеорологических параметров: $\Delta t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 2\text{ м/с}$; $k^{\circ} = 0,14\text{ м}^2/\text{с}$; $X_1 = 1000\text{ м}$

Fig. 11. Model of transformational changes over the “heat island” at the value of meteorological parameters: $\Delta t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U = 2\text{ м/с}$; $k^{\circ} = 0.14\text{ м}^2/\text{с}$; $X_1 = 1,000\text{ м}$

над городом при обтекании ветровым потоком на основе программы ЭВМ позволило составить модель трансформационных изменений над «островом тепла» и его подвижность на расстоянии при различных значениях метеорологических факторов (рис. 11).

Анализ представленных результатов в виде графиков показывает, что траектория воздушной трансформации и пути перемещения воздушного купола «острова тепла» непосредственно зависят от температурных показателей подстилающей поверхности, коэффициента турбулентного обмена, а также скорости вертикальных конвективных потоков и высоты их подъема. При этом купол «острова тепла» расстилается на достаточно большие расстояния и охватывает высокие слои атмосферы, что позволяет прогнозировать траекторию распространения негативных атмосферных примесей и зону их максимальной концентрации на территории города, устанавливать степень распространения, рассеивания промышленных, автотранспортных и других негативных выбросов в городскую среду за пределами города.

Анализ результатов теоретических исследований и расчетов формирования и трансформации тепловой оболочки при помощи компьютерного моделирования показал зависимость качественных и количественных термодинамических и аэродинамических характеристик «острова тепла» и коэффициента турбулентности.

Установлено, что коэффициент турбулентности напрямую влияет на трансформацию купола «острова тепла» в направлении перемещения основного потока ветра. При этом чем больше коэффициент, тем динамичнее трансформация купола по длине X и высоте Z . Стоит отметить, что увеличение характеристик тепловых показателей в зоне «острова тепла» над городом зависит от коэффициента тепловой трансформации воздуха по вертикали и горизонтали. Составленная

теоретическая модель может быть применима для ряда конкретных задач:

- расчета распространения городского «макроострова тепла» на прилегающую территорию в зависимости от метеорологических факторов;
- расчета «микроострова тепла» на территорию городской застройки;
- расчета слияния «островов тепла»;
- оценки формы «острова тепла» и его трансформации;
- расчета распространения и рассеивания вредных от источника выбросов на прилегающую территорию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и инструментальные исследования механизма тепло-ветровых процессов и расчеты, проведенные на модели городского теплового поля программным комплексом, позволили выявить качественную и количественную картину формирования воздушного купола «острова тепла» над городами и степень его трансформации в пространстве при разных условиях ветрового режима. Установлены структурные особенности «острова тепла» городов в теплый период. Составлена модель трансформационных изменений воздушного купола «острова тепла» с разнообразными морфотипами деятельной поверхности городской инфраструктуры.

Разработанная методика качественной и количественной оценки тепло-ветрового режима модели городского «острова тепла» и ее трансформации на основе программного комплекса позволяет предварительно прогнозировать и производить оценку температурного поля тепловой воздушной оболочки городской среды. При этом появляется возможность учитывать интенсивность условий инсоляции и впо-

следствии уточнять термический режим деятельного слоя городского ландшафта в условиях низких и повышенных скоростей ветра. Последнее в совокупности

с антропогенным тепловым загрязнением определяет биологическое состояние окружающей среды в условиях урбанизированных территорий в теплый период.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Oke T.R. City size and the urban heat island // *Atmospheric Environment* (1967). 1973. Vol. 7. Issue 8. Pp. 769–779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6
2. Bosma C., Hein L. The climate and land use change nexus: implications for designing adaptation and conservation investment strategies in Sub-Saharan Africa // *Sustainable Development*. 2023. Vol. 31. Issue 5. Pp. 3811–3830. DOI: 10.1002/sd.2627
3. Baykara M. An assessment of long-term urban heat island impact on Istanbul's climate // *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 2023. Vol. 10. Issue 2. Pp. 40–47. DOI: 10.30897/ijgeo.1230381
4. Huang K., Leng J., Xu Y., Li X., Cai M., Wang R. et al. Facilitating urban climate forecasts in rapidly urbanizing regions with land-use change modeling // *Urban Climate*. 2021. Vol. 36. P. 100806. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100806
5. Rao P., Tassinari P., Torreggiani D. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach: a spatio-temporal analysis of remotely sensed data // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Issue 8. P. e18423. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18423
6. Miner M.J., Taylor R.A., Jones C., Phelan P.E. Efficiency, economics, and the urban heat island // *Environment and Urbanization*. 2017. Vol. 29. Issue 1. Pp. 183–194. DOI: 10.1177/0956247816655676
7. Degerli B.C., Cetin M. Evaluation of UTFVI index effect on climate change in terms of urbanization // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Issue 30. Pp. 75273–75280. DOI: 10.1007/s11356-023-27613-x
8. Giannaros C., Agathangelidis I., Papavasileiou G., Galanaki E., Kotroni V., Lagouvardos K. et al. The extreme heat wave of July–August 2021 in the Athens urban area (Greece): Atmospheric and human-biometeorological analysis exploiting ultra-high resolution numerical modeling and the local climate zone framework // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 857. P. 159300. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159300
9. Данилина Н.В., Власов Д.Н. «Здоровый» город как базовая концепция территориального развития // *Экология урбанизированных территорий*. 2020. № 2. С. 112–119. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12112. EDN KDYVWS.
10. Алексеева Л.И., Горлач И.А., Кислов А.В. Вертикальная структура и сезонные особенности «острова тепла» и распределения влажности над Москвой по спутниковым данным // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 8. С. 107–118. EDN EEEYWIE.
11. Гиясов А., Сокольская О.Н. Формирование городской застройки с учетом экологических факторов атмосферной среды в жарких маловетренных и штилевых климатических условиях : монография. Краснодар : ПринтТерра, 2016. 140 с. EDN WLTSOP.
12. Ле М.Т., Бакаева Н.В. Формирование средо-защитных объектов городской среды для условий жаркого и влажного климата // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 9. С. 52–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.52-59. EDN GROODL.
13. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Формирование и особенности «острова тепла» в большом городе // *Доклады Академии наук*. 2000. Т. 370. № 2. С. 249–252. EDN YNRFIR.
14. Мохов И.И. Связь интенсивности «острова тепла» города с его размерами и количеством населения // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 427. № 4. С. 530–533. EDN KPTVAT.
15. Бакаева Н.В., Черняева И.В. Алгоритм оценки градостроительной деятельности на основе принципов биосферной совместимости // *Градостроительство и архитектура*. 2019. Т. 9. № 2 (35). С. 5–14. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.02.1. EDN TAIUHV.
16. Кузнецова И.Н., Бруслова Н.Е., Нахаев М.И. Городской «остров тепла» в Москве: определение, границы, изменчивость // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 5. С. 49–61. EDN YNWCKX.
17. Демин В.И. О роли антропогенных и естественных факторов в оценке городского «острова тепла» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 25–33. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-25-33. EDN QKMWZD.
18. Оленьков В.Д., Бирюков А.Д., Сухоруков В.А. Использование данных дистанционного зондирования земли для построения карты городского «острова тепла» // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году : сб. науч. тр. РААСН*. 2020. С. 286–294. EDN JYFGGF.
19. Балдина Е.А., Константинов П., Грищенко М., Варенцов М. Исследование городских «островов тепла» с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне // *Земля из космоса: наиболее эффективные решения*. 2015. № S. С. 38–42. EDN UIQLYF.
20. Faurie C., Varghese B.M., Liu J., Bi P. Association between high temperature and heatwaves with heat-relat-

ed illnesses : a systematic review and meta-analysis // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 852. P. 158332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158332

21. Cecilia A., Casasanta G., Petenko I., Conidi A., Argentini S. Measuring the urban heat island of Rome through a dense weather station network and remote sensing imperviousness data // *Urban Climate*. 2023. Vol. 47. P. 101355. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101355

22. Erdem Okumus D., Terzi F. Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: the case of Istanbul // *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 73. P. 103128. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103128

23. Meili N., Paschalis A., Manoli G., Fatichi S. Diurnal and seasonal patterns of global urban dry islands // *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. Issue 5. P. 054044. DOI: 10.1088/1748-9326/ac68f8

24. Исаков С.В., Шкляев В.А. Определение суммарного влияния антропогенноизменных поверхностей на возникновение эффекта «городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014. № 1 (162). С. 178–182. EDN RWUDXJ.

25. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113. Issue 5. Pp. 893–903. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007

26. Khorrami B., Heidarlou H.B., Feizizadeh B. Evaluation of the environmental impacts of urbanization from the viewpoint of increased skin temperatures: a case study from Istanbul, Turkey // *Applied Geomatics*. 2021. Vol. 13. Issue 3. Pp. 311–324. DOI: 10.1007/s12518-020-00350-3

Поступила в редакцию 1 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 5 ноября 2024 г.

Одобрена для публикации 5 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Адхам Иминжанович Гиясов — доктор технических наук, профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9800-5187, РИНЦ ID: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru;

Оксана Николаевна Сокольская — кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова; **Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)**; 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2; SPIN-код: 6999-4101, РИНЦ ID: 781835, ORCID: 0000-0003-4089-3598; ons33@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Oke T.R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967). 1973; 7(8):769-779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6

2. Bosma C., Hein L. The climate and land use change nexus: implications for designing adaptation and conservation investment strategies in Sub-Saharan Africa. *Sustainable Development*. 2023; 31(5):3811-3830. DOI: 10.1002/sd.2627

3. Baykara M. An assessment of long-term urban heat island impact on Istanbul's climate. *International Journal of Environment and Geoinformatics*. 2023; 10(2):40-47. DOI: 10.30897/ijgeo.1230381

4. Huang K., Leng J., Xu Y., Li X., Cai M., Wang R. et al. Facilitating urban climate forecasts in rapidly urbanizing regions with land-use change modeling. *Urban Climate*. 2021; 36:100806. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100806

5. Rao P., Tassinari P., Torreggiani D. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach: a spatio-temporal analysis of remotely sensed data. *Heliyon*. 2023; 9(8):e18423. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18423

6. Miner M.J., Taylor R.A., Jones C., Phelan P.E. Efficiency, economics, and the urban heat island. *Environment and Urbanization*. 2017; 29(1):183-194. DOI: 10.1177/0956247816655676

7. Degerli B.C., Cetin M. Evaluation of UTFVI index effect on climate change in terms of urbanization. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023; 30(30):75273-75280. DOI: 10.1007/s11356-023-27613-x

8. Giannaros C., Agathangelidis I., Papavasileiou G., Galanaki E., Kotroni V., Lagouvardos K. et al. The extreme heat wave of July–August 2021 in the Athens urban area (Greece): Atmospheric and human-biometeorological analysis exploiting ultra-high resolution numerical modeling and the local climate zone framework. *Science of The Total Environment*. 2023; 857:159300. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159300

9. Danilina N.V., Vlasov D.N. “Healthy city” as a basic concept for territorial development. *Ecology of Urban Areas*. 2020; 2:112-119. DOI: 10.24411/1816-1863-2020-12112. EDN KDYVWS. (rus.).

10. Alekseeva L.I., Kislov A.V., Gorlach I.A. Vertical structure and seasonal features of the heat island and hu-

midity distribution over moscow derived from satellite data. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019; 8:107-118. EDN EEWIE. (rus.).

11. Giyasov A., Sokolskaya O.N. *Formation of urban development taking into account environmental factors of the atmospheric environment in hot, low-wind and calm climatic conditions: monograph*. Krasnodar, Print-Terra, 2016; 140. EDN WLTSOP. (rus.).

12. Le M.T., Bakaeva N.V. The formation of environmental protection objects of the urban environment for hot and humid climate conditions. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 9:52-59. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.52-59. EDN GROOMDL. (rus.).

13. Matveev L.T., Matveev Yu.L. Formation and specific features of the heat island in a large city. *Doklady Earth Sciences*. 2000; 370(2):249-252. EDN YNRFIR. (rus.).

14. Mokhov I.I. Link of intensity of heat-island effect of a city with its size and population. *Doklady Earth Sciences*. 2009; 427(4):530-533. EDN KPTVAT. (rus.).

15. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. The algorithm of assessment of urban development based on the principles of biospheric compatibility. *Urban Construction and Architecture*. 2019; 9(2):(35):5-14. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.02.1. EDN TAIUHV. (rus.).

16. Kuznetsova I.N., Brusova N.E., Nakhaev M.I. Moscow urban heat island: detection, boundaries, and variability. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2017; 5:49-61. EDN YNWCKX. (rus.).

17. Demin V.I. Role of antropogenic and natural drivers in estimation of urban heat island. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019; 16(5):25-33. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-25-33. EDN QKMWZD. (rus.).

18. Olenkov V.D., Biryukov A.D., Sukhorukov V.A. Using Earth Remote Sensing Data to Construct an Urban Heat Island Map. *Fundamental, search and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and*

the construction industry of the Russian Federation in 2019 : collection of scientific works of the RAASN. 2020; 286-294. EDN JYFGGF. (rus.).

19. Baldina E., Konstantinov P., Grishchenko M., Varentsov M. Study of Urban Heat Islands Using Infrared Remote Sensing Data. *Earth from Space*. 2015; S:38-42. EDN UIQLYF. (rus.).

20. Faurie C., Varghese B.M., Liu J., Bi P. Association between high temperature and heatwaves with heat-related illnesses : a systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*. 2022; 852:158332. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158332

21. Cecilia A., Casasanta G., Petenko I., Conidi A., Argentini S. Measuring the urban heat island of Rome through a dense weather station network and remote sensing imperviousness data. *Urban Climate*. 2023; 47:101355. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101355

22. Erdem Okumus D., Terzi F. Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: the case of Istanbul. *Sustainable Cities and Society*. 2021; 73:103128. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103128

23. Meili N., Paschalis A., Manoli G., Fatichi S. Diurnal and seasonal patterns of global urban dry islands. *Environmental Research Letters*. 2022; 17(5):054044. DOI: 10.1088/1748-9326/ac68f8

24. Isakov S.V., Shklyayev V.A. Determination of total impact of anthropogenic change surfaces, on the occurrence of the effect of urban heat island with the use of geographic information systems. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2014; 1(162):178-182. EDN RWUDXJ. (rus.).

25. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*. 2009; 113(5):893-903. DOI: 10.1016/j.rse.2009.01.007

26. Khorrami B., Heidarlou H.B., Feizizadeh B. Evaluation of the environmental impacts of urbanization from the viewpoint of increased skin temperatures: a case study from Istanbul, Turkey. *Applied Geomatics*. 2021; 13(3):311-324. DOI: 10.1007/s12518-020-00350-3

Received October 1, 2024.

Adopted in revised form on November 5, 2024.

Approved for publication on November 5, 2024.

BIONOTES: **Adham I. Giyazov** — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9800-5187, ID RSCI: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru;

Oksana N. Sokolskaya — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named after A.V. Titov; **Kuban State Technological University (KubSTU)**; 2 Moskovskaya st., Krasnodar, 350072, Russian Federation; SPIN-code: 6999-4101, ID RSCI: 781835, ORCID: 0000-0003-4089-3598; ons33@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.