

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 504.03.711

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1262-1273

Расчет интенсивности теплового острова в мегаполисах с помощью моделирования в программе ENVI-met

Ле Минь Туан, И.С. Шукуров, М.О. Гельманова, М.Ю. Слесарев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Моделирование городского микроклимата, в частности, феномена городского теплового острова (ГОТ), становится все более важным для городского планирования. В настоящее время анализ этого явления возможен благодаря значительной вычислительной мощности компьютеров и связи между инструментами компьютерного моделирования и базами данных, содержащих информацию о городской среде. Современные компьютерные средства позволяют рассчитать характеристики городского микроклимата посредством анализа и оценки различных воздействий городских климатических и антропогенных факторов (городская морфология, землепользование, строительные площадки, альbedo и т.д.).

Материалы и методы. ENVI-met — компьютерная программа для моделирования микроклимата в городской среде. Эта программа способна оптимизировать пропорции зданий и улиц, уличное затенение, расположение открытых пространств, движение воздуха и использование строительных материалов в отношении теплового комфорта и мер по смягчению последствий ГОТ для экологического планирования нового района. Рассматривается один из районов Ха Донг Ханоя с высокой плотностью высотных зданий, на примере которого подробно исследуется процесс детального моделирования, расчета и оценки эффекта ГОТ.

Результаты. С помощью моделирования в программе ENVI-met доказали, что температура воздуха в городской местности Ван Фу постепенно увеличивается с 8 до 17 ч, в течение которых максимальная температура воздуха может достигать 32,28 °C в течение 16 ч. Интенсивность ГОТ достигла своего максимального значения в интервале времени с 0:00 до 1:00 ч 29 мая 2017 г. и составила 2,41 °C.

Выводы. Города представляют собой сложные системы с широким спектром интерактивных факторов, влияющих на изменение городского климата. Значение $R^2 = 0,94$ подтвердило достоверность программного обеспечения ENVI-met для использования в климатических условиях жаркого, влажного и тропического города Ханой для моделирования и имитационных исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроклимат, городской остров тепла, городской ветер, озеленение, городское планирование, тепловой комфорт, городская тепловая среда, ENVI-met

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ле Минь Туан, Шукуров И.С., Гельманова М.О., Слесарев М.Ю. Расчет интенсивности теплового острова в мегаполисах с помощью моделирования в программе ENVI-met // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 9. С. 1262–1273. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1262-1273

Using ENVI-met simulation to analyze heat island intensity in megalopolises

Le Minh Tuan, Ilkhomzhon S. Shukurov, Margarita O. Gelmanova,
Mikhail Yu. Slesarev

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

ABSTRACT

Introduction. The simulation of urban microclimates, including the urban heat island (UHI) phenomenon, has turned all the more important for urban planning. Presently, the analysis of this phenomenon is feasible thanks to high computational power of computers and links between computer modeling instruments and databases that contain information on urban environments. Advanced hardware helps to study characteristics of urban microclimates by analyzing and assessing their exposure to various climatic and anthropogenic urban factors (urban morphology, land use, construction sites, albedo, etc.)

Materials and methods. ENVI-met is a software model used to simulate microclimates in urban environments. This software can optimize proportions of buildings and streets, outdoor shading, outdoor space planning, air movement, and use of construction materials in respect of thermal comfort and measures taken to mitigate consequences of urban heat islands within the framework of environmental planning of new districts. The co-authors analyze Ha Dong, a Hanoi district characterized by the high density of high-rise buildings. The co-authors consider the example of this district to study the process of detailed simulation, analysis and assessment of UHI effects.

Results. ENVI-met and its simulation capacity is employed to prove that the air temperature in Wang Fu, an urban area, gradually rises from 8 am to 5 pm, when the air temperature reaches its maximal value of 32.28 °C during the period of sixteen hours. UHI intensity was maximal between midnight and 1 am on May 29, 2017, when it reached 2.41 °C.

Conclusions. Cities are complex systems exposed to a wide array of interactive factors that influence the urban climate change. The value of R^2 equal to 0.94 has proven the reliability of ENVI-met applied to simulate and imitate the climate of Hanoi, which is a hot and damp tropical city.

KEYWORDS: microclimate, urban heat island (UHI), urban evening, landscape gardening, urban planning, thermal comfort, urban thermal environment, ENVI-met

FOR CITATION: Le Minh Tuan, Shukurov I.S., Gelmanova M.O., Slesarev M.Yu. Using ENVI-met simulation to analyze heat island intensity in megalopolises. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(9):1262-1273. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1262-1273 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизированная среда является местом радиационных, тепловых, динамических и гидравлических процессов, преобразующих климат. Особенность, отличающая городскую территорию от сельской, заключается в менее интенсивном рассеивании тепла ночью. Город накапливает тепловую энергию в течение дня и лишь частично отдает ее в окружающее пространство в ночное время [1, 2]. Структура городской среды, интенсивное использование городских территорий и высокая плотность застройки в сочетании с большой тепловой массивностью зданий приводят к снижению скорости ветра [3]. В современных условиях, когда появилась потребность в уменьшении последствий урбанизации, важную роль стали приобретать знания в отношении моделирования различных физических явлений в городах. Контроль энергопотребления городов, описание и количественная оценка воздействий городского острова тепла (ГОТ), изучение внутреннего и внешнего теплового комфорта городских жителей связаны с развитием знаний о взаимодействии между городом, климатом и энергией. ГОТ — одно из наиболее обсуждаемых явлений в научной литературе; он способствует глобальному потеплению и приводит к необходимости пересматривать политику устойчивого городского планирования [4]. Хорошие климатические условия и хорошее качество воздуха имеют большое значение для благополучия человека и служат значимыми факторами, влияющими на флору и фауну, а также на системы сельского хозяйства. Продуцирование свежего воздуха, а также очистка воздуха — важные функции здоровой климатической системы с точки зрения изменения климата. Для определения и анализа соответствующей климатической информации климат возможно описать на микро-, мезо- и макроуровне. Микроклимат может быть отнесен к небольшим по размеру территориям или сооружениям, расположенным на расстоянии до нескольких метров (например, строительные комплексы или деревья), именно микроклимат в первую очередь влияет на здоровье людей, а также растений и животных. Соответствующими метеорологическими показателями являются: температура, направление

и скорость ветра, испарение, относительная влажность и продолжительность солнечного излучения. Например, городские непроницаемые поверхности оказывают негативное влияние на местный климат, они сильно нагреваются в течение дня и медленно остывают в течение ночи [5]. Кроме того, эти поверхности почти не способны фильтровать загрязняющие воздух вещества и частицы пыли. Негативные воздействия на климат в основном вызваны выбросами, а также препятствиями для процессов воздухообмена (каковыми служат строительные конструкции) и уменьшением количества открытых/зеленых зон, столь важных для здорового микроклимата [1].

Связь между экосистемой и городом должна лежать в основе устойчивого развития городских территорий. С другой стороны, отсутствие открытых пространств и зеленых насаждений, высокая плотность застройки, компактность городских кварталов, плохое качество воздуха и постоянный транспортный коллапс могут привести к ухудшению городской среды. По этой причине озеленение городов, как часть биоклиматической концепции развития урбанизированной среды, может стать способом снижения температуры наружного воздуха в жаркие дни. Результатом вышеупомянутой методики улучшения микроклимата (увеличение площадей озеленения) станет улучшение условий теплового комфорта на открытом воздухе [6]. Независимо от погодных условий общий тепловой поток, поступающий в здание с зеленой крышей, может быть снижен на 50–60 % по сравнению со зданием, имеющим обычную кровлю [7]. В жарком сухом климате увеличение влажности в атмосфере при помощи озеленения может снизить температуру до 5 градусов, таким образом, увеличивая тепловой комфорт летом [8]. Деревья и растительность наиболее эффективны в качестве средства смягчения климата, если их высаживать в «стратегически» важных местах вокруг зданий или для затенения тротуара или улиц.

В работе описывается использование климатической модели в программе ENVI-met для помощи в принятии решений, касающихся проектирования городских пространств на примере городской зоны Ван Фу в районе Ха Донг. Цель исследования за-

ключается в расширении понимания феномена ГОТ и проблем микроклимата города, которые влияют на деятельность людей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характеристика городского острова тепла

ГОТ характеризуется избыточной температурой воздуха в городских районах относительно окружающей город сельской местности. Слой городского купола — это приземный слой воздуха, простирающийся вверх примерно до средней высоты здания (рис. 1). Каждый ГОТ имеет свои уникальные особенности, количественная оценка этого явления зависит от конкретного города. Во многих исследованиях показано, что измерение уровня температуры на улицах не имеет значения, поскольку температура воздуха меняется незначительно, на расстоянии более одного метра от стен или дороги [9, 10]. В литературных источниках перечисленные методы наблюдения ГОТ основаны на сборе статистических данных о разнице температур между городскими и сельскими метеорологическими станциями [11, 12]; изучении тенденций изменения температуры по данным городских метеостанций в сравнении с данными температурного тренда, наблюдаемого для нескольких станций, установленных в средах с различным уровнем; наблюдениях с помощью сети стационарных станций, вдоль дорог с использованием транспортного средства.

Территория исследования и сбор данных

Цель настоящего исследования — изучение влияния плотно застроенной территории на городской микроклимат. Для этого выясняется, как температурные условия меняются в зависимости

от количества растительности в жилом районе. Был исследован городской микрорайон Ван Фу в центре Ха Донг с населением 20 000 человек и площадью 94,1 га, спроектированный с учетом требований к современному архитектурному пространству и инфраструктуре (рис. 2). Улично-дорожная сеть составляет 34,4 % от общей площади микрорайона Ван Фу. На территории имеются офисные здания, высотой 36–40 этажей, и жилые кварталы со зданиями высотой 4–5 этажей. В целом, территория характеризуется небольшим количеством растительности, узкими улицами, примыкающими к автострадам с большой плотностью движения — источникам загрязняющих веществ. В стремлении к более высокой точности компьютерного моделирования прилегающая к центру района область учитывалась при расчете модели.

Для моделирования использовались микроклиматические показатели ближайшей метеостанции. Цель моделирования заключалась в изучении возникновения городского микроклимата из текущих условий среды и возможности с помощью растительности улучшить тепловой комфорт. На основании климатических данных с сайта climate.oneBuilding.org в анализе были учтены соответствующие метеорологические параметры: изменение температуры со временем, относительная влажность, скорость и направление ветра для типичного летнего дня.

Моделирование городского микроклимата

Программное обеспечение ENVI-met использует параметры зданий, растительности, поверхности земли, климатических условий, почв для моделирования изменений микроклимата в зависимости от формы здания, дополнительного затенения и т.д. ENVI-met представляет собой трехмерную ком-

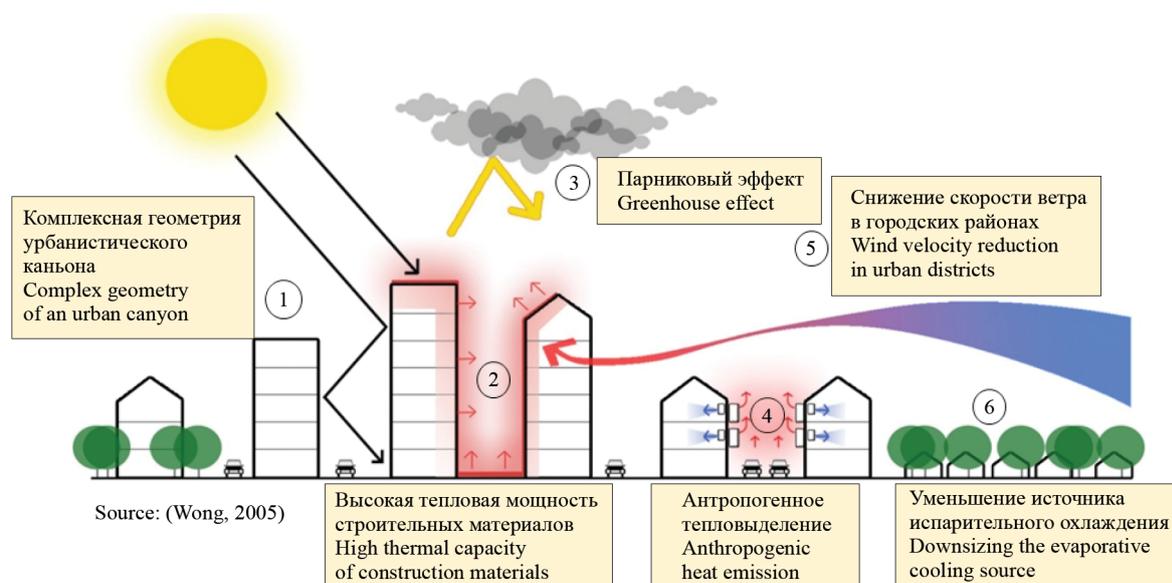


Рис. 1. Схематичное изображение ГОТ

Fig. 1. The UHI layout

Новый квартал Ван Фу — Район Ха Донг — г. Ханой
Wang Fu, a new block — Ha Dong District — Hanoi

Карта планирования участка
Site engineering map

Условные обозначения:
The legend:

-  Граница территории исследований
Research area boundary
-  Граница планировки
Layout boundary

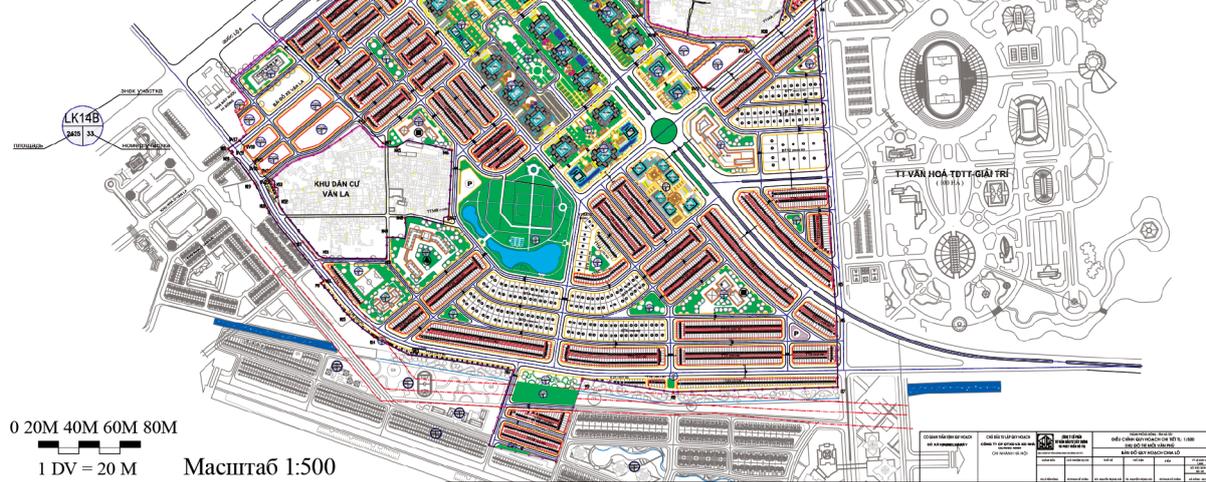


Рис. 2. Территория исследования

Fig. 2. The area under research

пьютерную модель, которая анализирует микро-масштабные тепловые взаимодействия в городских условиях. Программное обеспечение использует как расчет динамических характеристик воздушной среды, таких как поток воздуха и турбулентность, так и термодинамические процессы, происходящие на поверхности земли, на стенах, на крышах и озелененных зонах. ENVI-met учитывает все виды солнечного излучения (прямое, отраженное и рассеянное) и рассчитывает среднюю температуру излучения. Расчет радиационных потоков учитывает затенение растениями, поглощение и экранирование ими излучения, а также переизлучение [13].

ENVI-met моделирует динамические изменения нескольких термодинамических параметров в макромасштабном диапазоне, создавая трехмерную (ячейка сетки размером $2 \times 2 \times 2$ м), негидростатическую модель взаимодействия здания – атмосферы – растительности [14]. Благодаря фундаменту, основанному на принципах механики жидкости, термодинамики и законах физики атмосферы, он способен рассчитывать трехмерные поля ветра, турбулентности, температуры и влажности воздуха, радиационные потоки и рассеивание загрязняющих веществ [15]. Высокое пространственное разрешение модели в сочетании с детальным моделированием растительности позволяет рассчитывать индивидуальные скорости фотосинтеза

с учетом локальной солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, скорости ветра, концентрации CO_2 и многих других параметров [15, 16].

Перед моделированием в ENVI-met необходимо сделать два основных шага. Первый — это редактирование входных данных городского района, подлежащего тестированию. Для этой задачи требуются горизонтальные и вертикальные размеры архитектурной среды, а также любые специфические конструктивные особенности, такие как открытые подъездные пути, выступы, материалы горизонтальной поверхности, почвенный покров, размер растительности и ее площадь и т.д.

Модель запроектирована в трехмерном пространстве, где расположены здания, деревья/растительность и различные поверхности. Эти элементы представлены ячейками сетки различного размера. Чем меньше ячейка, тем лучше разрешение (всего 0,5 м). Ячейки могут иметь размеры в каждом из трех измерений от 0,5 до 10 м. Например, область размером 100×100 м может быть представлена сеткой 100×100 ячеек размером 1×1 м каждая, или она может быть представлена сеткой 20×20 ячеек размером 5×5 м каждая, в зависимости от размера тестовой области и желаемого разрешения [17].

Вторым этапом является редактирование файла конфигурации, в который вводятся информация о местоположении объекта, температуре, скорости

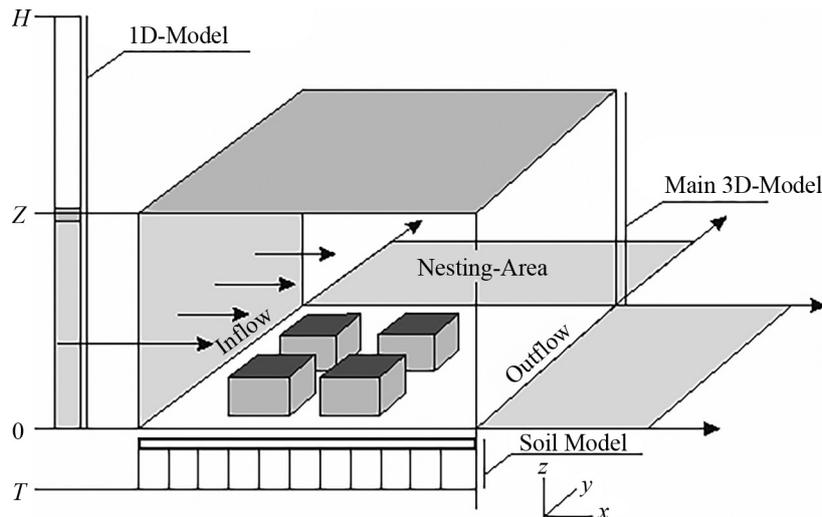


Рис. 3. Базовая схема CFD-моделирования в ENVI-met [13]

Fig. 3. CFD simulation by ENVI-met: the process layout [13]

ветра, влажности, параметрах PMV, а также базы данных по типам почвы и растительности. Симуляция затем просчитывается с использованием как входных файлов, так и файлов конфигурации. Приведенная блок-схема иллюстрирует методы, использованные в этой работе для моделирования параметров микроклимата с помощью ENVI-met (рис. 3).

Последующий процесс включает три основных этапа: полную организацию каталога файлов; моделирование и редактирование параметров модели (данных микроклимата и элементов сборки) с использованием базы данных растений и материалов поверхности, создающих входной файл расчетной

области (INX) и файл моделирования (SIM); оценку файлов результатов (EDT/EDX) и их визуализацию (рис. 4).

Каждый выходной файл содержит множество информации, которая должна быть переведена в разные слои в Leonardo. Следующие основные слои обычно используются для визуализации выходных данных:

- уровень данных — отображает непрерывные показатели (например, температуры);
- специальный — отображает отдельные параметры (например, здания, заводы);
- вектор — отображает векторы, такие как ветер.

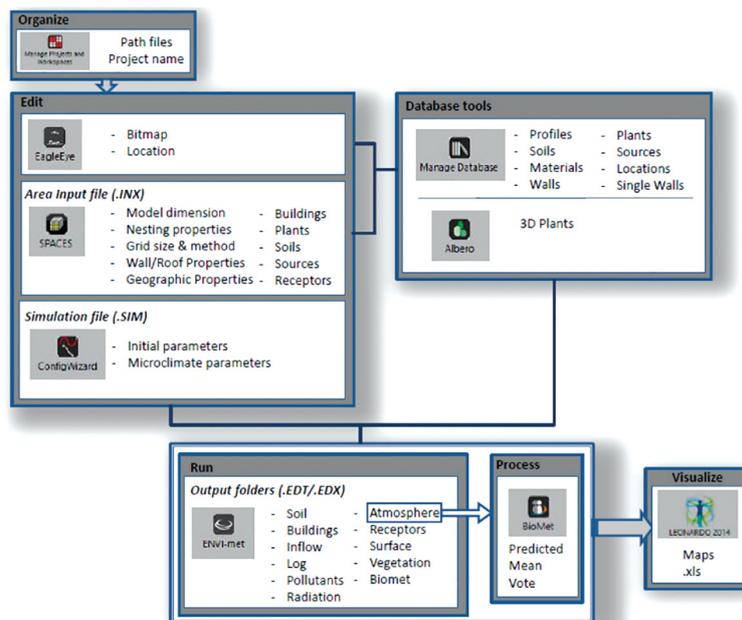


Рис. 4. Рабочий процесс в ENVI-met

Fig. 4. The ENVI-met workflow

Визуализация затем настраивается для отображения городской среды с нужным «срезом» данных: по горизонтали (вид в плане), по вертикали (вид в разрезе) или в трехмерном аксонометрическом виде. Такое разложение позволяет анализировать мелкомасштабные взаимодействия между отдельными зданиями, поверхностями и растениями для различных сценариев в течение 24 часов.

Для того чтобы смоделировать условия микроклимата в этом районе и изучить сценарии смягчения последствий ГОТ, был выбран один из самых жарких дней в 2019 г. Что касается пиковых значе-

ний моделирования: зарегистрированная температура для мая была 31,73 °С в 17:00 ч летом (табл. 1).

В каждом выходном файле базы данных ENVI-met представлены различные материалы и трехмерные растения, позволяющие детально реконструировать городскую среду. Каждый тип материала определяется удельной теплоемкостью, поглощением, альбедо и другими параметрами. На рис. 5 и в табл. 2 проиллюстрированы все выбранные материалы, которые использовались для построения модели местности.

Табл. 1. Исходные данные области исследования в ENVI-met

Table 1. Input data designated for research in ENVI-met

Размер имитационной модели, м / Simulation model dimensions, m	1300 × 1200 × 244
Размер модели (количество сеток в направлении xyz) Model dimensions (the number of grids in xyz directions)	187 × 192 × 35
Размер ячейки сетки, м, dx , dy , dz Grid cell dimensions, m, dx , dy , dz	8 × 8 × 8
Географическое положение (широта, долгота) Geographical position (latitude, longitude)	20.96, 105.76
Вложенные сетки / Sub-grids	8
Метод генерации вертикальной сетки Vertical grid generation method	Эквидистантный Equidistant
Часовой пояс / Time zone	GMT +7
Основные параметры модели / Principal model parameters	
Дата моделирования / Simulation date	29 мая 2019 г. / May 29, 2019
Начало и продолжительность моделирования Simulation start time and duration	00:00, 24 ч / hours
Скорость ветра, измеренная на высоте 10 м Wind velocity at the altitude of 10 m	2,53 м/с / m/s
Направление ветра / Wind direction	142,60°
Начальная температура атмосферного воздуха Initial air temperature	29,625 °С = 302,775 K
Минимальная температура (дата моделирования) Minimal temperature (simulation date)	26,976 °С
Максимальная температура (дата моделирования) Maximal temperature (simulation date)	31,73 °С
Относительная влажность на высоте 2 м, % Relative humidity at the altitude of 2 m, %	66,93 %
Удельная влажность в верхней части модели (2500 м, г/кг) Unit humidity of the upper part of a model (2,500 m, g/kg)	16,33 г/кг / g/kg
Минимальная влажность (дата моделирования) Minimal humidity (simulation date)	51,66 %; 6 ч / pm
Максимальная влажность (дата моделирования) Maximal humidity (simulation date)	78,36 %; 6 ч / pm

Табл. 2. Типы элементов строительной среды

Table 2. Types of elements in a built environment

Тип элемента / Element type	Альbedo / Albedo
Бетонная стена / Concrete wall	0,3
Заасфальтированная дорога / Paved road	0,2
Тротуары / Sidewalks	0,3
Почва / Soil	0,1

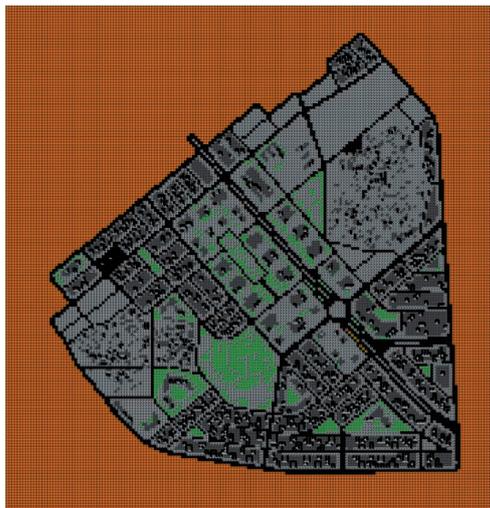


Рис. 5. Типы материалов исследуемой территории (2D)

Fig. 5. Types of materials within an area under research (2D)

Табл. 3. Типы поверхностей площади

Table 3. Types of surfaces

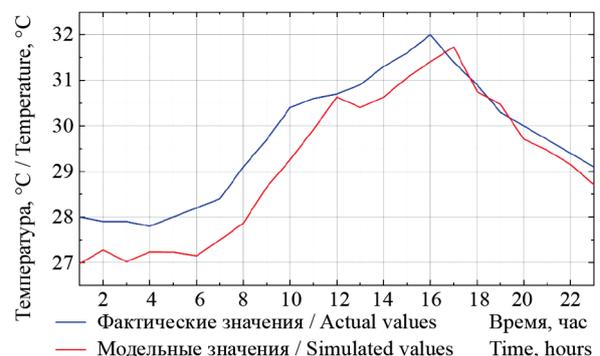
Площадь, м ² / Area, m ²				
Застройка / Built-up area	Тротуар / Sidewalk	Дороги / Roads	Зеленые насаждения / Greenery	Итого / Total
311 461,63	453 932,49	242 524,5	77 335,13	1 085 253,76

Рис. 5 и табл. 3 доказывают, что городская среда, как правило, характеризуется поверхностями с высоким альbedo и редкими участками растительности, расположенными на открытых пространствах или вдоль дорог.

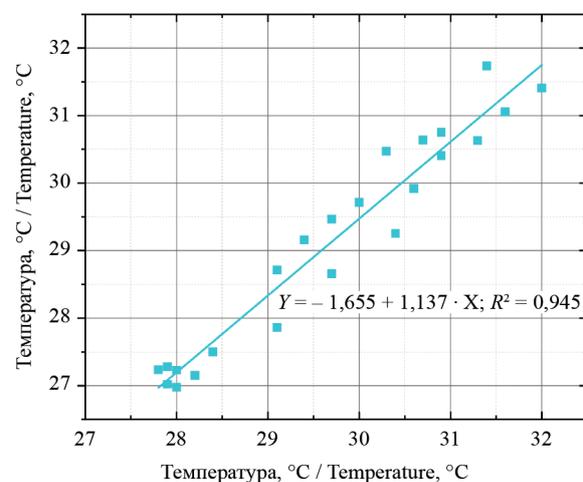
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Учитывая нелинейность и сложность описания климатических и тепловых явлений в городских пространствах, необходимо использовать динамическое численное моделирование, позволяющее проводить сравнительный анализ относительного потенциала различных предлагаемых мероприятий

и базового варианта. Величина R^2 , равная 0,94, была получена при сравнении средних значений температуры фактических наземных измерений с полученными при моделировании значениями, что подтверждает достоверность расчетов в ENVI-met для выбранного участка (рис. 6). ENVI-met зарекомендовало себя как программное обеспечение, которое воспроизводит сложности городской климатической системы: одновременные и интерактивные расчеты радиационного, теплового и гидравлического баланса, а также аэродинамики в городских пространствах в различных масштабах. Эти расчеты могут применяться для климатического моделирования на выбранной площадке во влажном тропическом климате Ханоя.



a



b

Рис. 6. Результаты проверки: a — температура в зависимости от времени; b — фактические значения в сравнении со значениями модели

Fig. 6. Verification results: a — dependence of temperature on time; b — actual values vs simulated values

Программа ENVI-met предоставляет результаты 24-часового моделирования микроклимата нового городского района Ван Фу 29 мая 2017 г. (рис. 7). Результаты моделирования микроклимата

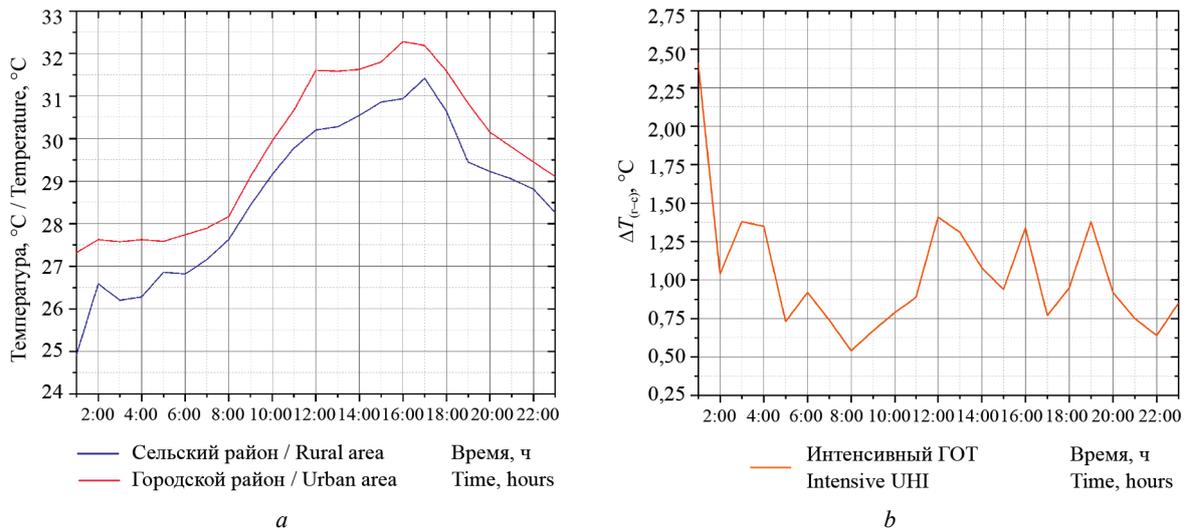


Рис. 7. Разница температуры воздуха между городской и сельской местностью за 24 часа (а); интенсивный ГОТ в течение 24 часов (b)

Fig. 7. Air temperature difference in urban and rural areas within a 24-hour period (a); intensive UHI within a 24-hour period (b)

фиксируют температуру внутри области с плотной застройкой многоэтажными зданиями в интервале от 27,32 до 32,28 °C, в то время как температура внутри области с малоэтажными редко расположенными зданиями варьируется от 24,91 до 31,42 °C. Интенсивность ГОТ в новом городском районе Ван Фу определяется разницей между температурой внутренней зоны и зоны вне города. Интенсивность ГОТ достигла своего максимального значения в интервале времени с 0:00 до 1:00 ч 29 мая 2019 г. и составила 2,41 °C. Различия в температуре воздуха между городом и деревней часто бывают самыми значительными в ясные вечера, поскольку сельская местность охлаждается ночью быстрее, чем город, который сохраняет большую часть тепла, аккумулированного дорогами и зданиями.

Температура воздуха в городской местности Ван Фу постепенно увеличивается с 8 до 17 ч, в течение которых максимальная температура воздуха может достигать 32,28 °C в течение 16 ч (рис. 8, а). Результаты моделирования климата соответствуют фактическим результатам, зарегистрированным в Ханое. Феномен повышения температуры воздуха обусловлен влиянием микроклимата, вызванного эффектом фона, в сочетании с влиянием высотной застройки. Во временном интервале между 12 и 16 ч температура воздуха составляет 30,2–32,28 °C, этот температурный диапазон превышает пороговое значение температуры наружного комфорта для жителей Вьетнама (табл. 4), поэтому отрицательно сказывается на активности людей, живущих в городских районах.

Табл. 4. Тепловое ощущение жителей Вьетнама [18, 19]

Table 4. Warmth sense modality of Vietnamese people [18, 19]

Микроклимат Microclimate	Тепловое ощущение Warmth sense modality	По графику эффективной температуры According to the effective temperature graph		Температура воздуха, °C (φ = 80 %; ν = 0,3–0,5 м/с) Air temperature, °C (φ = 80 %; ν = 0.3–0.5 m/s)	
		Холодный сезон Cold season	Жаркий сезон Hot season	Холодный сезон Cold season	Жаркий сезон Hot season
Комфорт Comfort	Нижнее значение Bottom value	20,0	—	21,5	—
	Комфортно Comfortable	23,3	24,0	24,5	25,5
	Предельно допустимое значение Limit value	26,5	28,0	29	29,5

Результаты моделирования в ENVI-met также показывают проблемы с вентиляцией в городской местности Ван Фу. Преобладающее направление ветра в районе исследования — юго-восток (рис. 8, *b*). В центральной части города скорость ветра меняется незначительно. Здания построены близко друг к другу, чтобы блокировать юго-восточный ветер, который частично влияет на температуру воздуха в области малоэтажных зданий на северо-западе. Температура вокруг северо-западного городского жилого района Ван Фу местами достигает 32 °С.

Результат сравнения изменения температуры воздуха в городской местности Ван Фу во время самой низкой температуры воздуха в 1:00 и самой высокой температуры воздуха в 16:00 показывает, что температура воздуха изменяется от 3,96 до 6,10 °С. Кварталы с высотными зданиями имеют меньшие перепады температуры, чем районы с малоэтажными зданиями (рис. 9, *a*). Это объясняется тем, что

группа высотных зданий днем получает прямое излучение солнца, а ночью отдает тепловое излучение в окружающую среду. Таким образом, температура воздуха среди высотных зданий меняется в меньших пределах, чем температура среди малоэтажных зданий. С другой стороны, чем ниже температура воздуха, тем меньше количество влаги, которое может храниться в воздухе, и, наоборот, влагоемкость воздуха увеличивается с ростом температуры (рис. 9, *b*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Города являются сложными системами с широким спектром интерактивных факторов, влияющих на изменение городского климата. Поэтому все еще очень трудно измерить и различить их отдельные эффекты, несмотря на многочисленные утверждения, найденные в литературе о ГОТ.

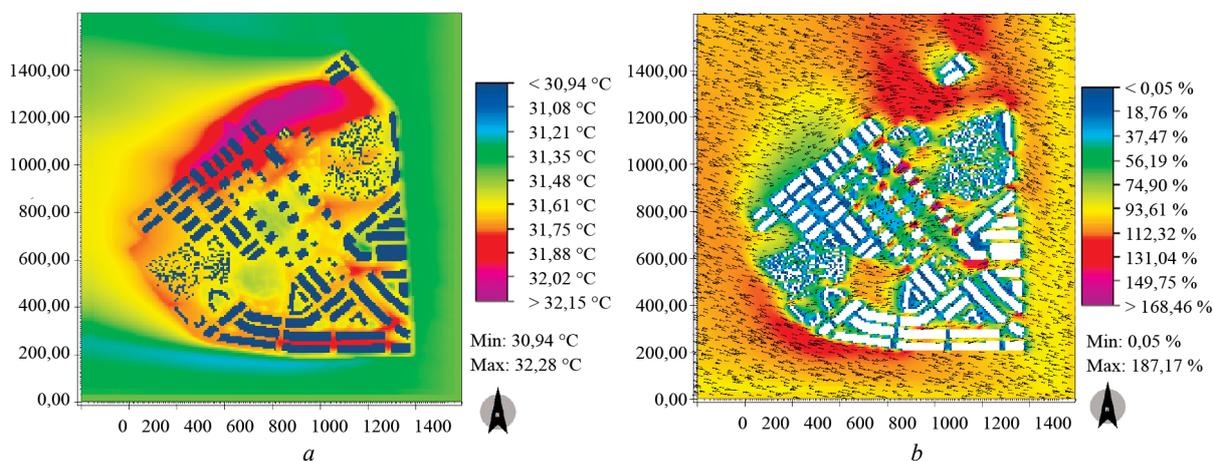


Рис. 8. Потенциальная температура воздуха в городском районе Ван Фу в 16:00 (*a*); скорость ветра в городской зоне Ван Фу в 16:00 (*b*)

Fig. 8. Potential air temperature in Van Phu urban district at 4 pm (*a*); wind velocity in Van Phu urban area at 4 pm (*b*)

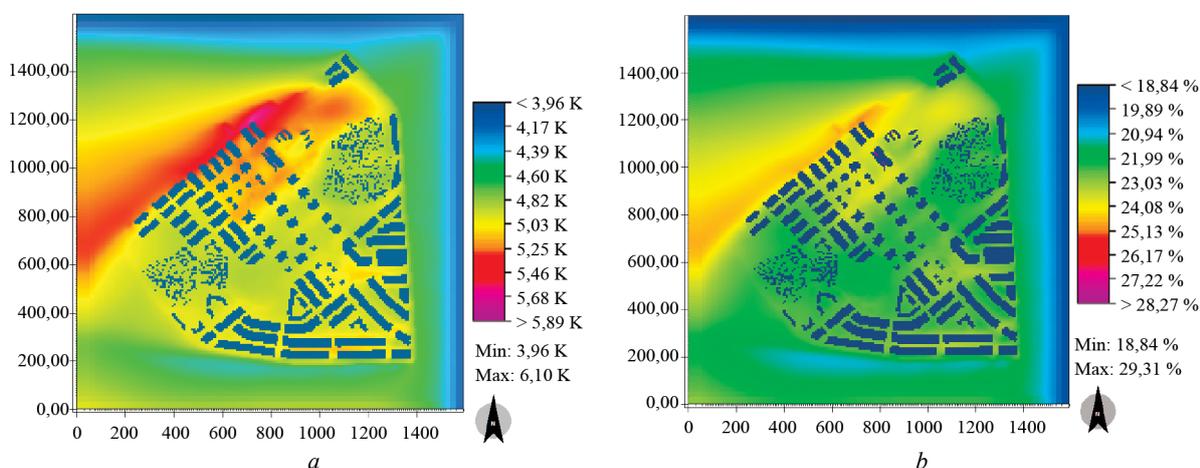


Рис. 9. Абсолютная разница потенциалов температуры воздуха (*a*); абсолютная разница относительной влажности (*b*)

Fig. 9. Absolute air temperature difference (*a*); absolute difference of relative humidity (*b*)

Тропический теплый и влажный климат в городской зоне Ван Фу (округ Ха Донг, г. Ханой) был исследован на возможность реализации городской инфраструктуры, приводящей к смягчению ГОТ. Значение $R^2 = 0,94$ подтвердило достоверность программного обеспечения ENVI-met для использования в климатических условиях жаркого, влажного и тропического города Ханой для моделирования и имитационных исследований.

Влияние озеленения и городских фонтанов на тепловой комфорт пешеходов и на энергопотре-

бление зданий будет смоделировано на следующем этапе исследования.

Такие факторы, как площади городской растительности и водных пространств, являются важными и могут напрямую влиять на текущий процесс проектирования, но их следует тщательно изучать для каждого случая. Именно здесь политика и программы по снижению воздействия тепловых островов и достижению соответствующих целей в области экологии и энергосбережения могут быть наиболее эффективными.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексашина В.В., Ле Минь Туан.* Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 36–40. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-15036
2. *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. Vol. 85. Issue 12. Pp. 3085–3102. DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.023
3. *Makropoulou M.* Microclimate improvement of inner-city urban areas in a Mediterranean coastal city // Sustainability. 2017. Vol. 9. Issue 6. P. 882. DOI: 10.3390/su9060882
4. *Ле Минь Туан.* Влияние планировки города на возникновение островов тепла в мегаполисах с тропическим климатом (г. Ханой) // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2. С. 148–157. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.148-157
5. *Le M.T., Cao T.A.T., Tran N.A.Q., Sadriavich S.I., Nguyen T.K.P., Le T.K.C.* Case study of GIS application in analysing urban heating island phenomena in tropical climate country // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. P. 012090. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012090
6. *Dimoudi A., Nikolopoulou M.* Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits // Energy and Buildings. 2003. Vol. 35. Issue 1. Pp. 69–76. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00081-6
7. *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. Vol. 103. Pp. 682–703. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.003
8. *McPherson E.G., Simpson J.R., Peper P.J., Xiao Q.* Tree guidelines for San Joaquin Valley Communities. USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 1999.
9. *Nakamura Y., Oke T.R.* Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon // Atmospheric Environment (1967). 1988. Vol. 22. Issue 12. Pp. 2691–2700. DOI: 10.1016/0004-6981(88)90437-4
10. *Eliasson I.* Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry // Physical Geography. 1994. Vol. 15. Issue 1. Pp. 1–22. DOI: 10.1080/02723646.1994.10642501
11. *Nasrallah H.A., Brazel A.J., Balling R.C.* Analysis of the Kuwait City urban heat island // International Journal of Climatology. 1990. Vol. 10. Issue 4. Pp. 401–405. DOI: 10.1002/joc.3370100407
12. *Moreno-garcia M.C.* Intensity and form of the urban heat island in Barcelona // International Journal of Climatology. 1994. Vol. 14. Issue 6. Pp. 705–710. DOI: 10.1002/joc.3370140609
13. *Bruse Michael.* ENVI-met website (n.d.) retrieved on September 16, 2007. URL: <http://www.envi-met.com/>
14. *Berardi U., Wang Y.* The effect of a Denser City over the urban microclimate: The case of Toronto // Sustainability. 2016. Vol. 8. Issue 8. P. 822. DOI: 10.3390/su8080822
15. *Bruse M.* ENVI-met implementation of the Jacobs A — gs Model to calculate the stomata conductance. 2004. URL: http://envi-met.com/documents/new_a_gs.pdf
16. *Liu Z., Zheng S., Zhao L.* Evaluation of the ENVI-Met vegetation model of four common tree species in a subtropical hot-humid area // Atmosphere. 2018. Vol. 9. Issue 5. P. 198. DOI: 10.3390/atmos9050198
17. *Chatzinikolaou E., Chalkias C., Dimopoulou E.* Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model // ISPRS — International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. XLII-4. Pp. 69–76. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-69-2018
18. *Pham Ngoc Dang, Pham Duc Nguyen, Luong Minh.* Vat ly xay dung (phan 1, nhiet va khi hau) (Строительная физика, часть 1, температура и климат) // NXB. Xay dung. Hanoi. 1981, (Издательство строительства Ханоя, 1981).
19. *Pham Ngoc Dang.* Huong dan thiet ke do an nhiet va khi hau kien truc (Справочник по архитектурному проектированию тепло-климатических проектов) // NXB. Xay dung. Hanoi, 1980 (Издательство строительства Ханоя, 1980).

Поступила в редакцию 21 апреля 2020 г.

Принята в доработанном виде 6 августа 2020 г.

Одобрена для публикации 28 августа 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Ле Минь Туан — аспирант кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2453-1372, ORCID: 0000-0003-4164-7452; grado@mgsu.ru;

Илхомжон Садриевич Шукуров — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры градостроительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 630748; grado@mgsu.ru;

Маргарита Олеговна Гельманова — аспирант кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8462-8299, ORCID: 0000-0003-2232-5239; agpz@mgsu.ru;

Михаил Юрьевич Слесарев — доктор технических наук, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Aleksashina V.V., Le Minh Tuan. Influence of the urban heat island effects on the ecology of the megacity. *Regional Environmental Issues*. 2018; 5:36-40. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-15036 (rus.).
2. 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):3085-3102. DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.023
3. Makropoulou M. Microclimate improvement of Inner-City urban areas in a Mediterranean coastal city. *Sustainability*. 2017; 9(6):882. DOI: 10.3390/su9060882
4. Le Minh Tuan. The influence of city planning on the emergence of heat islands in megacities with a tropical climate (Hanoi). *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(2):148-157. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.148-157 (rus.).
5. Le M.T., Cao T.A.T., Tran N.A.Q., Sadriavich S.I., Nguyen T.K.P., Le T.K.C. Case study of GIS application in analysing urban heating island phenomena in tropical climate country. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661:012090. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012090
6. Dimoudi A., Nikolopoulou M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*. 2003; 35(1):69-76. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00081-6
7. 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; 103:682-703. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.003
8. McPherson E.G., Simpson J.R., Peper P.J., Xiao Q. *Tree guidelines for San Joaquin valley communities*. USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 1999.
9. Nakamura Y., Oke T.R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment (1967)*. 1988; 22(12):2691-2700. DOI: 10.1016/0004-6981(88)90437-4
10. Eliasson I. Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography*. 1994; 15(1):1-22. DOI: 10.1080/02723646.1994.10642501
11. Nasrallah H.A., Brazel A.J., Balling R.C. Analysis of the Kuwait City urban heat island. *International Journal of Climatology*. 1990; 10(4):401-405. DOI: 10.1002/joc.3370100407
12. Moreno-garcia M.C. Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*. 1994; 14(6):705-710. DOI: 10.1002/joc.3370140609
13. Bruse Michael. *ENVI-met website (n.d.) retrieved on September 16, 2007*. URL: <http://www.envi-met.com/>
14. Berardi U., Wang Y. The effect of a denser city over the urban microclimate: The case of Toronto. *Sustainability*. 2016; 8(8):822. DOI: 10.3390/su8080822
15. Bruse M. *ENVI-met implementation of the Jacobs A — gs Model to calculate the stomata conductance*. 2004. URL: http://envi-met.com/documents/new_a_gs.pdf
16. Liu Z., Zheng S., Zhao L. Evaluation of the ENVI-Met vegetation model of four common tree species in a subtropical hot-humid area. *Atmosphere*. 2018; 9(5):198. DOI: 10.3390/atmos9050198

17. Chatzinikolaou E., Chalkias C., Dimopoulou E. Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model. *ISPRS — International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018; XLII-4:69-76. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-69-2018

18. Pham Ngoc Dang, Pham Duc Nguyen, Luong Minh. Vat ly xay dung (phan 1, nhiet va khi hau) (*Build-*

ing physics, part 1, temperature and climate. NXB. Xay dung. Hanoi, 1981 (Construction Publishing House Hanoi, 1981)).

19. Pham Ngoc Dang. Huong dan thiet ke do an nhiet va khi hau kien truc (*Handbook for architectural design of thermal and climatic projects*. NXB. Xay dung. Hanoi, 1980 (Construction Publishing House Hanoi, 1980)).

Received April 21, 2020

Adopted in revised form on August 6, 2020.

Approved for publication on August 28, 2020.

BIONOTES: **Le Minh Tuan** — postgraduate student of the Department of Urban planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2453-1372, ORCID: 0000-0003-4164-7452; grado@mgsu.ru;

Ikhomzhon S. Shukurov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Urban planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 630748; grado@mgsu.ru;

Margarita O. Gelmanova — postgraduate student of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8462-8299, ORCID: 0000-0003-2232-5239; agpz@mgsu.ru;

Mikhail Yu. Slesarev — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Energy Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru.