Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки

Ле Минь Туан¹, И.С. Шукуров¹, Нгуен Тхи Май²

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

² Национальный центральный университет; г. Тао Юань, Тайвань

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен метод моделирования в формировании максимальной интенсивности городского острова тепла (ГОТ) с учетом планировки территории с использованием параметров высоты здания H и ширины прилегающей улицы B в виде H/B . Городской остров тепла характеризуется повышением температуры в городских центрах города по сравнению с прилегающими сельскими районами.

Материалы и методы. Исследование основано на технологии дистанционного зондирования для анализа деятельности поверхности города Ханоя. Изучение проводилось в разные времена года с целью выявления распространения эффекта острова тепла с течением времени. Метод исследования основан на теории чисел модели Оке. Выбран квартал в центре города с высокой плотностью застройки для моделирования максимального по интенсивности ГОТ.

Результаты. Установлено, что увеличение численности населения влияет на процесс урбанизации. В течение многих лет городская территория страдает от эффекта острова тепла. На основании модели Оке произведены расчеты максимальной интенсивности ГОТ в квартале Нхан Чинь в районе Тхань Суан г. Ханоя. Расчеты показали, что чем выше здание и больше расстояние от дороги, тем больше интенсивность острова тепла. Соответственно, чем ниже здание и чем меньше расстояние от дороги, тем ниже интенсивность теплового острова.

Выводы. Использование модели Оке для оценки интенсивности острова тепла на основе соотношения высоты и расстояния здания от дороги делает возможным моделирование процесса. В результате планировщик может предложить варианты решения планировки, позволяющие устранить негативное влияние эффекта городского острова тепла.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ле Минь Туан, Шукуров И.С., Нгуен Тхи Май. Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 3. Ст. 2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.2

A study case of urban heat island intensity based on urban geometry

Le Minh Tuan¹, Ilkhomzhon S. Shukurov¹, Nguyen Thi Mai²

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

² National Central University; Tao Yuan, Taiwan

ABSTRACT

Introduction. The paper presents a method to simulate the maximum intensity of urban heat island (UHI) based on urban geometry using H/W parameters, where H — building height and W — width of neighboring street. Urban heat island is determined by the increase in the temperature in the city centers compared to the surrounding rural areas.

Materials and methods. The research is based on remote sensing technology to analyze the thermal surface of Hanoi city. It was run in different seasons thereby determining the expansion of the heat island effect over the years. The research method is based on Oke's model number theory. An area is selected in the city center with high construction density to simulate the intensity of UHI.

Results. The study shows that population growth affects the urbanization process. Over the years the urban land area is affected by the expansion of the heat island effect. Based on Oke's model, calculations of UHI maximum intensity in Nhan Chinh block (Thanh Xuan district of Hanoi) were made. The estimation showed that the higher the building and the greater the distance from the road, the greater the intensity of the heat island. Accordingly, the lower the building and the smaller the distance from the road, the lower the intensity of the heat island.

Conclusions. Using the Oke's model to estimate heat island intensity based on the height-to-distance ratio of a building to a road makes process modeling possible. As a result, the planner can offer solutions to eliminate the negative impact of the urban heat island effect.

KEY WORDS: micro climate, urban heat island, urban wind, landscape, urban planning, thermal comfort, urban thermal environment

FOR CITATION: Le Minh Tuan, Ilkhomzhon S. Shukurov, Nguyen Thi Mai. A study case of urban heat island intensity based on urban geometry. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019; 9(3):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.2 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

С быстрым движением процесса урбанизации Вьетнама, городское население и масштабы использования земли непрерывно увеличивались. Таким образом, возникло противоречие между увеличивающимся городским населением и ограниченными возможностями окружающей среды и ресурсов, что привело к развитию городских проблем, таких как загрязнение воздуха и городская термальная среда. От сжигания большого количества топлива промышленными предприятиями атмосфера загрязняется газовыми отходами. Они образуют очаги воздушных ореолов и «колпаков» над городами, «острова тепла» с повышенным содержанием оксида углерода и углекислого газа, аэрозольных выбросов производства и транспорта. В результате этого взаимодействия получается температурная инверсия с образованием парникового эффекта или смоговых явлений. В связи с этим над городом существенно меняется метеорологический режим. Вследствие эффективного излучения отдельных участков деятельной поверхности земли в городской среде образуются «острова тепла». Известное явление, называемое «городской островом тепла» (ГОТ), влияет на качество жизни. Городские центры накапливают больше тепла, здесь наблюдаются более высокие температуры воздуха, чем в районах, которые находятся на окраинах города (или в прилегающих сельских районах). Исследование ГОТ из-за увеличения урбанизации г. Ханой особенно важно для оценки глобального потепления [1, 2]. Среди факторов, которые влияют на интенсивность острова тепла, можно выделить городскую планировку. Планировка взаимодействует с обменным излучением между землей и атмосферой с последующими явлениями отражения, поглощения и накопления тепла [3]. Геометрическое сочетание горизонтальных и вертикальных внутригородских поверхностей часто называют «городским каньоном», который обычно измеряется соотношением сторон по высоте и ширине (H/B), соотношением между средней высотой здания и шириной улицы. Среди аналитических исследований, связывающих городскую планировку и формирование островов тепла, стоит выделить исследование, проведенное в Англии Оке (1981 г.). Увеличение отношения

H/B соответствует уменьшению скорости охлаждения городской среды по отношению к сельской местности [4]. Таким образом, изучение модели в качестве вычислительного инструмента может открыть возможности анализа и упростить его использование проектировщиками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Города и городские районы изменяют климат, создавая различные микроклиматические режимы в городах. Это связано с рядом сложных факторов, таких как охлаждение на озелененных территориях, повышенная активность человека и накопление тепла в городских условиях, а также влияние каньонов [5]. Планировка города обычно связана с формированием городских факторов острова тепла. Изменение геометрии в городских условиях может влиять на увеличение или уменьшение значений температуры воздуха по сравнению с данными измерений на окраинах города, скорость и направление ветра, длинные и короткие волны излучения [6–9].

Факторы, влияющие на возникновение и интенсивность островов тепла, можно классифицировать на две категории:

- первая категория — это метеорологические факторы, включая скорость и направление ветра, влажность и облачность.
- вторая категория в основном является продуктом городской планировки, таким как плотность застройки, соотношение сторон, экспозиции рельефа и строительные материалы [10].

Теоретически, чем больше отношение H/B , тем меньше площадь видимого неба и рассеивание длинноволнового излучения. Таким образом, большее значение H/B снижает скорость охлаждения в городских районах за счет уменьшения турбулентного переноса из-за ветра и количества антропогенного тепловыделения [11].

В дополнение к возможным помехам в ГОТ, которые может вызвать соотношение H/B , одним из наиболее значительных изменений, производимых зданиями, являются изменения воздушного потока, обычно измеряемые по длине шероховатости Z_0 [12]. Существуют различные исследования, связывающие городскую планировку и изменения ветрового потока с применением концепции Z_0 [13, 14].

Модель Оке (1981 г.) была разработана путем сравнения результатов эксперимента с моделью физического масштаба и данными, полученными в поле, для анализа формирования городских островов тепла [15, 16]. Основываясь на ряде математических выводов, этот исследователь разработал численную модель эмпирической основы. Формула (1) (с $R_2 = 0,89$) описывает модель и является одной из ссылок в литературе по городскому климату, поскольку она может выделить специфическую роль одной из причин острова тепла городской планировки.

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7,45 + 3,97 \ln \left(\frac{H}{B} \right), \quad (1)$$

где $\Delta T_{u-r(\max)}$ — максимальная температура ГОТ, °С; H — высота зданий в городском каньоне; B — ширина улицы в городском каньоне.

Анализ показывает, что явление ГОТ наблюдалось во многих городах мира преимущественно ночью. Наибольшая интенсивность островов тепла отмечается через несколько часов после захода солнца [15]. Это происходит из-за особенностей формирования городских территорий.

Например, в Афинах максимальная интенсивность городского острова тепла ($\text{ГОТ}_{\max}$) наблюдается при 2,8 °С около полуночи [17]. В Базеле, Швейцария, обнаружили $\text{ГОТ}_{\max}$ при 5 °С в 11 часов вечера. Это явление имеет место в период после заката [18]. Городская планировка может сильно влиять на значения $\text{ГОТ}_{\max}$ и время, в которое это происходит. В ночное время при соотношении сторон менее 4 °С температура изменяется по мере увеличения H/B из-за захвата уходящего длинноволнового излучения высокими зданиями [19]. Однако при соотношении сторон, превышающем 4 °С, температур воздуха понижается с увеличением H/B . Другими словами для очень высоких пропорций увеличение соотношения привело к более низкой ночной температуре [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Столица Ханой после расширения административных границ с 2008 г. увеличилась до 30 административных единиц, в том числе 12 районов площадью 3344,7 км², население также увеличилось почти на 7 млн человек (рис. 1).

С 1998 по 2016 гг. в Ханое произошли значительные изменения в общей численности и плотности населения (рис. 2). Общая численность населения значительно увеличилась с 2685 тыс. чел. в 1999 г. до 7328,4 тыс. чел. в 2016 г. (рис. 3), увеличившись на 4643,4 тыс. чел. через 17 лет, при темпах роста 273,14 тыс. чел. в год. Двойной скачок населения произошел в 2008 г., увеличившись на 3153,3 тыс. чел. по сравнению с 2007 г., что привело к административной экспансии. Кроме того,

это событие связано с быстрой урбанизацией и экономическим развитием, люди из других провинций покинули свои родные города и переехали в Ханой в поисках работы с более высоким доходом.

Плотность населения также постоянно увеличивалась во всех районах Ханоя в течение периода исследования (рис. 2). Согласно карте плотности населения в 2016 г. (рис. 3), пять районов Ба Динь — 26 249 чел./км², Кау Жай — 20 931 чел./км², Донг Да — 40 331 чел./км², Хай Ба Трунг — 31 308 чел./км², Хоан Кием — 29 471 чел./км² и Тхань Суан — 29 295 чел./км² имеют самую высокую плотность населения, которая, как правило, со временем увеличивается. Эти места являются центральными районами Ханоя, где деловые и экономические условия наиболее благоприятные. Такая ситуация привела к тому, что плотность населения в этих районах намного выше, чем в соседних регионах. Ханой расширяется, в результате чего ГОТ способствуют изменению климата во Вьетнаме.

Пространственные распределения температуры поверхности земли (ТПЗ) в трех временных точках (1999, 2009 и 2016 гг.) в Ханое также получены из тепловых изображений Landsat, как показано на рис. 4. В целом, более высокие значения ТПЗ были в основном зафиксированы вдоль центра г. Ханоя (> 24 °С) в течение всех трех временных точек. Центр города представляет собой наиболее многолюдный жилой район с плотной застройкой зданий, что привело к увеличению непроницаемых поверхностей, таких как асфальт, парковки и тротуары в этой области. Непроницаемые поверхности увеличивают поглощение солнечной энергии и преобразуют эту энергию в тепло. Кроме того, тепловая энергия от промышленной деятельности в промышленных зонах делает температуру поверхности выше, чем температура окружающей среды.

Таким образом, ТПЗ в этих областях довольно высокая по сравнению с окружающими территориями, в местах расположения промышленной зоны температура поверхности земли достигает более 30 °С. В сельской местности ТПЗ ниже, что наиболее заметно в 1999 г., и составляет от 20 до 24 °С. Лесные и водные районы являются областями с самой низкой ТПЗ во всех трех временных точках, представляя ТПЗ ниже 20 °С. В 1999 и 2009 гг. районы с высокой температурой поверхности суши были в основном расположены в столичном регионе. Со временем ТПЗ имела тенденцию повышаться в районах вокруг центральной части города. В 2016 г. области температуры поверхности высокогорья значительно расширились к северо-востоку, следуя пространственной структуре землепользования и изменениям земного покрова. Температура поверхности земли в этом районе достигла лишь 22–24 °С в 1999 г., но в 2016 г. поднялась до 24–28 °С. Кроме того, очевидно, что пространственная структура индекса нарастания нормализованной

Рис. 1. Схема г. Ханой

Рис. 2. Развитие населения г. Ханой периода 1999–2016 гг.

Рис. 3. Плотность населения г. Ханой в 2016 г., чел./км²

Рис. 4. Карта ТПЗ в г. Ханой по данным Landsat в 1999, 2009 и 2016 гг.

разности в целом соответствует ТПЗ, тогда как такая для индекса растительности с нормализованной разницей является обратной. Эти результаты показывают, что более низкое содержание растительности в центре города приводит к более высокой ТПЗ

и значениям нормализованной разницы в размерах при сравнении с прилегающими территориями.

В табл. 1 приведены результаты проверки ТПЗ в трех временных точках. Данные о температуре воздуха, которые были собраны с четырех метео-

Табл. 1. Сравнение температуры поверхности суши с температурой воздуха на метеостанциях Ханоя

Метеостанция	Проверка ТПЗ, °С								
	23.09.1999 г.			05.11.2009 г.			07.10.2016 г.		
	ТПЗ	Температура воздуха, °С	Δt , °С	ТПЗ	Температура воздуха, °С	Δt , °С	ТПЗ	Температура воздуха, °С	Δt , °С
Ланг	27,92	26,4	1,52	25,88	23,1	2,78	28,49	26,7	1,79
Ха Донг	26,87	25,7	1,17	25,34	22	3,34	27,23	26	1,23
Шон Тай	25,9	25,6	0,3	22,76	21,5	1,26	25,84	25,3	0,54
Ба Ви	24,88	23,8	1,08	22,75	21	1,75	25,17	24,1	1,07

Рис. 5. Определение зоны ГОТ г. Ханой в 1999, 2009, 2016 гг.

Табл. 2. Временные доли зоны ГОТ в Ханое (1999, 2009 и 2016 гг.)

Тип	Соотношение между площадью острова тепла и площадью города Ханой, %		
ГОТ	10,98 (1999 г.)	25,36 (2009 г.)	31,83 (2016 г.)
Не ГОТ	89,02 (1999 г.)	74,64 (2009 г.)	68,17 (2016 г.)

рологических станций в Ханое (Ланг, Шон Тай, Ба Ви, Ха Донг), использовались для сравнения ТПЗ, полученной из изображения Landsat. Разница между температурой воздуха и ТПЗ находится в диапазоне от 0,3 до 3,34 °С. Разница выше в городских районах, тогда как температура воздуха ближе к ТПЗ в сельской местности.

На рис. 5 показаны идентифицированные зоны городских островов тепла в Ханое в трех временных точках 1999, 2009 и 2016 гг., а в табл. 2 приведены проценты зоны островов тепла. Пространственная структура района ГОТ была обнаружена в столичной центральной зоне. Эта область со временем расширилась вокруг центра города и выросла на северо-востоке в 2016 г., следуя пространственной структуре землепользования и земного покрова, а также изменениям ТПЗ. В 1999 г. площадь ГОТ составляла только 10,98 %, а за 17 лет она увеличилась на 20,85 %, достигнув 31,83 % в 2016 г. Очевидно,

что со временем острова городского тепла в Ханое расширились, и эти изменения соответствуют тенденции роста города в этот период. Кроме того, в северо-восточном районе в 2016 г. отмечается расширение площади ГОТ. Этот результат показывает тесную связь между распределением ГОТ, развитием землепользования и ТПЗ.

По карте распределения эффекта ГОТ в 2016 г. (рис. 5) был выбран квартал Нхан Чинь в районе Тхань Суан для оценки интенсивности ГОТ. Место, выбранное для оценки, имеет высокую плотность застройки комбинированных высотных зданий (рис. 6).

Сплошные линии осей делятся на фрагменты по их пересечениям (блокам). На основании значения радиуса выбираются здания, которые «принадлежат» каждому блоку (рис. 7). Каждое здание связано со своим блоком, который, в свою очередь, связан с линиями осей, окаймляющими их.

Рис. 6. Территория исследования интенсивности ГОТ в квартале Нхан Чинь района Тхань Суан

После этого выполняются числовые ассоциации. Расчет H — это средняя высота всех зданий с обеих сторон (2). Расчет B производится на основе суммы средних значений от зданий к оси, правой и левой сторон (3). Таким образом, значение максимальной интенсивности острова тепла получается в соответствии с формулой.

$$H = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_x}{x}; \quad (2)$$

$$B = \frac{D_{\text{справа.1}} + D_{\text{справа.2}} + D_{\text{справа.3}} + \dots + D_{\text{справа.y}}}{y} + \frac{D_{\text{слева.1}} + D_{\text{слева.2}} + D_{\text{слева.3}} + \dots + D_{\text{слева.z}}}{z}, \quad (3)$$

где H — средняя высота; h — высота каждого здания; B — средняя ширина; $D_{\text{справа}}$ — расстояние от каждого здания до оси, от блока на правой стороне; $D_{\text{слева}}$ — расстояние от каждого здания до оси, от блока на левой стороне.

Это исследование показывает что, исходя из модели Оке для городской местности, в которой отношение H/B колеблется между 0,30 и 0,5, максимальная интенсивность значений ГОТ_{макс} остается в диапазоне от 2,65 до 4,68 °C. Когда отношение H/B изменяется в диапазоне от 0,53 до 1,27, результирующие значения максимальной интенсивности ГОТ_{макс} находятся в диапазоне от 4,92 до 8,4 °C. Отмечено, что модель предполагает наличие большего изменения интенсивности ГОТ для более низких значений отношения H/B , чем для более высоких.

В некоторых исследованиях, связанных с вычислением отношения H/B , учитывается только ширина улицы или добавляются меры тротуаров, или они могут основываться только на эталонных аэрофотоснимках. Этот разработанный инструмент может более точно рассчитать изменение расстояний между фасадами зданий, учитывая, что существуют районы и города, где наблюдается большая разни-

Рис. 7. Пространственные ассоциации, выполненные к оси относительно зданий

Табл. 3. Статистика средних значений в точках опроса отмечена на карте (рис. 7)

Оси	$H_{\text{сред}}$	$B_{\text{сред}}$	$H_{\text{сред}}/B_{\text{сред}}$ (пропорция)	ГОТ _{макс} °С
A	12,65	37,42	0,34	3,14
B	12,10	15,54	0,78	6,46
C	9,9	29,03	0,34	3,18
D	12,99	26,11	0,50	4,68
E	12,41	24,99	0,50	4,67
F	11,93	15,54	0,77	6,40
G	12,51	23,68	0,53	4,92
H	13,20	33,52	0,39	3,75
I	13,20	15,70	0,84	6,76
J	11,31	23,79	0,48	4,50
K	13,20	44,20	0,30	2,65
M	11,98	18,20	0,66	5,79
N	12,90	27,45	0,47	4,45
L	13,20	32,25	0,41	3,90
O	13,20	17,05	0,77	6,43
P	23,10	34,89	0,66	5,81
Q	26,40	34,15	0,77	6,43
R	34,65	27,28	1,27	8,40
S	33,00	73,60	0,45	4,27

Рис. 8. Взаимосвязь между интенсивностью ГОТ и городской планировки

ца во фронтальных расстояниях между соседними зданиями.

Использование модели Оке для расчета интенсивности ГОТ имеет то преимущество, что дает почти точные результаты, основанные на отношении высоты и расстояния здания к дороге, существует ограничение анализа, основанного только на этом параметре, исключая другие, которые влияют на ГОТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В приземных слоях атмосферы вследствие указанных особенностей деятельных поверхностей формируются особые условия микроклимата. Наличие «пестроты» температур у поверхностей различных покрытий, обусловленное их различными теплофизическими свойствами и плотностью зеленых насаждений, асфальтового покрытия на солнце на 20–30 °С могут превышать температуру воздуха на уровне дыхания взрослого человека (2 м), а температура газонов — на 8–12 °С. В жаркую погоду тепло, отдаваемое перегретой деятельной поверхностью, создает ощущение угнетающей духоты.

Центры городов являются наиболее интенсивными местами появления ГОТ, где наблюдается наибольшая плотность населения и недостаточность зеленых зон. С резким увеличением численности населения в центре Ханоя (2007 г.) отмечается уменьшение зеленой зоны и тенденция повышения температуры воздуха на 3,34 °С (по данным

метеостанции Ха Донг). Повышение температуры воздуха территории города зависит от увеличения высоты застройки, длины и ширины центра города (площадь ГОТ в 1999 г. 10, 98 %, в 2016 г. 31, 83 %), а также от скорости ветра. В соответствии с целью работы установлена аналитическая взаимосвязь между интенсивностью ГОТ и городской планировки. Предложенный инструмент дает возможность точно рассчитать ГОТ в зависимости от изменения соотношения Н/В. На основании исследований можно рекомендовать следующие мероприятия по интенсификации ветрового режима и оздоровлению окружающей среды:

- в проектировании центра города на уровне детальной планировки возможно использование ветростимулирующей застройки. Например, не создавать преграды господствующим направлениям ветра;
- разрежение плотности застройки с формированием свободных от застройки пространств;
- исключить фронтальную застройку протяженных зданий путем замены на дома башенного типа;
- озеленение территории необходимо делать более раскрытым для господствующих ветров.

Практическая значимость исследования заключается в том, что приведенный вычислительный инструмент может открыть возможность анализа ГОТ центра городов. Исследование позволяет обеспечить оптимальный выбор градостроительных экологических мероприятий в градостроительном проектировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shi Y., Zhang Y. Remote sensing retrieval of urban land surface temperature in hot-humid region // *Urban Climate*. 2018. Vol. 24. Pp. 299–310. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.01.001
2. Darmanto N.S., Varquez A.C.G., Kawano N., Kanda M. Future urban climate projection in a tropical megacity based on global climate change and local urbanization scenarios // *Urban Climate*. 2019. Vol. 29. P. 100482. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100482
3. Шукуров И.С., Хонгорова И.В. Теплофизическое моделирование в градостроительстве // *Вестник МГСУ*. 2012. № 1. С. 12–16. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.1.12-16
4. Шукуров И.С. Исследование конвективных потоков в условиях многоэтажной застройки // *Жилищное строительство*. 2006. № 9. С. 22–23.
5. Levermore G.J., Cheung H.K.W. A low-order canyon model to estimate the influence of canyon shape on the maximum urban heat island effect // *Building Services Engineering Research and Technology*. 2012. Vol. 33. Issue 4. Pp. 371–385. DOI: 10.1177/0143624411417899
6. Jihad A.S., Tahiri M. Modeling the urban geometry influence on outdoor thermal comfort in the case of Moroccan microclimate // *Urban Climate*. 2016. Vol. 16. Pp. 25–42. DOI: 10.1016/j.uclim.2016.02.002
7. Bourbia F., Boucheriba F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine) // *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35. Issue 2. Pp. 343–347. DOI: 10.1016/j.renene.2009.07.017
8. Oke T.R. Street design and urban canopy layer climate // *Energy and Buildings*. 1988. Vol. 11. Issue 1–3. Pp. 103–113. DOI: 10.1016/0378-7788(88)90026-6
9. Stewart I.D., Oke T.R. Local climate zones for urban temperature studies // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. Vol. 93. Issue 12. Pp. 1879–1900. DOI: 10.1175/bams-d-11-00019.1
10. Rajagopalan P., Lim K.C., Jamei E. Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city // *Solar Energy*. 2014. Vol. 107. Pp. 159–170. DOI: 10.1016/j.solener.2014.05.042
11. Oke T.R. *Boundary layer climates*. 2nd ed. London and New York : Routledge, 1987. 464 p. DOI: 10.4324/9780203407219

12. Memon R.A., Leung D.Y.C., Liu C.H. Effects of building aspect ratio and wind speed on air temperatures in urban-like street canyons // *Building and Environment*. 2010. Vol. 45. Pp. 176–188. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.05.015

13. Kanda M., Moriizumi T. Momentum and heat transfer over urban-like surfaces // *Boundary-Layer Meteorology*. 2009. Vol. 131. Issue 3. Pp. 385–401. DOI: 10.1007/s10546-009-9381-7

14. Zaki S.A., Hagishima A., Tanimoto J., Ikegaya N. Aerodynamic Parameters of Urban Building Arrays with Random Geometries // *Boundary-Layer Meteorology*. 2011. Vol. 138. Issue 1. Pp. 99–120. DOI: 10.1007/s10546-010-9551-7

15. Oke T.R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations // *Journal of Climatology*. 1981. Vol. 1. Issue 3. Pp. 237–254. DOI: 10.1002/joc.3370010304

16. Atkinson B.W. Numerical modelling of urban heat-island intensity // *Boundary-Layer Meteorology*. 2003. Vol. 109. Issue 3. Pp. 285–310. DOI: 10.1023/a:1025820326672

17. Giannopoulou K., Santamouris M., Livada I., Georgakis C., Caouris Y. The impact of canyon ge-

ometry on intra urban and urban: suburban night temperature differences under warm weather conditions // *Pure and Applied Geophysics*. 2010. Vol. 167. Issue 11. Pp. 1433–1449. DOI: 10.1007/s00024-010-0099-8

18. Hardin A.W., Liu Y., Cao G., Vanos J.K. Urban heat island intensity and spatial variability by synoptic weather type in the northeast U.S. // *Urban Climate*. 2018. Vol. 24. Pp. 747–762. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.09.001

19. Millward-Hopkins J.T., Tomlin A.S., Ma L., Ingham D., Pourkashanian M. Estimating aerodynamic parameters of urban-like surfaces with heterogeneous building heights // *Boundary-layer Meteorology*. 2011. Vol. 141. Issue 3. Pp. 443–465. DOI: 10.1007/s10546-011-9640-2

20. Marcos Vinícius Bueno de Moraes, Edmilson Dias de Freitas, Viviana Vanesa Urbina Guerrero, Leila Droprinchinski Martins. A modeling analysis of urban canopy parameterization representing the vegetation effects in the megacity of São Paulo // *Urban Climate*. 2016. Vol. 17. Pp. 102–115. DOI: 10.1016/j.uclim.2016.04.004

Поступила в редакцию 13 июня 2019 г.

Принята в доработанном виде 9 июля 2019 г.

Одобрена для публикации 28 августа 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: Ле Минь Туан — аспирант кафедры архитектуры; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; pz@mgsu.ru;

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

Нгуен Тхи Май — магистрант кафедры технологий дистанционного зондирования; Национальный центральный университет; 32001, г. Тао Юань, ул. Чжунда, д. 300, район Чжунли, Тайвань; mainguyen1495@gmail.com.

INTRODUCTION

With the rapid expansion of Vietnam's urbanization process, urban populations and the scale of land use have been increasing steadily. Thus, tensions between an increasing urban population and limited environmental and resource capacities arose, which led to the development of civic problems such as air pollution and urban thermal environment. The combustion of large amounts of fuel by industrial enterprises pollutes the atmosphere with gas waste. They form source regions of air halos and "umbrellas" over cities, "heat islands" with increased concentration of carbon monoxide and carbon dioxide, aerosol emissions of factories and transport. This interaction results in the temperature inver-

sion with formation of greenhouse effect or smog phenomena. Therefore the meteorological regime changes significantly over the city. Due to the effective radiation of particular areas of earth active surface, "heat islands" are formed in the urban environment. A well-known phenomenon called "urban heat islands" (UHI) affects the quality of life. Urban centers accumulate more heat and have hotter temperatures than areas on the outskirts of the city (or surrounding rural areas). A study of UHI due to increasing urbanization in Hanoi is particularly important for assessing global warming [1, 2]. Among the factors in the intensity of the heat island, we can distinguish the urban geometry. The layout interacts with the exchange radiation between the earth and the atmosphere with the subsequent phenomena of reflection,

absorption and accumulation of heat [3]. The geometric combination of horizontal and vertical intra-city surfaces is often referred to as a “street canyon”, which is usually measured by height-to-width aspect ratio (H/W), the relation between medium height of a building in a street canyon and the width of the street. Among the analytical studies linking urban geometry and the formation of heat Islands, it is worth highlighting the study conducted in England by Oke (1981). An increase in the H/W ratio corresponds to a decrease in the cooling rate of the urban environment in relation to the countryside [4]. Thus, the study of the model as a computational tool can open the door for possibilities of analysis and simplify its use by designers.

MATERIALS AND METHODS

Cities and urban areas change climate, creating various microclimatic regimes in cities. This is due to a number of complex factors, such as cooling in green planted land, human overaction and heat accumulation in urban settings, as well as the influence of canyons [5]. Urban planning is usually associated with the formation of heat island urban factors. A change in geometry in urban settings can affect the increase or decrease in air temperature as compared with measurement data on the outskirts of the city, wind velocity and direction, long and short radiation waves [6–9].

Factors in the occurrence and intensity of heat islands can be classified into two categories:

- the first category is meteorological factors, including wind velocity and direction, humidity and cloud cover;
- the second category is mainly a product of urban planning, such as building density, aspect ratio, relief exposure and constructional materials [10].

Theoretically, the larger the H/W ratio, the smaller the area of the visible sky and the scattering of long-wave length radiation. Thus, a large H/W value reduces the cooling rate in urban areas through decrease in turbulent transport due to wind and the amount of anthropogenic heat [11].

In addition to the potential interferences in UHI that the H/W ratio may cause, one of the most significant changes made by buildings are changes in air flow, usually measured along the length of the roughness Z_0 [12]. There are various works linking urban planning and changes in wind flow using the concept Z_0 [13, 14].

The Oke’s model (1981) was developed by comparing the results of an experiment with a physical scale model and field values to analyze the formation of urban heat Islands [15, 16]. Basing on a number of mathematical derivations, this researcher developed a numerical model of the empirical basis. Formula (1) (with $R_2 = 0.89$) describes the model and it is among the references in the literature on urban climate, as it can highlight the specific role of one of the causes of the heat island in urban planning.

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7.45 + 3.97 \ln \left(\frac{H}{W} \right), \quad (1)$$

where $\Delta T_{u-r(\max)}$ — maximal UHI temperature, °C; H — buildings height in street canyon; W — street width in street canyon.

The analysis suggests that UHI phenomenon was observed in many places around the world mainly at night. The greatest intensity of the heat islands is observed in a few hours after sunset [15]. This is due to the peculiarities of urban areas formation.

For example, in Athens, the maximum intensity of the urban heat island ($\text{UHI}_{\max}$) is observed at 2.8 °C about midnight [17]. In Basel, Switzerland, $\text{UHI}_{\max}$ was detected at 5 °C at 11 p.m. This phenomenon occurs after sunset [18]. Urban planning can greatly affect $\text{UHI}_{\max}$ values and the time at which it occurs. At night, with an aspect ratio of less than 4 °C, the temperature changes with H/W increase due to the capture of the outgoing long-wave radiation by high buildings [19]. However, when the aspect ratio exceeds 4 °C, the air temperature decreases with H/W increase. In other words for very high proportions the increase in ratio resulted in a lower night temperature [20].

RESULTS

The capital Hanoi has expanded its administrative boundaries since 2008 to 30 administrative units, including 12 districts 3,344.7 km² in area, the population has also increased by almost 7 million people (Fig. 1).

From 1998 to 2016, Hanoi experienced significant changes in total population and its density (Fig. 2). The total population increased significantly from 2,685 thousand people in 1999 to 7,328.4 thousand people in 2016 (Fig. 3), having increased by 4,643.4 thousand people in 17 years, at growth rates of 273.14 thousand people a year. Double jump of the population occurred in 2008, having increased by 3,153.3 thousand people in comparison with 2007, which resulted in administrative expansion. In addition, the event is linked to rapid urbanization and economic development; people from other provinces have left their home towns and moved to Hanoi on a job of larger income search.

Population density also had been steadily increasing in all areas of Hanoi throughout the study period (Fig. 2). According to the population density map in 2016 (Fig. 3), five Ba Dinh districts — 26,249 people/km², Cau Giay — 20,931 people/km², Dong Da — 40,331 people/km², Hai Ba Trung — 31,308 people/km², Hoan Kiem — 29,471 people/km² and Thanh Xuan — 29,295 people/km² have the highest population density, which, as a rule, increases with the passing of time. These places are the central districts of Hanoi, where business and economic conditions are most favorable. This situation has led to the fact that the population density in these areas is much higher than in

Fig. 1. Hanoi city plan

Fig. 2. Population growth in Hanoi in 1999–2016

Fig. 3. Population density in Hanoi in 2016, people/km²

Fig. 4. LST map in Hanoi according to Landsat data in 1999, 2009, and 2016

neighboring regions. Hanoi is expanding, causing UHI to contribute to climate change in Vietnam.

The spatial distributions of the land surface temperature (LST) at three time points (1999, 2009, and 2016) in Hanoi are also obtained from Landsat thermal images, as shown in Fig. 4. In general, higher LST values were mainly recorded along the center of Hanoi ($> 24^{\circ}\text{C}$) during all three time points. The city center is the most populous high-density residential, which has led to an increase in impermeable surfaces such as asphalt, parking lots and sidewalks in this area. Impermeable surfaces increase the absorption of solar energy and convert this energy into heat. In addition, industrial activities thermal energy in process areas makes the surface temperature higher than the ambient temperature.

Thus, LST in these areas is rather high compared with the surrounding territories; in industrial zone land surface temperature reaches more than 30°C . In rural areas, LST is lower, which is most noticeable in 1999, and ranges from 20 to 24°C . Forest and water areas are the ones with the lowest LST at all three time points, representing LST below 20°C . In 1999 and 2009 areas with a high land surface temperature were mainly located in the metropolitan area. Over time, LST tended

to rise in areas around city center. In 2016, the surface temperature regions of the highlands expanded significantly to the northeast, following the spatial structure of land use and changes in the land cover. Land surface temperature in this region reached only 22 – 24°C in 1999, but in 2016 it rose to 24 – 28°C . In addition, it is obvious that the spatial structure of growth index of the normalized difference as a whole corresponds to LST, while that for the index of vegetation with a normalized difference is the opposite. These results suggest that a lower vegetation content in the city center leads to higher LST and normalized size differences by comparison with surrounding areas.

Table 1 shows the results of the LST test in three. The air temperature data collected from four meteorological stations in Hanoi (Lang, Son Tây, Ba Vi, Ha Dong) was used to compare LST obtained from Landsat image. The difference between air temperature and LST is in within range from 0.3 to 3.34°C . The difference is higher in urban areas, while air temperature is closer to LST in rural areas.

The identified zones of the urban heat islands in Hanoi are shown in Fig. 5 at three time points in 1999, 2009, and 2016, and the percentage of the heat island

Table 1. Comparison of land surface temperature with air temperature at Hanoi weather stations

Weather station	LST test, $^{\circ}\text{C}$								
	23.09.1999.			05.11.2009.			07.10.2016.		
	LST	Atmospheric temperature, $^{\circ}\text{C}$	Δt , $^{\circ}\text{C}$	LST	Atmospheric temperature, $^{\circ}\text{C}$	Δt , $^{\circ}\text{C}$	LST	Atmospheric temperature, $^{\circ}\text{C}$	Δt , $^{\circ}\text{C}$
Lang	27.92	26.4	1.52	25.88	23.1	2.78	28.49	26.7	1.79
Ha Dong	26.87	25.7	1.17	25.34	22	3.34	27.23	26	1.23
Son Tây	25.9	25.6	0.3	22.76	21.5	1.26	25.84	25.3	0.54
Ba Vi	24.88	23.8	1.08	22.75	21	1.75	25.17	24.1	1.07

Fig. 5. Determination of UHI zone of Hanoi in 1999, 2009, and 2016

Table 2. UHI percentage (1999, 2009, and 2016) in Hanoi

Type	The relation between the area of the heat island and the area of the city of Hanoi, %		
UHI	10.98 (1999)	25.36 (2009)	31.83 (2016)
Not UHI	89.02 (1999)	74.64 (2009)	68.17 (2016)

Fig. 6. Territory of UHI intensity study in Nhan Chinh block of Thanh Xuan district

zone is shown in Table 2. The spatial structure of UHI area was spotted in the metropolitan central zone. This area expanded over time around the city center and grew in the northeast in 2016, following the spatial structure of land use and land cover, as well as changes in LST. In 1999, UHI area was only 10.98 %, and over a 17-year period it increased by 20.85 %, reaching 31.83 % in 2016. It is obvious that over time urban heat islands in Hanoi expanded, and these changes are consistent with the growth trend of the city during this time period. In addition, in the northeastern part an expansion of UHI area was noted in 2016. This result shows

a close relationship between the distribution of UHI, the development of land use and LST.

Based on the distribution map of UHI effect in 2016 (Fig. 5), Nhan Chinh in Thanh Xuan district was selected to assess the intensity of UHI. The site chosen for the assessment has a high density of combined high-rise buildings (Fig. 6).

The solid lines of the axes are divided into fragments at their intersections (blocks). The buildings that “belong” to each block are selected based on the radius value (Fig. 7). Each building is linked to its own block, which in turn is linked to the axes lines that surround them.

Fig. 7. Spatial associations made to an axis relative to buildings

Table 3. Statistics of average values at the survey points are marked on the map (Fig. 7)

Axes	H_{med}	B_{mean}	H_{med}/B_{mean} (proportion)	$UHI_{max}, ^\circ C$
A	12.65	37.42	0.34	3.14
B	12.10	15.54	0.78	6.46
C	9.9	29.03	0.34	3.18
D	12.99	26.11	0.50	4.68
E	12.41	24.99	0.50	4.67
F	11.93	15.54	0.77	6.40
G	12.51	23.68	0.53	4.92
H	13.20	33.52	0.39	3.75
I	13.20	15.70	0.84	6.76
J	11.31	23.79	0.48	4.50
K	13.20	44.20	0.30	2.65
M	11.98	18.20	0.66	5.79
N	12.90	27.45	0.47	4.45
L	13.20	32.25	0.41	3.90
O	13.20	17.05	0.77	6.43
P	23.10	34.89	0.66	5.81
Q	26.40	34.15	0.77	6.43
R	34.65	27.28	1.27	8.40
S	33.00	73.60	0.45	4.27

Fig. 8. The relationship between UHI intensity and urban planning

After that, numerical associations are performed. Calculation of H is medium height of all buildings on both sides (2). Calculation of W is based on the sum of the average values from the buildings to the axis, the right side and the left side (3). Thus, the value of the maximum intensity of the heat island is obtained in accordance with the formula.

$$H = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_x}{x}, \quad (2)$$

$$W = \frac{D_{\text{right}.1} + D_{\text{right}.2} + D_{\text{right}.3} + \dots + D_{\text{right}.y}}{y} + \frac{D_{\text{left}.1} + D_{\text{left}.2} + D_{\text{left}.3} + \dots + D_{\text{left}.z}}{z}, \quad (3)$$

where H — medium height; h — the height of each building; B — mean width; D_{right} — distance from each building to the axis, from the block on the right side; D_{left} — distance from each building to the axis, from the block on the left side.

This research suggests that, based on the Oke's model for urban areas, in which the H/W ratio varies between 0.30 and 0.5, the maximum intensity of UHI_{max} values remains in the range from 2.65 to 4.68 °C. When the H/W ratio changes in the range from 0.53 to 1.27, the resultant values of the maximum UHI_{max} intensity are within the range from 4.92 to 8.4 °C. It is being noted that the model presupposes larger change in UHI intensity for lower H/W ratios than for higher ones.

In some studies related to calculating the H/W ratio, only street width is taken into account or sidewalk measures are added, or they can only be based on reference aerial photographs. This developed tool can more precisely calculate the length variation between the facades of buildings, given that there are areas and cities where there is a big difference in the frontal spacing between buildings.

The use of the Oke's model for calculating the intensity of UHI has the advantage of giving almost surely results based on the ratio of the height and distance of the building to the road; there is a limitation of analysis based only on this parameter, excluding others that affect UHI.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In the surface layers of the atmosphere, due to the indicated features of the active surfaces, special micro climate conditions are formed. The presence of “variegated” temperatures on the surfaces of various coatings, due to their various thermophysical properties and the density of green spaces, asphalt pavement in the sun can exceed the air temperature by 20–30 °C at the level of respiration of an adult (2 m), and the temperature of lawns — by 8–12 °C. In hot weather, the heat given off by an overheated active surface arises sensation of oppressive stuffiness.

Urban centers are the most intense places of UHI appearance, where there is a large population density and lack of green areas. Along with sharp increase in the population in the center of Hanoi (2007), there is a decrease in the green zone and a tendency of increasing air temperature by 3.34 °C (according to Ha Dong weather station). The increase in air temperature in the city depends on buildings heightening, the length and width of the city center (UHI area in 1999 — 10.98 %, in 2016 — 31.83 %), as well as on wind velocity. In furtherance of the work, an analytical relationship has been established between UHI intensity and urban planning. The proposed tool confers the possibility to accurately calculate UHI depending on H/W repropotion. On the ground of research, the following measures to intensify the wind regime and improve the environment can be recommended:

- in the design of the city center at the level of detailed planning, the use of wind-stimulating buildings is possible. For example, do not obstruct the prevailing wind directions;
- reduction of building density with the formation of undeveloped spaces;
- eliminate frontal development of long-length buildings by replacing them with tower-blocks;
- the landscaping of the area should be made more open to the prevailing winds.

Practical implications of the research are that the given computational tool can open the door for UHI analysis in city centers. Research delivers an optimum choice of town-planning ecological activities in town-building design.

REFERENCES

1. Shi Y., Zhang Y. Remote sensing retrieval of urban land surface temperature in hot-humid region. *Urban Climate*. 2018; 24:299–310. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.01.001
2. Darmanto N.S., Varquez A.C.G., Kawano N., Kanda M. Future urban climate projection in a tropical megacity based on global climate change and local urbanization scenarios. *Urban Climate*. 2019; 29:100482. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100482
3. Shukurov I.S., Khongorova I.V. Thermophysical modeling in urban. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 1:12–16. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.1.12-16 (rus.).
4. Shukurov I.S. The study of convective flows in multi-storey buildings. *Housing construction*. 2006; 9:22–23. (rus.).
5. Levermore G.J., Cheung H.K.W. A low-order canyon model to estimate the influence of canyon shape

on the maximum urban heat island effect. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2012; 33(4):371-385. DOI: 10.1177/0143624411417899

6. Jihad A.S., Tahiri M. Modeling the urban geometry influence on outdoor thermal comfort in the case of Moroccan microclimate. *Urban Climate*. 2016; 16:25-42. DOI: 10.1016/j.uclim.2016.02.002

7. Bourbia F., Boucheriba F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*. 2010; 35(2):343-347. DOI: 10.1016/j.renene.2009.07.017

8. Oke T.R. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*. 1988; 11(1-3):103-113. DOI: 10.1016/0378-7788(88)90026-6

9. Stewart I.D., Oke T.R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012; 93(12):1879-1900. DOI: 10.1175/bams-d-11-00019.1

10. Rajagopalan P., Lim K.C., Jamei E. Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. *Solar Energy*. 2014; 107:159-170. DOI: 10.1016/j.solener.2014.05.042

11. Oke T.R. *Boundary layer climates*. 2nd ed. London and New York, Routledge Publ., 1987; 464. DOI: 10.4324/9780203407219

12. Memon R.A., Leung D.Y.C., Liu C.H. Effects of building aspect ratio and wind speed on air temperatures in urban-like street canyons. *Building and Environment*. 2010; 45:176-188. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.05.015

13. Kanda M., Moriizumi T. Momentum and heat transfer over urban-like surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*. 2009; 131(3):385-401. DOI: 10.1007/s10546-009-9381-7

14. Zaki S.A., Hagishima A., Tanimoto J., Ikegaya N. Aerodynamic parameters of urban building arrays with random geometries. *Boundary-Layer Meteorology*. 2011; 138(1):99-120. DOI: 10.1007/s10546-010-9551-7

15. Oke T.R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*. 1981; 1(3):237-254. DOI: 10.1002/joc.3370010304

16. Atkinson B.W. Numerical modelling of urban heat-island intensity. *Boundary-Layer Meteorology*. 2003; 109(3):285-310. DOI: 10.1023/a:1025820326672

17. Giannopoulou K., Santamouris M., Livada I., Georgakis C., Caouris Y. The impact of canyon geometry on intra urban and urban: suburban night temperature differences under warm weather conditions. *Pure and Applied Geophysics*. 2010; 167(11):1433-1449. DOI: 10.1007/s00024-010-0099-8

18. Hardin A.W., Liu Y., Cao G., Vanos J.K. Urban heat island intensity and spatial variability by synoptic weather type in the northeast U.S. *Urban Climate*. 2018; 24:747-762. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.09.001

19. Millward-Hopkins J.T., Tomlin A.S., Ma L., Ingham D., Pourkashanian M. Estimating aerodynamic parameters of urban-like surfaces with heterogeneous building heights. *Boundary-layer Meteorology*. 2011; 141(3):443-465. DOI: 10.1007/s10546-011-9640-2

20. Marcos Vinícius Bueno de Moraes, Edmilson Dias de Freitas, Viviana Vanesa Urbina Guerrero, Leila Dropinichinski Martins. A modeling analysis of urban canopy parameterization representing the vegetation effects in the megacity of São Paulo. *Urban Climate*. 2016; 17:102-115. DOI: 10.1016/j.uclim.2016.04.004

Received June 13, 2019.

Adopted on July 9, 2019.

Approved for publication August 28, 2019.

BIONOTES: **Le Minh Tuan** — postgraduate student of Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; pz@mgsu.ru;

Ilkhomzhon S. Shukurov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru;

Nguyen Thi Mai — master student of Center for Space and Remote Sensing Research; **National Central University**; 300 Zhongda Rd., Zhongli District, Tao Yuan city, 32001, Taiwan; mainguyen1495@gmail.com.