

На правах рукописи



ЛЕ МИНЬ ТУАН

**МОДЕЛИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗАСТРОЙКИ
(НА ПРИМЕРЕ Г. ХАНОЙ - ВЬЕТНАМ)**

2.1.10 Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Научный руководитель:

Шукуров Илхомжон Садриевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Оленьков Валентин Данилович
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра «Градостроительство, инженерные сети и системы», профессор.

Попова Ирина Владимировна

кандидат географических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», кафедра жилищно-коммунального хозяйства, доцент.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук»

Защита состоится 23 декабря 2021 г. в 15:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» www.mgsu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,



Слесарев Михаил Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Быстрые темпы индустриализации, большая численность населения, высокая интенсивность движения транспортных средств и проблема благоустройства городской среды Ханоя приводят к серьёзному изменению теплового режима и к загрязнению окружающей среды города. До сих пор существует недостаточная изученность факторов формирования городских островов тепла и их влияния на окружающую среду Ханоя, отсутствуют научные основы алгоритма построения имитационных моделей и расчёта городского острова тепла в городских районах.

Во всем мире актуальной проблемой по-прежнему является поддержание нормативной комфортной температуры на урбанизированных территориях, тем более в мегаполисах. Актуальность темы диссертации определяется наличием проблемы экологической безопасности температуры деятельной поверхности города Ханоя и необходимостью обеспечения нормативной комфортной температуры.

Существующие методы измерения и мониторинга температуры воздуха с помощью метеорологических станций не обеспечивают комплексного решения экологических проблем Ханоя, не позволяют прогнозировать интенсивность городского острова тепла (ГОТ) и тепловой комфорт при изменении пропорции озеленённых пространств. Поэтому моделирование городского острова тепла в мегаполисах является актуальной научно-практической проблемой для столицы Вьетнама и других мегаполисов.

Степень разработанности темы исследования. По проблеме городского острова тепла известны научные труды следующих авторов: Балдиной Е. А., Дудоровой Н. В., Джедида М., Нахаевой М. И., Поповой И.В., Оленьков В. Д., и других. В исследованиях данных авторов подчёркивается необходимость имитационного моделирования ГОТ для постоянного мониторинга теплового режима города.

Существующие модели фокусируются исключительно на определении городского острова тепла на основании данных самостоятельного обследования или метеорологических станций. Однако, существующие методы не позволяют спрогнозировать изменения эффекта ГОТ на основании изменения данных о соотношении площади зелёных насаждений и водных поверхностей и не позволяют определить влияние эффекта городского острова тепла на тепловой комфорт городских жителей.

Цель работы - прогнозирование теплового режима города моделированием и обеспечение тепловой безопасности застройки.

Объектом исследования является температурный режим городской среды и деятельной поверхности.

Предметом исследования являются закономерности, позволяющие разработать основы моделирования ГОТ, и метод моделирования ГОТ в мегаполисах (на примере г. Ханой, Вьетнам).

Задачи исследования:

1. Изучить методы моделирования теплового режима города и модели обеспечения тепловой безопасности застройки в научных трудах.
2. Составить карты изменения температуры поверхности города Ханоя на основе базы данных спутниковых изображений методом анализа изображений с помощью дистанционного зондирования.
3. Определить взаимосвязь между средозащитными свойствами зелёных насаждений и температурой поверхности города.
4. Разработать алгоритм расчёта интенсивности ГОТ на основе соотношения высоты и расстояния между зданиями в городе Ханое.

5. Разработать модели городского острова тепла с помощью методов вычислительной гидродинамики и определить влияние ГОТ на тепловой комфорт человека.

6. Разработать рекомендации по обеспечению тепловой безопасности застройки и снижению температуры поверхности города путём моделирования ГОТ.

Научная гипотеза: повышение экологической безопасности застройки в городе может быть получено научным обоснованием организации системы озеленения и системы обводнения в городских районах, а также моделированием ГОТ и расчётным обоснованием микроклиматических параметров городской среды.

Научная новизна работы:

1. Разработаны научные основы расчета интенсивности ГОТ для тропического климата, которые базируются на численном моделировании воздушной городской среды с применением методов вычислительной гидродинамики.

2. Впервые определено расположение ГОТ в Ханое в зависимости от морфологии застройки и параметров городского микроклимата.

3. Построена модель расчёта соотношения площади зелёных насаждений и водной поверхности, учитывающая аэродинамические и тепловые эффекты, возникающие в плотной городской застройке с целью ослабления негативного воздействия ГОТ на жителей города.

4. Научно обоснованы средозащитные факторы транспирационного охлаждения – система озеленения, и система водных объектов на городских территориях для обеспечения тепловой безопасности застройки.

5. Получены новые результаты экспериментальных и численных исследований температурно-влажностного режима застройки для условий тропического климата.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в: установлении закономерностей формирования ГОТ; научно-обоснованном применении имитационного моделирования для обеспечения тепловой безопасности застройки; разработке методов и алгоритма уменьшения негативного воздействия городских островов тепла на жителей города.

Практическая значимость и реализация результатов работы заключаются:

– в разработке инженерно-градостроительных основ проектирования и применении имитационной модели, показывающей экологическое состояние выбранной территории с указанием ГОТ, что позволит оптимизировать комплекс мероприятий по обеспечению тепловой безопасности застройки;

– в определении текущего состояния ГОТ в Ханое и прогнозировании изменения экологических характеристик застройки;

– в разработке и обосновании технической и организационной структур экологического мониторинга за тепловым режимом в Ханое;

– в разработке рекомендаций, направленные на снижение влияния ГОТ на окружающую среду (путём увеличения озеленённых территорий для рекреации, уменьшения затрат на кондиционирование воздуха).

Методология и методы исследования:

– анализ и обобщение научно-исследовательских работ по теме исследования, а также нормативно-технической документации и государственных стандартов Социалистической Республики Вьетнам;

– системный анализ (в т.ч. и анализ генерального плана развития города Ханоя), комплексный подход к решению научно-методологических и теоретических задач;

– методы математической статистики, методы анализа изображений с помощью дистанционного зондирования и методы вычислительной гидродинамики CFD, использованные при расчётах в программе ENVI-met. Для проверки и корректировки результатов моделирования

сравнивались расчётные значения, полученные в программе ENVI-met, с фактическими значениями микроклимата, предоставленными местной метеорологической станцией в городе Ханое.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическая модель определения и расчёта интенсивности ГОТ на территории города Ханоя, полученная на основе данных метеостанций и дистанционного зондирования территории;
2. Методика определения границ ГОТ в условиях плотной городской застройки и составления климатических карт температуры деятельной поверхности;
3. Модель прогнозирования ГОТ, учитывающая изменение температурно-влажностного режима застройки;
4. Рекомендации к организации системы зелёных насаждений, обеспечивающей тепловую безопасность застройки в городе Ханое;
5. Рекомендации по градостроительному проектированию, направленные на снижение влияния ГОТ на окружающую среду, для условий жаркого и влажного климата.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования обусловлена хорошей сходимостью расчётных значений в сравнении с фактическими данными, зафиксированными метеорологическими станциями города Ханоя.

Апробация работы диссертации заключалась в представлении автором основных положений и материалов исследования на международных научно-практических конференциях:

- Международная научная конференция «Актуальные проблемы архитектуры, гражданской технологии и экологической экономики» (ТРАСЕЕ-2018), г. Москва, 3 - 5 декабря 2018 г.;
- Международная научная конференция «Устойчивое развитие территорий», г. Москва, 16 мая 2018 г.; 26-27 мая 2021 г.;
- Международная научная конференция «Construction – The formation of living environment» (FORM-2019), г. Ташкент, 18-21 апреля 2019 г.;
- Международная научная конференция «XXVIII Russian – Polish – Slovak Seminar theoretical foundation of civil engineering», г. Жилина, 09 – 13 сентября 2019 г.;
- Международная научная конференция «International scientific conference on energy, environmental and construction engineering» (EECE-2019), г. Санкт Петербург, 19 – 20 ноября 2019 г.;
- Международная научная конференция «Construction the formation of living environment» (FORM-2020), г. Ханой, 22 – 25 апреля 2020 г.

Личный вклад автора заключается в разработке теоретических положений закономерностей формирования ГОТ для условий тропического климата. Автором разработан метод оценки теплового режима в городе Ханое; выполнено моделирование для прогнозирования температуры городской поверхности, учитывающее данные окружающих экосистем; даны рекомендации по проектированию городской застройки, направленные на снижение влияния ГОТ на окружающую среду путём организации системы озеленённых территорий.

Публикации по результатам исследований. Материалы диссертации в достаточно полной степени изложены в 15 научных публикациях, из которых 8 работ опубликовано в научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ, и 5 работ опубликовано в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 170 наименований, в том числе 88 иностранных литературных источников. Работа изложена на 158 страницах основного текста, содержит 80 рисунков, 30 таблиц и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертационной работы проанализированы труды отечественных и зарубежных авторов, показывающие особенности городской аэрации в условиях слабого ветра, а также причины формирования эффекта ГОТ. Дается понятие термина «остров тепла» и «городской остров тепла». Впервые предлагается подразделять ГОТ на 2 типа: «надземный городской остров тепла» и «атмосферный городской остров тепла». Установлено негативное влияние ГОТ на людей и окружающую среду. Изучено влияние планировки города с учётом норм Вьетнама на формирование микроклимата и ГОТ. Доказано что, разработка новых эффективных современных методов моделирования ГОТ для обеспечения экологической безопасности является чрезвычайно актуальной научной задачей.

Во второй главе дано представление об определении температуры поверхности города при использовании разных методов с учётом данных, полученных городскими метеостанциями, и спутниковых данных.

Произведён анализ спутниковых снимков температуры поверхности земли исследуемой территории Ханоя, полученных Геологической службой США (USGS) при помощи спутников Ландсат, для 1999, 2009 и 2016 годов (таблица 1).

Таблица 1 – Данные спутниковых снимков Ландсат, использованные в исследовании

Сенсор	Идентификатор сцены	Дата приобретения	Сезон
Ландсат-5 TM	LT51270451999266BKT00	23.09.1999	Осень
Ландсат-5 TM	LT51270452009309BJC00	05.11.2009	Осень
Ландсат-8 OLI/TIRS	LC81270452016281LGN01	07.10.2016	Осень

NDVI индекс является мерой разницы в отражательной способности между красной полосой (RED) и полосой ближнего инфракрасного диапазона (*NIR*) изображений. *NDVI* находится в диапазоне от -1,0 до +1,0, где положительные значения указывают на участки с растительностью, а отрицательные значения - на участки без растительности.

NDVI выражается следующим уравнением (1):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

где *RED* - коэффициент отражения в красной спектральной зоне, соответствует полосе 3 Ландсат TM (0,63 ... 0,69 м) и полосе 4 Ландсат OLI (0,64 ... 0,67 м);

NIR - коэффициент отражения в ближней инфракрасной зоне соответствует полосе 4 Ландсат TM (0,76 ... 0,90 м) и полосе 5 Ландсат OLI (0,85 ... 0,88 м).

NDBI - эффективный метод картирования городских застроенных территорий с общей точностью 92%. *NDBI* рассчитывается на основе разницы между *NIR* и *MIR* (средний инфракрасный диапазон) изображений. Этот индекс определяется уравнением (2):

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \quad (2)$$

где *MIR* соответствует полосе 5 Ландсат TM (1,55 ... 1,75 м) и полосе 6 Ландсат OLI (1,57...1,65 м).

Для получения температуры поверхности Земли по данным Ландсат в диссертационном исследовании использован алгоритм на основе входных сигналов RED, NIR и TIR (тепловой инфракрасный диапазон). Растительность $p(v)$ вычисляется по значениям *NDVI* по формуле (3):

$$p(v) = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad (3)$$

где $NDVI_{\min}$ (минимальный *NDVI*) и $NDVI_{\max}$ (максимальный *NDVI*) обозначают динамический диапазон значения *NDVI*.

Для получения данных по температуре поверхности Земли требуется определить коэффициент излучения поверхности земли ε , который находится из следующего уравнения (4):

$$\varepsilon = mP(v) + n \quad (4)$$

$$m = (\varepsilon_v - \varepsilon_s) - (1 - \varepsilon_s)F\varepsilon_v; n = \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s)F\varepsilon_v$$

где ε_s и ε_v - коэффициент излучения почвы и коэффициент излучения растительности, соответственно;

m - значения излучательной способности почвы;

n - значения излучательной способности растительности.

Значения $m = 0,004$ и $n = 0,986$.

После преобразования цифровых числовых значений в спектральную яркость на датчике (L_λ), температура поверхности земли (LST) может быть получена с помощью коэффициента излучения поверхности Земли (ε):

$$LST = \frac{K2}{\ln\left(\frac{\varepsilon * K1}{L_\lambda}\right) + 1} - 273,15 \quad (5)$$

где LST - температура поверхности земли в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$);

$K1$ и $K2$ - термические константы TIR , которые можно идентифицировать в файле метаданных, связанном со спутниковым изображением;

L_λ - это спектральная величина излучения;

ε - коэффициент излучения, рассчитанный по уравнению (4).

Интенсивность ГОТ определяется как разница между температурой поверхности Земли в городе и в сельской местности с использованием следующих уравнений:

а) Уравнение, указывающее на наличие ГОТ:

$$LST > \mu + 0,5 * \delta \quad (6)$$

б) Уравнение, указывающее на отсутствие ГОТ:

$$0 < LST \leq \mu + 0,5 * \delta \quad (7)$$

где μ и δ - среднее и стандартное отклонение температуры поверхности земли в исследуемой области, соответственно.

Для повышения точности определения зоны теплового острова используется комбинированный метод с использованием карты земельного покрова и карты температуры поверхности земли.

Для оценки влияния ГОТ на качество городской жизни существует ряд индексов теплового комфорта. В этом исследовании был выбран индекс дисперсии теплового поля в городах ($UTFVI$), который оценивается уравнением (8):

$$UTFVI = \frac{T_s - T_m}{T_s} \quad (8)$$

где T_s - температура поверхности земли;

T_m - средняя температура поверхности земли в исследуемой области.

Значения индекса дисперсии городского теплового поля были разделены на шесть категорий, каждая из которых имела соответствующие интерпретированные экологические оценки. В таблице 2 показаны пороговые значения индекса дисперсии теплового поля в городах.

Таблица 2 – Пороговые значения уровней индекса дисперсии городского теплового поля (*UTFVI*)

<i>UTFVI</i>	Городской остров тепла	Индекс экологической оценки
< 0,000	нет	отлично
0,000 ... 0,005	слабый	хорошо
0,005 ... 0,010	средний	удовлетворительно
0,010 ... 0,015	сильный	плохо
0,015 ... 0,020	сильнее	хуже
> 0,020	самый сильный	наихудший

Эффективность охлаждения определяется как кривая между областью (переменной) и максимальной интенсивностью охлаждения каждой озеленённой зоны (рис. 1). Если размер озеленённой зоны увеличивается с П1 до П2, изменение температуры поверхности почвы ($T_2 \dots T_1$) будет значительным. Однако, если размер зелёных насаждений увеличивается с П3 до П4, температура поверхности повышается незначительно ($T_4 \dots T_3$), хотя изменение площади остается тем же. В определенный момент значение охлаждающего эффекта станет стабильным в заданном диапазоне. Поэтому для рационального озеленения территорий, которое максимально эффективно способствует охлаждению воздуха в тёплый период года, предлагается при определении площади озеленения городской территории учитывать показатель порогового значения эффективности (ПЗЭ).

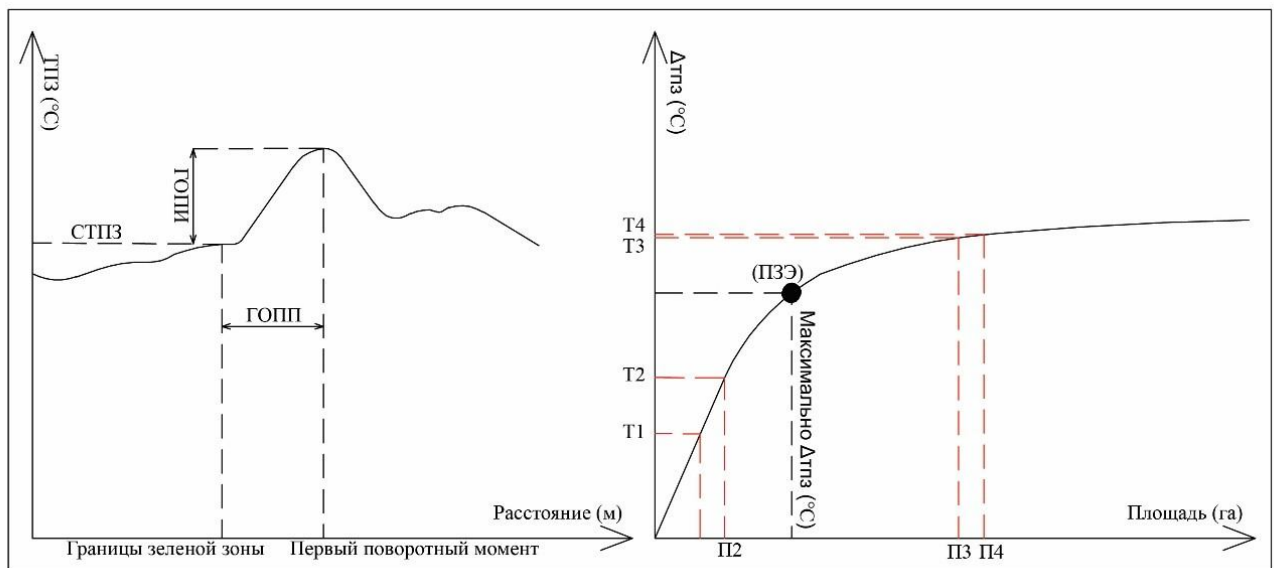


Рисунок 1. Определение эффективности охлаждения

- где $\Delta T_{пз}$ - разница температуры поверхности земли, ($^{\circ}C$);
 ГОП - городской остров прохлады;
 СТПЗ - средняя температура поверхности земли;
 ТПЗ - температура поверхности земли, ($^{\circ}C$);
 ГОПП - городской остров протяжённости прохлады;
 ГОПИ - городской остров интенсивности прохлады;
 ПЗЭ - пороговое значение эффективности.

Одной из причин формирования ГОТ является повышение температуры искусственных поверхностей в городах. Как правило, большая часть городских поверхностей представлена асфальтобетонными дорожными покрытиями, температура которых значительно повышается в тёплое время года, что приводит к появлению эффекта ГОТ.

В диссертационном исследовании был применён программно-вычислительный комплекс ENVI-met 4.4.5, в котором было осуществлено моделирование городской территории Ханоя для анализа формирования ГОТ. Модель запроектирована в трехмерном пространстве (рис.2), где расположены здания и дорожные покрытия с различными типами поверхностей, элементы озеленения и водные объекты. Расчётная область включает в себя сетку с ячейками разрешением от 0,5 до 10 метров, причём, чем меньше размер ячейки сетки, тем более точное решение будет получено. Так, например, область размером 100x100 метров может быть представлена сеткой 100x100 ячеек размером 1x1 метр каждая, или она может быть представлена сеткой 20x20 ячеек размером 5x5 метров каждая, в зависимости от размера тестовой области и желаемого разрешения.

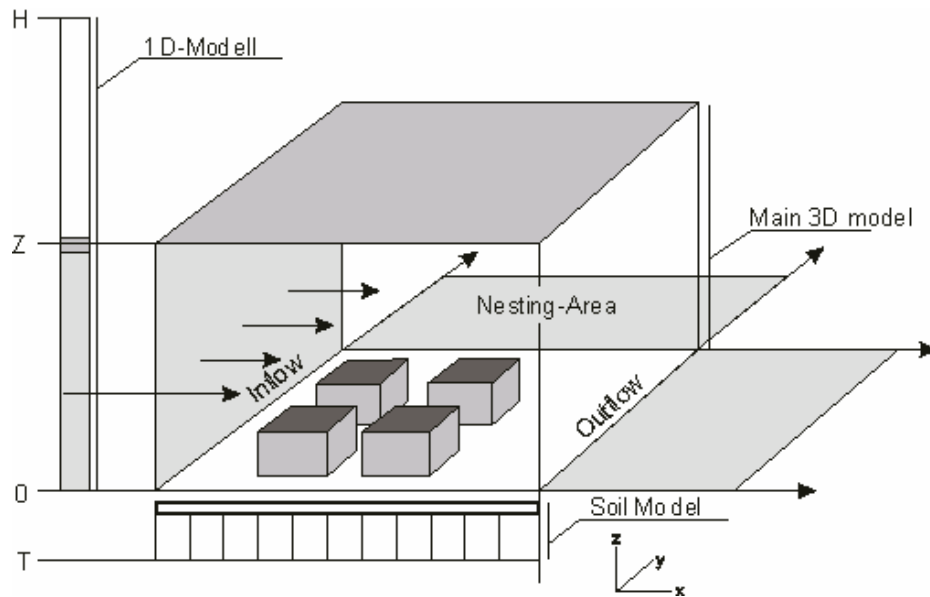


Рисунок 2. Базовая схема CFD - моделирования в ENVI-met

В третьей главе представлены результаты по определению ГОТ в городе Ханое и карты Индекса дисперсии городского теплового поля (UTFVI). Приведены данные дешифрирования температуры подстилающей поверхности, полученные при помощи спутниковых изображений со спутников Ландсат-5 TM и Ландсат-8 OLI.

Карты по распределению температуры поверхности Земли (LST) в Ханое в трех временных точках (1999, 2009 и 2016 гг.), полученные на основе тепловизионных изображений Ландсат (табл. 3), сравнивались с данными по температуре воздуха, полученными с метеорологических станций Ханоя (табл.4).

Разница между температурой воздуха и температурой земной поверхности находится в диапазоне от 0,3 °C до 3,34 °C. Разница выше в городских районах, тогда как в сельской местности температура воздуха ближе к температуре поверхности земли.

Таблица 3 – Сравнение температуры земной поверхности Ханоя в 1999, 2009 и 2016 годах

Температура поверхности земли (°C)	1999	2009	2016
	Процент (%)	Процент (%)	Процент (%)
< 22	61,4	4,2	5,9
22 ... 24	25,33	32,7	46,3
24 ... 26	12,8	46,7	42,5
26 ... 28	0,45	14,2	5,2
> 28	0,02	2,2	0,1

Таблица 4 – Сравнение данных по температуре земной поверхности (LST) с данными по температуре воздуха, полученными с метеорологических станций Ханоя

Проверка температуры поверхности Земли									
Метеостанция	23.09.1999			05.11.2009			07.10.2016		
	Значение LST (°C)	Температура воздуха (AT), (°C)	Разница LST-AT (°C)	Значение LST (°C)	Температура воздуха (AT), (°C)	Разница LST-AT (°C)	Значение LST (°C)	Температура воздуха (AT), (°C)	Разница LST-AT (°C)
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
Сон 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

На рисунке 3 выявлены зоны ГОТ в Ханое в 1999, 2009 и 2016 гг. Эффект ГОТ был обнаружен в центральной части города. В целом, с 1999 до 2016 гг. были обнаружены более высокие значения температуры на поверхности земли в центральной части Ханоя ($> 24^{\circ}\text{C}$). В 1999 и 2009 годах районы с высокой температурой поверхности земли были расположены в центральной части Ханоя. Со временем территория вокруг центра города расширилась, причём в 2016 г. она увеличилась в направлении к северо-востоку, как показано на картах землепользования и изменения температуры поверхности земли Ханоя. В 1999 г. площадь ГОТ составляла только 10,98%, а через 17 лет она увеличилась на 20,85%, достигнув 31,83% в 2016 г. Очевидно, что городской остров тепла в Ханое со временем расширился, и эти изменения соответствуют тенденции роста города в этот исследуемый период. Этот результат показывает тесную взаимосвязь между размещением ГОТ и развитием землепользования.

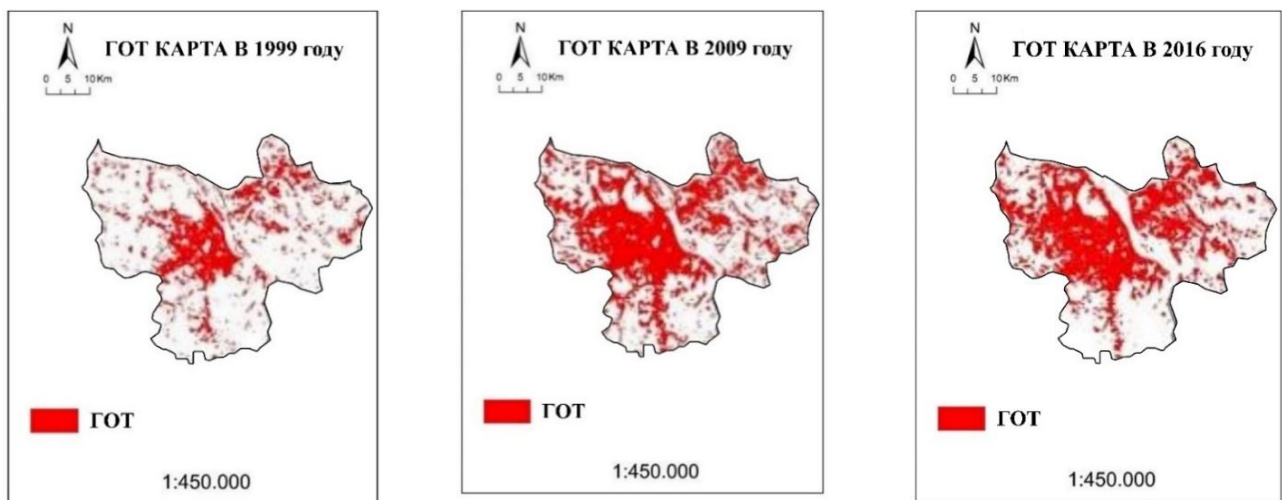


Рисунок 3. Распределение городских тепловых островов в Ханое в 1999, 2009 и 2016 годах

На рисунке 4 показано распространение влияния ГОТ, который оценивается индексом дисперсии городского теплового поля (англ. - Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI)).

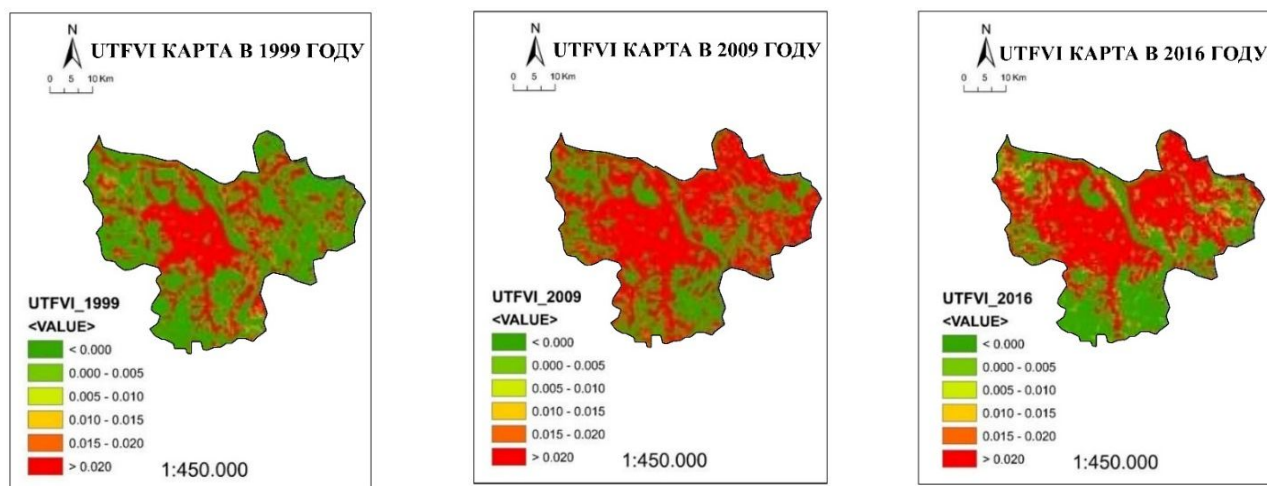


Рисунок 4. Карты UTFVI для Ханоя в 1999, 2009 и 2016 годах

Различные воздействия ГОТ были определены на основе степени теплового комфорта, связанного с существованием городского острова тепла. Город имеет две степени теплового комфорта: районы с наихудшим тепловым состоянием ($UTFVI > 0,02$) и районы с отличным тепловым состоянием ($UTFVI < 0$). В целом, большая часть Ханоя имеет хорошие условия для жизни. Территории с $UTFVI < 0$, в основном, размещены в сельских районах и в районах, расположенных на лесных и сельскохозяйственных угодьях. Однако, районы, подверженные плохим и наихудшим условиям ($UTFVI > 0,01$), были относительно небольшими и находились на границах жилой зоны. Что ещё более важно, районами с наихудшим тепловым состоянием были центр города и участки с обнажённой почвой. Важно отметить, что в 2016 году по спутниковым данным и данным метеостанций на территории Ханоя в центральной и северо-восточной части города были выявлены изменения типа земельного покрова, высокие температуры поверхности земли, вследствие этого и выраженный эффект ГОТ. Границы территорий с эффектом ГОТ совпадают с районами Ханоя, находящимися в наихудших тепловых условиях ($UTFVI > 0,02$), что выявляет области на территории города, в которых наиболее выражена проблема теплового загрязнения, и подтверждает важность принятия мер по смягчению эффекта ГОТ именно на данных территориях.

Выполнены соответствующие вычисления по интенсивности снижения температуры (макс.) и по определению расстояния снижения температуры (макс.) для теплого и холодного периодов на территории исследования. На рисунке 5 показана зависимость между тепловой интенсивностью и размерностью зеленого пространства. Интенсивность снижения тепла пропорциональна увеличению размера зеленого пространства. Нелинейная модель с независимым измерением может объяснить изменение средней интенсивности снижения температуры летом на 71,93% и изменение средней интенсивности снижения температуры зимой на 36,86%.

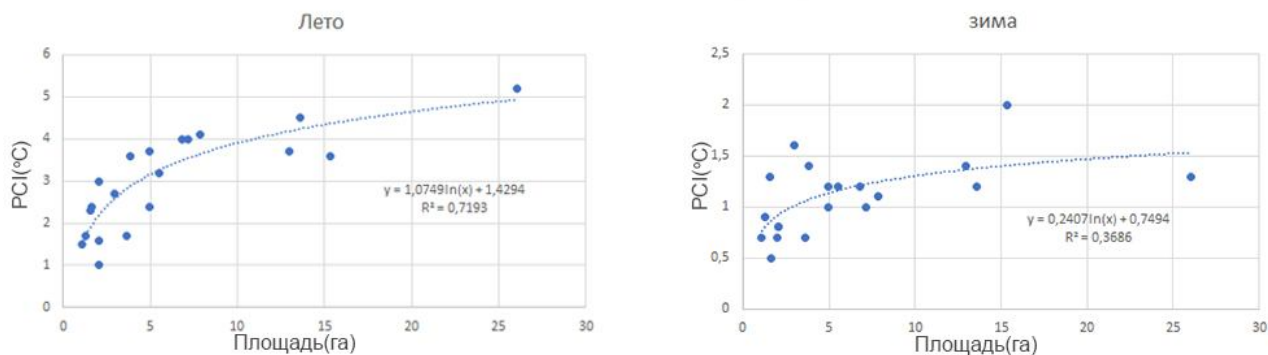


Рисунок 5. График взаимосвязи между средней интенсивностью снижения температуры, °С, и средней площадью снижения температуры, га

На рисунке 6 показано, что увеличение площади зеленого пространства способствует увеличению диапазона охлаждения городских районов.

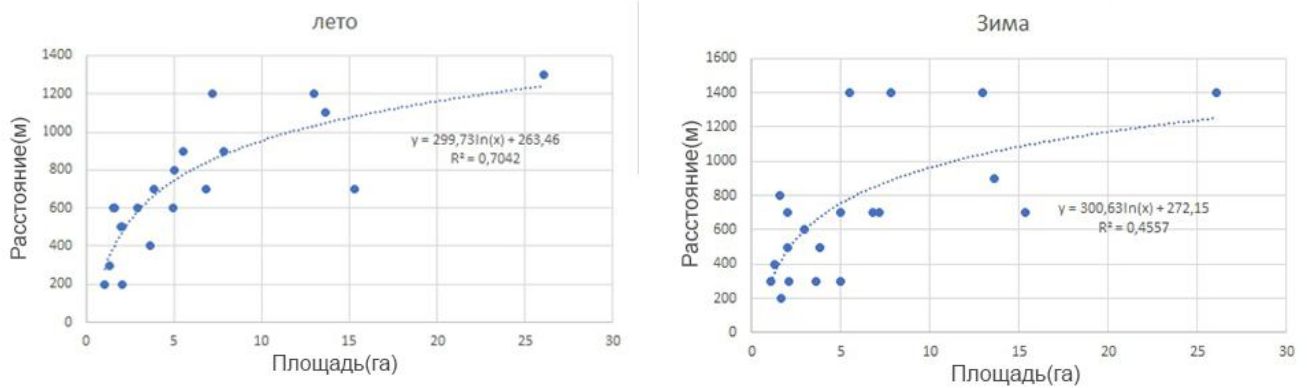


Рисунок 6. График взаимосвязи между радиусом снижения температуры, м, и площадью зелёного пространства, га

На рисунке 7 продемонстрирована взаимосвязь между интенсивностью снижения температуры и показателем формы зеленого пространства — это линейная инвертированная система. Когда показатель SI увеличивается, интенсивность снижения температуры уменьшается. Поэтому, чтобы увеличить интенсивность снижения температуры зеленого пространства, необходимо уменьшить показатель SI при помощи увеличения площади зеленого пространства.

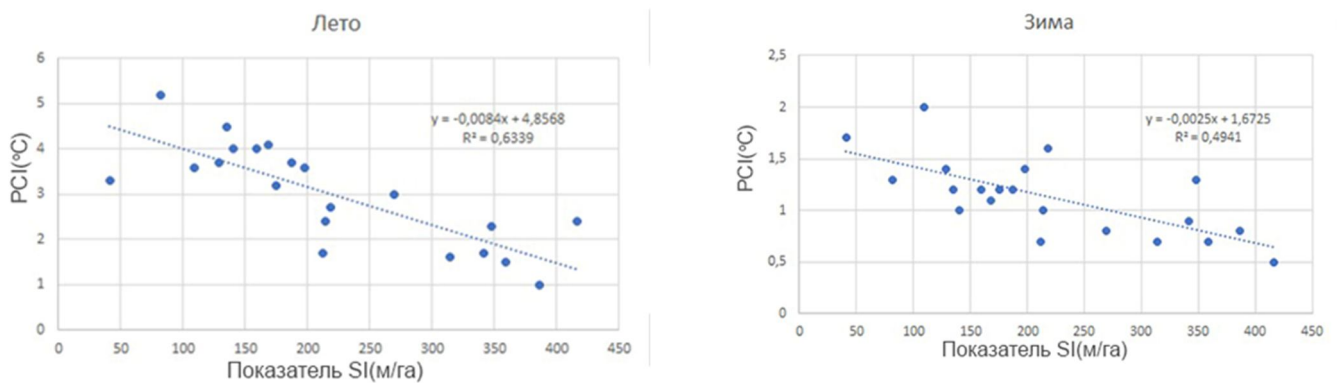


Рисунок 7. График взаимосвязи между средней интенсивностью снижения температуры, °С, и показателем SI, м/га.

Для того, чтобы смоделировать с помощью программы ENVI-met условия микроклимата в городском микрорайоне Ван Фу в центре района Ха Донга с населением 20 000 человек и площадью 94,1 га и изучить сценарии смягчения последствий ГОТ, был выбран один из самых жарких дней в 2019 году. Что касается пиковых значений моделирования: зарегистрированная температура для мая была 31,73°C в 17:00 часов в тёплое время года. Данные метеостанции в дальнейшем будут использованы для верификации модели.

Коэффициент детерминации R2, равный 0,94, был получен при сравнении средних значений температуры фактических наземных измерений с полученными при моделировании значениями, что подтверждает достоверность расчетов в ENVI-met для выбранного участка.

В четвертой главе представлены рекомендации по уменьшения влияния ГОТ в городе Ханое, разработана модель обеспечения экологической безопасности застройки.

Модель городской территории, выбранной для рекомендацией имеет размеры сетки 187x192x35 элементов с шагом 8м. В ENVI-met проведено моделирование сценариев: сценария текущего состояния и сценария с организацией искусственных озёр и фонтанов, которые представлены на рисунке 8 для сравнения.

На тепловой карте городского квартала Ван Фу, смоделированной в программе ENVI-met, показана разница температур воздуха днем и ночью. Более высокие температуры воздуха были обнаружены над асфальтированными дорогами вокруг жилых и общественных зон.

Созданные водные объекты позволяют сформировать прохладные и влажные зоны, с понижением температуры на $2,87^{\circ}\text{C}$ на исследуемой территории и вокруг жилого района. Из-за того, что основное направление ветра юго-восточное (от озера к жилой застройке), ветер в способствует снижению температуры на большей части рассматриваемой территории.

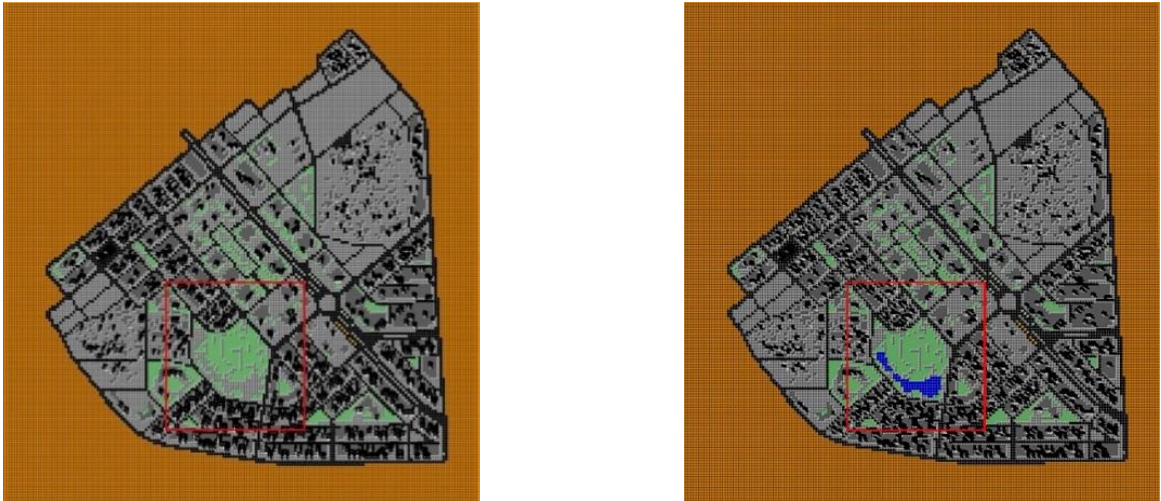


Рисунок 8. Базовый сценарий и случай с искусственным озером и фонтанами.

Результаты моделирования показывают, что в 16:00 29 мая 2019 года температура воздуха в базовом сценарии достигла самого высокого значения $31,964^{\circ}\text{C}$, в то время как температура воздуха в сценарии с организацией искусственного озера и фонтанов достигает значения $30,401^{\circ}\text{C}$. Таким образом, использование искусственных озер и фонтанов в городском пространстве Ван Фу площадью 6088 м^2 помогло снизить температуру воздуха на $1,563^{\circ}\text{C}$ в самую жаркую часть дня. При использовании метода охлаждения искусственными озерами и фонтанами возникает явление испарения воды на открытой поверхности, что приводит к увеличению влажности воздуха. Так, в 16:00 в базовом сценарии влажность воздуха достигает $53,164\%$, а в случае использования искусственных озер и фонтана она составляет $62,253\%$. Испарение воды с открытых акваторий может снизить температуру, но с другой стороны также увеличивает влажность, что снижает положительное влияние на тепловой комфорт.

Сравнение эталонного случая с предлагаемыми сценариями показывает, что за счет увеличения процента зеленых насаждений на территории исследования температура воздуха снижается во всех сценариях. При сценарии с увеличением количества деревьев на 30% и общей площади газона, зеленых крыш и зеленых фасадов на 70% происходит максимальное снижение температуры воздуха на $3,896^{\circ}\text{C}$. Это охлаждение обусловлено двумя основными факторами: тенью и испарением в течение дня и ночи, соответственно.

Вариант озеленения был выбран в качестве оптимального сценария по минимизации эффекта городского теплового острова и повышению тепловой эффективности зданий, поскольку в нем значительно снижаются дневные и ночные температуры воздуха (больше, чем при других рассмотренных сценариях).

Во всех предлагаемых вариантах озеленения территории скорость ветра значительно снижается по сравнению с исходным сценарием. Однако, температура воздуха на участке моделирования все равно значительно снижается из-за влияния растительности.

Предложенные рекомендации к размещению зеленых насаждений вдоль тротуаров для наиболее оптимального использования эффекта затенения, позволяют уменьшить интенсивность теплового излучения, падающего на дорожное покрытие. Материалы более яркого цвета отражают больше солнечного излучения, что приводит к меньшему нагреву поверхности земли.

Основными элементами системы моделирования температуры поверхности города являются: система мониторинга микроклимата, представленная метеостанциями в городе; база данных; корректировка градостроительной планировки города.

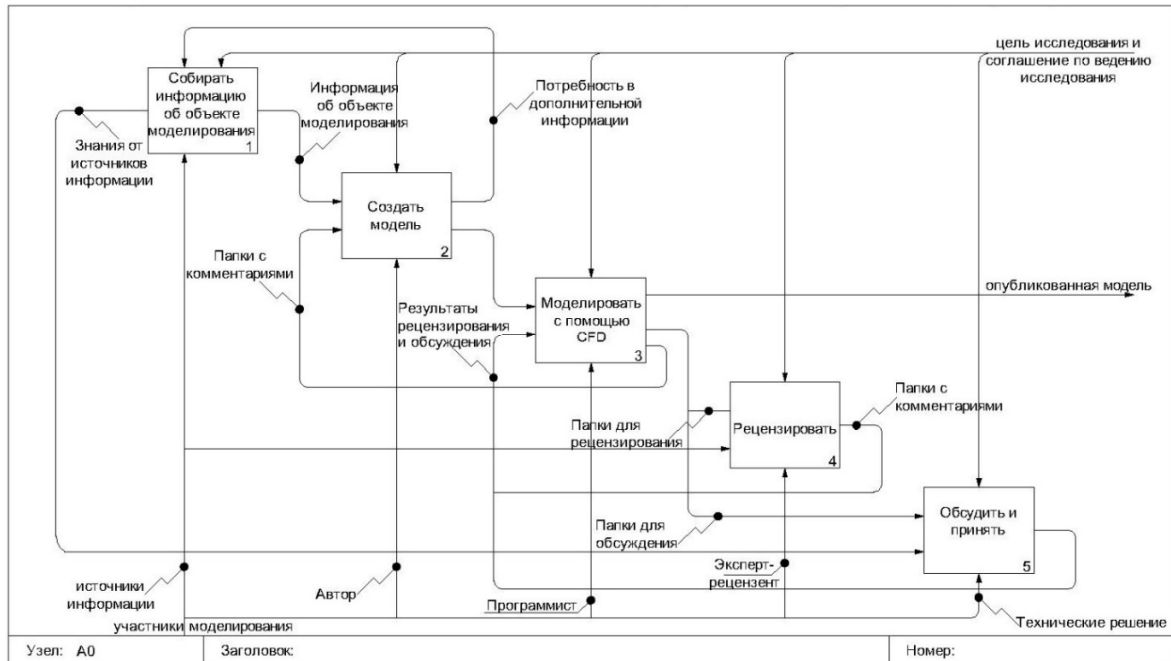


Рисунок 9. Общий алгоритм моделирования температуры деятельной поверхности города.

На рис. 9 имитационная система определения температуры деятельной поверхности осуществляется с помощью пяти блоков обработки информации (A1, A2, A3, A4, A5). При этом в функциональных блоках A1 осуществляется сбор информации об объектах моделирования. После того как объекты будут классифицированы и связаны с условиями микроклимата исследуемой территории, будет осуществляться передача информации в функциональные блоки A2, являющиеся ролевыми моделями построения. В функциональных блоках A2 будут вынесены необходимые требования для построения модели. Если функциональные блоки A1 предоставят достаточную информацию, то функциональным блокам A3 будет передана роль имитатора при поддержке программного обеспечения ENVI-met, основанного на методах гидродинамического анализа. Если обработка информации в функции A2 не выполняется, то будут возвращены функциональные блоки A1 для добавления дополнительной информации. Результаты моделирования, полученные в функциональном блоке A3, непосредственно передаются функциональным блокам A4, отвечающим за оценку результатов, а в функциональных блоках A5 содержатся обсуждение и анализ результатов. В функциональных блоках A4 будет произведена оценка точности имитационной модели. Если модель не достигла того уровня точности, который необходим, то происходит регулировка параметров в функции A3. В функциональном блоке A5 будут объединены технические решения, из которых будут вынесены необходимые требования по корректировке имитационной модели для функциональных блоков A3 с целью продолжения обработки моделирования и достижения оптимальных результатов по снижению поверхностного теплового воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке имитационной модели, позволяющей прогнозировать формирование ГОТ в городе и оценивать способы по смягчению

данного эффекта и снижению негативного воздействия ГОТ на окружающую среду, а также обеспечению тепловой безопасности застройки (на примере города Ханоя).

В диссертационной работе на основе проведенных теоретических и численных исследований решена актуальная научная задача по повышению экологической безопасности городской среды за счёт смягчения эффекта городского острова тепла. Решение проблемы теплового загрязнения в крупных городах имеет существенное значение для развития строительства и городского хозяйства.

Итоги выполненного исследования:

1. По результатам анализа научных источников по формированию ГОТ дано развёрнутое понятие термина «городской остров тепла». Впервые предлагается подразделять городской остров тепла на 2 типа: «надземный городской остров тепла» и «атмосферный городской остров тепла». Установлено негативное влияние ГОТ на людей и окружающую среду для условий жаркого и влажного климата.

2. Изучено влияние планировки города с учетом установленных гигиенических норм Вьетнама на формирование микроклимата и ГОТ. Произведён расчёт воздушного потока между зданиями с учётом альbedo поверхностей и теплообмена между ними, влияния озеленения и водных объектов (фонтана и искусственного озера) на микроклимат городской территории. Рассмотрено три сценария озеленения территории квартала Ван Фу города Ханоя: 1) с добавлением 30% деревьев, 2) с добавлением 50% деревьев и 3) с увеличением количества деревьев на 30% и общей площади газона, зелёных крыш и зелёных фасадов на 70%. Для многоэтажной центральной части города характерно сочетание высоких значений показателя закрытости горизонта (свыше 0,8) и низкой доли растительного покрова (около 30%), где наблюдается наиболее высокое значение интенсивности ГОТ и аэрационного потенциала.

3. Приведены пороговые значения в шести категориях индекса дисперсии теплового поля в городах. Для определения изменения микроклиматических данных и моделирования тепловой среды городских улиц использовался вычислительный гидродинамический анализ (англ. - Computational Fluid Dynamics (CFD)). Была применена версия 4.4.5 программного комплекса ENVI-met для моделирования и анализа городских островов тепла,

4. Приведена блок-схема для моделирования параметров микроклимата с помощью ENVI-met и прогнозирования формирования городского острова тепла, позволяющий модель позволяет идентифицировать все информационные объекты.

5. Результаты показывают тесную взаимосвязь между распределением городского острова тепла и развитием землепользования и температурой поверхности земли. Установлено, что большое значение в формировании уровня теплового комфорта в слое атмосферного воздействия застройки отдельной группы зданий играют зелёные насаждения и система обводнения. Поэтому различные воздействия городского острова тепла были определены на основе степени теплового комфорта, связанные с существованием городского острова тепла. Территории Ханоя можно отнести к двум степеням теплового комфорта: районы с наихудшим тепловым состоянием ($UTFVI > 0,02$) и районы с отличным тепловым состоянием ($UTFVI < 0$).

7. Учитывая нелинейность и сложность описания климатических и тепловых явлений в городских пространствах, использовались динамическое численное моделирование, позволяющее проводить сравнительный анализ относительного потенциала различных предлагаемых мероприятий и базового варианта. Тропический тёплый 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 коэффициента детерминации $R^2 = 0,94$ подтвердило достоверность расчёта в ENVI-met. Это показывает, что ENVI-met может быть использован для моделирования тропического климата городской территории Ханоя.

8. Для снижения влияния ГОТ предложены принципы озеленения и обводнения территории квартала Ван Фу. Представлен общий алгоритм моделирования температуры деятельной поверхности города. Доля растительного покрова в модели учитывается со знаком «минус» как фактор, способствующий уменьшению интенсивности ГОТ. Дана оценка плотности объема застройки – косвенного показателя изменения теплового баланса вследствие накопления и хранения тепла и собственного длинноволнового излучения всех вертикальных конструкций и искусственных материалов. Применение предложенного моделирования ГОТ и методики в проектах градостроительного планирования обеспечивает микроклиматическую и экологическую комфортность городской среды до гигиенических нормативных значений.

Рекомендации и перспективы дальнейшей проработки темы исследования: Предлагаются следующие рекомендации по повышению экологической безопасности городской среды от влияния ГОТ.

1. Результаты исследования следует рассматривать как основу практических методик для количественной оценки уровня тепловой защиты и уменьшению интенсивности ГОТ.

2. Предусмотреть возможность внедрения результатов исследования в гигиенические нормативы качества городской среды и нормативы градостроительного проектирования городской застройки с учетом факторов, влияющих на формирование микроклимата и ГОТ.

3. При градостроительном планировании и проектировании городской застройки комплексно учитывать средозащитные свойства озеленения, объектов обводнения и других факторов, что обеспечит микроклиматическую и экологическую комфортность городской среды до гигиенических нормативных значений.

Дальнейшая разработка темы может быть связана с изучением гидрологических, климатических и других характеристик деятельной поверхности территорий в условиях тропического климата для приведения этих территорий к комфортным условиям проживания жителей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Минь Туан Ле. Формирование средозащитных объектов городской среды для условий жаркого и влажного климата / **Минь Туан Ле**, Бакаева Н.В. // Промышленное и гражданское строительство. - 2021. - № 9. - С. 52-59.

2. Ле Минь Туан. Исследование влияния озеленения Ханоя на эффект городского острова тепла / **Ле Минь Туан**, Гельманова М.О., Шукуров И.С., Слесарев М.Ю., Нгуен Ван Минь // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. - 2021. - № 1 (33). - С. 35-50.

3. Ле Минь Туан. Расчет интенсивности теплового острова в мегаполисах с помощью моделирования в программе ENVI-met / **Ле Минь Туан**, Шукуров И.С., Гельманова М.О., Слесарев М.Ю. // Вестник МГСУ. - 2020. – Т. 15. - № 9. - С. 1262-1273.

4. Ле Минь Туан. Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое. / **Ле Минь Туан**, Шукуров И.С. // Вестник МГСУ. - 2020. - Т. 15.- № 3. - С. 368–379.

5. Ле Минь Туан. Влияние эффекта «городского острова тепла» на устойчивое развитие городов (на примере города Ханой) / Шукуров И.С., **Ле Минь Туан**, Шукурова Л.И., Дмитриева А.Д. // Градостроительство и архитектура. - 2020. - Том 10, № 2. - С. 62-70.

6. Ле Минь Туан. Влияние планировки города на возникновение островов тепла в мегаполисах с тропическим климатом (г. Ханой) / **Ле Минь Туан** // Вестник МГСУ. - 2019. - № 2 (125). - С. 148-157.

7. Ле Минь Туан. Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки / **Ле Минь Туан**, Шукуров И.С., Нгуен Тхи Май // Строительство: наука и образование. - 2019. – Т. 9. - № 3. - С. 1-22.

8. Ле Минь Туан. Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса / **Ле Минь Туан**, Алексашина В.В. // Проблемы региональной экологии. - 2018. - № 5. - С. 36-40.

Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых в базе цитирования SCOPUS:

9. Le, M.T. Features of the formation of urban heat islands effects in tropical climates and their impact on the ecology of the city / **Le, M.T.**, Tran, N.A.Q. //E3S Web of conferences. - 2019. - Vol. 91. 05005.

10. Le, M.T. The role of green space in the urbanization of Hanoi city / **Le, M.T.**, Cao, T.A.T., Tran, N.A.Q. // E3S Web of conferences. - 2019. - Vol. 97. 01013.

11. Le, M.T. Case study of GIS Application in Analyzing Urban Heating Island Phenomena in Tropical Climate Country / **Le, M.T.**, Tuyet Cao, T.A., Quan Tran, N.A., Phuong Nguyen, T.K., Cuong Le, T.K. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - Vol. 661 (1). 012090.

12. Le, M.T. A study case of Mathematical Calculation of Urban Heat Island Intensity Based on Urban Geometry / **Le, M.T.**, Shukurov, I., Shukurova, L., Dmitrieva, A. // Lecture Notes in Civil Engineering. - 2020. - Vol. 70. Pp. 373-388.

13. Le, M.T. Sulfur-extended asphalt concrete with assessing the surface temperature of roads affecting urban heat island / **Le, M.T.**, Tuan Le, H., Shukurov, I., Slesarev, M. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2020. -Vol. 869. 022007.

Публикации в других научных журналах и изданиях:

14. Ле Минь Туан. Проблемы градостроительства в условиях тропического климата (на примере города Ханой) / **Ле Минь Туан**, Алексашина В.В. // сборник докладов международной научно-практической конференции. Москва. - 2018. - С. 183-187.

15. Ле Минь Туан. Влияние зеленых насаждений на температурный режим города / **Ле Минь Туан** // сборник докладов международной научно-практической конференции. Москва. - 2021. - С. 75-79.