

Нгуен Фыонг Донг, Доктор,
Ханойский Горно-геологический университет
Nguyen Phuong Dong, Doctor,
Hanoi University of Mining and Geology

Ле Минь Туан, Доктор,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
Le Min Tuan, Doctor,
National Research University Higher School of Economics

**ОЦЕНКА МЕР ПО СМЯГЧЕНИЮ ЭФФЕКТА ГОРОДСКОГО ТЕПЛООВОГО
ОСТРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ:
НА ПРИМЕРЕ ГОРОДСКОГО РАЙОНА ВАНФУ, ХАНОЙ
ASSESSING MITIGATION MEASURES FOR THE URBAN HEAT
ISLAND EFFECT USING NUMERICAL MODELING:
A CASE STUDY OF VAN PHU URBAN, HANOI**

Аннотация. Эффект городского теплового острова (ГТО) представляет собой всё более серьёзную экологическую проблему в условиях стремительной урбанизации во всем мире. Одним из наиболее эффективных методов изучения сложной динамики формирования ГТО, а также оценки эффективности мероприятий по его смягчению при различных сценариях градостроительного развития, признается численное моделирование. В настоящем исследовании использовалась модель Envi-met для оценки результативности определённых мер по смягчению последствий ГТО в жилом районе Ван Фу, расположенном в городе Ханой, Вьетнам. В рамках моделирования рассматривались сценарии, ориентированные на улучшение зелёной инфраструктуры и расширение озеленённых территорий. Результаты моделирования показали, что преобразование инфраструктуры в сочетании с увеличением площади зелёных насаждений способствует значительному снижению интенсивности ГТО, одновременно повышая уровень теплового комфорта для городского населения.

Abstract. The urban heat island (UHI) effect has become an increasingly critical concern in cities worldwide. Numerical modeling is recognized as one of the most effective approaches for investigating the complex dynamics of UHI formation and for assessing the effectiveness of measures to mitigate under alternative urban development scenarios. In this study, the authors applied the Envi-met model to evaluate the effectiveness of selected mitigation strategies in the Van Phu urban area in Hanoi, Vietnam. The simulated scenarios focused on enhancements in green infrastructure and the expansion of vegetated areas. The results revealed that infrastructure transformation and increased green space coverage significantly reduce UHI intensity while simultaneously improving thermal comfort for urban residents.

Ключевые слова: Градостроительство; городской тепловой остров; зелёные насаждения; тепловой комфорт;

Keywords: Urban planning; urban heat island; green space; thermal comfort;

1. Введение

Городская среда представляет собой сложную систему, в которой происходят радиационные, тепловые, динамические и гидравлические процессы, способствующие изменению климата. Интенсивное строительство в рамках урбанизации привело к возникновению сложного явления – локального повышения температуры, известного как эффект городского теплового острова (ГТО). Понятие ГТО описывает ситуацию, при которой



температура в городской местности значительно превышает температуру в окружающих сельских или пригородных районах. Впервые данный феномен был зафиксирован в умеренных широтах [1]. Многочисленные исследования, проведённые за последние десятилетия, позволили глубже раскрыть природу и механизмы формирования ГТО, а также выявить его тесную связь с антропогенной деятельностью [2, 3].

Города аккумулируют тепловую энергию в течение дня и лишь частично отдаёт её в атмосферу ночью [4, 5]. Это обусловлено особенностями морфологии городской застройки: высокой плотностью застройки, преобладанием многоэтажных зданий и наличием большого количества водонепроницаемых поверхностей, таких как дороги и тротуары, что способствует аккумуляции тепла днём и снижает эффективность его рассеивания ночью [4, 6]. В современных условиях, когда возникает потребность в смягчении негативных последствий урбанизации, знания о моделировании различных физических процессов в городе приобретают особое значение. Мониторинг городского энергопотребления, количественная оценка воздействия ГТО, а также исследование теплового комфорта жителей как внутри помещений, так и на открытом воздухе, становятся важными компонентами изучения взаимодействия между градостроительством, климатом и энергетикой [7].

Ханой является одним из наиболее урбанизирующихся городов Вьетнама, всё более подверженный последствиям глобального потепления, в частности росту частоты и интенсивности экстремальных температур. Развитие эффекта ГТО в центральных районах Ханоя было подтверждено в ряде исследований [8, 9], согласно которым урбанизационные процессы привели к увеличению разницы температур воздуха между урбанизированными и сельскими территориями: с 0–0,3 °C в 1980 году до 1–2 °C в 2020 году. Кроме того, ожидается, что масштабные изменения землепользования будут способствовать дальнейшему усилению и трансформации ГТО в будущем.

Основные меры по смягчению воздействия ГТО в настоящее время включают увеличение площади зелёных насаждений, строительство фонтанов и искусственных водоёмов [10], озеленение крыш и фасадов зданий, применение строительных материалов с высокими отражающими свойствами для кровель и дорожных покрытий [11, 12]. Особенно в жарких и засушливых климатических зонах повышение влажности воздуха за счёт озеленения может способствовать снижению температуры до 5 °C, тем самым повышая уровень теплового комфорта в летний период. Подобные решения становятся всё более востребованными в борьбе с ростом температуры в мегаполисах в летнее время. Эти подходы также легли в основу научной концепции авторов по разработке стратегий смягчения последствий ГТО путём увеличения растительного покрова и изменения структуры зелёной инфраструктуры в пределах конкретной территории.

Настоящее исследование сосредоточено на территории жилого района Ван Фу (общин Ха Донг, г. Ханой) с населением около 20 000 человек и общей площадью 94,1 га. Проект планировки района учитывает современные архитектурные и инфраструктурные требования. Улично-дорожная сеть и тротуары занимают около 34,4 % общей площади. Район Ван Фу представляет собой типичный городской ландшафт с развитой уличной сетью и разнообразной застройкой, подразделяемой на четыре основные зоны: 1) высотные офисные здания (36–40 этажей); 2) блоки сблокированных вилл; 3) две зоны плотной малоэтажной жилой застройки (4–5 этажей); 4) участки с зелёными насаждениями и водоёмами. На данный момент в районе всё ещё имеются открытые пространства, которые могут быть переустроены в соответствии с будущими планами развития. Для моделирования теплового режима был использован микроклиматический симулятор Envi-met, позволяющий количественно оценить интенсивность теплового излучения и эффективность различных стратегий смягчения. Полученные результаты служат основой для обоснованного проектирования комфортной и устойчивой городской среды.



2. Процедура и методы

ENVI-met представляет собой трёхмерную численную модель, предназначенную для анализа микроклиматических тепловых взаимодействий в условиях городской среды. Входные данные модели включают параметры зданий, растительности, почвы, дорожных покрытий и иных элементов землепользования на исследуемой территории [13]. На основе фундаментальных законов механики жидкости, термодинамики и атмосферной физики, модель ENVI-met позволяет рассчитывать трёхмерные поля ветра, турбулентности, температуры и влажности воздуха, радиационных потоков, а также распространения загрязняющих веществ.

Для оценки эффективности различных стратегий по снижению интенсивности эффекта городского теплового острова были разработаны четыре сценария моделирования (см. Табл. 1). В соответствии с рекомендациями по использованию модели ENVI-met минимальная продолжительность симуляции должна составлять не менее 6 часов. В рамках данного исследования была выбрана суточная продолжительность моделирования (24 часа), что соответствует практике, принятой в ряде предыдущих научных работ. Начальные параметры и условия моделирования для исследуемого участка приведены в таблице 2.

Таблица 1.

Сценарии моделирования для городской территории Ван Фу

Сценарий	Характеристика
Сценарий 1	Базовое состояние территории (текущее положение)
Сценарий 2	Увеличение площади озеленения на 30 % по сравнению с базовым сценарием
Сценарий 3	Увеличение озеленения на 30 %, а также проведена реконструкция зеленых зданий (покрытие – около 70 % общей площади зданий).
Сценарий 4	Увеличение площади озеленения на 50 %

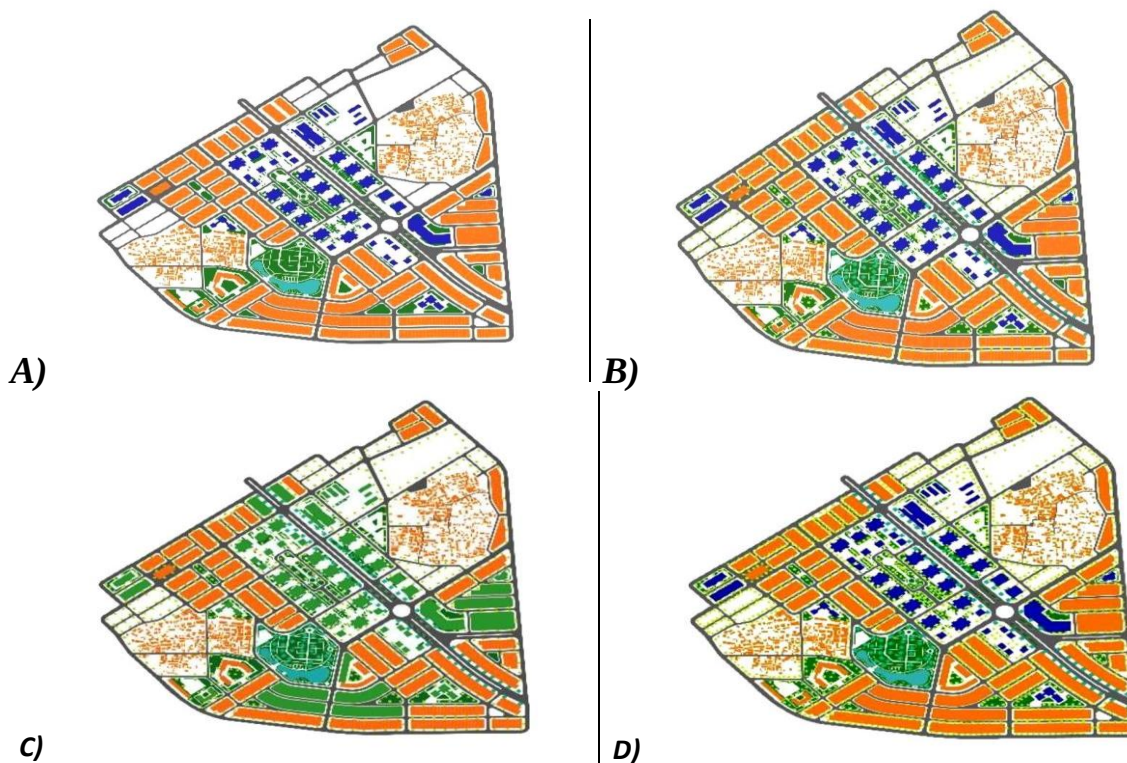


Рисунок 1. Сценарии моделирования городской территории Ван Фу: А) Сценарий 1; В) Сценарий 2; С) Сценарий 3 и D) Сценарий 4.



Таблица 2.

Входные данные для численного моделирования

Параметр	Значение
Пространственные размеры модели (м)	1440 × 1488 × 240
Количество ячеек по осям (x, y, z)	181×187×31
Размер ячейки (м) по осям dx, dy, dz	8×8×8
Географическое положение (широта, долгота)	20,96 ° с.ш.; 105,76 ° в.д.
Метод формирования вертикальной сетки	Равномерно
Время начала моделирования	00:00, продолжительность – 24 ч
Скорость ветра на высоте 10 м	2,26
Направление ветра	Юго-восток
Начальная температура воздуха	33,17 °C = 306,17°K
Минимальная температура воздуха в течение дня	31,25°С
Максимальная температура воздуха в течение дня	40,4°С
Минимальная влажность воздуха (г/кг)	17,97 (в 17:00)
Максимальная влажность воздуха (г/кг)	22,5 (в 02:00)

Оценка теплового комфорта проводилась с использованием индекса физиологически эквивалентной температуры (ФЭТ), который учитывает как метеорологические параметры (температура воздуха, влажность, скорость ветра, средняя радиационная температура – $T_{\text{мрт}}$), так и физиологические характеристики человека (пол, масса тела, рост, уровень активности и тепловое сопротивление одежды). Индекс ФЭТ разработан на основе Мюнхенской модели энергетического баланса человека и отражает тепловое состояние организма в реальных уличных условиях.

Значение ФЭТ позволяет проводить сопоставление сложных микроклиматических условий с типичными условиями внутри помещения (в отсутствие прямой солнечной радиации и ветра). Например, в жаркие летние дни при интенсивном солнечном излучении ФЭТ может превышать фактическую температуру воздуха на 20 К, тогда как зимой при сильном ветре ФЭТ может быть ниже температуры воздуха на 15 К.

3. Результаты

Результаты численного моделирования показали, что суточная динамика температуры воздуха в пределах исследуемой территории во всех сценариях демонстрирует схожий характер изменений, соответствующий наблюдаемым метеорологическим данным. Минимальные значения температуры фиксируются в утренние часы (около 4–5 часов утра по местному времени), в то время как максимальные температуры достигаются в период с 16 до 17 часов, после чего температура постепенно снижается.

Для более глубокого понимания колебаний температуры, а также для сопоставления результатов между различными функциональными зонами при реализации различных стратегий смягчения ГТО были выделены пять контрольных точек. Пространственное распределение этих точек представлено на рисунке 2, где:

- Точки 1 и 4 представляют зону плотной малоэтажной жилой застройки;
- Точка 2 – парковая зона и зелёные насаждения;
- Точка 3 – высотные жилые здания;



Точка 5 – зона таунхаусов и коттеджей.

Такая дифференциация позволяет оценить микроклиматические различия между урбанизированными и озеленёнными участками, а также эффективность мероприятий по снижению температурных пиков и повышению термического комфорта.



Рисунок 2. Суточная динамика температуры воздуха в различных сценариях

Согласно результатам моделирования, можно отметить, что в зонах высотной и сблокированной застройки (таунхаусы), где сохраняются возможности для перепланировки территории, внедрения дополнительных зелёных насаждений и интеграции зелёной инфраструктуры (зелёные крыши, озеленение фасадов), наблюдается значительное снижение температуры воздуха. Напротив, в районах с плотной малоэтажной застройкой, из-за ограниченного пространства и трудностей с изменением функционального использования участков, температура воздуха в пиковые часы (с 11:00 до 18:00) мало отличается между различными сценариями.



Рисунок 3 иллюстрирует пространственное распределение значений ФЭТ в 12:00 по местному времени для всех рассмотренных сценариев. В жаркие летние дни во Вьетнаме наблюдаются экстремальные тепловые стрессы, особенно в незатенённых открытых пространствах. В базовом сценарии (Сценарий 1) почти вся территория урбанизированной зоны Ванфу подвергается прямому воздействию солнечного излучения. При этом минимальные значения ФЭТ составляют 44,25 °С, а максимальные достигают 54,90 °С.

Введение дополнительных озеленённых пространств и источников тени (Сценарии 2 и 4), а также комбинированные меры с элементами зелёной инфраструктуры (Сценарий 3), значительно снижают значения ФЭТ:

Сценарий 2: ФЭТ в диапазоне от 32,51 до 54,86 °С;

Сценарий 3: ФЭТ от 32,43 до 54,88 °С; Сценарий 4: ФЭТ от 32,45 до 54,84 °С.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенные меры смягчения демонстрируют высокую эффективность, особенно в центральных уличных пространствах, у подножия высотных зданий и в зонах таунхаусов, где значения ФЭТ снижаются от категории «очень жарко» (>42 °С) до категорий «тёпло» и «жарко» (34–42 °С), что соответствует условиям улучшенного теплового комфорта.

На основании результатов моделирования самого жаркого дня можно сделать вывод, что в условиях экстремального теплового воздействия в городе Ханой ощущаемая человеком температура значительно снижается в зонах с развитой зелёной растительностью и присутствием затенённых пространств. Исследование также показало, что при отсутствии стратегий по смягчению последствий тепловой нагрузки, тепловой стресс будет возникать часто и иметь выраженный характер.

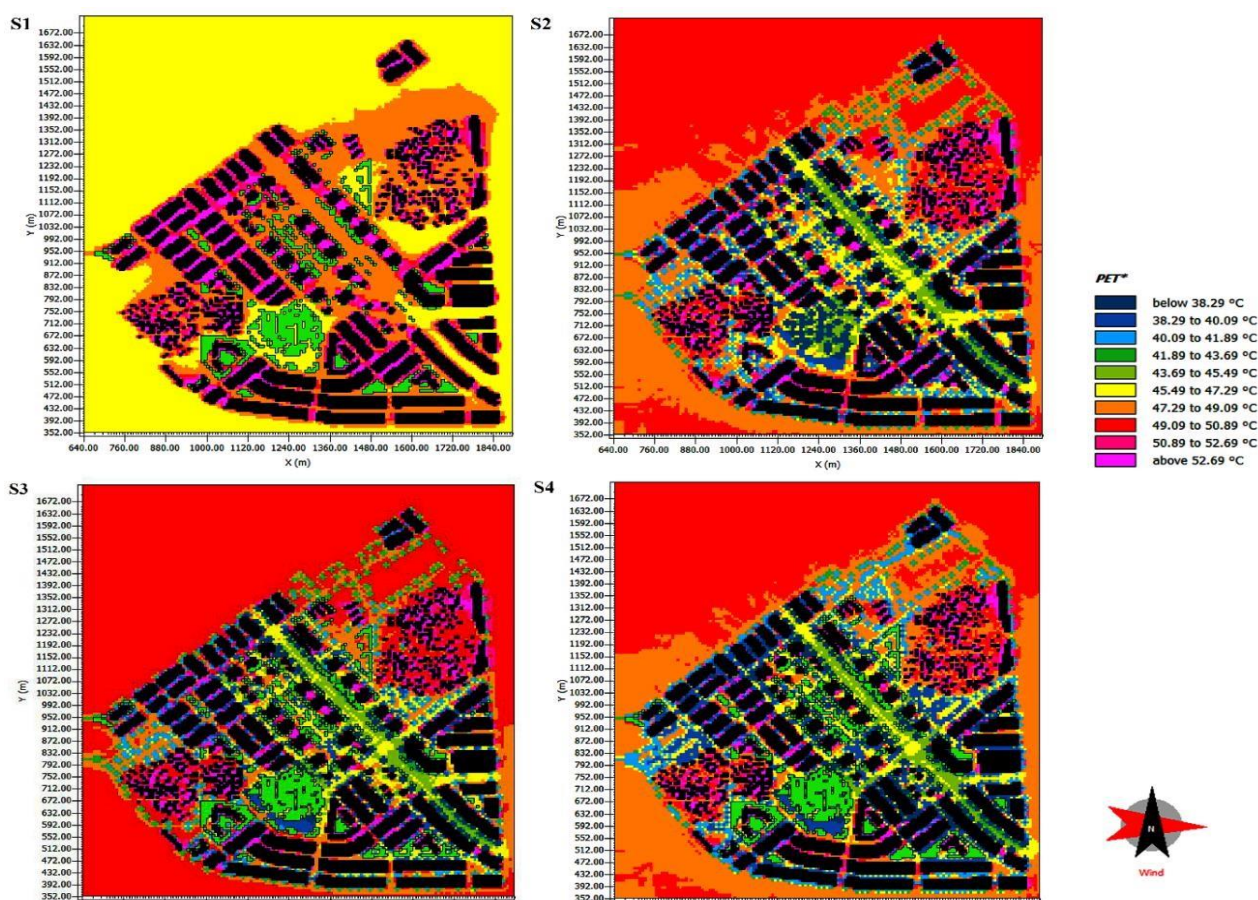


Рисунок 3. Пространственная вариация ФЭТ в 15:00 для всех сценариев



Увеличение площади затенённых участков за счёт посадки деревьев, создания зелёных насаждений и внедрения элементов зелёной инфраструктуры может рассматриваться как ключевая стратегия устойчивого городского планирования, направленная на смягчение эффекта ГТО. Полученные результаты показывают, что озеленение оказывает существенное влияние как на формирование локального микроклимата, так и на повышение уровня теплового комфорта для пешеходов и пользователей городской среды.

4. Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало существенное влияние зелёных насаждений на снижение проявлений эффекта городского теплового острова, посредством применения микроклиматической модели ENVI-met и построения различных сценариев с различным уровнем озеленения в пределах исследуемой территории.

Полученные результаты показывают, что увеличение числа деревьев в сочетании с внедрением зелёной инфраструктуры способствует снижению температуры воздуха в наиболее жаркое время суток на 1,5–4,36 °C, а также заметному улучшению теплового комфорта населения, особенно в открытых общественных пространствах.

Исследование также подтверждает, что экологическое разнообразие способствует формированию более вариативных условий микроклимата. Развитие озеленённых общественных пространств и расширение затенённых участков представляют собой эффективные стратегические меры адаптации городской среды к условиям жаркого и влажного тропического климата. Это создаёт благоприятные условия для жизнедеятельности населения, снижает воздействие экстремальной жары и способствует укреплению физического и психоэмоционального здоровья.

Список литературы:

1. T. R. Oke, "City size and the urban heat island," *Atmospheric Environment* (1967), vol. 7, no. 8, pp. 769-779, 1973/08/01/ 1973, doi: [https://doi.org/10.1016/00046981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/00046981(73)90140-6).
2. Peter Boehme, Matthias Berger, and T. Massier, "Estimating the building based energy consumption as an anthropogenic contribution to urban heat islands," *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, pp. 373-384, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.05.006>.
3. Xian-Xiang Li and Leslie K. Norford, "Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore," *Urban Climate*, vol. 16, pp. 59-74, 2016/06/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.12.002>.
4. Oke T.R., "The energetic basis of the urban heat island," *Quarterly journal of the royal meteorological society*, vol. 108, no. 455, pp. 1-24, 1982.
5. В. Алексашина and Л. М. Туан, "Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса," *Проблемы региональной экологии*, no. 5, pp. 36-40, 2018.
6. Kruger E.L., Minella F.O., and R. F., "Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil," *Building and Environment*, vol. 46, no. 3, pp. 621-634, 2011.
7. L. M. Tuan, "The influence of city planning on the emergence of heat islands in megacities with a tropical climate (Hanoi)," *Vestnik MGSU*, vol. 2, pp. pp. 148–157, 2019, doi: [doi: 10.22227/1997-0935.2019.2.148-157](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.2.148-157).
8. Dao Ngoc Hung, Hoang Luu Thu Thuy, Dang Bich Thao, and T. T. Thao, "Assessment of heat stress change in Hanoi city," *HNUE JOURNAL OF SCIENCE*, vol. Volume 67, no. 1, pp. 115-122, 2022.
9. A. R. Trihamdani, T. Kubota, H. S. Lee, K. Sumida, and T. T. T. Phuong, "Impacts of Land use Changes on Urban Heat Islands in Hanoi, Vietnam: Scenario Analysis," *Procedia Engineering*, vol. 198, pp. 525-529, 2017/01/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.107>.



10. Y. Tominaga, Y. Sato, and S. Sadohara, "CFD simulations of the effect of evaporative cooling from water bodies in a micro-scale urban environment: Validation and application studies," *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, pp. 259-270, 2015/12/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.03.011>.
11. E. P. D. Barrio, "Analysis of the green roofs cooling potential in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 27, no. 2, pp. 179-193, 1998/04/01/ 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00029-7).
12. EPA, "Reducing urban heat islands: compendium of strategies," *Heat Island Reduction Activities*, pp. 1-23, 2008.
13. W. Y. Berardi Umberto, "The effect of a denser city over the urban microclimate: The case of Toronto," *Sustainability*, vol. 8, no. 8, p. 822, 2016.

