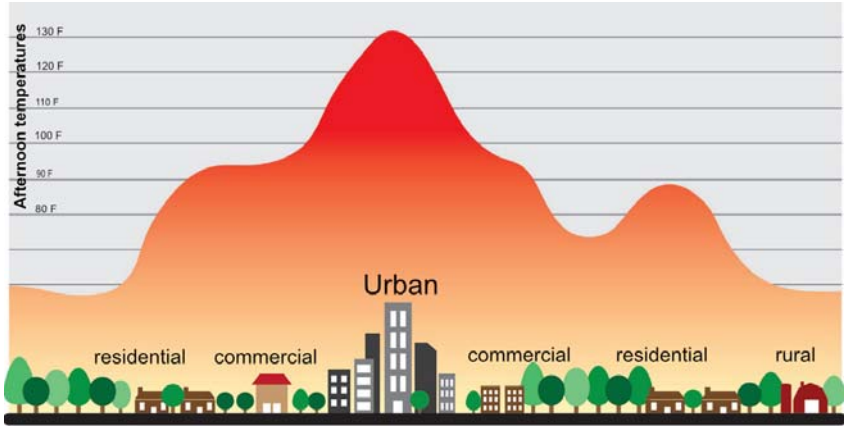
Ле Минь Туан, И.С. Шукуров

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСТРОВА ТЕПЛА ГОРОДОВ

Монография



Курск
ЗАО Университетская книга
2026

УДК 711.503
ББК 38.311
Л32

Рецензенты:
Абдуназаров Д.Н., д.т.н., проф. д.т.н.
Хатамов А.Т., д.т.н., проф. д.т.н. зав. кафедрой «Градостроительная инфраструктура» Ташкентского архитектурно-строительного университета.

Л32 Ле Минь Туан, Шукуров И.С.
Исследование особенностей острова тепла городов: монография / Ле Минь Туан, И.С. Шукуров. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга». 2026.- 163 с.

ISBN 978-5-00291-172-1

В монографии рассмотрены проблемы теплового режима жилой застройки городов, а также влияние городской планировки на формирование эффекта городского острова тепла (ГОТ) в условиях современной высокоплотной многоэтажной застройки с учетом санитарно-гигиенических требований. Представлены результаты теоретических и практических исследований по решению проблемы формирования городских островов тепла. Описаны результаты экспериментальных исследований и методика оценки эффекта ГОТ в жилых районах городов. Раскрыта роль и значение многоэтажной высокоплотной застройки в формировании данного эффекта. В работе представлен расчёт интенсивности городского острова тепла с использованием программы моделирования ENVI-met. Разработаны алгоритм и рекомендации по расчёту температуры деятельной поверхности, а также предложены методы использования результатов моделирования для управления её температурным режимом.

Предложены рекомендации по обеспечению комфортной среды проживания при проектировании и планировке жилой застройки.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке нормативно-технической документации по оптимизации и оздоровлению городской среды.

Монография будет полезна инженерам, проектировщикам, научным сотрудникам и студентам архитектурно-строительных специальностей вузов.

Структура и объем монографии состоит из введения, введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 178 наименований. Работа изложена на 156 страницах основного текста, содержит 80 рисунков, 30 таблиц и 6 приложений.

ISBN 978-5-00291-172-1 УДК 711.503
ББК 38.311

© Ле Минь Туан, Шукуров И.С., 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОБЛЕМЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КРУПНЫХ ГОРОДОВ 7

1.2. Формирование городского острова тепла (ГОТ) и проблемы теплового режима крупных городов 7

1.1.1. Понятие и факторы, вызывающие образование городского острова тепла 7

1.1.2. Влияние городского острова тепла на экологию города 19

1.2. Формирование теплового баланса на деятельной поверхности урбанизированных территорий 20

1.3. Влияние планировки городов на формирование эффекта ГОТ. Роль системы озеленения в формировании городской среды 22

1.3.1. Влияние планировки городов на формирование ГОТ 22

1.3.2. Роль системы озеленения в формировании городской среды 24

1.4. Проблема теплового стресса на деятельной поверхности города городов 28

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕЯТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ 31

2.1. Краткая история развития города Ханоя 31

2.2. Природно-климатические условия Ханоя 34

2.3. Существующая планировочная структура городов и выбор объекта исследования 38

2.3.1. Размещение и характеристика промышленных зон в Ханое 38

2.3.2. Характеристика застройки жилых и общественных зон 43

2.3.3. Современное состояние автотранспортной системы города 44

2.3.4. Система поверхностных водных объектов городов (рек, озёр и др.) 47

2.3.5. Система озеленения в Ханое 48

2.4. Проведение натурных наблюдений с использованием технологии дистанционного зондирования (ДЗ). Методы исследований 51

2.4.1. Методика проведения натурных наблюдений 51

2.4.2. Метод определения эффективности охлаждения воздушной среды при помощи зелёных насаждений 57

2.4.3. Методы определения температуры дорожного покрытия 59

2.4.4. Метод вычислительного гидродинамического анализа (Computational Fluid Dynamics - CFD) 62

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ОСТРОВОВ ТЕПЛА 77

3.1. Методика оценки эффекта городского острова тепла 77

3.1.1. Методика определения городских островов тепла 77

3.1.2. Воздействие изменения землепользования на температуры деятельной поверхности 87

3.2. Теоретическое решение задачи ГОТ, связанной с конфигурацией зелёных насаждений в районе 21 озер городов и температурой деятельной поверхности 94

3.3. Оценка результатов рачёта температуры асфальтобетонных дорожных покрытий в Ханое 99

3.4. Расчёт интенсивности городского острова тепла с помощью моделирования в программе ENVI-met 100

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА В Г. ХАНОЙ 108

4.1. Результаты моделирования по влиянию поверхностных водных объектов на смягчение эффекта ГОТ на примере территории жилого района в Ханое 108

4.2. Результаты моделирования по влиянию озеленения на смягчение эффекта ГОТ и на улучшение качества жизни на примере территории жилого района в Ханое 115

4.3. Результат исследования по влиянию показателя альбедо на снижение температуры поверхности 128

4.4. Экологическая оценка и система моделирования температуры деятельной поверхности города городов 133

4.4.1. Рекомендации по расчёту температуры деятельной поверхности. Алгоритм моделирования температуры деятельной поверхности 133

4.4.2. Рекомендации по использованию результатов моделирования для управления температурой деятельной поверхности городов 137

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 138

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 141

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 142

ПРИЛОЖЕНИЯ 157

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается значительный рост численности городского населения во всём мире; на сегодняшний день более половины населения планеты проживает в городах. Высокая плотность городского населения и сопутствующая антропогенная нагрузка оказывают глубокое воздействие на природную и техногенную среду. Современные модели урбанизации сопровождаются трансформацией природных поверхностей, изменением теплового и радиационного режимов, влажности и химического состава атмосферного воздуха. Эти изменения приводят к модификации динамики окружающей среды и формированию особого типа городского микроклимата, ключевой особенностью которого является эффект городского острова тепла (ГОТ) [1]. Эффект городского острова тепла (ГОТ) оказывает дестабилизирующее воздействие на качество окружающей среды, что проявляется в возникновении теплового стресса у населения (преимущественно в летние месяцы) и значительном увеличении энергопотребления в целях кондиционирования помещений.

Интенсивная индустриализация, высокая плотность населения, значительная нагрузка транспортных потоков, а также специфика благоустройства городской среды приводят к существенной трансформации теплового режима и деградации окружающей среды городов. Стремительные темпы урбанизации сопровождаются значительными изменениями морфологии и температурного режима почвенного покрова. Замещение естественного растительного покрова непроницаемыми искусственными поверхностями способствует значительному повышению их температуры. Согласно данным городских метеостанций за период с 1980 по 2010 год, интенсивность городского острова тепла возросла с 0,3°C до 0,6–0,8°C; при этом подтверждено, что температура воздуха в городской черте значительно превышает показатели близлежащих сельских территорий. Возникающий вследствие вышеуказанных факторов эффект городского острова тепла (ГОТ) оказывает глубокое воздействие на экологическую ситуацию в городе. В настоящее время в мировой практике широко изучается влияние ГОТ на городскую инфраструктуру и здоровье населения. Эффект ГОТ является деструктивным (особенно в условиях тропического климата), поскольку он провоцирует возникновение теплового стресса у людей и ведет к росту энергозатрат на охлаждение зданий. Температуры воздуха и городских поверхностей выступают определяющими факторами, формирующими городской микроклимат. Кроме того, исследования метеорологов и экологов показывают, что в зонах ГОТ происходит аккумуляция вредных веществ, образующихся в результате техногенных выбросов (промышленность, транспорт), которые впоследствии концентрируются в атмосферных осадках.

Несмотря на актуальность проблемы, факторы формирования городских островов тепла и степень их воздействия на городскую среду остаются недостаточно изученными. В частности, отсутствует научно обоснованная методологическая база для построения имитационных моделей и расчёта параметров ГОТ в условиях городской застройки.

Поддержание оптимального температурного режима на урбанизированных территориях, и в особенности в мегаполисах, остается одной из наиболее острых проблем мирового масштаба. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью обеспечения экологической безопасности городской среды в контексте влияния температуры деятельной поверхности, а также потребностью в соблюдении установленных санитарно-гигиенических норм комфорта.

Существующие методы мониторинга температуры воздуха на базе метеорологических станций не позволяют в полной мере решать комплексные экологические проблемы городов, в том числе прогнозировать интенсивность городского острова тепла и уровень теплового комфорта при изменении доли озеленённых территорий. В связи с этим разработка моделей городского острова тепла является актуальной научно-практической задачей для современных мегаполисов.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОБЛЕМЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА КРУПНЫХ ГОРОДОВ

1.2. Формирование городского острова тепла (ГОТ) и проблемы теплового режима крупных городов

1.1.1. Понятие и факторы, вызывающие образование городского острова тепла

Климат многих крупных городов мира существенно отличается от климата прилегающих территорий: в жаркие летние дни он зачастую приобретает черты полупустынного или даже пустынного. Так, например, в летний период в Москве температура поверхности асфальта достигает 45–55 °C, в то время как температура кирпичной стены составляет 41 °C, белой стены — 38 °C, а травяного покрова — всего 25 °C. Такие температурные различия обусловлены характеристиками испарительных поверхностей и коэффициентом суммарного испарения. В растениях влага перемещается от корней и стеблей к листьям, где происходит переход воды из жидкого состояния в парообразное. Этот процесс, поступающий в атмосферу, позволяет поддерживать оптимальный температурный режим растения и предотвращать его перегрев. Данное явление называется транспирацией и выполняет роль своего рода «природного кондиционера [8].

На высоте 100 – 150 м в безветренные дни в крупных городах может образовываться островной слой с высокой температурой и интенсивным нагревом каменных, кирпичных и бетонных конструкций, что приводит к загрязнению воздушной массы и перегреву центральных районов города [9]. Так, например, разница температур между центром Парижа и его окрестностями составляет 1,7 °C. В Москве и Санкт-Петербурге среднегодовая температура в центральных районах в среднем на 3–4 °C выше, чем в пригородных зонах.

Под воздействием эффекта городского острова тепла создаются температурные градиенты, которые обуславливают специфическую локальную циркуляцию воздуха (городские ветры). В летний период интенсивный прогрев приземного слоя атмосферы в центре города приводит к формированию зоны низкого давления, что вызывает приток воздушных масс из периферийных районов и пригородных лесопарковых зон. Такой перенос воздуха способствует очищению атмосферы в центральной части города. Тем не менее, данные процессы носят нестабильный характер. При

отсутствии выраженного перепада давления или при доминировании сильного регионального ветра локальная городская циркуляция подавляется [8].

Одной из ключевых особенностей городской аэрации при слабых ветровых нагрузках является высокая интенсивность тепловой конвекции, обусловленная положительной аномалией теплового баланса городской среды. В структуре температурного поля данное явление проявляется в виде специфического микроклиматического эффекта — «городского острова тепла» (ГОТ) [10].

Впервые научные исследования, в которых были представлены особенности городского климата, появились в 1818 году. В процессе исследований городского климата Лондона был обнаружен такой феномен, как «искусственный избыток тепла», где температура воздуха была выше в сравнении с пригородами [11]. Подобные открытия были сделаны Эмилией Рено в Париже в конце XIX века [12, 13, 14], Вильгельмом Шмидтом в Вене в XX веке [15, 16], в США в начале XX века [17, 18]. Область ГОТ визуально имеет форму пространственного купола, похожую на «остров», поэтому данному феномену в городе было позже присвоено название «городской остров тепла».

Одной из ключевых особенностей микроклимата современных мегаполисов является формирование городского острова тепла (ГОТ), выражающееся в возникновении зон с повышенными температурными показателями в определенных районах города. Стоит подчеркнуть, что доля техногенного тепла в структуре теплового баланса ГОТ может составлять до половины интенсивности солнечной радиации. Как правило, ГОТ развивается над городскими территориями площадью от 100 км² и более, принимая форму «теплового купола», в пределах которого температура воздуха существенно превышает значения в пригородных зонах [19]. Как правило, днём средняя температура воздуха в ГОТ выше на 4℃, а в ночное время при небольшим ветре на 6-8℃ и более.

Вследствие высокого уровня загазованности и задымленности городского воздуха поступление солнечной радиации снижается (потери ультрафиолетовой радиации в Балтиморе (США) достигают 50%, в Москве 25 - 30%, в Санкт-Петербурге 17 - 24%, в Киеве 17% [20]), что, тем самым, является причиной повышенного содержания болезнетворных бактерий в городском воздухе.

Под эффектом острова тепла понимается:

- область воздуха с повышенными значениями температуры над некоторыми районами городской застройки (физические механизмы, приводящие к образованию ГОТ, в основном, изучены в середине 80-х гг. XX в.)

- «плато» теплого воздуха с повышенными значениями температуры в направлении к центру города. При этом термическая однородность «плато» нарушается включениями холодного и горячего воздуха, так называемыми «разрывами» поверхности или областями генерации прохладного воздуха (озеленённые территории – парки, скверы, бульвары и т.д., водные объекты) и горячего воздуха (промышленные предприятия, объекты энергетики, транспортные «артерии», плотная застройка). На границе города и сельской местности или границе промышленного и жилого районов может возникнуть значительный вертикальный перепад температуры, иногда достигающий нескольких градусов, который называется «утесом острова тепла» (рисунок 1.1).

Рисунок 1.1. Сечение зоны теплого воздуха с повышенными температурами над городом (эффект ГОТ)

Урбанизация и индустриализация являются основными причинами возникновения эффекта городского острова тепла (ГОТ). Для большинства городских районов характерна более высокая температура воздуха по сравнению с сельской местностью, особенно в ночное время в теплый период года. Схематическое изображение причин возникновения ГОТ представлено на рисунке 1.2 [3, 21].

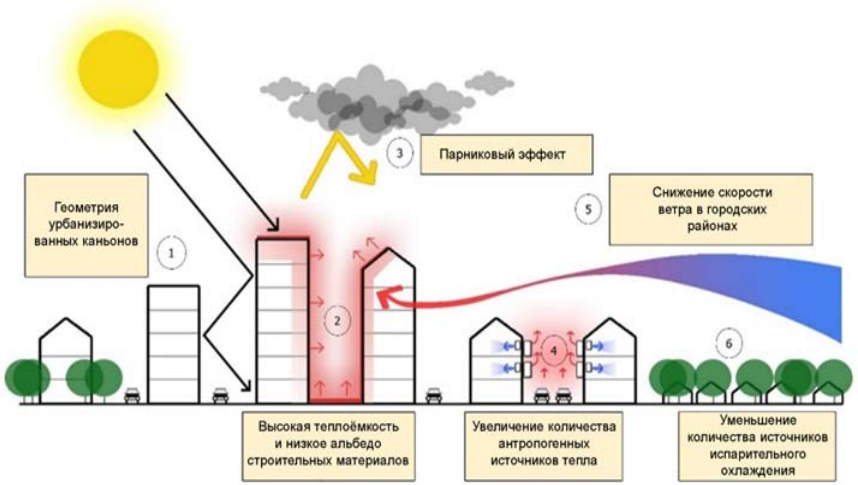


Рисунок 1.2. Основные причины формирования эффекта ГОТ

Существует связь эффекта ГОТ с локальным увеличением интенсивности циркуляции конвекционных потоков воздуха и значительным снижением горизонтального движения воздушных масс (на 25-35% по сравнению с окружающими территориями). В городах со штилевым режимом этот эффект часто становится единственным механизмом смешивания воздуха, позволяющим вытеснять загрязненный перегретый воздух из поверхностного слоя городской атмосферы в более высокие слои. С учетом специфики развития разных частей города, интенсивный тепловой поток в поверхностном слое атмосферы наблюдается там, где плотность застройки максимальна. Кроме того, поглощение солнечной радиации неравномерно на плоскостях с разным углом наклона. В плотно застроенных районах больше солнечного излучения приходится на северный «склон» (и поглощается им), а не на южный. В связи с этим происходит смещение высокотемпературной конвекции к геометрическому центру застройки. Следовательно, изменение положения высотной части города относительно его геометрического центра способствует притоку прохладного свежего воздуха из пригородов. Для улучшения воздухообмена следует предусматривать зоны с низкой плотностью застройки, чтобы воздушные потоки перемещались в нужном направлении. Такой подход может быть реализован посредством разноуровневой застройки центральных районов и развития периферии. Расположенные друг напротив друга сооружения должны

иметь разную высоту. В этом случае центральная часть циркуляционной ячейки тепловой конвекции также сместится, что обеспечит максимальное продувание территории города свежим пригородным «бризом» [8].

Согласно данным ряда исследователей, тепловое влияние городов отчетливо прослеживается в приземном слое атмосферы на высоте 100–500 метров. В условиях слабого ветра (1-3 м/с) в городской черте наблюдается циркуляция воздушных масс: вблизи поверхности земли потоки направляются к центру города (в зону ГОТ), в то время как в верхних слоях происходит отток воздуха к периферии» [22].

Городской остров тепла подразделяется на два типа:

- «надземный городской остров тепла»;
- «атмосферный городской остров тепла».

Формирование «надземного городского острова тепла» представляет собой процесс, при котором такие поверхности, как кровля и тротуары, интенсивно нагреваются в дневные часы, аккумулируют тепловую энергию и постепенно отдают её в вечерний и ночной периоды. Городские поверхности характеризуются более высокой степенью инсоляции по сравнению с затененными участками сельской местности. Несмотря на то, что эффект «надземного городского острова тепла» проявляется как днем, так и ночью, его пиковые значения фиксируются в светлое время суток. Превышение температуры городского воздуха над температурой в прилегающих сельских районах приводит к возникновению «атмосферного городского острова тепла», который, в свою очередь, подразделяется на два типа: остров городского слоя и остров поверхностного слоя [23, 8].

Городской слой» охватывает пространство от поверхности земли до верхней границы крон деревьев или крыш зданий. В свою очередь, «поверхностный слой» располагается в воздушном массиве над уровнем застройки и простирается до границы, за которой влияние городского ландшафта на атмосферу нивелируется. При этом «поверхностный слой», как правило, способствует усилению интенсивности «городского острова тепла» в силу взаимного взаимодействия этих двух слоев. Сравнительная характеристика поверхностного и городского тепловых островов приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Основные характеристики городского и поверхностного слоёв ГОТ [8]

Особенность	Городской слой ГОТ	Поверхностный слой ГОТ
Временное развитие	– присутствует в любое время дня и ночи; – наиболее интенсивен в течение дня; – активнее выражен в летнее время года	– может быть менее выраженным или не существовать в дневное время; – наиболее интенсивен в темное время суток или на рассвете; – активнее выражен в зимний период
Пиковая интенсивность (наиболее интенсивные условия ГОТ)	Больший размах пространственных и временных значений: день: 10-15 °C ночь: 5-10 °C	Меньший размах значений: день: 1–3 °C ночь: 7–12 °C
Типичный метод идентификации	Косвенное измерение Дистанционное зондирование	Прямое измерение Стационарные метеостанции. Мобильные траверсы
Типичное изображение	Тепловые изображения	Изотермические карты График температуры

Повышение температуры воздуха, обусловленное эффектом городского острова тепла, особенно в летний период, оказывает существенное воздействие на состояние окружающей среды и качество жизни городского населения. Несмотря на наличие определенных положительных аспектов, таких как пролонгация вегетационного периода, большинство данных воздействий имеют выраженный негативный характер.

Причины возникновения ГОТ неразрывно связаны с процессами урбанизации и индустриализации. За последние десятилетия антропогенная нагрузка на окружающую среду привела к обострению глобального экологического кризиса, в частности, к изменению климата (глобальному потеплению) и значительному загрязнению атмосферы.

Загрязнение атмосферы техногенными выбросами приводит к ухудшению состояния окружающей среды. Примечательно, что такие выбросы, попадая в атмосферу, могут распространяться на огромные расстояния, перенося частицы даже на территории соседних государств. Так, например, вследствие выбросов оксидов серы и азота промышленными предприятиями и транспортом возникают «кислотные дожди», которые могут охватывать обширные территории (термин был введен в 1872 году инженером Р. Смитом, однако явление кислотных осадков стало серьезной проблемой с 70-х годов XX века, когда приобрело массовый характер). [24, 25]. На рисунке 1.3 приведена схема образования кислотных осадков и их воздействие на экосистемы [26].

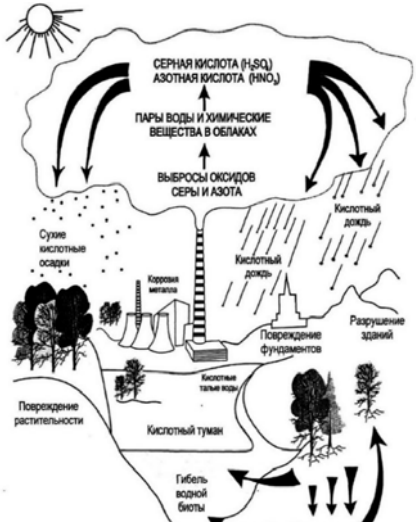


Рисунок 1.3. Схема образования кислотных осадков и их воздействие на экосистемы

Загрязнение атмосферы техногенными выбросами в урбанизированных зонах приводит к изменению теплового режима и росту концентрации вредных веществ. Примечательно, что доля углекислого газа и водяного пара в настоящее время достигает 90% от общего объема парниковых газов, что способствует формированию «парникового эффекта». Наибольшему воздействию данных факторов подвержены активно развивающиеся города. Средняя температура воздуха в городской черте превышает показатели пригородов на 7-15°С, что обусловлено локальным «парниковым эффектом», тепловыми выбросами транспортных средств, промышленных предприятий и иной хозяйственной деятельности [27, 28, 29]. Основными источниками загрязнения атмосферы, включая тепловое загрязнение, являются транспорт (до 60% всех выбросов) и промышленные объекты (около 30%) [30, 31].

Основными причинами формирования эффекта ГОТ являются:

- техногенные выбросы от промышленных предприятий и энергетической промышленности;
- выбросы транспортных средств;
- бытовое тепловое загрязнение;
- тепло от теплотрасс с температурой от 50°С до 150°С;
- определённая структура застройки города (высокая плотность зданий, плохая аэрация жилой и общественной застройки, высокая теплопроводность ограждающих конструкций зданий);
- низкая доля озеленённых территорий в городе (и как следствие, пониженное испарение и низкая влажность воздуха);
- значительная часть искусственных тёмных покрытий, поглощающих тепло;
- недостаточное количество водных объектов (в особенности на территории с эффектом ГОТ.

Каменные здания, асфальтобетонные покрытия и тёмные искусственные поверхности являются аккумуляторами тепла в городе. Так, летом температура таких поверхностей местами может достигать: 52°С (г.Москва), 65-70°С (г.Ереван), 73°С (г.Одесса), 80°С. (г.Ташкент) (см.табл.1.2).

В крупных городах воздействие ГОТ может распространяться на расстояние до 30-50 км с подветренной стороны города [32]. Так, например, в Европе разница температур воздуха в центре крупного города и на его окраинах в определённых условиях может достигать 15°С. Но, как правило, летом данный показатель составляет, в среднем, 5-7°С, зимой - 2-8°С [33].

Так, например, Лос-Анджелес является типичным примером города, подверженного «эффекту городского острова тепла» (ГОТ). Дефицит зеленых насаждений, обеспечивающих затенение, в сочетании с темным покрытием тротуаров и дорог, интенсивно поглощающим солнечную радиацию, способствует значительному росту температуры в городской черте.

Повышение температуры воздуха может вызвать тепловой стресс, создавая риски для здоровья населения, а также ведет к увеличению энергозатрат на кондиционирование помещений. В качестве меры по частичному смягчению эффекта ГОТ в Лос-Анджелесе предлагается окрашивание крыш и фасадов зданий в белый цвет (опираясь на опыт стран Ближнего Востока), что неизбежно приведет к снижению внутренней температуры зданий на несколько градусов.

Свойства ГОТ в городе Ханое во многом схожи со свойствами городских островов тепла в некоторых мегаполисах мира (см. табл. 1.2). Температура воздуха в среднем городском тепловом острове в Ханое (4.7℃) выше температуры ГОТ в Нью-Йорке (3℃, 2002г.) и Париже (2,6℃, 2006г.). Значение температуры воздуха в максимальном городском тепловом острове в Ханое (8,3℃) приближено к значениям температур, зафиксированным в ГОТ Лондона (8℃, 2003г.), Пекина (7,9℃, 2002г.) и Токио (8.1℃, 1992г.).

Следует отметить, что все перечисленные города более урбанизированы, чем Ханой, который в настоящее время активно развивается.

Формирование ГОТ в значительной степени зависит от аэрационного режима городской застройки. Как правило, скорость ветра внутри города на 10-20% ниже, чем за его пределами, что зачастую обусловлено факторами экранирования: особенностями рельефа, лесными массивами, а также архитектурно-планировочными решениями [34]. Вместе с тем в городской среде выделяются зоны, где скорость воздушного потока в 2-3 раза превышает средние показатели открытой местности; такие явления особенно характерны для районов многоэтажной застройки. Среднегодовая скорость ветра на открытых пространствах города составляет около 1,3 м/с, при этом в зимний период наблюдается её увеличение по сравнению с летним. В определенные фазы фиксируются интенсивные порывы (до 8-12 м/с), вызванные прохождением циклонов. В крупных агломерациях направление ветра отклоняется от преобладающего внегородского вектора. Данная особенность обусловлена эффектом «каньона» в условиях сомкнутой застройки, когда поток воздуха направляется вдоль основных магистралей, а также температурными градиентами, провоцирующими возникновение локальных завихрений, например, во дворах зданий [35, 36] (рисунок 1.4).

Таблица 1.2

Характеристика городского острова тепла в мегаполисах[1]

Город	ГОТ	Прибрежные/ внутренние	Речная система	Климат	Численность населения, чел	Плотность населения, чел/км^2
Нью-Йорк	Макс.: 5.4˚C Мин.: ~3˚C	Прибрежный	Р. Гудзон	Умеренный океанический	8.622.698 (в 2017г.)	10.923 (в 2017г.)
Париж	Макс.: 6˚C Мин.: 2.6˚C	Внутренний	Р. Сена	Западно-Европейский умеренно-влажный	2.206.488 (в 2018г.)	21.000 (в 2018г.)
Лондон	8˚C - 9˚C	Внутренний	Р. Темза	Умеренный океанический	8.825.000 (в 2017г.)	5.613 (в 2017г.)
Пекин	7.9˚C	Внутренний	Р. Ёнгдинг, Р. Чаобайхэ	Влажный континентальный, муссонный климат	21.710.000 (в 2017г.)	1.291 (в 2017г.)
Токио	Макс.: 8.1˚C Мин.: 5.3˚C	Прибрежный	Р. Тама, Р. Сумида	Влажный субтропический	13.515.271 (в 2015г.)	6.169 (в 2015г.)
Дели	Макс.: 8.3˚C Мин.: 4.7˚C	Внутренний	Р. Джамна	Влажный субтропический	19.072.564 (в 2017г.)	12.852 (в 2017г.)
Ханой	Макс.: 2,25˚C Мин.: 0,5˚C	Прибрежный	Р. Красная	Влажный субтропический	7.238.400 (в 2016г.)	2.164 (в 2016г.)
Москва	14˚C	Внутренний	Р. Москва	Континентальный	12.380.664 (в 2017г.)	4.880 (в 2017г.)

[1] Manju Mohan, Urban Hear Island Assessment for a Tropical Urban Airshed in India // Atmospheric and Climate Sciences, 2012, 2, 127-138.

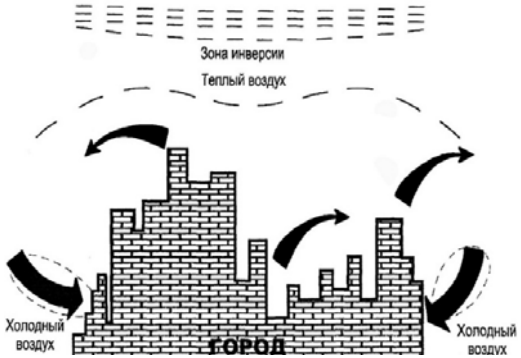


Рисунок 1.4. Схема циркуляции воздуха вблизи «острова тепла»

Роза ветров выступает одной из ключевых характеристик городского климата и должна учитываться при планировании размещения промышленных объектов [37]. Данные семи метеостанций Москвы свидетельствуют о том, что для каждого района характерна своя специфика розы ветров, отличная от показателей соседних территорий. Следовательно, при определении локализации предприятий и расчёте допустимых норм вредных выбросов используются данные ближайшей метеостанции [4, 38]. На рисунке 1.5 представлена циркуляция воздушных потоков с содержанием загрязняющих веществ, возникающих в результате промышленной эмиссии, при различных вариантах погодных условий.

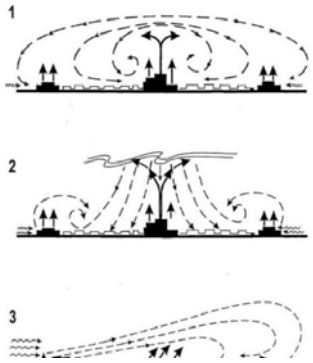


Рисунок 1.5. Схема циркуляции воздушных потоков с загрязняющими веществами от выбросов промышленных предприятий в городе при различных вариантах погодных условий: 1– антициклон; 2– температурная инверсия; 3– циклон

При решении вопросов размещения промышленных предприятий ключевое значение имеют климатические данные, так как они определяют характер рассеивания вредных веществ, образующихся в процессе производственной деятельности [39, 40, 41].

Одновременно с этим значимой является область влияния города на окружающую среду. Так, область воздействия крупного города или городской агломерации, характеризующаяся высотой около 5 км и радиусом, превышающим радиус города в 40–50 раз, определяется как «градсфера» [42, 43, 44]. Данный феномен может охватывать целые регионы. В частности, опыт США и стран Западной Европы показывает, что локальные изменения климата в близко расположенных населённых пунктах способны оказывать влияние на климатические условия на значительном удалении.

Относительно негативного воздействия городского острова тепла (ГОТ) следует отметить, что в данной зоне концентрируются вредные для человека и окружающей среды газообразные и пылевые выбросы промышленности, энергетики и транспорта. Эти вещества вымываются атмосферными осадками на территории города, как правило, с наветренной стороны или на определенном расстоянии от центра ГОТ (в направлении преобладающих ветров) [45, 46, 47]. Снизить вредное воздействие таких осадков на здоровье населения возможно путем перенаправления потоков воздуха над парковыми зонами или водными объектами, что технически реализуемо в современных условиях.

Таким образом, под «островом тепла» понимается зона с повышенными значениями температуры воздуха над определенными городскими участками, возникающая вследствие значительного объема тепловых выбросов от различных источников. В данной зоне температура воздуха на несколько градусов превышает показатели прилегающих территорий.

Следовательно, «городской остров тепла» представляет собой область городского пространства с повышенной температурой воздуха по сравнению с периферией. Как правило, центр ГОТ смещен в сторону преобладающих ветров [48].

1.1.2. Влияние городского острова тепла на экологию города

А) Влияние ГОТ на увеличение энергопотребления зданий

Формирование в городской черте зон с повышенной температурой ведет к росту энергозатрат на кондиционирование зданий. Согласно имеющимся данным, потребность в электроэнергии для охлаждения помещений возрастает на 1,5–2,0% при каждом повышении температуры воздуха на 0,6 °C. В условиях эффекта городского острова тепла (ГОТ) увеличение энергопотребления может достигать 5–10%, что влечет за собой существенные экономические издержки [49].

Б) Влияние ГОТ на увеличение загрязнения атмосферного воздуха

Повышенная температура воздуха может привести к увеличению загрязнения атмосферного воздуха вследствие:

- увеличения энергопотребления зданий;
- появления химических реакций в воздушной среде: под влиянием высоких температур происходит преобразование первичных загрязнителей воздуха во вторичные, более токсичные и опасные для здоровья людей;
- высокого атмосферного давления, слабого ветра и отсутствия осадков или их малого количества, которые приводят к «застою» загрязняющих веществ над уровнем земли.

Сгорание ископаемого топлива сопровождается выбросом в атмосферу ряда загрязняющих веществ, включая диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), оксид углерода (CO), ртуть (Hg) и диоксид углерода (CO_2). Данные соединения провоцируют образование кислотных осадков и усиливают парниковый эффект, что ведет к глобальному потеплению [50, 51, 52, 53].

Упомянутые поллютанты оказывают негативное воздействие на здоровье человека и приводят к существенному ухудшению качества атмосферного воздуха, что проявляется в формировании приземного озона (смога) и увеличении частоты кислотных дождей. Интенсивное использование ископаемого топлива в энергетическом секторе увеличивает эмиссию парниковых газов, прежде всего CO_2, являющегося ключевым фактором глобальных климатических изменений [54, 55, 56, 57].

Более того, аккумуляция данных загрязняющих веществ в пределах городского острова тепла (ГОТ) в сочетании с повышенным температурным фоном создает синергетический эффект, усиливающий неблагоприятное воздействие на городскую экосистему и здоровье населения.

В) Влияние ГОТ на качество воды

Нагрев искусственных горизонтальных поверхностей (тротуаров, кровель зданий и т.д.) приводит к существенному повышению температуры ливневых стоков, что создает благоприятные условия для пролиферации патогенных бактерий [58]. Согласно данным исследований, при температуре дорожного покрытия 38 °C температура дождевой воды может возрасти с 21 °C до 35 °C и более. Поступление таких нагретых вод в водоемы (ручьи, реки, озера) стимулирует размножение болезнетворных микроорганизмов. Тепловое загрязнение пресноводных экосистем в результате стока ливневых вод может вызвать критический термический стресс, приводящий к гибели водной биоты.

Повышение температуры атмосферного воздуха оказывает выраженное негативное воздействие на здоровье населения, проявляющееся в виде общего недомогания, респираторных нарушений, судорог, тепловых и солнечных ударов. В совокупности данные факторы приводят к развитию теплового стресса и увеличению показателей смертности, ассоциированной с воздействием высоких температур.

1.2. Формирование теплового баланса на деятельной поверхности урбанизированных территорий

Локальный климат города может быть охарактеризован как результат непрерывного взаимодействия энергетических потоков, модулируемых морфологией городской поверхности и физико-химическими свойствами её элементов [59]. Ряд исследований был направлен на анализ пространственно-временной динамики температур с целью выявления механизмов формирования городского острова тепла (ГОТ) и изучения его суточного хода [1].

В настоящее время в крупнейших городах наблюдается устойчивая тенденция к существенному росту температуры воздуха и поверхностей по сравнению с прилегающими сельскими (фоновыми) территориями [60]. Функционирование ГОТ характеризуется наличием выраженных суточных и сезонных циклов. Суточные колебания температуры в пределах ГОТ определяются преимущественно уровнем инсоляции, а также способностью городских поверхностей отражать, аккумулировать и переизлучать сол-

нечную энергию. Сезонная изменчивость, в свою очередь, обусловлена влиянием макроклиматических факторов, таких как скорость ветра, степень облачности и продолжительность светового дня [1].

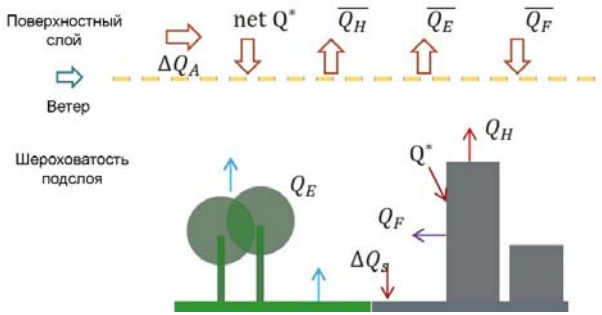


Рисунок 1.6. Тепловые потоки в разных слоях городской атмосферы [61]

Морфология городской поверхности влияет на структуру турбулентности и формирование среднего профиля ветра в городском пограничном слое. Степень устойчивости атмосферы и параметры турбулентного профиля обуславливают интенсивность тепло- и влагообмена между поверхностями элементов городской среды и приземным слоем атмосферы [62] (рис. 1.1). Процессы энергообмена между поверхностями и воздухом в условиях городской застройки могут быть описаны с использованием метода «объемного усреднения» [63] (рис. 1.6).

Энергетический или тепловой баланс поверхности в городской среде определяется по формуле [64, 65]:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \text{ , (Вт/м}^2\text{)} \quad (1.1)$$

где, Q*— тепловой поток солнечной энергии, (Вт/м^2);

Q_F — антропогенный тепловой поток, (Вт/м^2);

Q_H — поток жары, (Вт/м^2);

Q_E — скрытый тепловой поток, (Вт/м^2);

ΔQ_S— тепловой поток чистой накопленной энергии, (Вт/м^2);

ΔQ_A— тепловой поток чистой энергии от адвекции, (Вт/м^2).

Ночью воздух в центре города обычно теплее, чем воздух в сельских районах, поэтому городской остров тепла определяется разницей температур между городом и сельскими районами ($\Delta T_{u\text{-}r}$), которая появляется за счет разницы в энергетическом (тепловом) балансе.

В трудах Оке. Т. Р (англ. - Oke. T.R.) по исследованию климата в пограничном слое были упомянуты две эмпирические зависимости между интенсивностью городского острова тепла и отношением высоты здания к расстоянию (H/B) или функцией элемента неба [63]:

$$\Delta T_{u\text{-}r} = 7{,}54 + 3{,}97 * \ln\left(\frac{H}{B}\right) \quad (1.2)$$

$$\Delta T_{u\text{-}r} = 15{,}27 - 13{,}88 * \Psi_s \quad (1.3)$$

$$\Psi_s = \cos\left(\operatorname{atan}\left(\frac{2H}{B}\right)\right) \quad (1.4)$$

где Ψ_s- коэффициент обзора неба.

1.3. Влияние планировки городов на формирование эффекта ГОТ. Роль системы озеленения в формировании городской среды

1.3.1. Влияние планировки городов на формирование ГОТ

Формированию эффекта городского острова тепла способствует большое количество факторов. Одним из наиболее важных факторов является городское планирование территории. Аспекты городского планирования связаны как с внутренними факторами, такими как размер города, численность населения, плотность застройки и землепользование, так и с внешними, такими как климат, погода и времена года.

Геометрия застройки может значительно повлиять на тепловой баланс города. Так, например, здания, расположенные на пути воздушного потока, приводят к снижению скорости ветра и повышению температуры воздуха на данной территории. Поэтому необходимо обеспечивать достаточное пространство между зданиями для циркуляции воздуха. Вместе с тем большую роль играют свойства ограждающих конструкций зданий. Так, например, панорамное остекление высотных зданий, как правило, приводит к повышению температуры вблизи них и внутри помещений [66, 67, 2].

В городах на месте некогда озеленённых природных территорий возводятся непроницаемые искусственные поверхности (тротуары, дороги), здания и сооружения, что приводит к сокращению растительного покрова. Озеленённые территории способствуют охлаждению поверхности путём суммарного испарения влаги с поверхности листьев и почвы, благодаря чему происходит регулирование температуры земной поверхности. В сель-

ской местности доля озеленённых территорий и объектов значительно выше, вследствие чего испаряется большее количество влаги, что позволяет сохранять прохладу воздуха в летний период.

В то же время для городских районов характерна большая площадь непроницаемых поверхностей, что обуславливает высокую скорость стока и низкую степень инфильтрации. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению количества влаги, доступной для испарения, по сравнению с естественным почвенным покровом, и способствует повышению температуры поверхности и воздуха в городе. Способом частичного решения проблемы ГОТ может стать расширение озеленения городских территорий [1].

Энергия солнечного излучения состоит из инфракрасных лучей (52%), видимого света (43%) и ультрафиолетовых лучей (5%). Солнечное излучение в значительной степени участвует в процессе формирования ГОТ.

Кроме того, на формирование ГОТ влияет показатель альбедо. Альбедо — это коэффициент отражения падающей солнечной энергии поверхностью. Этот показатель зависит от расположения поверхностей, их материала и цвета. Светлые материалы обладают низкой поглощательной способностью и высоким альбедо. Материалы тёмного цвета, напротив, обладают высокой поглощательной способностью в дневное время и интенсивно отдают (излучают) накопленное тепло в ночное время (формула 1.5). Как правило, в городских районах тёмные поверхности имеют низкое альбедо [68].

$$\text{Альбедо} = \frac{\textit{Отраженная энергия}}{\textit{Падающая энергия}} \qquad (1.5)$$

Тепловое излучение также является важным фактором формирования ГОТ. Поверхности с высоким коэффициентом излучения более эффективно отдают тепло в окружающую среду, что способствует их более быстрому охлаждению. Большинство строительных материалов, за исключением металлов, обладают высоким коэффициентом излучения. Теплорадиационные свойства различных материалов приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Радиационные свойства некоторых материалов [63]

Материал	Альбедо (α)	Излучательная способность (ε)
Асфальт	0.05-0.20	0.95
Бетон	0.10-0.35	0.71-0.91
Городские районы	0.10-0.27	0.85-0.96
Почва	0.05-0.40	0.98-0.90
Зелёные насаждения	0.16-0.26	0.90-0.95

1.3.2. Роль системы озеленения в формировании городской среды

Зелёные насаждения играют важную роль в формировании городской среды [69, 70, 19]. В процессе урбанизации природная окружающая среда претерпевает значительные изменения. Так, например, площадь озеленения постепенно сокращается, особенно в крупных городах [71]. Изменение климата в совокупности с загрязнением окружающей среды **наносит** ущерб здоровью человека, в том числе и психологическому [72, 73].

Для защиты окружающей среды и улучшения качества жизненного пространства, в дополнение к мерам по сокращению источников загрязнения, чрезвычайно важно развитие системы зелёных насаждений [74, 75, 76].

Система зелёных насаждений выполняет следующие функции:

– климатическая: озеленение способствует улучшению микроклимата, поскольку растения способны удерживать влагу, постепенно испаряя её, что создаёт комфортные условия для жизнедеятельности организмов, а также влияет на скорость ветра и вентиляцию (рисунок 1.7);

– экологическая: системы озеленения защищают окружающую среду, поглощая CO_2 и выделяя O_2, снижая концентрацию вредных газов и пыли в воздухе. В пригородных зонах зелёные насаждения эффективно противодействуют эрозии почв и регулируют уровень грунтовых вод (рисунок 1.8).

Кроме того, зелёные насаждения способствуют снижению уровня шумового загрязнения в центре города.

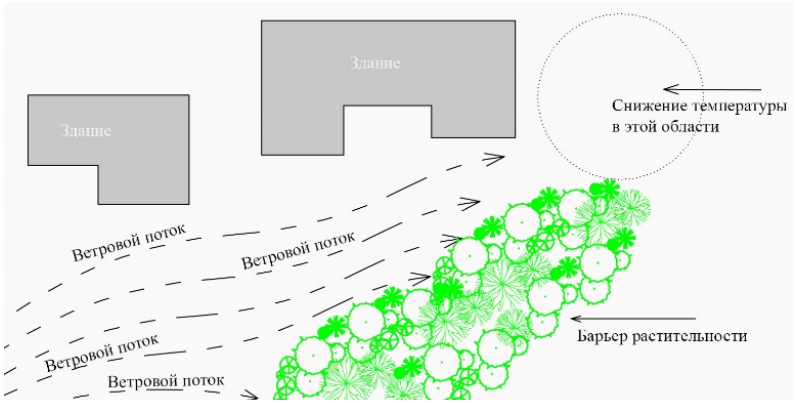


Рисунок 1.7. Схема элементов (ландшафт, здания и сооружения), выступающих в качестве барьера для ветра

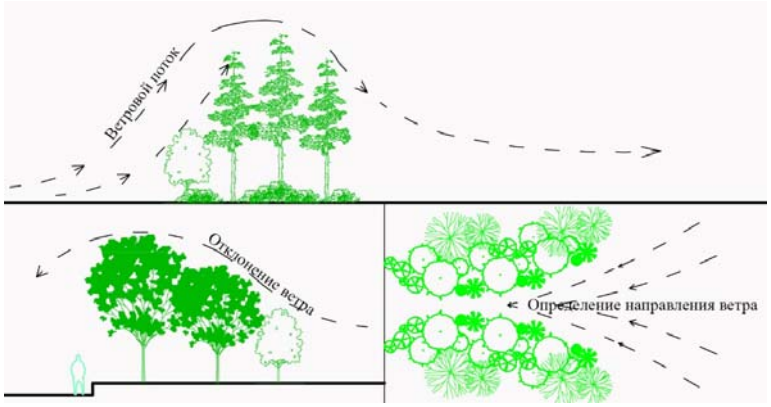


Рисунок 1.8. Схема объектов озеленения (деревья и кустарники), влияющих на направление и скорость ветра

Городская система озеленения играет важную роль в архитектуре и ландшафтном дизайне. Городская растительность, помимо практической функции, **выполняет** и эстетическую. Более того, зелёные насаждения в совокупности с объектами архитектурного наследия и особенностями ландшафта формируют эстетическую ценность городской среды [77, 78]. Помимо этого, размещение объектов озеленения, особенно деревьев, в различных частях города способствует социальной активности населения (например, развитию туризма) [79].

Площадь зелёных насаждений в определённом районе города должна быть пропорциональна плотности населения данной территории. Каждая территория имеет свои особенности организации системы озеленения, которые при этом должны соответствовать санитарно-гигиеническим и эстетическим требованиям.

Согласно нормативно-технической документации Вьетнама в области строительства (TCXDVN 362: 2005) «Планировка зелёных насаждений общего пользования в городских районах — Стандарты проектирования», предусматриваются нормы озеленения в зависимости от размера города (табл. 1.4-1.7). Под нормой озеленения подразумевается площадь озеленённых территорий общего пользования, приходящаяся на одного жителя.

Таблица 1.4

Норма зелёных насаждений общего пользования по типам городов

Тип города	Численность населения, чел	Площадь озеленения, $м^2$/чел
Крупнейшие	Больше или равно 1.500.000	12-15
I и II	От 250.000 до менее 1.500.000	10-12
III и IV	От 50.000 до менее 250.000	9-11
V	От 4.000 до менее 50.000	8-10

Таблица 1.5

Норма зелёных насаждений общегородских парков, садов и скверов

Тип города	Численность населения, чел	Площадь озеленения, $м^2$/чел
Крупнейшие	Больше или равно 1.500.000	7-9
I и II	От 250.000 до менее 1.500.000	6-7,5
III и IV	От 50.000 до менее 250.000	5-7
V	От 4.000 до менее 50.000	4-6

Таблица 1.6

Норма зелёных насаждений общегородских цветников

Тип города	Численность населения, чел	Площадь озеленения, $м^2$/чел
Крупнейшие	Больше или равно 1.500.000	3-3,6
I и II	От 250.000 до менее 1.500.000	2,5-2,8
III и IV	От 50.000 до менее 250.000	2-2,2
V	От 4.000 до менее 50.000	1,6-1,8

Таблица 1.7

Норма озеленения улиц

Тип города	Численность населения, чел	Площадь озеленения, $м^2$/чел
Крупнейшие	Больше или равно 1.500.000	1,7 -,2,0
I и II	От 250.000 до менее 1.500.000	1,9 – 2,2
III и IV	От 50.000 до менее 250.000	2,0 – 2,3
V	От 4.000 до менее 50.000	2,0 – 2,5

Площадь зелёных насаждений общего пользования должна соответствовать регламентированным значениям. Организация системы озеленения зависит от природно-климатических условий, особенностей ландшафта, санитарных норм и архитектурного облика пространства.

Организации, занимающиеся ландшафтным дизайном, должны проектировать систему озеленения с учётом существующего рельефа, гармонично сочетая элементы озеленения с водными объектами и окружающей средой. При этом следует использовать различные типы насаждений (разнообразие пород деревьев, кустарников, травянистых растений и цветов), объединяя их в целостную художественную композицию.

Система озеленения улиц должна быть спроектирована таким образом, чтобы, помимо декоративных функций, она обеспечивала зонирование (например, разделение проезжей части и тротуара), выполняла пылезащитную и шумоизоляционную функции, способствовала улучшению микроклимата и формированию эстетичного городского ландшафта.

В жилых и общественных районах, промышленных парках, туристических зонах и вдоль дорожной сети система зелёных насаждений, в особенности деревья, должна быть грамотно организована. В исторических частях города, в связи с высокой плотностью застройки и дефицитом свободных территорий, следует принимать меры по увеличению площади озеленения путём создания локальных зеленых зон на прилегающих территориях. При расширении или реновации исторической застройки по возможности необходимо предусматривать организацию небольших цветников и рекреационных площадок.

При обновлении исторических городских территорий, разработке генерального плана города, а также при планировании жилых районов необходимо определить оптимальные способы организации озеленения при максимально возможном сохранении существующих насаждений.

Система озеленения должна быть интегрирована с существующей технической инфраструктурой и системой освещения, исходя из типа застройки.

При посадке растений в парках необходимо соблюдать следующие дистанции: кустарники и деревья должны располагаться на расстоянии от 2 до 5 метров от стен зданий, от 3 до 5 метров от трамвайных путей, от 1,5 до 2 метров от тротуаров и дорог, в 4 метрах от границ электрических сетей и от 1 до 2 метров от подземных инженерных коммуникаций.

1.4. Проблема теплового стресса на деятельной поверхности города городов

Стремительная урбанизация обычно сопровождается значительным увеличением плотности застройки и сокращением площади растительного покрова в масштабах всего города. Одновременно с этим город нагревается за счет антропогенного тепла, выделяемого транспортными средствами и промышленным оборудованием, что приводит к повышению температуры воздуха, охватывающему всю городскую территорию. Ежедневные выбросы транспортных средств вносят существенный вклад в рост городской температуры. Бетонные поверхности и непроницаемые асфальтобетонные покрытия, из которых состоит большая часть городской инфраструктуры, существенно отличаются по своим теплофизическим свойствам от природных поверхностей. Они поглощают значительный объем солнечного излучения, что приводит к их быстрому нагреву. В то же время плотная

высотная застройка создает барьеры, затрудняющие циркуляцию свежего воздуха, что дополнительно усиливает перегрев городской среды.

На рисунке 1.7 представлена динамика среднегодовой температуры воздуха по данным четырех метеорологических станций Ханоя, демонстрирующая устойчивую тенденцию к повышению в период с 1999 по 2016 годы. На станции Ланг за 17 лет температура выросла на 0,93 °C — с 24,3 °C в 1999 году до 25,23 °C в 2016 году, что в среднем составляет 0,052 °C в год. На станции Ха Донг за тот же период зафиксирован рост на 1,18 °C (с 23,61 °C в 1999 году до 24,79 °C в 2016 году), что соответствует среднему приросту 0,066 °C в год. Аналогично, температура на станции Сон Тай за 17 лет увеличилась на 0,82 °C — с 23,72 °C в 1999 году до 24,53 °C в 2016 году (в среднем 0,045 °C в год). Наконец, на станции Ба Ви за 11 лет наблюдений температура повысилась на 0,63 °C — с 23,32 °C в 1999 году до 23,95 °C в 2010 году, что составляет в среднем 0,057 °C в год.

Таким образом, максимальный рост температуры зафиксирован на станции Ха Донг, что свидетельствует о наиболее интенсивных климатических изменениях в данном районе. Это объясняется тем, что после 2008 года Ха Донг был преобразован в городской район, что сопровождалось стремительным ростом населения и интенсивным строительством. Данные антропогенные факторы стали основной предпосылкой значительного повышения температуры воздуха в этой местности. В то же время на станции Ба Ви зафиксирован самый медленный темп роста температуры, что обусловлено расположением станции в горной местности, вдали от городского центра.

На рисунке 1.8 представлена динамика усиления эффекта городского острова тепла в Ханое в период с 1999 по 2016 годы. За последние 17 лет разница в приросте температуры воздуха между двумя метеорологическими станциями — городской (Ланг) и сельской (Сон Тай) — составила 0,12 °C (прирост составил 0,58 °C для Сон Тай и 0,7 °C для Ланг соответственно). Таким образом, ежегодное увеличение разности температур составляет 0,0065 °C. Данный результат свидетельствует о том, что эффект городского острова тепла со временем интенсифицируется, что проявляется в более выраженном росте температуры воздуха в городских районах.

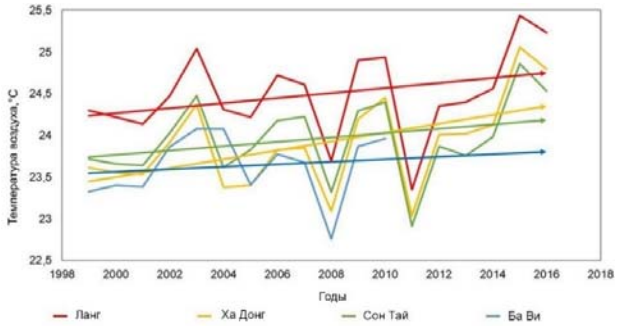


Рисунок 1.7. Среднегодовая температура воздуха (℃), зафиксированная четырьмя метеостанциями городов (Ланг, Ха Донг, Сон Тай в период 1999-2016гг. и метеостанция Ба Ви в период 1999-2010гг.).

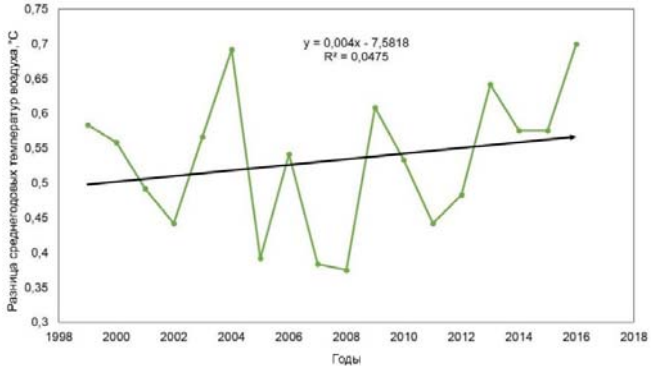


Рисунок 1.8. Сравнение колебаний среднегодовой температуры воздуха (°C) между метеостанциями Ланг и Сон Тай с 1999 по 2016 гг.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕЯТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.1. Краткая история развития города Ханоя

На сегодняшний день столица Вьетнама, город Ханой, с численностью населения примерно 7,24 млн человек и средней плотностью 2 239 чел/км² (по состоянию на 2018 год), занимает площадь около 3345 км². Согласно математическим прогнозам, к 2030 году численность населения города увеличится до 10 млн человек, а к 2050 году — до 13 млн человек. Присоединение прилегающих территорий в 2008 году привело к увеличению площади города более чем в три раза. В настоящее время административно-территориальное деление города включает следующие районы: Лонгбьен, Хоанмай, Тэйхо, Донгда, Тханьсуан, Хоанкием, Хайбачунг, Бадинь, Каузай и Хадонг (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1. Схема подразделения городов на районы [80]

В 1954 году площадь города составляла 152 км², а численность населения — 53 тыс. человек. К 1961 году площадь увеличилась до 584 км², при этом численность населения достигла 91 тыс. человек. В 1978 году было принято решение о расширении столицы Вьетнама, в результате чего площадь была увеличена до 2136 км², а численность населения достигла 2,5 млн человек [81]. Однако в 1991 году границы города были изменены, в связи с чем площадь территории сократилась до 924 км² при населении около 2 млн человек. Относительно низкие темпы роста численности населения в предшествующий период были обусловлены сдерживанием процесса урбанизации и экономическими трудностями 1980-х годов после войны 1964–1975 гг. во Вьетнаме.

В 1990-х годах пригородные районы были включены в состав города, и численность населения увеличилась до 2,672 млн человек [82, 83]. После последнего расширения границ в августе 2008 года численность населения города составила 6,323 млн человек, и он занял 17-е место в списке крупнейших столиц мира [84]. В настоящее время значительную часть населения составляют мигранты из соседних провинций (таблица 2.1; рисунок 2.2).

Таблица 2.1

Динамика изменения численности населения, площади территории и плотности населения в Ханое

Год	Население, чел	Площадь, $км^2$	Плотность населения, чел / $км^2$
1954	53.000	152	348
1961	91.000	584	155
1978	2.500.000	2.136	1.170
1991	2.000.000	924	2.164
1999	2.672.000	924	2.891
2001	2.812.000	924	3.043
2008	6.323.000	3.344	1.928
2011	6.699.600	3.328,9	2.013
2019	8.054.000	3.358,6	2.410

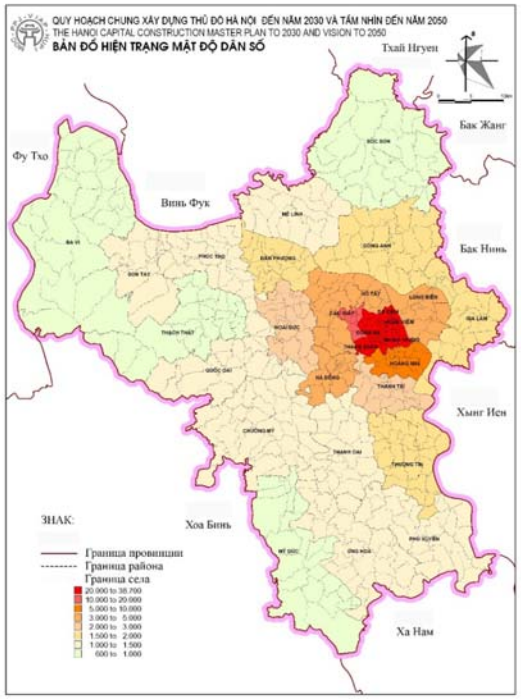


Рисунок 2.2. Плотность населения

Развитие города городов происходит в соответствии с моделью городов-кластеров, для которой характерно расположение небольших городов – спутников вокруг центрального города. Такая модель представлена в ряде развитых стран мира. Для построения данной модели необходимо следовать следующим принципам:

– создание такой городской системы, которая включает центральный город и окружающие его небольшие города-спутники с соответствующим транспортным сообщением и технической инфраструктурой;

– развитие системы городского транспорта, отвечающей требованиям безопасности, технологичности и соблюдения бесперебойной работы всех транспортных средств.

В настоящее время в связи с динамичным развитием правительством Вьетнама была принята к реализации концепция «зелёного города», основанная на принципах «устойчивого развития». Данная концепция была

предложена в 2011 году в рамках конференции «Развитие зелёного города» в Ханое. Вместе с тем был запущен проект «Развитие зелёного города», в котором приняли участие как отечественные, так и зарубежные специалисты. Особое внимание этому проекту было уделено после принятия Киотского протокола, который касался изменений климата, вызванных влиянием деятельности человека.

2.2. Природно-климатические условия Ханоя

А) Географическое положение

Территория города расположена между 20°53' и 21°23' северной широты и между 105°44' и 106°02' восточной долготы [85]. С севера к Ханою примыкают провинции Тхай-Нгуен и Винь-Фук, с юга — Ханам и Хоабинь, с востока — Бак-Ззянг, Бак-Нинь и Хунг-Йен, с запада — Футхо. После расширения границ города его площадь составила 334 470,02 га, что в три раза превышает прежние показатели [86, 85]. Ханой расположен на сложном рельефе с постепенным понижением с севера на юг и с запада на восток; при этом равнинная местность занимает 75% всей территории города. Средняя высота территории города над уровнем моря составляет от 5 до 20 метров [85].

Б) Тепловой режим

Город Ханой (21°02′ с. ш., 105°50′ в. д.) является одним из крупнейших городов Вьетнама. Он расположен на сложном рельефе, понижающемся с севера на юг и с запада на восток, при этом около 75% территории города занимает дельта реки [85]. Средняя высота ландшафта города над уровнем моря составляет 5–20 метров. Климат региона характеризуется жарким влажным летом и холодной зимой. Тёплый сезон длится с апреля по октябрь, преобладающее направление ветра в этот период — юго-восточное [85]. Средняя температура воздуха составляет от 24 до 29 °C (приложение А; рисунок 2.3). С июля по сентябрь в тёплое время года наблюдается период дождей [85]. Среднегодовое количество осадков составляет 1605,2 мм. Холодный сезон начинается в ноябре и заканчивается в марте, преобладающее направление ветра — северо-восточное. Средняя температура воздуха в этот период составляет примерно от 15 до 22 °C, а средняя влажность воздуха достигает 83% [85]. Холодный сезон характеризуется малым количеством осадков. Ежегодно в период с июля по сен-

тябрь наблюдаются штормы с сильным ветром, скорость которого по шкале Бофорта достигает 8–10, а иногда и 12 баллов [85].

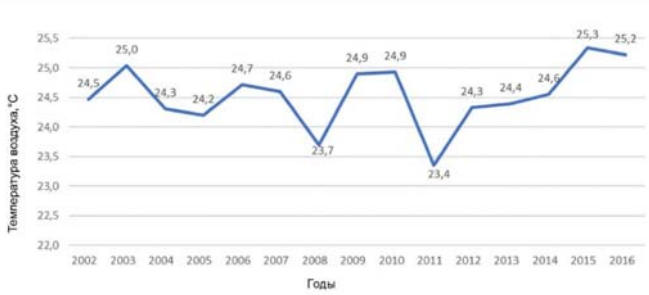


Рисунок 2.3. График средних значений температуры воздуха за 12 месяцев, станция «Ланг», г. Ханой

В) Режим осадков

Субэкваториальный муссонный климат Ханоя обуславливает выраженную сезонность с существенными различиями между тёплым и холодным периодами, что в значительной степени определяется режимом атмосферных осадков. В тёплый сезон (май–сентябрь) наблюдается резкое увеличение количества осадков по сравнению с сухим периодом (ноябрь–март). Среднегодовая норма осадков в Ханое составляет 1655 мм; при этом в наиболее влажные месяцы их объем может достигать 550,5 мм, что обуславливает необходимость реализации комплекса мер по защите городской территории от ливневых паводков и наводнений.

В приложении Б представлены данные о ежемесячном распределении осадков в Ханое и их среднегодовом объеме. Анализ данных свидетельствует о неравномерности распределения осадков по месяцам, что является характерной чертой климата Вьетнама в целом. Максимальные значения осадков выпадают в период с мая по сентябрь и составляют 263,7 мм (рисунок 2.4).

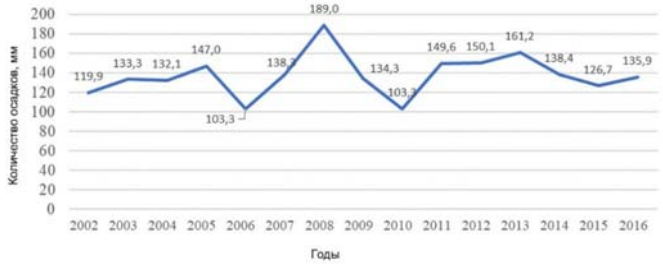


Рисунок 2.4. График средних значений количества осадков за 12 месяцев, станция «Ланг», г. Ханой

Г) Влажность воздуха

На территории Вьетнама на протяжении всего года наблюдается стабильно высокая относительная влажность воздуха (рисунок 2.5), что объясняется влиянием воздушных масс Южно-Китайского моря. Благодаря значительной протяжённости страны вдоль побережья, высокий уровень влажности характерен для большинства её регионов. В тёплый период года данный показатель может достигать 90–95% в течение суток. Динамика среднемесячной и минимальной относительной влажности воздуха приведена в приложении В.

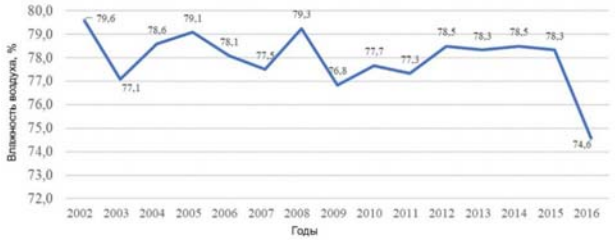


Рисунок 2.5. График средних значений влажности воздуха за 12 месяцев, станция «Ланг», г. Ханой

Д) Ветровой режим

Ханой расположен в северной части Вьетнама, для которой с октября по март характерны северные и северо-восточные ветры, а с мая по сентябрь – южные, западные и юго-западные. Климат данного региона условно делится на зимний (ноябрь – март) и летний (май – сентябрь) сезоны,

разделенные переходными периодами в октябре и апреле. В зимний период северные регионы Вьетнама подвержены влиянию холодных воздушных масс (как сухих, так и влажных). В летний же сезон преобладают тёплые и влажные воздушные массы, определяющие микроклимат города. В связи с этим при проектировании зданий в северных районах страны приоритетной считается их ориентация на юг или юго-восток.

Ветровой режим характеризуется скоростью и частотой направлений ветра. Соответствующие данные по городу Ханоя за 2011–2016 гг. приведены в Приложении Г. Преобладающее юго-восточное направление ветра способствует переносу тёплых воздушных масс, что может вызвать перегрев внутренних помещений; данный фактор необходимо учитывать при архитектурном проектировании. Кроме того, следует предусмотреть конструктивные меры по защите зданий от воздействия холодных северо-восточных ветров в зимний период.

Е) Солнечная радиация

Высокая интенсивность солнечного излучения обусловлена географическим положением города в северном субэкваториальном поясе (105,51° в. д., 21,02° с. ш.). В летний период солнечные лучи падают под углом, близким к вертикальному, а интенсивность радиации достигает 908 Вт/м^2. В зимний период данный показатель может достигать 804 Вт/м^2.

Высокая интенсивность солнечной радиации обусловлена расположением городов в северном субэкваториальном поясе (105,51° восточной долготы, 21,02° северной широты). В летний период солнечные лучи преимущественно вертикальные, а интенсивность солнечной радиации достигает 908 Вт. В зимний период интенсивность солнечной радиации может достигать 804 Вт.

Высота полуденного солнца (угол между плоскостью горизонта и направлением падения лучей в 12:00) для города составляет 45,5° на 22 декабря и 92,5° на 22 июля (с переходом солнца в северную часть небосвода относительно зенита). В летний и зимний периоды доля рассеянного излучения (результата рассеяния солнечных лучей в атмосфере) может достигать 45–50% от суммарной солнечной радиации. Данные о продолжительности солнечного сияния в Ханое за 2002–2016 гг., полученные метеостанцией «Ланг», представлены в Приложении Д и на рисунке 2.6.

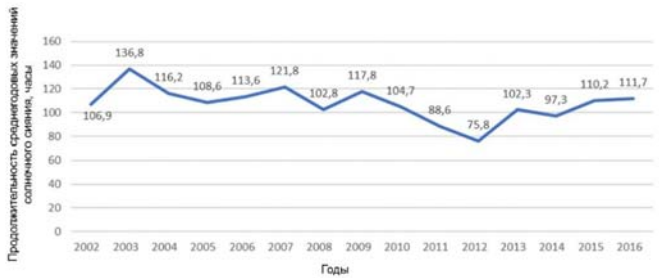


Рисунок 2.6. График среднегодовых значений продолжительности солнечного сияния, станция «Ланг», г. Ханой

2.3. Существующая планировочная структура городов и выбор объекта исследования

2.3.1. Размещение и характеристика промышленных зон в Ханое

Промышленные зоны, кластеры и предприятия города Ханоя имеют рассредоточенный характер. Часть этих объектов расположена в городской черте, в частности в районах Винь-Туй, Кау-Зяй и Хай-Ба-Чынг, в то время как остальные размещены вдоль основных магистралей и на въездах в город. В структуре города выделяются высокотехнологичный парк Хоа-Лак и 17 промышленных парков, общая площадь которых составляет 5 377,5 га (рис. 2.7; табл. 2.2) [2]

Таблица 2.2

Типы производств в Ханое

№	Тип производства	Площадь, га	Название района
1	2	3	4
1	Биологическая промышленность	200	Ты Лиэм
2	Производство товаров для дома	420	Шай Донг

[2] Источник: Согласно «Отчёту о статусе промышленных зон, промышленных кластеров и промышленных предприятий в Ханое» (Министерство промышленности и торговли (№:72/BC-CNĐP, 16/12/2008))

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3
Механическое производство, электронная промышленность	97,11	Жа Лам
Сельскохозяйственное производство и аквакультура (товарное рыбоводство)	302	Донг Ань
Машиностроение, электронная промышленность, пищевая промышленность, лёгкая промышленность, товары народного потребления	112	Тхыонг Тин
Машиностроение, электронная промышленность, пищевая промышленность, лёгкая промышленность, товары народного потребления	670	Чыонг Мй
Машиностроение, электронная промышленность, пищевая промышленность, лёгкая промышленность, товары народного потребления	155	Тхач Тхат
Сельскохозяйственное производство и аквакультура (товарное рыбоводство)	40	Лонг Биен
Производство товаров для дома	260,87	Ты Лиэм
Сельскохозяйственное производство и аквакультура (товарное рыбоводство)	100	Шок Шон
Механическое производство, производство автомобильных деталей, электрооборудования, строительных материалов	55	Шок Шон
Механическое производство, производство автомобильных деталей, электрооборудования, строительных материалов	470	Донг Ань
Механическая, электронная и лёгкая промышленность, товары народного потребления		Хоанг Маи
Сельскохозяйственное производство и аквакультура (товарное рыбоводство)	401	Тхыонг Тин
Сельскохозяйственное производство и аквакультура (товарное рыбоводство)	17000	Тхань Чи
Сельскохозяйственное производство и аквакультура (товарное рыбоводство)		Хоаи Дык
Механическая, электронная и лёгкая промышленность, товары народного потребления		Тхань Оаи

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3
Сельскохозяйственное производство и аквакультура (товарное рыбоводство)	353	Жа Лам
Производство строительных материалов	551,62	Фу Суен
Механическая, электронная и лёгкая промышленность, товары народного потребления	66,54	Шок Шон
Механическая, электронная и лёгкая промышленность, товары народного потребления	40	Ты Лиэм
Механическая, электронная и лёгкая промышленность, товары народного потребления	63	Жа Лам
Сельскохозяйственное производство и аквакультура (товарное рыбоводство)	20	Жа Лам
Высокотехнологичное производство	306,72	Тхач Тхат
Высокотехнологичное производство	1586	Тхач Тхат
Лесное производство и производство строительных материалов	28	Ты Лиэм
Швейное производство	18,5	Донг Ань
Механическая, электронная и лёгкая промышленность, товары народного потребления	9,3	Хай Ба Чынг

Электроэнергетика играет ключевую роль в энергетическом секторе как Ханоя, так и в глобальном масштабе. За последние десятилетия в столице Вьетнама произошел значительный прорыв в развитии и расширении данной отрасли. Энергоснабжение Ханоя обеспечивается преимущественно за счет работы гидроэлектростанций (ГЭС) и теплоэлектростанций (ТЭС). В частности, с 1988 года функционирует ГЭС в провинции Хоабинь (77 км от города) установленной мощностью 1920 МВт, которая имеет стратегическое значение для энергосистемы страны и города Ханоя. Вторая по значимости ГЭС расположена в провинции Туенкуанг (130 км от города) и состоит из 3 блоков общей мощностью 342 МВт. Третья ГЭС, построенная в 1972 году в Тхак-Ба (180 км от города), имеет 3 блока мощностью 120 МВт. Кроме того, в 1984 и 2003 годах в районе Фа-Лай (56 км от города) были введены в эксплуатацию две ТЭС мощностью 440 МВт и 600 МВт соответственно. В 2007 году мощность ТЭС в Уонг-Би (149 км от города) была увеличена со 105 МВт до 300 МВт.

Рисунок 2.7. Схема размещения промышленных зон в Ханое.

Данная станция в основном обеспечивает электроэнергией город Хайфон и провинцию Куаннинь, в то время как доля поставок в Ханой остается незначительной. Также следует упомянуть ТЭС Нин-Бинь, запущенную в 1974 году с мощностью 100 МВт, модернизация которой предполагает увеличение мощности до 300 МВт. Наряду с электроэнергетикой, в Ханое активно развивается перерабатывающая промышленность. В окрестностях города сосредоточено большое количество малых и средних предприятий горнодобывающего и энергетического секторов. Схема расположения электрических подстанций на территории города приведена на рисунке 2.8, а количественные показатели их мощности представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Подстанции в Ханое, данные 2006 года [3]

№	Наименование	Напряжение (кВ)	Мощность (МВт)	Рмакс. (МВт)	Рмин. (МВт)
1	Ха Донг	220/110	2x250	394	207
2	Май Донг	220/110	2x250	316	142
3	Чиэм	220/110	2x250	338	258
4	Шок Шон	220/110	2x125	114	90
5	Фо Ной	220/110	250+125	224	122
6	Суан Май	220/110	1x125	46	25
	Итого:		2.125		

Рисунок 2.8. Схема расположения электрических подстанций в Ханое.

[3] Источник: Институт Энергетики Вьетнама

2.3.2. Характеристика застройки жилых и общественных зон

В конце 1950-х годов центральная часть города охватывала площадь около 70 км², при этом ключевыми административными и культурными центрами являлись районы Ба-Динь и Хоан-Кием к югу от озера Хо-Тай. В 1960-х годах началось расширение южных, а впоследствии и северо-восточных окраин города (районы За-Лам и Донг-Ань). В тот период административно-территориальное деление Ханоя включало 4 района и 4 квартала общей площадью порядка 200 км². До середины XX века численность населения не превышала 1 млн человек, однако с 1960-х годов темпы урбанизации существенно возросли, и к 1978 году население достигло 2,5 млн человек. Площадь центрального ядра города к тому времени увеличилась до 102 км².

Жилая застройка Ханоя отличается архитектурным разнообразием: от традиционных построек Старого квартала до зданий в стиле французского колониализма в историческом Французском квартале.

Жилищный фонд города можно классифицировать по следующим типам:

- Традиционная застройка: сосредоточена в Старом квартале; здания возведены с начала XIX века. Характеризуется крайне высокой плотностью застройки (до 75–86%), острым дефицитом зеленых насаждений и общественных пространств.

- Малоэтажная застройка: представлена преимущественно в районах Хай-Ба-Чынг, Донг-Да, Ба-Динь и Тхань-Шуан. Основными проблемами являются износ технической инфраструктуры, отсутствие рекреационных зон и низкие эксплуатационные характеристики жилья.

- Среднеэтажная застройка (до 6 этажей): представлена в районах Ким-Лен, Чунг-Ты, Занг-Во, Тхань-Конг, Хыонг-Туонг, Ким-Занг, Тхань-Шуан и Нгиа-До. Данный фонд в основном сформирован в 70–80-х годах XX века (секционный тип зданий). Для этого типа жилья характерны высокая плотность застройки, высокая влажность, а также деградация конструкций (осадка фундамента, растрескивание стен).

- Социальное жилье: преимущественно располагается вблизи промышленных зон и предназначено для рабочих и малообеспеченных групп населения.

Согласно данным за 2007 год, удельная площадь на одного жителя в центральном районе города составляла 7,5 м², в пригородной зоне — 15 м², а в сельской местности — 18 м².

На сегодняшний день городская инфраструктура находится в состоянии перегрузки, а темпы жилищного строительства не соответствуют динамике развития города и потребностям в техническом и социальном обеспечении (рисунок 2.9).

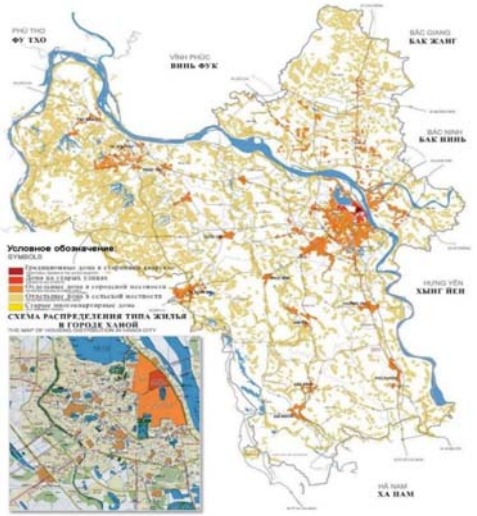


Рисунок 2.9. Современное состояние застройки в Ханое.

2.3.3. Современное состояние автотранспортной системы города

Ханой представляет собой ключевой транспортный узел страны, через который проходят основные пассажиро- и грузопотоки (таблица 2.4). Структура транспортной сети города базируется на системе магистральных колец, в то время как внутрирайонные связи организованы по сетчатому принципу (в виде сетки).

Таблица 2.4

Автодорожный транспорт городов[4]

№	Вид дороги	Длина, (км)	Ширина, кол-во полос движения	Плотность, (км/км^2)
1	Национальная автомагистраль	299,5	2-4	0,10
2	Уличная сеть	1.349,0	2-6	0,40
3	Районные дороги	2.450,0	1-3	0,74
	Итого:	4.098,5		1,24

Значительный рост численности населения города (превысивший 8 млн человек к 2019 году) обусловил необходимость расширения и модернизации его транспортной системы.

В настоящее время транспортная связность крупнейших городов Вьетнама обеспечивается сетью магистральных автомобильных дорог большой протяжённости, в число которых входят национальные трассы №1A, №2, №3, №5, №6, №18 и №32.

Так, автодороги №5 и №18 связывают Ханой с северо-восточными регионами страны, включая международные и региональные морские порты Хайфон и Кай Лан. Северная национальная трасса №1A соединяет столицу с городом Лангшон, расположенным на границе с Китаем. Проектирование данной трассы было направлено на снижение нагрузки на южную национальную магистраль Фап Ван – КауЖе, введенную в эксплуатацию в 2002 году. На сегодняшний день трасса №1A является главной транспортной артерией Вьетнама, протянувшейся от Лангшона до Камау.

Национальная автомагистраль №6 обеспечивает связь Ханоя с северо-западной частью страны и ведет к крупнейшей в Вьетнаме ГЭС в провинции Хоабинь (70 км от города). Протяжённость данного участка на территории города составляет 29,8 км.

Особо следует отметить высокую пропускную способность дорог №2 и №3. Национальная магистраль №2 примыкает к шоссе Северный Тханлонг — Ной Бай, которое связывает Ханой с западными и северо-западными провинциями; её протяжённость в черте города составляет около 5 км. Кроме того, для оптимизации пассажиропотоков была расширена

[4] Источник: Запись общего планирования в Ханое, стр. 188, 2010.

секция Шок Шон шоссе №3 (около 20 км в пределах города), соединяющая 3-е кольцевое кольцо Ханоя с провинцией Тай Нгуен [86].

Сообщение города с северо-западным регионом осуществляется по автодороге №32, протяжённость которой на территории города составляет 55,5 км.

Анализируя текущее состояние внешних автомобильных связей города, можно констатировать, что национальные автомагистрали перегружены, что препятствует полноценному транспортному взаимодействию Ханоя с другими городами Вьетнама. Отсутствие сформированных магистралей №4 и №5 создает серьезные затруднения для осуществления междугородних пассажирских и грузовых перевозок, что, в свою очередь, увеличивает нагрузку на внутреннюю транспортную сеть города (рисунок 2.10).

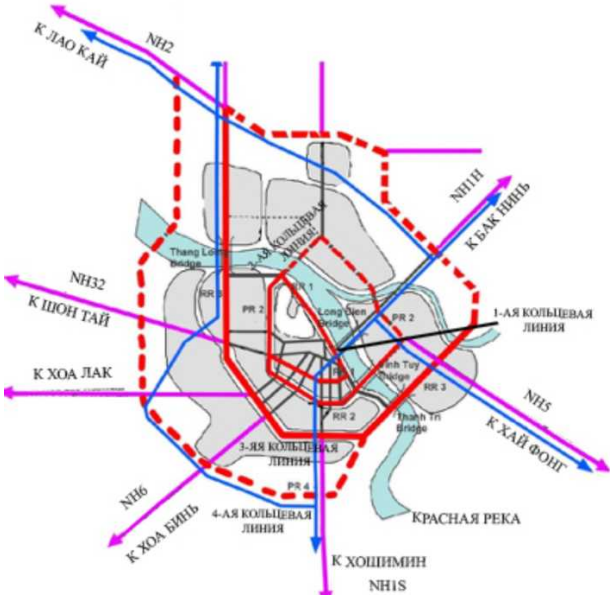


Рисунок 2.10. Транспортная сеть городов

Развитие и расширение существующих автомагистралей Вьетнама затруднено в связи с несоответствием предъявляемых требований к транспортному сообщению между городами с темпами строительных работ.

2.3.4. Система поверхностных водных объектов городов (рек, озёр и др.)

Система поверхностных водных объектов города играет ключевую роль в формировании городского ландшафта. Естественный сток поверхностных вод осуществляется через сеть рек и озёр, определяемую рельефом местности. Таким образом, данные водные объекты составляют основу естественной гидрографической сети города. Кроме того, они обеспечивают увлажнение воздуха и способствуют снижению температуры окружающей среды в тёплый период, что имеет особое значение для регионов субэкваториального, тропического и субтропического климатических поясов.

На территории города расположено 111 озёр общей площадью 2186 га. В исторической части города сосредоточено 24 озера площадью 765 га, что составляет 10% всей городской территории (рисунок 2.11). Интенсивная урбанизация стала основной причиной сокращения площади водных объектов, что отчетливо наблюдается в течение последних десятилетий.

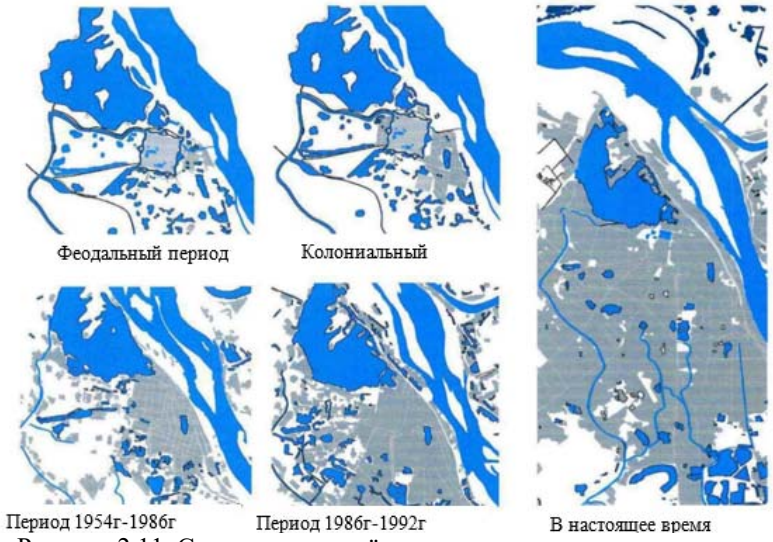


Рисунок 2.11. Система рек и озёр городов в различные периоды

Речная система города включает в себя реки То Лич, Лы, Сэт, Ким Нгыу, Дуонг и Красная (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Характеристика речной системы в Ханое [87]

Название реки	Длина, м	Ширина, м	Глубина, м
То Лич	13,7	30-40	3-4
Лы	5,8	20–30	2–4
Сэт	6,7	20–30	3–4
Ким Нгыу	10,8	20-30	3-4
Дуонг	25	300-450	4-6
Красная	34,5	1,5-4,6	4-8

Влияние урбанизации привело к обмелению этих рек и к их загрязнению сливами неочищенных производственных и бытовых сточных вод. Вследствие значительного загрязнения рек города вода уже не может использоваться в качестве питьевой воды. Загрязнение рек влияет не только на здоровье людей, но и способствует изменению ландшафта города. В результате паводков рек и озёр происходит загрязнение окружающей среды города. Во время сезона дождей (июль-август) в некоторых районах городов происходит затопление территории, которое может приводить к эпидемиям.

2.3.5. Система озеленения в Ханое

Природные лесные зоны и сельскохозяйственные угодья занимают 56,5% общей площади города. Система городского озеленения представлена насаждениями общего пользования (парки, скверы, бульвары), ограниченного пользования (зеленые зоны в жилых, промышленных и общественных секторах), а также насаждениями специального назначения (в частности, питомниками растений). Доля озеленения в Ханое составляет примерно 12% от всей городской территории, а удельный показатель площади озеленения на одного жителя достигает 2,4 м²/чел (рисунок 2.12).

Данный показатель существенно ниже, чем в других мировых мегаполисах: для сравнения, в Париже он составляет 10 м²/чел, а в Москве — 40 м²/чел.

Распределение зеленых насаждений в Ханое крайне неравномерно. Так, в историческом центре удельная площадь озеленения составляет всего 0,2 м²/чел при чрезвычайно высокой плотности населения (1000 чел/га) [8]. Средняя площадь парков на душу населения в городских районах составляет 0,9 м²/чел; в густонаселенных жилых районах, таких как Хоан Кием и Хай Ба Чынг, этот показатель равен 1,2 м²/чел и 1,7 м²/чел соответственно (таблица 2.6; рисунок 2.13) [8]. Суммарная площадь парков в четырех старых районах составляет 135 га (в среднем 1,3 м²/чел). Однако из-за интенсивной урбанизации в районах Донг Да, Тхань Суан и За Лам данный показатель остается критически низким — 0,05 м²/чел [8]. Таким образом, исторические районы города испытывают острый дефицит зеленых насаждений на душу населения, что особенно выражено в округах Донг Да, Кау Жай и Тхань Суан [8].

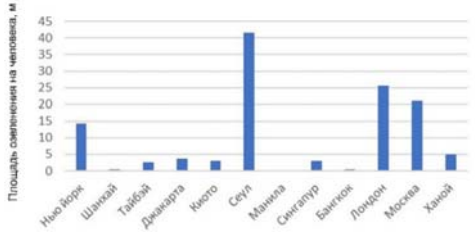


Рисунок 2.12. Показатель площади озеленения в расчете на 1 человека в крупнейших городах мира.

Рисунок 2.13. Система озеленения в Ханое

Таблица 2.6

Система озеленения в районах городов на 2000 год[5] [8]

№	Название района	Природная территория, га	Площадь зелёных насаждений, га	Общее количество деревьев, шт.	Средняя площадь озеленения	
					$м^2$/чел	$м^2$/семья
1	Ба Динь	925	50,36	58170	2,4	10,0
2	Хоан Кием	529	17,29	15483	1,0	3,3
3	Хай Ба Чынг	1,465	37,92	35503	1,1	4,9
4	Донг Да	996	48,75	61149	3,8	20,1
5	Кау Жай	1204	51,85	66690	3,8	20,1
6	Тай Хо	2400	77,52	119091	8,2	17,6
7	Тхань Суан	911	70,83	112512	4,4	19,1
8	Шок Шон	30651	2068,8	8224105	105,3	538,6
9	Донг Ань	18230	959,19	1663171	36,4	160,7
10	Жа Лам	17432	634,67	1068201	18,6	80,6
11	Ты Лием	7532	479,73	841055	24,2	112,1
12	Тхань Чй	9.822	396,63	691.601	17,4	81,4
	Итого:	80811,465	4893,54	12265130	226,6	1068,5

[5] Источник: Департамент местного самоуправления и жилищного строительства городов

2.4. Проведение натурных наблюдений с использованием технологии дистанционного зондирования (ДЗ). Методы исследований

2.4.1. Методика проведения натурных наблюдений

Температура земной поверхности является ключевым фактором формирования окружающей среды, определяющим интенсивность физических процессов в почве и атмосфере [88, 6]. Тем не менее, для высокоточного мониторинга температурных полей на обширных территориях требуется развертывание плотной сети метеорологических станций и их длительная эксплуатация [5, 89, 90]. Ограниченное количество наземных метеостанций в Ханое затрудняет детальное исследование распределения температуры поверхности города на основе традиционных методов измерений.

США занимают лидирующие позиции в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), используя данные спутниковой серии Landsat, запуск которой начался в 1972 году с аппарата Landsat-1 [7, 91]. Из восьми поколений спутников серии Landsat в настоящее время активными остаются Landsat-7 и Landsat-8 [92]. Начиная с моделей Landsat-4 и Landsat-5, оснащенных прибором TM (Thematic Mapper), и Landsat-7 с датчиком ETM+, обеспечивается получение высококачественных мультиспектральных данных. В частности, датчик ETM+ (Enhanced Thematic Mapper +) позволяет регистрировать тепловое излучение земной поверхности, что дает возможность формировать тепловизионные изображения с высоким пространственным разрешением [93]. Применение технологий дистанционного зондирования позволяет эффективно определять температуру поверхности в любой точке земного шара [94].

Материалы и методы анализа температуры поверхности земли в Ханое

Информационная база исследования включает в себя архив спутниковых снимков серии Landsat за три временных интервала (1999, 2009 и 2016 гг.), полученных из базы данных Геологической службы США (USGS). Подробные характеристики используемых снимков представлены в таблице 2.7. Помимо данных дистанционного зондирования, в работе применяются следующие материалы:

- топографическая карта района исследования;

- комплексные характеристики исследуемой территории (географическое положение, природно-климатические условия, демографические и социально-экономические показатели).

Таблица 2.7

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 – 8OLI/TIRS	LC81270452016281LGN01	07.10.2016	Осень

Метод классификации с обучением (supervised classification), применяемый для выделения объектов земного покрова (водных объектов, растительности, различных типов землепользования и т. д.), основан на использовании обучающих выборок. В данном методе критерии классификации формируются на базе эталонных областей, а присвоение каждому пикселю определенного класса покрытия осуществляется с помощью алгоритмов принятия решений. В основе данного процесса лежит метод максимального правдоподобия, который описывается следующими формулами [95, 96]:

$$g_i(x) = \ln p(\omega_i) - \frac{1}{2}\ln\left|\sum i\right| - \frac{1}{2}(x - m_i)^T \sum_i^{-1}(x - m_i) \quad (2.1)$$

Где i - объекты классификации;

x - количество универсальных каналов;

$p(\omega_i)$ - значение вероятности, возникает, когда объект ω_i подобен другим объектам;

$\sum_i^{-1}(x - m_i)$ - обратная матрица объектов ω_i;

m_i - изменение значений вектора.

Это правильная классификация, но она требует много времени для расчета и зависит от нормального распределения данных. Необходимо включить следующие шаги:

– определение типов земель с целью использования этих данных для интерпретации изображения;

– выбор спектров и структуры для отделения объектов друг от друга;

– выделение области изображения для сортировки результатов;

– оценка точности образца при сравнении каждого образца с другими образцами и нахождение отличий;

– оценка точности классификации изображений на основе индекса Каппа (κ), этот индекс находится в диапазоне от 0 до 1 и указывает на пропорциональное уменьшение ошибки, допущенной при полной классификации случайным образом.

$$\kappa = \left[N\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r}(x_{i+} \dots x_{+i})\right] / \left[N^2 - \sum_{i=1}^{r}(x_{i+} \dots x_{+i})\right] \quad (2.2)$$

Где N - общее количество точек отбора проб;

r - количество объектов класса;

x_{ii} - количество точек поля в первом классе;

xi + - общая точка поля i-го класса выборки;

x_{+i} - общее количество точек поля следующего i-го класса.

Разработка схемы классификации является приоритетной задачей при применении методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для картирования земного покрова. Процесс формирования обучающих выборок опирается не только на визуальный анализ изображений, но и на совокупность дополнительных факторов: пространственное разрешение, сезонный характер съемки, время регистрации данных и результаты наземных обследований (полевые данные) [97]. В настоящем исследовании для построения карт землепользования и земного покрова (три класса, табл. 2.8) был использован классификатор максимального правдоподобия, примененный к данным оптических каналов спутников Landsat. Кроме того, на основе полученных материалов был проведен анализ динамики изменений типов землепользования.

Для верификации результатов классификации карта за 2016 год была сопоставлена с референсными данными, предоставленными городским Департаментом окружающей среды и природных ресурсов. Оценка точности выполнялась методом случайного выбора контрольных точек.

Согласно методике, для каждого класса было отобрано по 50 верификационных образцов [98], что в сумме составило 400 контрольных точек для валидации итогового изображения. Количественная оценка эффективности классификации проводилась на основе анализа общей точности, матрицы ошибок (включая точность производителя и пользователя) и индекса Каппа [99].

Таблица 2.8

Три категории классов землепользования / земного покрова, которые использовались в этом исследовании

№		Классы	Включение
1	Застройка	Жилой	территории малоэтажной, среднеэтажной, многоэтажной жилой застройки на территории
		Промышленный, Коммерческий	территории индустриальных парков, промышленных кластеров, территории перерабатывающей промышленности; территории для торговли и обслуживания
2	Озеленённые территории	Активное сельское хозяйство	территории для выращивания многолетних деревьев
		Неактивное сельское хозяйство (Слишком влажная или сухая земля)	территории рисовых полей, территории для выращивания многолетних деревьев
		Лесное хозяйство	защитные леса, леса производственные
		Отмели	Прибрежная земля
		Голая почва	Неиспользуемая земля
3	Водные поверхности	Водные поверхности	Земля с реками, ручьями, каналами, водными источниками

Нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) представляет собой один из наиболее востребованных вегетационных индексов в практике дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [100]. Он основан на разности коэффициентов спектрального отражения в красном (RED) и ближнем инфракрасном (NIR) каналах. Диапазон значений NDVI ограничен интервалом от -1,0 до +1,0, при этом положительные значения характеризуют наличие растительного покрова, тогда как отрицательные или близкие к нулю значения соответствуют объектам без растительности (вода, почва, застройка) [101]. Расчет NDVI осуществляется по формуле (2.3):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2.3)$$

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 μм) и полосе 5 Ландсат OLI (0,85–0,88 μм);

NDBI - эффективный метод картирования городских застроенных территорий с общей точностью 92% [102].

NDBI рассчитывается на основе разницы изображений между NIR и MIR (средний инфракрасный диапазон). Этот индекс получается из уравнения (2.4) [103]:

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR} \quad (2.4)$$

Где MIR - соответствует полосе 5 Ландсат TM (1,55–1,75 μм) и полосе 6 Ландсат OLI (1,57–1,65 μм).

Для оценки температуры земной поверхности (ТЗП) по данным спутника Landsat разработано множество алгоритмов [104]. В настоящем исследовании применяется алгоритм расчета температуры поверхности, основанный на использовании данных красного (RED), ближнего инфракрасного (NIR) и теплового инфракрасного (TIR) каналов. В первую очередь рассчитывается доля растительного покрова (P_v) с использованием значений индекса NDVI согласно уравнению (2.5) [105]:

$$p(v) = \left(\frac{NDVI - NDVI_{мин}}{NDVI_{мак} - NDVI_{мин}}\right)^2 \quad (2.5)$$

Где $NDVI_{мин}$ (минимальный NDVI) и $NDVI_{мак}$ (максимальный NDVI) обозначают динамический диапазон значения NDVI.

Для получения данных по температуре поверхности земли требуется коэффициент излучения поверхности земли, который находится из следующего уравнения (2.6) [106]:

$$\varepsilon = mP(v) + n \quad (2.6)$$

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

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 [106].

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) из уравнения (2.6) при использовании следующего уравнения (2.7):

$$LST = \frac{K2}{\ln\left(\frac{\varepsilon * K1}{L_\lambda}\right) + 1} - 273{,}15 \quad (2.7)$$

Где LST - температура поверхности земли в градусах Цельсия (℃);

K1 и K2 - термические константы TIR, которые можно идентифицировать в файле метаданных, связанном со спутниковым изображением [107];

L_λ – это спектральная величина излучения;

$\varepsilon -$ коэффициент излучения, рассчитанный по уравнению (2.6).

Для перевода результатов в градусы Цельсия необходимо преобразовать данные, вычтя значение абсолютного нуля, которое составляет - 273,15. После этого были проанализированы взаимосвязи между типами земного покрова и температурой поверхности земли в Ханое.

Не во всех городах наблюдаются чётко выраженные городские острова тепла, и их распределение и развитие зависят от многих факторов. Следовательно, необходимо определить пространственное распределение и тенденции развития городских тепловых островов. Интенсивность городского острова тепла определяется как разница между температурой поверхности земли в городской черте и в сельской местности с использованием следующего уравнения (2.8) [108]:

$$LST > \mu + 0{,}5 * \delta \quad (2.8)$$

$-$ относится к зоне городского острова тепла (2.9)

$$0 < LST \leq \mu + 0{,}5 * \delta \quad (2.9)$$

$-$ обозначается как не городской остров тепла,

Где μ и $\delta -$ среднее и стандартное отклонение температуры поверхности земли в исследуемой области, соответственно.

Однако, на распределение зон городского теплового острова, основанное на этом методе, могут влиять многие факторы. Поэтому для повышения точности определения зоны теплового острова используется комбинированный метод с использованием карты земельного покрова и карты температуры поверхности земли. В данном исследовании область теплового острова определяется, как содержащая следующие элементы:

$LST > \mu + 0{,}5 * \delta$ и тип земельного покрова - жилой и промышленный, относящийся к городской зоне городского острова тепла.

В условиях урбанизации эффект городского острова тепла (ГОТ) выступает существенным фактором, оказывающим воздействие на состояние окружающей среды и здоровье населения. С целью оценки влияния ГОТ на качество городской среды применяется ряд индексов теплового комфорта. В настоящей работе используется индекс вариации городского теплового поля (UTFVI), определяемый по следующему уравнению (8) [109]:

$$UTFVI = \frac{T_s - T_m}{T_s} \quad (2.10)$$

Где T_s – температура поверхности земли, а 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 [110]. В таблице 2.9 показаны пороговые значения в шести категориях индекса дисперсии теплового поля в городах.

Таблица 2.9

Пороговые значения уровней индекса дисперсии городского теплового поля (UTFVI), используемых в этом исследовании

UTFVI	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

2.4.2. Метод определения эффективности охлаждения воздушной среды при помощи зелёных насаждений

Устойчивое городское планирование не только повышает качество жизни населения, но и способствует долгосрочному развитию городов в условиях стремительной урбанизации. Рост городов и увеличение плотности населения приводят к росту температуры приземного слоя воздуха и

возникновению эффекта городского острова тепла (ГОТ). В данном контексте, с целью минимизации негативного воздействия ГОТ на здоровье людей и состояние окружающей среды, представляется необходимым расширение площади городского озеленения. Данная мера способствует нивелированию теплового эффекта и созданию комфортного температурного режима в городской среде [111].

Согласно ряду исследований, охлаждающий эффект зеленых насаждений снижается по мере удаления от них и полностью нивелируется на определенном расстоянии [112]. Данный эффект определяется как разность температур поверхности земли между массивом озеленения и прилегающей городской застройкой. Таким образом, зона максимального охлаждения характеризуется расстоянием от границы зеленого пространства до точки, где разница температур становится статистически незначимой (рис. 2.14). Точкой перегиба (критической точкой) здесь выступает максимальная интенсивность охлаждения, определяющая пространственную протяженность «острова прохлады».

Эффективность охлаждения описывается кривой зависимости между пространственной переменной и максимальной интенсивностью охлаждения для каждой конкретной зеленой зоны (рис. 2.14).

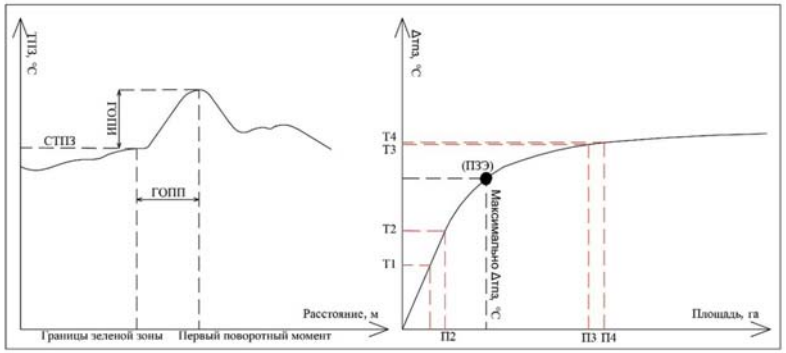


Рисунок 2.14. Кривая охлаждающего эффекта от озеленённого пространства [113]

Где Δ тпз – разница температуры поверхности земли, (°С);

ГОП - городской остров прохлады;

СТПЗ - средняя температура поверхности земли;

ТПЗ - температура поверхности земли, (°С);

ГОПП - городской остров протяжённости прохлады;

ГОПИ - городской остров интенсивности прохлады;
ПЗЭ - пороговое значение эффективности.

При увеличении площади озеленённой зоны с П1 до П2 наблюдается существенное снижение температуры поверхности почвы (Т2–Т1). В то же время, при увеличении площади с П3 до П4 снижение температуры поверхности становится незначительным (Т4–Т3), несмотря на идентичный прирост площади. Таким образом, при достижении определенного предела величина охлаждающего эффекта стабилизируется. В связи с этим, для обеспечения рационального городского озеленения, максимально эффективно влияющего на снижение температуры воздуха в тёплый период года, предлагается использовать показатель порогового значения эффективности (ПЗЭ) при определении оптимальной площади зелёных насаждений.

2.4.3. Методы определения температуры дорожного покрытия

Одной из основных причин формирования городского острова тепла (ГОТ) является перегрев искусственных поверхностей в городской среде. Значительная часть таких поверхностей представлена асфальтобетонными дорожными покрытиями, которые в тёплый период года подвержены интенсивному нагреву, что и обуславливает возникновение эффекта ГОТ. В связи с этим представляется необходимым исследование свойств городских покрытий и их влияния на тепловой режим городской застройки.

Особое значение имеют качество и долговечность автомобильных дорог как ключевого элемента транспортной системы, обеспечивающей экономическую устойчивость страны. Повышение технического состояния дорожной сети является актуальной задачей для многих городов Вьетнама, решение которой заключается в увеличении эксплуатационного срока дорожных конструкций. На прочность и износостойкость покрытий влияет совокупность факторов, среди которых доминирующую роль играют климатические условия.

Асфальтобетон, являясь термопластичным материалом [114], подвержен деформациям под воздействием температурных колебаний. Напряжённо-деформированное состояние (НДС) дорожной одежды в значительной степени определяет срок её службы.

Большинство современных исследований сфокусировано на анализе таких характеристик дорожных покрытий, как альбедо, плотность, проницаемость и влагоёмкость верхнего слоя, поскольку данные параметры напрямую определяют температуру поверхности.

Дорожные одежды классифицируются на гибкие и жёсткие, которые различаются по количеству слоёв и их физико-механическим свойствам. Гибкое покрытие состоит из термопластичного материала с изнашиваемой поверхностью (например, асфальта), уложенного на основание. Жёсткое покрытие, в свою очередь, характеризуется наличием бетонного слоя, опирающегося на основание и подстилающий грунт. Верхний слой жёсткого покрытия может быть выполнен из бетона или тонкого слоя асфальтобетона. В то время как гибкие покрытия деформируются под нагрузкой за счёт возникновения горизонтальных растягивающих и сжимающих напряжений, жёсткие покрытия обладают высокой прочностью на изгиб, что позволяет распределять нагрузку по большей площади и снижает её передачу на нижележащие слои. Таким образом, выбор типа дорожной конструкции определяется конкретными эксплуатационными задачами.

Ряд исследований подтверждает значительное влияние дорожной сети на усиление эффекта ГОТ, что объясняется большой площадью застройки дорогами и низким коэффициентом альбедо тёмных поверхностей дорожного полотна [115]. В среднем дорожные покрытия занимают до 40% площади городов. Анализ мезомасштабных спутниковых снимков в тепловом инфракрасном диапазоне показал, что дорожная сеть выступает основным источником теплового излучения в городской среде [116].

Следует учитывать, что солнечная радиация состоит из видимого (43%), инфракрасного (52%) и ультрафиолетового (5%) излучения [117]. При низком значении альбедо асфальтобетонного покрытия (около 5%) поглощается до 95% солнечного излучения. Это диктует необходимость разработки мер по коррекции свойств дорожных материалов с целью оптимизации тепловых характеристик городской среды.

Для расчёта температуры поверхности асфальтобетонных покрытий применяется несколько подходов. Ниже приведено сравнение двух наиболее известных методов: метода Ковалёва Ю. Н. (Россия) и метода «Superpave» (США).

По методу Ковалёва Ю.Н. [118] минимальная температура асфальтобетонного покрытия определяется по формуле:

$$T_{П}^{min} = 0.7\ T_{min}, \qquad (2.11)$$

Где $T_{П}^{min}$ – расчётная минимальная температура поверхности покрытия асфальтобетона, ° С;

T_{min} – минимальная наружная температура, ° С.

Формула для определения максимальной температуры:

$$T_{п} = T_{в} + T_{экв}, \quad (2.12)$$

Где $T_{п}$ - максимальная расчётная температура поверхности покрытия асфальтобетона, ° С;

$T_{в}$ – температура воздуха, °С;

$T_{экв}$ – эквивалентная температура $T_{экв} = (1\text{-}A)\frac{I}{\alpha_{п}}$, ° С;

А – альбедо поверхностного покрытия, характеризующееся его отражательной способностью, для асфальтобетона А = 10%;

I – интенсивность солнечного излучения, для климата городов I = 16,75 Вт/м^2;

$\alpha_{п}$ – коэффициент теплопроводности, для асфальтобетона $\alpha_{п} = 1.05$ Вт/(м^2 ·°С).

По методу «Superpave» [119] минимальная температура асфальтобетонного покрытия определяется по формуле:

$$T_{П}^{min} = 0{,}859\, T_{min} + 1{,}7, \quad (2.13)$$

Где $T_{П}^{min}$ – минимальная расчётная температура поверхности покрытия асфальтобетона, ° С;

T_{min}- минимальная температура воздуха в среднем за год, установленная по метеорологическим данным, ℃.

А максимальная температура такого покрытия равна:

$$T_{2}^{max} = 0{,}9545(T_{B7} - 0{,}00618Ш^2 + 0{,}2289Ш + 42{,}2) - 17{,}18, \quad (2.14)$$

Где T_{2}^{max}- максимальная расчётная температура покрытия на глубине 2 см, °С;

T_{B7} – максимальная температура воздуха в среднем за неделю, °С;

Ш – широта объекта в градусах, для городов составляет 21,0278°N.

2.4.4. Метод вычислительного гидродинамического анализа (Computational Fluid Dynamics - CFD)

Развитие методов вычислительной гидродинамики (CFD) началось в 1960-х годах с разработки численных методов моделирования нестационарных двумерных потоков жидкости, хотя теоретические предпосылки возникновения CFD прослеживаются ещё с 1920-х годов. В настоящее время методы CFD позволяют решать системой уравнений динамику жидкостей и газов с помощью компьютерного моделирования для прогнозирования полей потоков. В рамках данного диссертационного исследования был использован программно-вычислительный комплекс ENVI-met 4.4.5 для моделирования городских территорий с целью анализа механизмов формирования городских островов тепла (ГОТ) и верификации результатов с использованием фактических данных. В ходе моделирования были определены ключевые факторы, способствующие возникновению ГОТ, на основе которых предложен комплекс мероприятий по оптимизации городской среды и даны конкретные рекомендации по благоустройству городских территорий.

Численное моделирование в рамках CFD-анализа классифицируется по используемым методам расчёта на следующие категории:

- прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation – DNS);

- моделирование больших вихрей (Large-Eddy Simulation – LES);

- моделирование на основе осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-averaged Navier–Stokes – RANS).

Теоретически метод DNS обеспечивает максимально точное воспроизведение поля потока, однако его применение ограничено низкими значениями числа Рейнольдса, необходимостью использования малых временных и пространственных шагов сетки, что сопряжено с колоссальными вычислительными затратами. Метод LES позволяет рассчитывать как крупные, так и мелкие турбулентные вихри, однако вследствие пространственно-временного усреднения в данной модели не учитывается влияние молекулярной вязкости на крупномасштабные вихри. Как правило, LES применяется в инженерных расчётах процессов горения, акустики и при моделировании пограничного слоя атмосферы. В сравнении с DNS и LES, модель RANS получила наиболее широкое распространение в практических приложениях.

Следует отметить, что переход к турбулентному течению, характеризующемуся хаотическим движением частиц среды и флуктуациями давления и скорости, обусловлен гидродинамической неустойчивостью ламинарного потока при достижении критического числа Рейнольдса ($Re_{кр}$). Моделирование турбулентных потоков представляет значительную сложность ввиду многомасштабности вихревых структур и нелинейности определяющих уравнений. В зависимости от требуемой точности были разработаны различные модели турбулентности (DNS, LES, k-ϵ, модель Буссинеска, модель Спаларта-Алмарса, модель напряжений Рейнольдса и др.). Помимо точности, данные модели различаются по вычислительной сложности. Наиболее эффективной признана k-ϵ модель, которая реализована в программном комплексе ENVI-met. Помимо стандартного уравнения адвекции-диффузии k-ϵ, в ENVI-met используется осреднённая по Рейнольдсу модель Навье-Стокса (RANS).

Модель k-ϵ, предложенная Б. Лаундером и Д. Б. Спалдингом в 1972 году, классифицируется по количеству дифференциальных уравнений на нулевые, одно-, двух- и многоуравневые модели. Двухуравневая модель k-ϵ базируется на эмпирических данных и оперирует двумя основными переменными (турбулентной кинетической энергией и скоростью её диссипации), что обеспечивает оптимальный баланс между точностью расчётов и вычислительными затратами [120, 121].

Функциональные возможности комплекса ENVI-met позволяют проводить комплексный анализ микроклимата в трёхмерной модели городской застройки, включая исследование микромасштабных тепловых взаимодействий. ENVI-met предназначен для расчёта динамических характеристик воздушной среды (потоков воздуха и турбулентности) с одновременным учётом термодинамических процессов на поверхности почвы, стенах, кровлях зданий и в зонах озеленения. Программный комплекс позволяет задавать параметры застройки, свойства поверхностей, типы растительности и граничные климатические условия. ENVI-met учитывает все компоненты солнечного излучения (прямое, отражённое и рассеянное) при расчёте средней температуры излучения. Кроме того, при моделировании радиационного обмена учитываются эффекты затенения растительностью, поглощение, экранирование и переизлучение [122, 123].

А) Средний расход воздуха

Пространственное и временное развитие ветрового поля в модельной области описывается уравнениями Навье-Стокса в трёхмерной негидростатической форме:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = -\frac{\partial_{p'}}{\partial x} + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}\right) + f(v - v_g) - S_u(x,y,z) \quad (2.15а)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\frac{\partial_{p'}}{\partial y} + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2}\right) + f(u - u_g) - S_v(x,y,z) \quad (2.15б)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\frac{\partial_{p'}}{\partial z} + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2}\right) + g\frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_z(x,y,z) \quad (2.15в)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

Где f (= 10^{-4} $с^{-1}$) - параметр Кориолиса;

p′ - локальное возмущение давления;

K_m - коэффициент обмена;

θ - потенциальная температура на высоте z.

Обозначения u_i и x_i соответствуют u, v, w и x, y, z при i = 1, 2, 3, соответственно. Поскольку воздух теперь рассматривается как несжимаемая жидкость, то приближение Буссинеска (т.е. $\rho = \rho_0$ = 1,29 кгм$^{-3}$) может быть применено для упрощения исходных уравнений Навье-Стокса за счёт показателя плотности воздуха ρ. Уравнение неразрывности (2.16), следовательно, добавлено для сохранения массы модели, а также в качестве члена для теплового вынужденного вертикального движения в w-уравнении (2.15в). S_u, S_v и S_z которые описывают потерю скорости ветра из-за сил сопротивления, вызванных возможными элементами растительности [124]:

$$S_{u_i} = \frac{\overline{\partial p'}}{\partial x_i} = C_{d,f} LAD(z) \cdot W \cdot u_i \quad (2.17)$$

Где W = $(u^2 + v^2 + z^2)^{0,5}$ — это средняя скорость ветра на высоте z;

LAD — это плотность площади листьев, показывающая пористость зелёного насаждения;

$c_{d,f}$ - коэффициент механического сопротивления, который обычно устанавливается равным 0,2.

Б) Температура и влажность

Распределение потенциальной температуры θ и удельной влажности q в атмосфере задается комбинированным уравнением адвекции-диффузии с внутренним источником:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}+u_i\frac{\partial\theta}{\partial x_i}=K_h\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x_i^2}\right)+\frac{1}{c_p\rho}\frac{\partial R_{n,lw}}{\partial z}+Q_h \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}+u_i\frac{\partial q}{\partial x_i}=K_q\left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2}\right)+Q_q \quad (2.19)$$

Где Q_h и Q_q используются для связи тепло- и парообмена между поверхностью растения и окружающей воздушной средой. K_h и K_q - коэффициенты диффузии тепла и пара. Вертикальная дивергенция длинноволнового излучения $\partial R_{n,lw}/\partial z$, учитывает охлаждающие и нагревающие эффекты радиационных потоков.

В) Атмосферная турбулентность

k-ε модель турбулентности позволяет моделировать процессы адвекции, а также учитывать влияние горизонтальной неоднородности. Эта модель подходит для городского контекста, поэтому она применяется в ENVI-met [125].

В модели k-ε для определения коэффициентов обмена добавляются ещё две переменные, а именно турбулентная кинетическая энергия k и скорость диссипации кинетической энергии ε. Эти уравнения представлены в научных трудах Г.Л.Меллора и Т.Ямады (англ. - G.L. Mellor, T.Yamada) [126] следующим образом:

$$\frac{\partial E}{\partial t}+u_i\frac{\partial E}{\partial x_i}=K_E\left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2}\right)+Pr+Th+Q_E-\varepsilon \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+u_i\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}=K_\varepsilon\left(\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial x_i^2}\right)+c_1\frac{\varepsilon}{E}Pr+c_3\frac{\varepsilon}{E}Th-c_2\frac{\varepsilon^2}{E}+Q_\varepsilon \quad (2.21)$$

Где c_1, c_2 и c_3– стандартные значения, представленные в статье Б. Лаундера и Д.Б. Спалдинга (англ. - B. Launder, D.B. Spalding) [127], но для особых условий могут быть использованы другие значения.

Обозначения Pr и Th описывают, соответственно, производство и диссипацию турбулентной энергии из-за сдвига ветра и тепловой стратификации и задаются:

$$Pr=K_m\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.22)$$

$$Th=\frac{g}{\theta_{ref(z)}}K_h\frac{\partial\theta}{\partial z} \quad (2.23)$$

Где $\theta_{ref(z)}$ - опорная потенциальная температура на границе притока;

g - ускорение свободного падения (~ 9,81 м/с).

Q_E и Q_ε учитывают дополнительную турбулентность, создаваемую растительностью, а также ускоренный каскад турбулентной энергии от крупного к малому масштабам вблизи листвы растений. Q_E и Q_ε выражаются следующим образом [128]:

$$Q_E=C_{d,f}LAD(z)\cdot W^3-4C_{d,f}LAD(z)\cdot|W|\cdot E \quad (2.24)$$

$$Q_\varepsilon=1{,}5C_{d,f}LAD(z)\cdot W^3-6C_{d,f}LAD(z)\cdot|W|\cdot\varepsilon \quad (2.25)$$

Где $C_{d,f}$ – коэффициент сопротивления листвы растения;

W - скорость ветра на рассматриваемой высоте.

В уравнении (2.25) ε находится путем применения соотношения Колмогорова: $\varepsilon=0{,}16E^{3/2}/l$.

После расчета поля k-ε, коэффициенты обмена K_m, K_h и K_q рассчитываются с предположением изотропии локальной турбулентности:

$$K_m=C_\mu\frac{E^2}{\varepsilon} \quad (2.26а)$$

$$K_h=K_q=1{,}35K_m \quad (2.26б)$$

$$K_E=\frac{K_m}{\sigma_E} \quad (2.26в)$$

$$K_\varepsilon=\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \quad (2.26г)$$

При c_μ = 0,09; σ_E = 1 и σ_ε = 1,3.

Функции масштабирования дополнительно используются для настройки этих коэффициентов диффузии на термическую стратификацию [129].

Однако, одним из недостатков модели k-ε является то, что она имеет тенденцию переоценивать турбулентность в верхних слоях атмосферы. Поэтому ENVI-met предлагает возможность использования замыкания первого порядка (градиентных уравнений) в случае однородной области модели.

Коэффициенты обмена между поверхностью земли или здания и воздухом, т. е первой точкой сетки рядом с поверхностью, рассчитываются не по модели k-ε, а с помощью эмпирических формул, основанных на физическом состоянии воздуха вблизи поверхности и самой поверхности.

Ветровое поле (сдвиг ветра) и тепловые силы (образование плавучести) являются здесь решающими в природе турбулентного обмена, то есть свободной конвекции или молекулярного обмена, и могут быть выражены числом Балка-Ричардсона (BRN):

$$Ri_b = \frac{g}{\theta}\frac{\Delta\theta \cdot \Delta w}{(\Delta u)^2} \quad (2.27)$$

Где $\Delta w -$ расстояние между поверхностью и первой сеткой воздуха рядом с ней;

$u -$ горизонтальная скорость ветра.

Турбулентные потоки импульса, тепла и пара на поверхностях затем вычисляются по закону подобия Монина-Обухова, который утверждает, что потоки в поверхностном слое очень постоянны и выражаются как функция масштабных величин u^*, θ^* и q^*:

Поток импульса: $(u^*)^2$

Турбулентный тепловой поток: $u^* \cdot \theta^*$

Турбулентный поток влаги/водяного пара: $u^* \cdot q^*$

Г) Потоки излучения

Атмосферное длинноволновое излучение зависит от температуры воздуха, а также от коэффициентов поглощения и излучения для каждого отдельного слоя воздуха. Фактическая скорость поглощения и выброса воздуха зависит от содержания воды, но также и от таких аэрозолей, как углекислый газ CO_2 и озон O_3. Тем не менее, учитывается только поглощение за счёт воды из-за сложных отношений поглощения, а также отсутствия информации о вертикальном распределении углекислого газа CO_2 и озона O_3. Следовательно, длинноволновое атмосферное излучение на высоте z, если оно не изменено растительностью, может быть аппроксимировано после интегрирования для n отдельных слоёв следующим образом [130]:

$$R_{lw}^{\downarrow}(z) = \sum_{n=1}^{N} \sigma_B T^4\,(n)[\varepsilon_n(l + \Delta l) - \varepsilon_n(l)] \quad (2.28)$$

Где $l -$ содержание воды в слое между высотой z и нижним слоем n;

$\varepsilon_n -$ излучательная способность слоя n;

$T -$ абсолютная температура.

Потоки коротковолнового излучения на границе модели R_{sw}^* рассчитываются путем интегрирования интенсивности излучения Солнца I_0 в диапазоне длин волн от λ = 0,29 до λ = 4,0.

$$R_{sw}^* = \int_{0.29}^{4.0} I_0\,(\lambda) exp\{-\alpha_R(\lambda)m + \alpha_M(\lambda)m\}d\lambda \quad (2.29)$$

I_0 доступен из таблиц [131]. Оптическая масса m является функцией высоты Солнца h, рэлеевского рассеяния (α_R = 0,00816 λ^{-4}) и рассеяния

Миса (α_M = $\lambda^{-1,3}\beta_{tr}$). Абсолютное количество прямого коротковолнового излучения на границе модели $R_{sw,dir}^0$ получается после вычета количества энергии, поглощенной $R_{sw,abs}$ содержащейся в ней водой. в атмосфере после Liljequist [132], а именно:

$$R_{sw,dir}^0 = R_{sw}^* - R_{sw,abs} = R_{sw}^* - (70 + 2{,}8VP_{2m} \cdot m) \quad (2.30а)$$

Коротковолновое диффузное излучение $R_{sw,dif}^0$ при условии безоблачного неба зависит от потока прямого солнечного излучения и высоты солнца ∅ и оценивается по Брауну и Исфальту [133]:

$$R_{sw,dif}^0 = f(R_{sw,dir}^0, \emptyset) \quad (2.30б)$$

Для условий облачного неба прямая солнечная радиация $R_{sw,dir}^0$ сокращается согласно исследованию [134].

В области модели потоки излучения сильно изменяются из-за размещенных зданий и растительности. Для учёта этих эффектов вводится ряд коэффициентов (σ (…)), которые варьируются от одного для невозмущенных потоков до нуля для полностью заблокированных потоков.

Для данной точки сетки в области модели, если здание блокирует прямое солнечное излучение, $\sigma_{sw,dir}$ устанавливается равным нулю. Для всех других потоков излучения частичное препятствие солнечному излучению зависит от доли неба, «просматриваемой» поверхностью, и определяется коэффициентом обзора неба σ_{svf}:

$$\sigma_{svf} = \frac{1}{360}\sum_{\pi=0}^{360} \cos\omega\,(\pi) \quad (2.31)$$

Где $\omega -$ вертикальный угол, определяемый препятствием под азимутальным углом π. Коэффициенты, характеризующие препятствия, создаваемые растениями для прямого и диффузного коротковолнового излучения ($\sigma_{sw,dir}$, $\sigma_{sw,dif}$), а также атмосферного и земного длинноволнового излучения ($\sigma_{lw}^{\downarrow}$ и $\sigma_{lw}^{\uparrow}$) выражаются следующим образом:

$$\sigma_{sw,dir}(z) = \exp\,(-F \cdot LAI^*(z)) \quad (2.32а)$$

$$\sigma_{sw,dif}(z) = \exp\,(-F \cdot LAI(z, z_p)) \quad (2.32б)$$

$$\sigma_{lw}^{\downarrow}(z) = \exp\,(-F \cdot LAI(z, z_p)) \quad (2.32в)$$

$$\sigma_{lw}^{\downarrow}(z) = \exp\,(-F \cdot LAI(0, z)) \quad (2.32г)$$

Где $F -$ коэффициент экстинкции, а $LAI -$ это одномерный индекс листовой поверхности, который получается путем вертикального интегрирования LAD по высоте растения. Для коротковолнового солнечного излу-

чения *LAI* заменяется на *LAI**, который является «трёхмерным», т.е. рассчитывается по углу падения падающих солнечных лучей.

Прямое коротковолновое излучение $R_{sw,dir}$ в любой точке z тогда выражаются следующим образом:

$$R_{sw,dir}(z) = \sigma_{sw,dir}(z) R^0_{sw,dir} \quad (2.33)$$

А полное диффузное излучение, включая диффузно отраженное излучение, $R_{sw,dif}$ определяется следующим образом:

$$R_{sw,dif}(z) = \sigma_{sw,dif}(z)\sigma_{svf}(z) R^0_{sw,dif} + (1 - \sigma_{svf}(z)) R^0_{sw,dir} \cdot \bar{a} \quad (2.34)$$

Первый член уравнения соответствует диффузному излучению, предполагается изотропно рассеянному и взвешенному по коэффициенту обзора неба. Второй член уравнения — это диффузно отраженное излучение с $\bar{a}$ - усредненным альбедо для всех стен и поверхностей земли в области модели. При наличии растительности потоки длинноволнового излучения $R^{\downarrow}_{lw}(z)$ вверх и $R^{\uparrow}_{lw}(z)$ вниз тогда выражаются следующим образом:

$$R^{\downarrow}_{lw}(z) = \sigma^{\downarrow}_{lw}(z) R^{\downarrow,0}_{lw} + (1 - \sigma^{\downarrow}_{lw}(z))\varepsilon_f \sigma_B \bar{T}^4_{f+} \quad (2.35)$$

$$R^{\uparrow}_{lw}(z) = \sigma^{\uparrow}_{lw}(z)\varepsilon_s \sigma_B T^4_0 + (1 - \sigma^{\uparrow}_{lw}(z))\varepsilon_f \sigma_B \bar{T}^4_{f-} \quad (2.36)$$

Где $\bar{T}^4_{f+}$ и $\bar{T}^4_{f-}$ – средняя температура листвы вышележащего (+) и нижележащего (-) слоя растительности;

T_0 - температура грунта;

$\overline{T_w}$ – средняя температура поверхности стен зданий;

σ_B - постоянная Стефана-Больцмана;

ε_f, ε_s и ε_w - коэффициенты излучения листвы, поверхности земли и стен

зданий, соответственно.

Д) Поверхности земли и зданий

Температура поверхности земли T_0 рассчитывается путем решения уравнения энергетического баланса поверхности:

$$R_{sw,net} + R_{lw,net} - G_0 - H_0 - LE_0 = 0 \quad (2.37)$$

Где $R_{sw,net}$ – чистое коротковолновое излучение, принимаемое поверхностью;

$R_{lw,net}$ – чистое длинноволновое излучение;

G – тепловой поток почвы;

H_0 и LE_0 – чувствительный и скрытый турбулентный тепловой поток, соответственно.

Расчёт $R_{lw,net}$ является сложным и включает в себя влияние зданий и растительности. Потоки длинноволнового излучения от зданий аппроксимируются в одной величине $R^{\leftrightarrow}_{lw}$, которая рассчитывается на основе усредненной температуры поверхности всех стен $\overline{T_w}$:

$$R^{\leftrightarrow}_{lw}(z) = (1 - \sigma_{svf}(z))\varepsilon_w \sigma_B \bar{T}^4_w \quad (2.38)$$

Турбулентные потоки H_0 и LE_0 являются функцией рассчитанных коэффициентов турбулентного обмена, а также температуры и влажности воздуха как на поверхности земли (z = 0), так и первой точки сетки по вертикали (z = 1). Молекулярный поток G и турбулентные и молекулярные потоки энергии на поверхности земли задаются:

$$G_0 = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_s (k = -1) \frac{T_0 - T_{k=-1}}{0{,}5\Delta z_{k=-1}} \quad (2.39)$$

$$H_0 = \rho c_p \cdot \left[-K^0_h \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0} \right] = \rho c_p \left[K^0_h \frac{T_0 - \theta_{k=1}}{0{,}5\Delta z_{k=1}} \right] \quad (2.40)$$

$$LE_0 = \rho \cdot L_0 \left[-K^0_q \frac{\partial q}{\partial z} \right] = \rho \cdot L_0 \left[K^0_h \frac{q_0 - q_{k=1}}{0{,}5\Delta z_{k=1}} \right] \quad (2.41а)$$

$$L_0 = (5{,}501 - 0{,}00237(T_0 - 273{,}13))10^6 \quad (2.41б)$$

Где λ_s - теплопроводность почвы;

$k = \pm 1$ соответствует первой точке сетки над или под поверхностью земли;

K^0_h и K^0_q – коэффициент теплообмена и паробмена между воздухом и поверхностью, рассчитанный с учетом температурной стратификации [135].

Очевидно, что наличие зданий играет важную роль в энергетическом бюджете городского района. Температура стен и кровли зданий рассчитывается путём решения уравнения энергетического баланса для каждой поверхности, соответственно. Однако накопление тепла в строительных материалах не учитывается.

Подобно поверхности земли энергетический баланс поверхности стены или крыши зданий определяется по формуле:

$$R_{sw,net} + R^{w,r}_{lw,net} - H_{w,r} - Q_{w,r} = 0 \quad (2.42)$$

Где H_w и $Q_{w,r}$ – турбулентный поток явного тепла и тепловой поток через крышу или стену зданий, соответственно. Чистый поток коротковолнового излучения $R_{kw,net}$ определяется по формуле:

$$R_{sw,net} = \{\cos\beta^* \cdot R_{kw,dir}(z_{w,r}) + R_{kw,dif}(z_{w,r})\}(1 - a_s) \quad (2.43)$$

Где $z_{w,r}$ - высота поверхности;

β^* - угол между падающим прямым солнечным лучом $R_{kw,dir}$ и нормалью к поверхности (закон Косинуса Ламберта).

Альбедо для стен и для крыш здания a_s рассчитывается для натуральных материалов и предопределяется в случае водонепроницаемых материалов.

Для чистого длинноволнового излучения проводится дифференциация между поверхностями крыши и стены из-за их различной ориентации (горизонтальной и вертикальной). Следовательно, для поверхности крыши чистый поток длинноволнового излучения $R^r_{lw,net}$ задаётся следующим образом:

$$R^r_{lw,net} = \sigma_{svf} R^{\downarrow,0}_{lw} + \left(1 - \sigma_{svf}\right)\varepsilon_w \sigma_B \bar{T}^4_r - \varepsilon_r \sigma_B \bar{T}^4_r \quad (2.44)$$

Вертикальные поверхности стен дополнительно получают часть излучения от земли. Здесь есть некоторые допущения для фасадов: явно установлено, что половина тепла исходит от земли, а половина - с неба в случае видимого неба, а одна треть излучаемого тепла исходит от земли и две трети от фасадов в случае преграды неба.

Чистый поток длинноволнового излучения $R^w_{lw,net}$ для поверхности стенки задается формулой:

$$R^w_{lw,net} = \sigma_{svf}\left(0{,}5\varepsilon_s \sigma_B \bar{T}^4_0 + 0{,}5R^{\downarrow,0}_{lw}\right) + \left(1 - \sigma_{svf}\right)\left(0{,}33\varepsilon_s \sigma_B \bar{T}^4_0 + 0{,}67\varepsilon_w \sigma_B \bar{T}^4_w\right) - \varepsilon_w \sigma_B \bar{T}^4_w \quad (2.45)$$

Чувствительный тепловой поток H_w от поверхности стены к расположенному рядом с ней воздуху (т. е. сеткам w и $w+1$) задается:

$$H_w = \rho c_p K^w_h \left.\frac{\partial T}{\partial x_i}\right|_w = p c_p K^w_h \frac{T_w - T_{w+1}}{\Delta w} \quad (2.46)$$

Это уравнение показывает зависимость коэффициента обмена на стене и градиента между температурой поверхности и температурой воздуха в первой точке сетки рядом с поверхностью стены. Тепловой поток через стену $Q_{w,r}$ может быть рассчитан исходя из данных по температуре поверхности стены или крыши и температуре воздуха в здании с помощью уравнения:

$$Q_{w,r} = U(T_w - T_{a,i}) \quad (2.47)$$

Где U – коэффициент теплопередачи строительного материала. Стандартные значения U для различных материалов представлены в литературном источнике [136].

Е) Модель почвы

В данной модели осуществляется расчёт температуры и влажности поверхности, а также приземного слоя почвы до глубины 1,75 м для всей области моделирования. Модель почвы базируется на учете гидрологических и термодинамических процессов, определяемых физическими свойствами грунта. Вертикальный профиль почвы представлен одномерной структурой, состоящей из 14 узлов; предполагается, что ниже данного уровня суточные амплитуды колебаний температуры и влажности становятся пренебрежимо малыми. Для каждой расчетной точки сетки может быть задан соответствующий тип почвы. Модель разделена на три слоя (0–20 см, 20–45 см и 45–175 см), для каждого из которых определяются характеристики почвы. База данных [137] содержит обширный перечень природных и техногенных типов почв с заданными гидрологическими и термодинамическими коэффициентами. Одномерный (1D) расчёт применяется для неэквидистантных сеток, при этом на верхней границе расчёт теплообмена выполняется в трёхмерном (3D) режиме для обеспечения корректного определения температуры поверхности. Значения теплопроводности для водонепроницаемых материалов, а также данные по альбедо и теплопроводности для природных типов почв, заложены в информационную базу программы.

К) Модель растительности

В программном комплексе ENVI-met растения рассматриваются как физические препятствия для воздушных потоков и солнечного излучения. Они определяются как биологические объекты, вступающие во взаимодействие с окружающей средой посредством тепло- и влагообмена. Растительность моделируется в виде одномерных (1D) структур, характеризующихся высотой z_p и глубиной корневой системы -z_r. Вертикальный профиль модели растения разделен на десять равных сегментов как в надземной, так и в подземной частях. Для каждого сегмента задаются соответствующие значения плотности листовой поверхности (LAD) и плотности корневой поверхности (RAD). Данная схема универсальна и применима ко всем видам растительности — от низкорослых травянистых покровов до высокобойных деревьев. Кроме того, в модели учитываются такие физиологические параметры, как стоматное сопротивление, тип листового аппарата (листопадные или вечнозелёные растения), а также альбедо листвы.

Обмены между растением и окружающим воздухом состоят из прямого теплового потока $J_{f,h}$ потока испарения $J_{f,evap}$, потока испарения и транспирации $J_{f,trans}$ и определяются по формуле:

$$J_{f,h} = 1{,}1 r_a^{-1}(T_f - T_a) \quad (2.48а)$$

$$J_{f,evap} = r_a^{-1}\Delta q \delta_c f_w + r_a^{-1}(1-\delta_c)\Delta q \quad (2.48б)$$

$$J_{f,trans} = \delta_c (r_a + r_s)^{-1}(1-f_w)\Delta q \quad (2.48в)$$

Где T_f – температура листа;

r_a – аэродинамическое сопротивление листа;

Δq – дефицит влажности между листьями и воздухом;

δ_c – коэффициент δ_c=1, если могут происходить испарение и транспирация ($\Delta q \geq 0$), в противном случае δ_c устанавливается равным нулю только для возможной конденсации;

f_w – доля влажных листьев;

r_s – устричное сопротивление, которое зависит от входного коротковолнового излучения и доступной почвенной воды и рассчитывается по Р.В. Дирдоффу (англ. - R.W. Deardoff) [138] или альтернативно по К.М.Дж. Джейкобсу (англ. - C.M.J. Jacobs) [139].

Энергетический баланс листа позволяет рассчитать температуру листа и выражается следующим образом:

$$R_{sw,net} + R_{lw,net} = c_p \rho J_{f,h} + \rho L(J_{f,evap} + J_{f,trans}) \quad (2.49)$$

Где L - скрытая теплота парообразования.

Чистый поток коротковолнового излучения задается формулой:

$$R_{sw,net}(z) = (F \cdot R_{sw,dir}(z) + R_{sw,dif}(z))(1 - a_f - tr_f) \quad (2.50)$$

Где F описывает ориентацию листьев к Солнцу (= 0,5 для случайно ориентированных листьев);

a_f – альбедо листьев;

tr_f – коэффициент пропускания, равный 0,3.

Чистый поток длинноволнового излучения задается формулой:

$$R_{lw,net}(z, T_f) = \quad (2.51)$$
$$= \varepsilon_f R_{lw}^{\downarrow}(z) + R_{lw}^{\leftrightarrow}(z) + \varepsilon_f R_{lw}^{\uparrow}(z) - 2\varepsilon_f \sigma_B T_f^4 - (1 - \sigma_{svf}(z))\sigma_B T_f^4$$

Где ε_f – коэффициент излучения листа.

Затем параметры источника / поглотителя, выраженные в модели атмосферы (уравнения 2.18 и 2.19), рассчитываются следующим образом:

$$Q_h(z) = LAD(z) J_{f,h} \quad (2.52а)$$

$$Q_q(z) = LAD(z) J_{f,evap} + J_{f,trans} \quad (2.52б)$$

Модель растительности интегрирована с моделью почвы, что позволяет учитывать процессы водообмена, включая поглощение влаги корневой системой и её последующее испарение.

Программный комплекс ENVI-met предназначен для моделирования динамики термодинамических параметров в микромасштабе. В его основе лежит трёхмерная негидростатическая модель взаимодействия городской среды, атмосферы и растительности с базовым разрешением сетки 2x2x2 м. Опираясь на фундаментальные законы гидрогазодинамики, термодинамики и физики атмосферы, ENVI-met позволяет с высокой точностью рассчитывать трёхмерные поля скоростей ветра, характеристики турбулентности, распределение температуры и влажности, радиационные потоки, а также процессы дисперсии загрязняющих веществ [140]. Высокое пространственное разрешение в сочетании с детальной параметризацией растительности обеспечивает возможность расчёта интенсивности фотосинтеза с учётом локальных значений солнечной инсоляции, температуры, влажности, скорости ветра и концентрации CO_2 [141].

Процедура моделирования в ENVI-met включает два основных этапа. На первом этапе осуществляется формирование входных данных исследуемой территории. В трёхмерной модели определяются геометрические параметры застройки и физические свойства поверхностей с учётом морфологии городской среды: конфигурации проездов, архитектурных выступов, состава почвенного покрова, а также характеристик и площади озеленения. Расчётная область задаётся в виде сетки с шагом от 0,5 до 10 метров, при этом уменьшение размера ячейки способствует повышению сходимости и точности численного решения. Так, территория 100x100 м может быть дискретизирована как сеткой 100x100 (шаг 1 м), так и сеткой 20x20 (шаг 5 м), исходя из целей исследования и доступных вычислительных ресурсов [142].

Второй этап заключается в редактировании конфигурационного файла, в котором задаются координаты объекта, граничные условия (температура, влажность, скорость ветра), а также определяются типы почв и растительности на основе встроенной базы данных. Таким образом, итоговый расчёт базируется на совокупности пространственных данных и параметров конфигурации. Методика моделирования параметров микроклима-

та, реализованная в данной диссертационной работе, представлена в виде блок-схемы на рисунке 2.15.

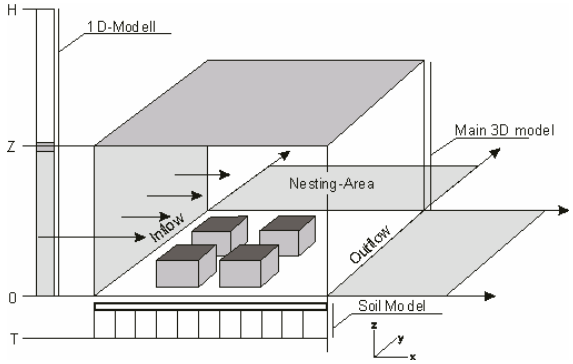


Рисунок 2.15. Базовая схема CFD - моделирования в ENVI-met [122]

Последующий процесс включает три основных этапа (рисунок 2.16):

1. Полная организация каталога файлов;

2. Моделирование и редактирование параметров модели (данных микроклимата и элементов сборки) с использованием базы данных растений и материалов поверхности, создающих входной файл расчетной области (INX) и файл моделирования (SIM);

3. Оценка файлов результатов (EDT/EDX) и их визуализация.

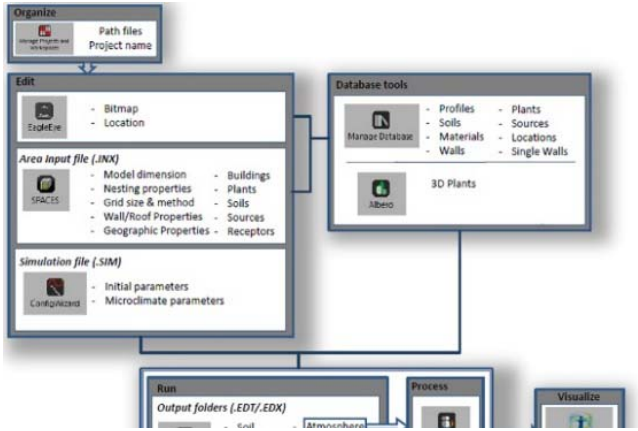


Рисунок 2.16. Схема рабочего процесса в ENVI-met

Для визуализации выходных данных необходимо всю имеющуюся информацию из выходных файлов перевести в слои в Leonardo. Как правило, слои представляются в следующем виде:

- *Слой данных*, в котором отображаются непрерывные данные (например, значение температуры или влажности);
- *Специальный слой*, в котором отображаются специальные данные (например, здания);
- *Векторный слой*, в котором отображаются векторные показатели, такие как ветер.

По завершении вычислений результаты моделирования могут быть представлены в различных форматах с использованием соответствующих сечений данных: в трёхмерной аксонометрической проекции, в горизонтальной плоскости (вид в плане) и в вертикальной плоскости (вид в разрезе). Данная визуализация позволяет детально анализировать микромасштабные взаимодействия между элементами городской среды (зданиями, покрытиями и растительностью) для различных сценариев в течение заданного временного интервала (максимальный период моделирования составляет 24 часа).

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ ОСТРОВОВ ТЕПЛА

3.1. Методика оценки эффекта городского острова тепла

3.1.1. Методика определения городских островов тепла

К 2008 году площадь территории города увеличилась до 3344,7 км², а её административное деление стало включать 30 районов (12 городских и 18 сельских). Численность населения города к этому периоду достигла почти 7 миллионов человек, при этом существенную долю составляют иммигранты. Процессы урбанизации и интенсификация жилищного строительства способствуют развитию городской инфраструктуры, что, в свою очередь, приводит к формированию эффекта «городского острова тепла», характеризующегося более высокими температурами поверхности по сравнению с пригородными и сельскими территориями. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), полученные с помощью спутников Landsat-5 TM и Landsat-8 OLI / TIRS, представляют собой эффективный инструмент для мониторинга температуры поверхности и анализа состояния городских земель, позволяя установить корреляцию между температурным режимом и типом земного покрова [143, 144, 145].

Результаты классификации свидетельствуют о том, что сельскохозяйственные земли (включая как активные, так и заброшенные угодья) являются доминирующим типом покрова и распределены по всей исследуемой территории. Лесные массивы занимают ограниченную площадь, сосредоточенную преимущественно в западной и юго-западной частях города. Жилая застройка локализована в центральной и северо-западной частях города (согласно данным за 2009 и 2016 гг.).

На рисунке 3.1 представлена карта землепользования центральной части города, включающая 12 центральных районов за 1999, 2009 и 2016 гг. В рамках данного анализа выделены три основные категории: городская застройка, озеленённые территории и водные поверхности. Кроме того, была изучена динамика трансформации земного покрова за период с 1999 по 2016 гг., результаты которой отражены на рисунке 3.2.

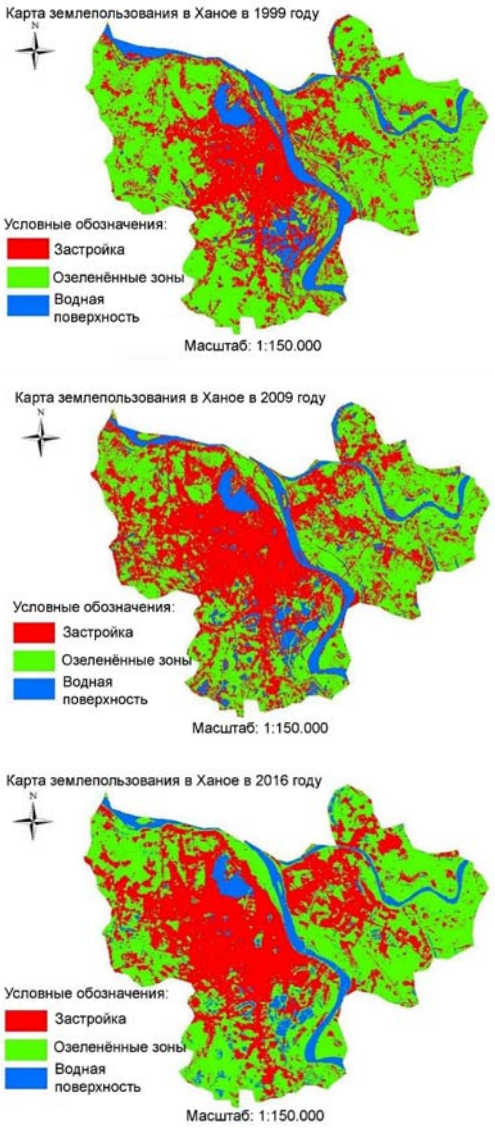


Рисунок 3.1. Карта землепользования / земельного покрова в Ханое для 1999, 2009 и 2016 годов

	Застройка	Озеленённые зоны	Водная поверхность
1999	14077,17	25414,47	4625,19
2009	18909,9	20499,12	4694,94
2016	17989,83	21934,17	4179,96

Рисунок 3.2. Диаграмма, показывающая соотношение покрытий земного покрова в Ханое для 1999, 2009 и 2016 годов

В сравнении с 1999 годом структура землепользования в 2009 и 2016 годах претерпела значительные трансформации, которые преимущественно затронули незастроенные территории и жилые массивы. В период с 1999 по 2016 год наблюдался существенный рост площади застройки: в 1,34 раза в 2009 году относительно 1999-го и в 1,27 раза в 2016 году относительно 2009-го. Данная тенденция обусловлена государственной стратегией по расширению жилого фонда в северо-восточном, западном и юго-западном направлениях.

Анализ земного покрова свидетельствует о том, что основные изменения в землепользовании связаны с сокращением площади открытых почв и интенсивным расширением городских застроенных территорий. В контексте экономического роста и административного расширения города Ханоя произошли масштабные изменения в структуре землепользования, вызванные процессами урбанизации и увеличением доли жилых и промышленных зон. Ключевыми факторами, стимулировавшими данные изменения, стали демографический рост, экономическое развитие и политические реформы [146].

На рисунке 3.3 представлены карты нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) за 1999, 2009 и 2016 годы, сформированные на основе данных спутников Landsat. Индекс NDVI позволяет количественно оценить плотность растительного покрова на исследуемой

территории. Во всех трёх временных интервалах максимальные значения NDVI соответствуют лесным массивам и активным сельскохозяйственным угодьям, тогда как минимальные значения характерны для городских застроенных территорий, заброшенных земель и открытых грунтов. В 1999 году значительная часть северо-восточной части города была представлена открытыми почвами, что обусловило низкие показатели NDVI. К 2009 и 2016 годам низкие значения индекса в южной части города были связаны с наличием водно-болотных угодий.

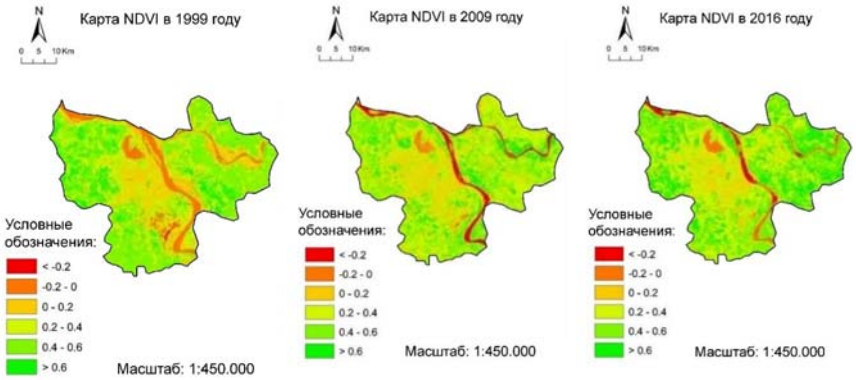


Рисунок 3.3. Карты с указанием NDVI городов по спутниковым снимкам в 1999, 2009 и 2016 годах

На рисунке 3.4 представлены карты нормализованного разностного индекса застройки (Normalized Difference Built-Up Index, NDBI) города за 1999, 2009 и 2016 гг. Для всех рассматриваемых периодов характерно преобладание высоких значений NDBI в центральной части города. Сопоставление с данными индекса NDVI за 1999 год позволяет выявить области с высокими значениями NDBI в северо-восточном секторе, что обусловлено присутствием открытых почв. К 2009 и 2016 годам зоны с высокими показателями NDBI существенно расширились, выйдя за границы центра города в северо-восточном направлении. Данная динамика расширения застроенных территорий в 2009 и 2016 годах коррелирует с высокими темпами урбанизации периферийных районов города в указанный период.

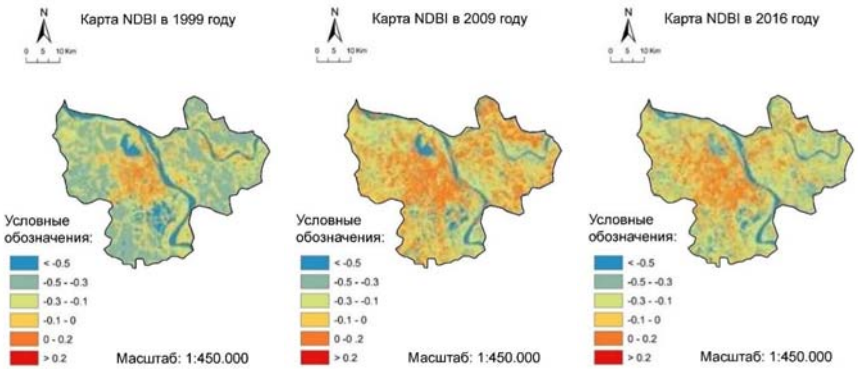


Рисунок 3.4. Карты с указанием NDBI городов по спутниковым снимкам в 1999, 2009 и 2016 годах

Аналогично, с использованием тепловизионных данных спутников Landsat было проанализировано пространственное распределение температуры поверхности земли (LST) в Ханое за 1999, 2009 и 2016 гг. (рис. 3.5, табл. 3.1). В исследуемый период (1999–2016 гг.) максимальные значения LST фиксировались в центральной части города (> 24 °C). Данный факт обусловлен тем, что в центре города сосредоточены многоэтажные жилые массивы с максимальной этажностью. Высокая плотность застройки в центральном районе характеризуется преобладанием водонепроницаемых поверхностей (преимущественно асфальтобетонных покрытий), которые интенсифицируют поглощение солнечной радиации и её последующую трансформацию в тепловую энергию [146]. Дополнительным фактором повышения температуры в промышленных зонах являются техногенные тепловыделения, что приводит к росту LST по сравнению с окружающими территориями [146]. В результате в указанных зонах температура поверхности существенно выше, чем в прилегающих районах, и может достигать 30 °C и более [146].

В сельской местности значения LST ниже, что особенно заметно по данным за 1999 год (диапазон 20–24 °C). Анализ данных за 1999, 2009 и 2016 гг. показал, что минимальные значения температуры поверхности (ниже 20 °C) характерны для лесных массивов и водных объектов (рек и озёр). Если в 1999 и 2009 гг. зоны высокого температурного режима были локализованы в центре города [146], то со временем наблюдается экспансия зон повышения температуры на периферию центральной части. К 2016

году площади с высокими значениями LST значительно расширились в северо-восточном направлении, что коррелирует с динамикой изменений структуры землепользования [146]. Установлено, что пространственная структура NDBI в целом совпадает с распределением температуры поверхности земли, в то время как для индекса NDVI наблюдается обратная корреляция. Таким образом, деградация растительного покрова в центре города ведет к росту LST и увеличению значений NDBI по сравнению с периферийными районами [146].

Сравнительный анализ температурных показателей за три рассматриваемых периода представлен в таблице 3.2 [146]. Для верификации данных LST, полученных по снимкам Landsat, использовались показатели температуры воздуха с четырех метеостанций Ханоя (Ланг, Сон Тай, Ба Ви, Ха Донг) (рис. 3.6) [146]. Разность между температурой воздуха и температурой поверхности варьируется в пределах от 0,3 до 3,34 °C. В городских районах данный температурный градиент выражен сильнее, чем в сельской местности, относительно естественного состояния поверхности земли [146].

Таблица 3.1

Сравнение температуры поверхности земли городов 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 3.2

Сравнение данных по температуре земной поверхности (LST)
с данными по температуре воздуха, полученными
с метеорологических станций городов

Проверка температуры поверхности Земли									
Метеостанция	23.09.1999			05.11.2009			07.10.2016		
	Значение LST (℃)	Температура воздуха (AT), (℃)	Разница LST-AT (℃)	Значение LST (℃)	Температура воздуха (AT), (℃)	Разница LST-AT (℃)	Значение LST (℃)	Температура воздуха (AT), (℃)	Разница LST-AT (℃)
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 3.7 представлены зоны городского острова тепла (ГОТ) в Ханое за 1999, 2009 и 2016 гг. Феномен городского острова тепла был локализован в центральной части города [146]. В последующие годы наблюдалась экспансия данной зоны за пределы центра; в частности, к 2016 году расширение произошло в северо-восточном направлении, что согласуется с данными карт землепользования и динамикой изменения температуры поверхности земли города [146]. В 1999 году площадь ГОТ составляла 10,98%, а к 2016 году она увеличилась на 20,85%, достигнув значения 31,83% [146]. Таким образом, расширение городского острова тепла в Ханое коррелирует с темпами урбанизации в указанный период [146]. В 2016 году зона ГОТ была зафиксирована в северо-восточном секторе города, что совпадает с районом его территориального расширения. Данный результат свидетельствует о тесной взаимосвязи между пространственным распределением городского острова тепла и изменениями в структуре землепользования [146].

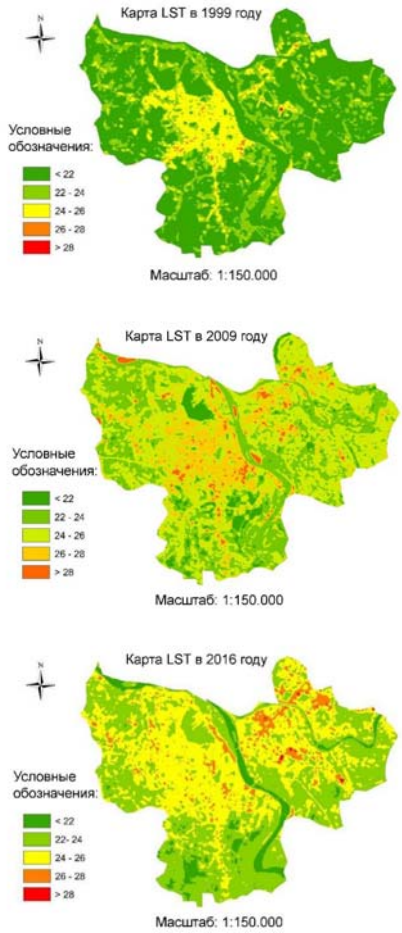


Рисунок 3.5. Карты температуры поверхности земли (LST) в Ханое по данным Ландсат в 1999, 2009 и 2016 годах

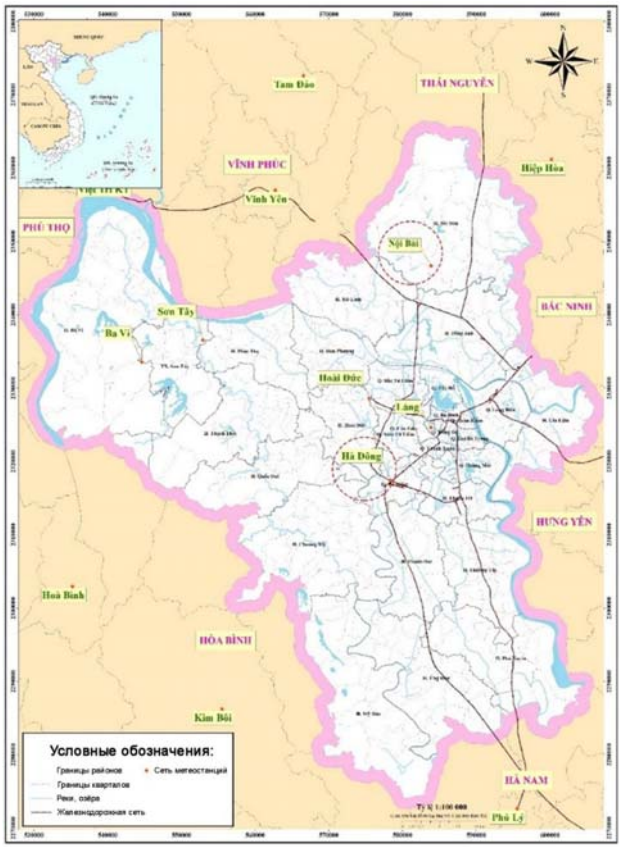


Рисунок 3.6. Расположение существующих метеостанций в Ханое

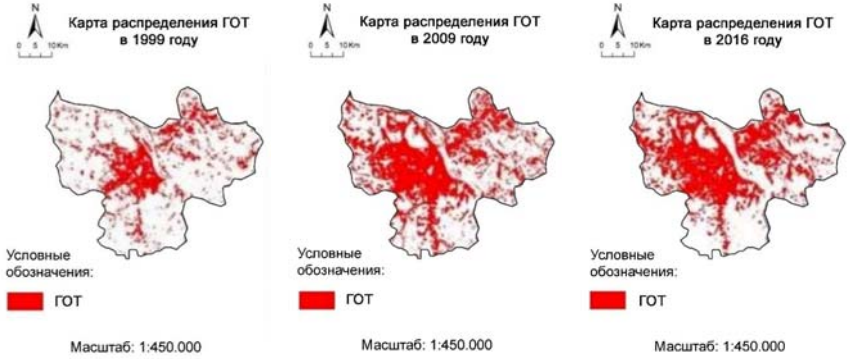


Рисунок 3.7. Распределение городских тепловых островов в Ханое в 1999, 2009 и 2016 годах

На рисунке 3.8 представлена оценка пространственной изменчивости городского острова тепла (ГОТ), характеризуемая индексом дисперсии городского теплового поля (Urban Thermal Field Variance Index — UTFVI). Степень воздействия ГОТ анализировалась исходя из уровней теплового комфорта. Территория города была дифференцирована по двум крайним состояниям теплового комфорта: зоны с критическим (наихудшим) тепловым режимом (UTFVI > 0,02) и зоны с благоприятным тепловым режимом (UTFVI < 0). В целом для большей части города характерны благоприятные условия проживания. Участки с UTFVI < 0 локализованы преимущественно в сельских районах, а также на лесных массивах и сельскохозяйственных угодьях. Напротив, территории, характеризующиеся неблагоприятными и критическими условиями (UTFVI > 0,01), имеют ограниченную площадь и расположены по периферии жилой застройки. Особо следует отметить, что зоны с наихудшим тепловым состоянием приходятся на центральную часть города и открытые участки почвы. Анализ спутниковых данных и показателей метеостанций за 2016 год свидетельствует о том, что в центральном и северо-восточном секторах города произошли изменения в структуре земельного покрова, сопровождавшиеся ростом температуры поверхности, что обусловило выраженный эффект ГОТ. Совпадение границ зон ГОТ с районами с критическими значениями UTFVI (> 0,02) позволяет идентифицировать очаги наиболее интенсивного теплового загрязнения и обосновывает необходимость реализации мер по минимизации воздействия ГОТ именно на данных территориях.

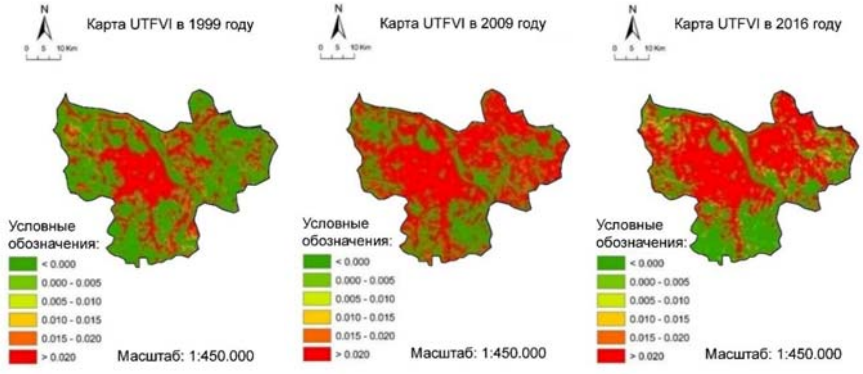


Рисунок 3.8. Карты UTFVI для городов в 1999, 2009 и 2016 годах

3.1.2. Воздействие изменения землепользования на температуры деятельной поверхности

В таблице 3.3 и на рисунке 3.9 показано, что с 1999 по 2009 год площадь зелёных насаждений уменьшилась на 4906,08 га, из которой площадь застройки составила 4835,43 га. Однако, как показано в таблице 3.4 и на рисунке 3.11 в период с 2009 по 2016 год площадь зелёных насаждений увеличилась на 1435 га, из которых площадь застройки незначительно уменьшилась на 920 га.

Таблица 3.3

Матрица преобразования земельного покрова в центре городов с 1999 по 2009 годы

Площадь, га	2009 год			Общая площадь в 1999 году
	Застройка	Озеленённые зоны	Поверхность воды	
Застройка	10901,7	2479,23	693,54	14074,5
Озеленённые зоны	7340,4	17438,76	625,95	25405,1
Поверхность воды	667,8	581,04	3375,45	4624,29
Общая площадь в 2009 году	18909,9	20499,03	4694,94	
Увеличенная площадь	8008,2	3060,27	1319,49	
Чистое изменение	4835,43	-4906,08	70,65	

Анализ динамики земельного покрова свидетельствует о том, что основные изменения в структуре землепользования обусловлены сокращением площади открытых почв и существенным увеличением доли застроенных территорий, которая к 2016 году достигла 28,44% от общей площади. Экономический рост и административное расширение границ привели к масштабным трансформациям земельного покрова Ханоя, вызванным экспансией городской застройки, включая расширение жилых и промышленных секторов. Ключевыми факторами, стимулировавшими данные изменения, стали демографический рост, экономическое развитие и проведение политических реформ.

Таблица 3.4

Матрица преобразования земельного покрова в центре городов с 2009 по 2016 годы

Площадь, га	2016 год			Общая площадь в 2009 году
	Застройка	Озеленённые зоны	Поверхность воды	
Застройка	14202	4389	319	18910
Озеленённые зоны	3546	16741	212	20499
Поверхность воды	242	804	3649	4695
Общая площадь в 2016 году	17990	21934	4180	
Увеличенная площадь	3788	5193	531	
Чистое изменение	-920	1435	-515	

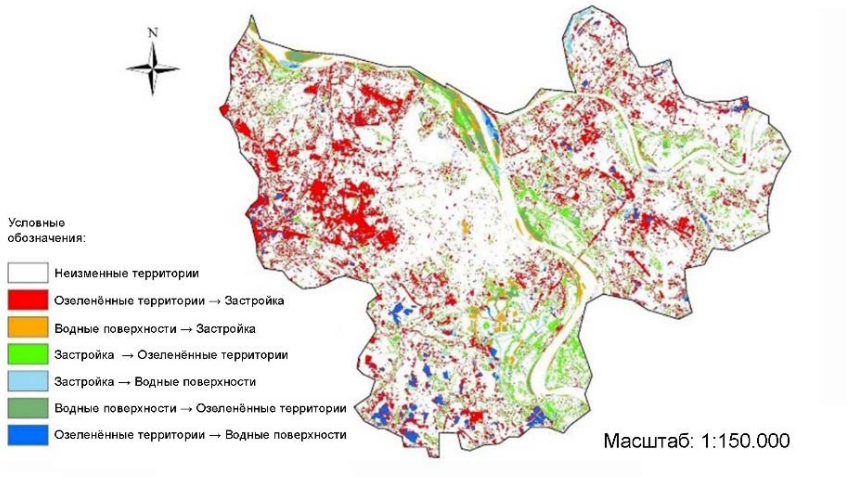


Рисунок 3.9. Схема преобразования земельного покрова в Ханое с 1999 по 2009 годы

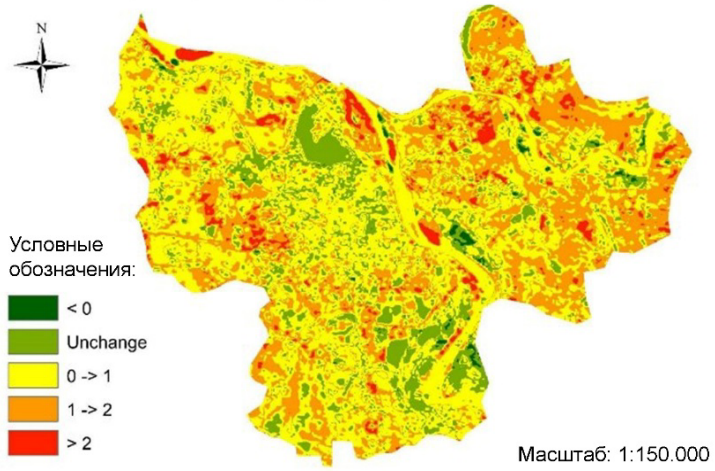


Рисунок 3.10. Схема разницы температур поверхности с 1999 по 2009 годы.

Сопоставление динамики температуры поверхности земли с картой изменений земельного покрова демонстрирует, что основные температурные аномалии локализованы в красных и оранжевых зонах, соответствующих ранее озеленённым территориям, что указывает на существенное сокращение площади растительности (см. рис. 3.10 и 3.12). С целью уточнения количественных показателей температурных изменений был проведен корреляционный анализ зон, в которых разница температур превышает 2 ℃, и динамики сокращения озеленения. Установлено, что при трансформации озеленённых территорий в застроенные температура поверхности земли увеличивается на 2,5 ℃ (табл. 3.5). Напротив, на участках, где застройка замещается растительностью или водными объектами, наблюдается снижение температуры на 0,5–1,5 ℃ (табл. 3.5 и 3.6). Таким образом, наличие зелёных насаждений и водных поверхностей выступает ключевым фактором минимизации температурного режима городской среды. Наиболее интенсивный охлаждающий эффект фиксируется при создании водных объектов. В частности, в Ханое в период с 1999 по 2009 год произошло значительное сокращение площади озеленения, что обусловило усиление эффекта городского острова тепла (рис. 3.13–3.16).

Таблица 3.5

Матрица преобразования земного покрова и разница температур поверхности земли на территории городов 1999-2009 гг.

	Средняя температура поверхности в 1999 году, ℃	Средняя температура поверхности в 2009 году, ℃	Разница, ℃
Застройка	25,58	26,5	0,92
=> Озеленённые территории	24	26	2
=> Водные поверхности	23	22,5	-0,5
Озеленённые территории	22,5	25,67	3,17
=> Застройка	23	25,5	2,5
=> Водные поверхности	22,5	23,5	1
Водные поверхности	21	22,3	1,3
=> Застройка	20,67	23	2,33
=> Озеленённые территории	18,43	21	2,57

Таблица 3.6

Матрица преобразования земного покрова и разница температур поверхности земли на территории городов 2009-2016 гг.

	Средняя температура поверхности в 2009 году, ℃	Средняя температура поверхности в 2016 году, ℃	Разница, ℃
Застройка	26,5	26,5	0
=> Озеленённые территории	25	23,5	-1,5
=> Водные поверхности	24,5	23	-1,5
Озеленённые территории	25	24,3	-0,7
=> Застройка	26	26	0

=> Водные поверхности	25	23	-2
Водные поверхности	22,5	22,5	0
=> Застройка	22,5	25	2,5
=> Озеленённые территории	22	23	1

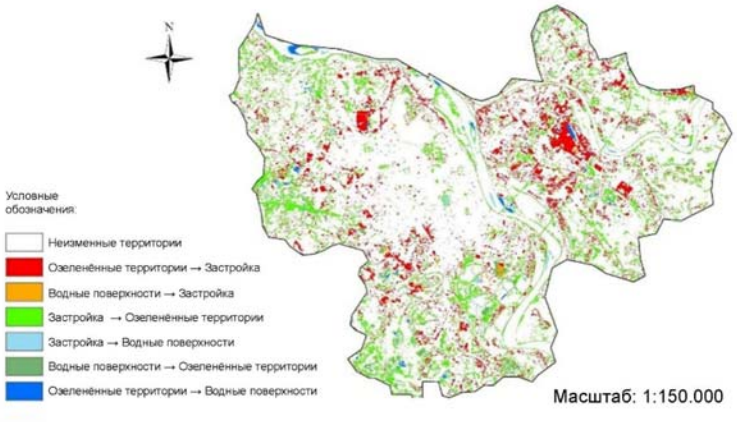


Рисунок 3.11. Схема преобразования земельного покрова в Ханое с 2009 по 2016 годы

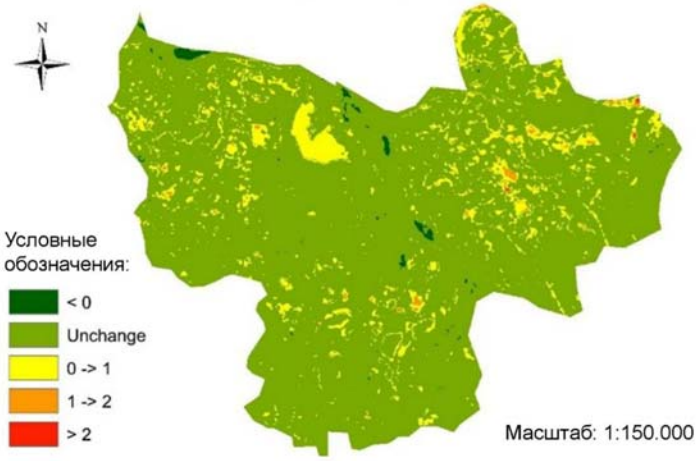


Рисунок 3.12. Схема разницы температур поверхности с 2009 по 2016 годы

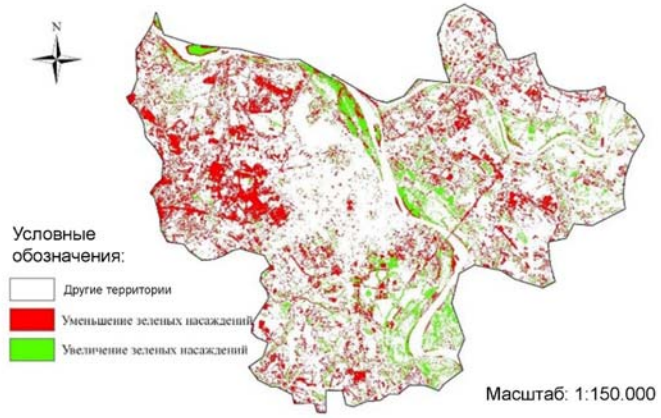


Рисунок 3.13. Схема изменения площади зелёных насаждений с 1999 по 2009 гг.

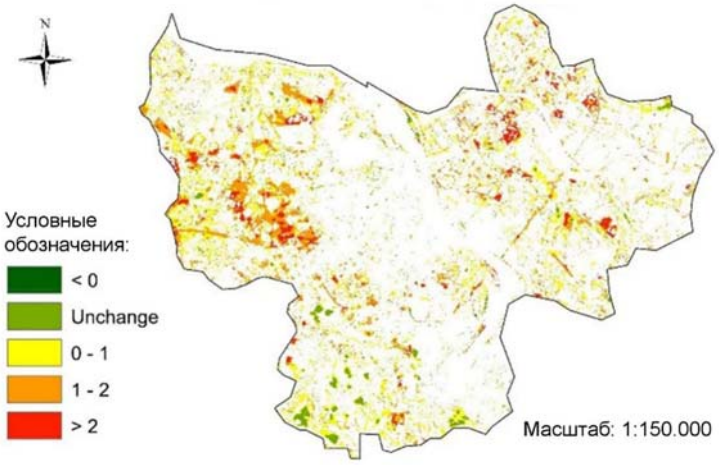


Рисунок 3.14. Связь между увеличением температуры поверхности земли и сокращением насаждений с 1999 по 2009 годы

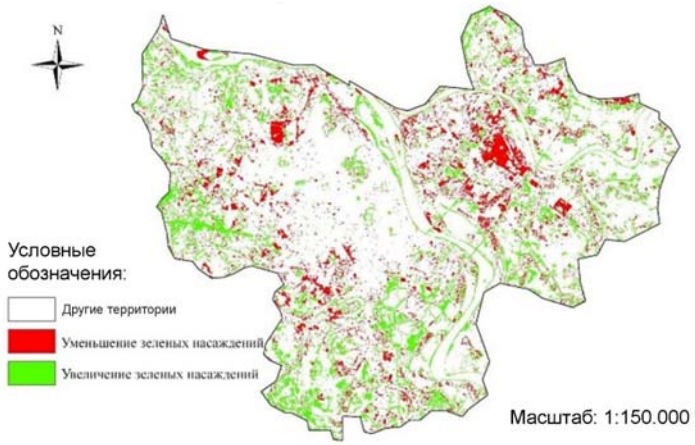


Рисунок 3.15. Схема изменения площади зелёных насаждений с 2009 по 2016 годы

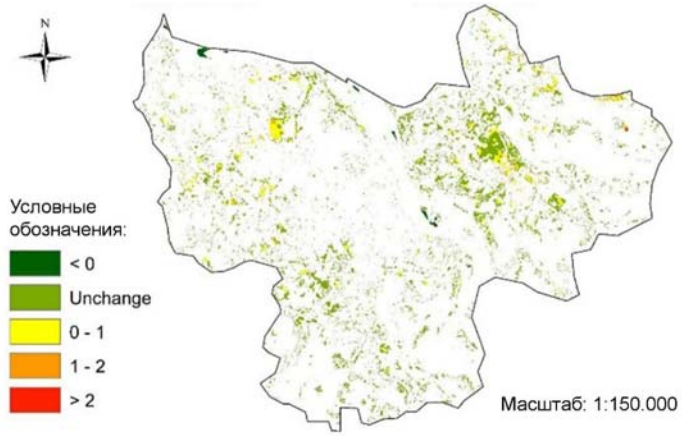


Рисунок 3.16. Связь между увеличением температуры поверхности земли и сокращением насаждений с 2009 по 2016 годы

Таким образом, влияние урбанизации на окружающую среду представляет собой одну из наиболее острых проблем современности. Результаты исследования подтверждают необходимость приоритизации задач по сохранению природного каркаса и внедрению «зелёных» технологий для обеспечения устойчивого развития растущих городских агломераций.

Данные вызовы требуют системного подхода и принятия соответствующих административных мер в ближайшей перспективе. При разработке Генеральных планов городов-спутников представляется необходимым учитывать риски усиления эффекта городского острова тепла (ГОТ), опираясь на эмпирические данные настоящего исследования, а также применять рекомендации по оптимизации системы городского озеленения. Очевидно, что стратегия устойчивого развития предполагает неразрывную связь между городским расширением и сохранением (а также развитием) рекреационных и зелёных зон. В частности, трансформация сельскохозяйственных угодий в муниципалитетах, влияющая на экономический потенциал и уровень занятости, стимулирует как миграционные потоки, так и рост стоимости земельных активов. При этом высокая неопределённость динамики социально-экономических и демографических переменных на урбанизированных территориях затрудняет долгосрочное прогнозирование. Следовательно, вопросы расселения населения, локализации промышленных зон и функционального зонирования территорий должны решаться в комплексной взаимосвязи с развитием городской среды. Данный подход приобретает особую значимость в контексте выявленного эффекта ГОТ, интенсивность которого может быть снижена за счёт реализации стратегий устойчивого развития на муниципальном уровне.

3.2. Теоретическое решение задачи ГОТ, связанной с конфигурацией зелёных насаждений в районе 21 озер городов и температурой деятельной поверхности

Водные объекты Ханоя оказывают существенное влияние на формирование городского ландшафта и выполняют важную климатическую функцию, обеспечивая снижение температуры городской среды в тёплый период. Кроме того, прибрежные зоны рек и озёр выступают в качестве рекреационных пространств, предназначенных для культурно-досуговой деятельности городского населения [19].

Интенсивные процессы урбанизации способствуют сокращению площади водных зеркал, а также приводят к росту частоты паводковых явлений и ухудшению экологического состояния окружающей среды [19]. Обмеление и загрязнение рек и озёр, которые формируют естественную гидрографическую сеть города, затрудняют регулирование ливневых стоков и негативно сказываются на микроклимате прилегающих территорий.

В контексте развития водной системы Ханоя можно выделить следующие ключевые проблемы [19]:

- антропогенное загрязнение поверхностных водных объектов и прибрежных зон;
- отсутствие в Генеральном плане города нормативной базы и стандартов по управлению водными ресурсами.

Согласно данным таблицы 3.7, в летний период средняя интенсивность снижения температуры воздуха составила 3 °C (максимальный показатель зафиксирован в районе озера Бан Мау — 5,2 °C, минимальный — в районе озера Бо Де — 1 °C). Средний радиус влияния озёр на температурный режим составил 714 м (максимальное значение наблюдается для озера Баи Мау — 1400 м, минимальное — для озёр Бо Де и Хай Ба Чынг — 200 м).

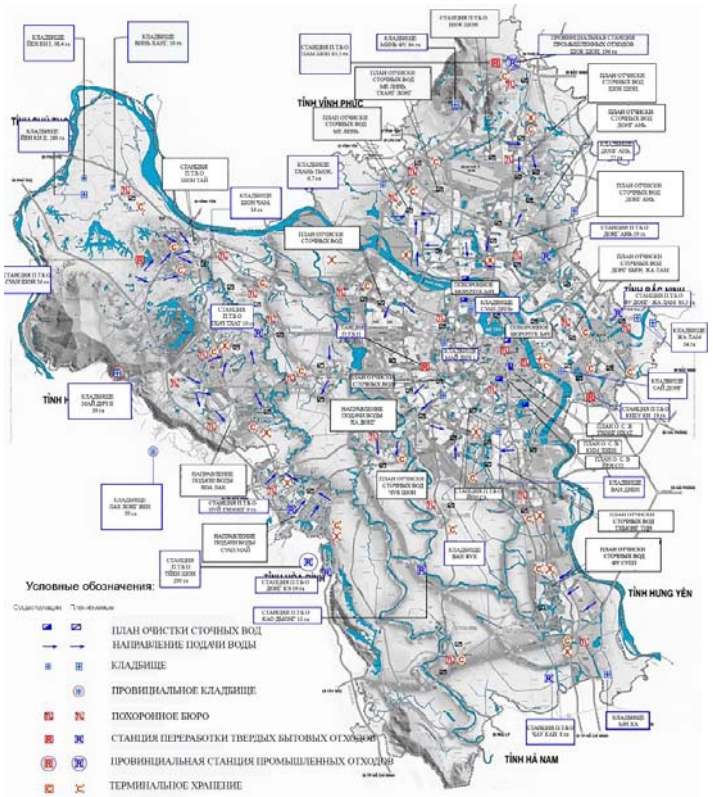


Рисунок 3.17. Речная система в Ханое

Таблица 3.7

Снижение температуры над озёрами в сравнении с температурами прилегающих районов и радиус влияния озёр на температуру воздуха в теплое и холодное время года в Ханое [147]

№	Название озера	Площадь, га	Периметр, м	Показатель SI[6], м/га	Лето		Зима	
					$\Delta_{тпз}$, °C	Расстояние, м	$\Delta_{тпз}$, °C	Расстояние, м
1	Хоан Кием	15,32	1671,73	109	3,6	700	2	700
2	Хуи Ван	1,31	446,58	341	1,7	300	0,9	400
3	Тху Ле	12,95	1669,06	129	3,7	1200	1,4	1400
4	Тхань Конг	5,49	960,29	175	3,2	900	1,2	1400
5	Са Дан	3,84	760,34	198	3,6	700	1,4	500
6	Ким Лиен	2,01	631,36	314	1,6	500	0,7	500
7	Жанг Во	7,17	1003,6	140	4	1200	1	700
8	Ху Таи	506,27	20553,46	41	3,3	1000	1,7	1200
9	Нгок Хань	3,63	767,89	212	1,7	400	0,7	300
10	Ланг	1,63	677,53	416	2,4	600	0,5	200
11	Донг Да	13,61	1832,66	135	4,5	1100	1,2	900
12	Баи Мау	26,05	2130,89	82	5,2	1300	1,3	1400
13	Тхиен Куанг	6,79	1079,59	159	4	700	1,2	700
14	Хай Ба Чынг	1,07	384,18	359	1,5	200	0,7	300
15	Тхань Нхан	7,83	1317,13	168	4,1	900	1,1	1400
16	Жап Бат	1,56	542,78	348	2,3	600	1,3	800
17	Ден Лы	4,97	1062,99	214	2,4	600	1	300
18	Линь Куанг	2,07	556,13	269	3	500	0,8	300
19	Нгиа Тан	4,98	931,89	187	3,7	800	1,2	700
20	Ле Чонг Тан	2,94	640,95	218	2,7	600	1,6	600
21	Бо Де	2,02	779,74	386	1	200	0,8	700
Среднее значение:		30,17	1923,85	219,05	3,01	714,29	1,13	733,33

[6] (SI) Показатель формы определяется отношением периметра (м) к площади (га) зеленого пространства

В зимний период средняя интенсивность снижения температуры воздуха была ниже и составила 1,1 °C (максимальное снижение — над озером Хоан Кием — 2 °C, минимальное — над озером Ланг — 0,5 °C). Средний радиус температурного влияния озёр составил 733 м (максимальные значения зафиксированы для озёр Тхань Конг, Тхань Нхан и Бан Мау — 1400 м, минимальное — для озера Ланг — 200 м). Сравнительный анализ показывает, что охлаждающий эффект водных объектов в летний период значительно более выражен, чем в зимний.

На рисунке 3.18 отражена нелинейная зависимость между средней интенсивностью понижения температуры и средней площадью зоны температурного воздействия. Установлено, что интенсивность снижения температуры увеличивается пропорционально расширению площади озеленения. Согласно построенной нелинейной модели, доля объяснённой дисперсии средней интенсивности снижения температуры составляет 71,93 % для летнего периода и 36,86 % для зимнего. Таким образом, масштаб зелёных массивов выступает в качестве определяющего фактора, влияющего на эффективность охлаждения городской среды.

.

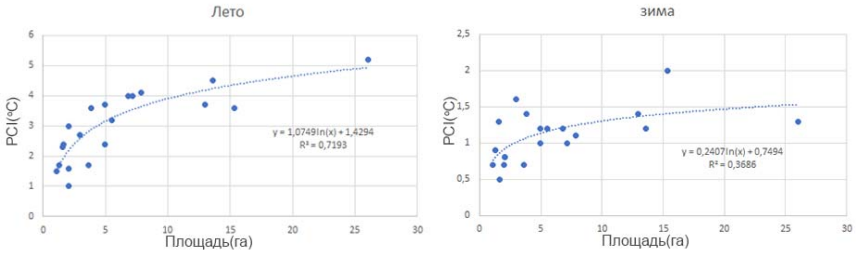


Рисунок 3.18. График взаимосвязи между средней интенсивностью снижения температуры, °C, и средней площадью снижения температуры, га

Рисунок 3.19 иллюстрирует, что расширение площади зелёных зон способствует увеличению охвата охлаждением соответствующих городских территорий. На рисунке 3.20 представлена обратная линейная зависимость между интенсивностью понижения температуры и индексом формы зелёных насаждений (SI) [19]. Наблюдается тенденция: по мере роста показателя SI интенсивность охлаждения снижается. Следовательно, для максимизации охлаждающего эффекта целесообразно минимизировать показатель SI путём увеличения площади озеленения [19].

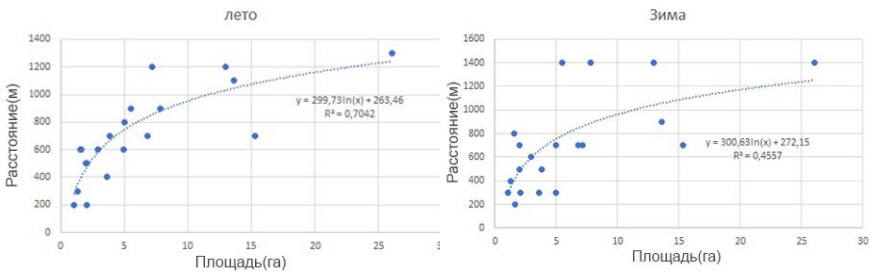


Рисунок 3.19. График взаимосвязи между радиусом снижения температуры, м, и площадью зелёного пространства, га

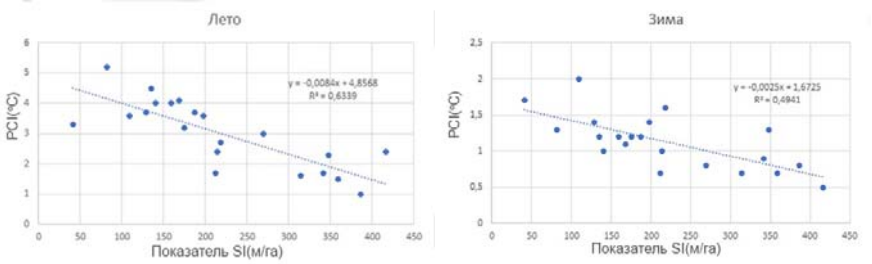


Рисунок 3.20. График взаимосвязи между средней интенсивностью снижения температуры, °C, и показателем SI, м/га

Высокая плотность гидрографической сети Ханоя затрудняет дифференциацию влияния водных поверхностей и растительности на температурный режим города. Согласно результатам исследования, охлаждающий эффект зелёных зон в значительной степени обусловлен площадью зеркала воды и степенью затенения, при этом незначительная доля открытых почв не оказывает существенного влияния на температурный градиент между внутренним и внешним контурами зелёного массива [19]. Таким образом, площадь озеленения выступает определяющим фактором снижения температуры в Ханое. С целью оптимизации охлаждения городской среды при проектировании рекреационных зон необходимо уделять приоритетное внимание точному расчету площади зелёных насаждений [19].

3.3. Оценка результатов рачёта температуры асфальтобетонных дорожных покрытий в Ханое

Анализ температурного режима асфальтобетонных дорожных покрытий был выполнен для июня 2010 года, который, согласно данным метеостанции «Ланг» за период 2010–2015 гг., характеризовался максимальными температурными показателями (приложение Е). Выбор экстремальных условий позволил оценить предельное энергопотребление систем охлаждения жилых зданий в условиях выраженного эффекта городского острова тепла. В соответствии с методикой Superpave, расчёт основывается на максимальной температуре верхнего слоя покрытия на глубине 2 см и минимальной расчётной температуре поверхности. Установлена зависимость температуры асфальтобетонных покрытий от температуры окружающего воздуха, зафиксированной локальными метеостанциями в соответствующих городских зонах. В расчётах использованы климатические данные за январь 2011 и июль 2010 года (рис. 3.21, рис. 3.22).

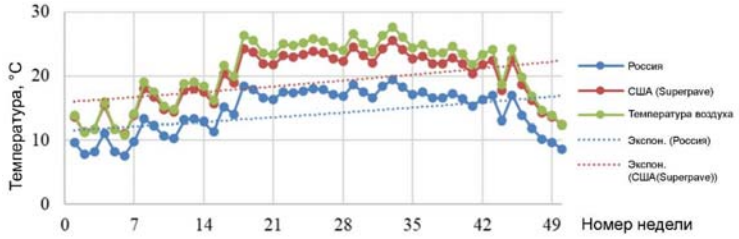


Рисунок 3.21. График сравнения минимальной температуры асфальтобетонных дорожных покрытий при использовании метода Ковалёва Ю.Н. и метода «Superpave»

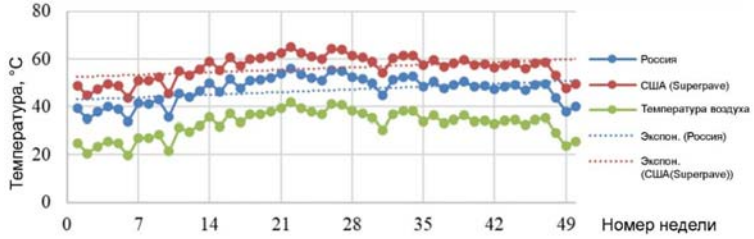


Рисунок 3.22. График сравнения максимальной температуры асфальтобетонных дорожных покрытий при использовании метода Ковалёва Ю.Н. и метода «Superpave»

По результатам расчёта температуры поверхности дорожных покрытий, можно сделать следующие выводы:

1. Особенно важно прогнозировать изменения температурного режима дорожного покрытия в зимний период и в пасмурные дни.

2. Температура дорожных покрытий изменяется в течение дня в значительных пределах, что отрицательно сказывается на физико-механических свойствах, транспортных и эксплуатационных характеристиках дорожного покрытия.

3. Диапазон колебаний температуры дорожных покрытий приблизительно пропорционален диапазону колебаний температуры воздуха, что подтверждает их взаимосвязь.

4. Амплитуда суточных колебаний температуры дорожного покрытия летом значительно больше, чем зимой.

3.4. Расчёт интенсивности городского острова тепла с помощью моделирования в программе ENVI-met

Настоящее исследование направлено на изучение влияния интенсивности городской застройки на микроклиматические условия среды. В частности, исследуется зависимость температурного режима жилого района от степени его озеленения.

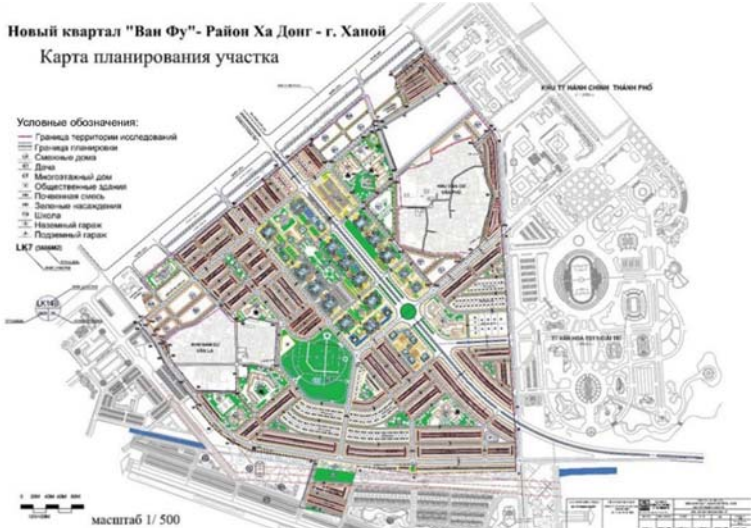


Рисунок 3.23. Территория исследования

В качестве объекта исследования был выбран микрорайон Ван Фу (центр района Ха Донг) с численностью населения 20 000 человек и общей площадью 94,1 га; планировка района соответствует современным градостроительным нормам и требованиям к инфраструктуре (рис. 3.23). Доля улично-дорожной сети составляет 34,4% от общей площади территории. Морфология застройки представлена офисными зданиями высотой 36–40 этажей и жилыми массивами с малоэтажной застройкой (4–5 этажей). Общая характеристика территории включает низкий процент озеленения и наличие узких улиц, примыкающих к магистралям с высокой интенсивностью транспортного потока, являющимся основным источником антропогенных загрязнений.

Таблица 3.8

Исходные данные области исследования в ENVI-met

Размер имитационной модели (м)	1300 x 1200 x 244
Размер модели (количество сеток в направлении xyz	187 x 192 x 35
Размер ячейки сетки (в метрах) dx, dy, dz	8 x 8 x 8
Географическое положение (широта, долгота)	20.96, 105.76
Вложенные сетки	8
Метод генерации вертикальной сетки	Эквидистантный
Часовой пояс	GMT +7
Основные параметры модели	
Дата моделирования	29 мая 2019
Начало и продолжительность моделирования	00:00, 24ч
Скорость ветра, измеренная на высоте 10 м	2.53 м/с
Направление ветра	142.60°
Начальная температура атмосферного воздуха	29.625℃ = 302.775°K
Минимальная температура (дата моделирования)	26.976℃
Максимальная температура (дата моделирования)	31.73℃
Относительная влажность на высоте 2 м (%)	66.93%
Удельная влажность в верхней части модели (2500м, г / кг)	16.33 г / кг
Минимальная влажность (дата моделирования)	51.66%; 18:00
Максимальная влажность (дата моделирования)	78.36%; 6:00

Для повышения достоверности результатов компьютерного моделирования в расчетную область была включена прилегающая к центру района территория. С целью моделирования микроклимата и разработки сценариев по минимизации эффекта городского острова тепла (ГОТ) были использованы данные за один из наиболее жарких дней 2019 года. Согласно таблице 3.8, пиковое значение температуры в мае зафиксировано в 17:00 и составило 31,73 °C.

В базе данных ENVI-met представлены различные материалы и трёхмерные растения, позволяющие детально реконструировать городскую среду. Каждый тип материала характеризуется удельной теплоемкостью, коэффициентом поглощения, альбедо и другими параметрами. На рисунке 3.24 и в таблице 3.9 представлены все выбранные материалы, которые использовались для построения модели территории.

Рисунок 3.24. Типы материалов исследуемой территории (2Д)

Таблица 3.9

Типы элементов строительной среды

Тип элемента	Альбедо
Бетонная стена	0.3
Заасфальтированная дорога	0.2
Тротуары	0.3
Почва	0.1

Таблица 3.10

Данные по площади для различных типов поверхностей

Площадь, м^2				
Застройка	Тротуар	Дороги	Зелёные насаждения	Итого
311461,63	453932,49	242524,5	77335,13	1085253,76

Данные рисунка 3.24 и таблицы 3.10 свидетельствуют о том, что городская среда характеризуется преобладанием поверхностей с высоким альбедо и низкой плотностью растительного покрова, сосредоточенного преимущественно на открытых пространствах и вдоль транспортных магистралей. Ввиду нелинейности и сложности теплофизических процессов в городской застройке, целесообразно применение динамического численного моделирования, что позволяет объективно оценить эффективность предлагаемых мероприятий в сравнении с базовым сценарием. Высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0{,}94$), полученный при сопоставлении средних значений натурных измерений температуры с результатами моделирования, подтверждает высокую достоверность расчётов в среде ENVI-met для данного участка (рис. 3.25). Программный комплекс ENVI-met позволяет эффективно воспроизводить сложные взаимодействия городской климатической системы, обеспечивая одновременный расчет радиационного, теплового и гидравлического баланса, а также параметров аэродинамики городских пространств в различных масштабах. Полученные результаты могут быть использованы при климатическом моделировании территорий, находящихся в условиях влажного тропического климата Ханоя.

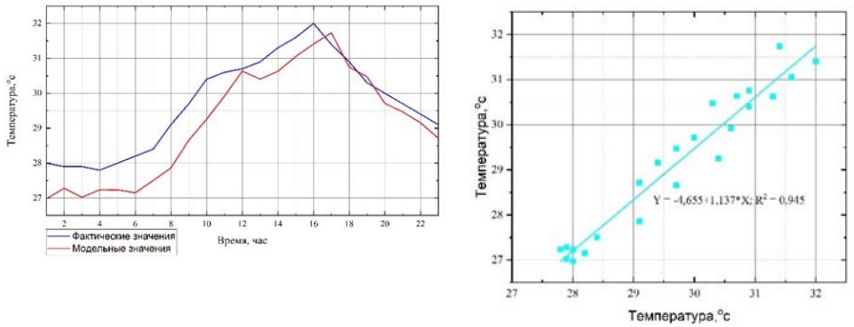


Рисунок 3.25. Результаты проверки, а - Температура в зависимости от времени, б - Фактические значения в сравнении с расчётными

На рисунке 3.25 представлены результаты суточного моделирования микроклимата нового городского района Ван Фу (29 мая 2019 г.), выполненного с помощью программного комплекса ENVI-met. Согласно полученным данным, температура в зонах плотной многоэтажной застройки колеблется в диапазоне от 27,32 ℃ до 32,28 ℃, в то время как на участках с малоэтажной и разреженной застройкой наблюдаются более низкие значения — от 24,91 ℃ до 31,42 ℃. Интенсивность городского острова тепла (ГОТ) в районе Ван Фу рассчитывалась как разница температур между городской застройкой и периферийными территориями. Пиковое значение интенсивности ГОТ составило 2,41 ℃ и было зафиксировано в интервале с 0:00 до 1:00. Стоит отметить, что температурный градиент между городскими и сельскими территориями достигает максимума в ясные вечера, что объясняется более интенсивным ночным охлаждением открытых сельских ландшафтов по сравнению с плотной городской застройкой, аккумулирующей тепло в дорожных покрытиях и строительных конструкциях.

Динамика температуры воздуха в районе Ван Фу характеризуется постепенным ростом с 8:00 до 17:00 с достижением максимального значения 32,28 ℃ в 16:00 (рис. 3.26а). Результаты моделирования демонстрируют высокую корреляцию с фактическими данными наблюдений в Ханое. Данный температурный режим обусловлен совокупным влиянием городского микроклимата и плотности высотной застройки. В период с 12:00 до 16:00 зафиксированные значения температуры (30,2–32,28 ℃) превышают нормативные пороги наружного теплового комфорта для жителей Вьетнама (таблица 3.11), что оказывает негативное воздействие на социальную и экономическую активность населения в данной городской зоне.

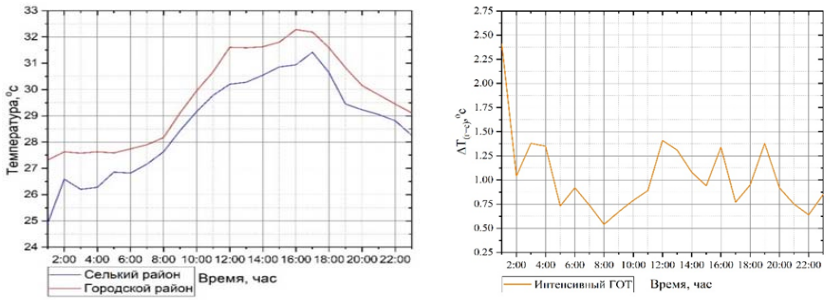


Рисунок 3.26. а-Разница температур воздуха в городской и сельской местности за 24-часовой период; б- Интенсивный ГОТ в течение 24-часового периода

Таблица 3.11

Тепловое ощущение жителей Вьетнама [148, 149]

Микроклимат	Тепловое ощущение	По графику эффективной температуры		Температура воздуха (℃) при φ=80% и v=0,3÷0,5 м/с	
		Холодный сезон	Тёплый сезон	Холодный сезон	Тёплый сезон
Комфортный	Нижнее значение	20,0		21,5	
	Комфортное значение	23,3	24,0	24,5	25,5
	Предельно допустимое значение	26,5	28,0	29	29,5

Результаты моделирования в среде ENVI-met свидетельствуют о наличии проблем с аэрацией городской среды района Ван Фу. Согласно полученным данным, преобладающим направлением ветра является юго-восточное (рис. 3.27б). В центральной части района наблюдается низкая вариативность скорости ветра. Плотная конфигурация застройки препятствует прохождению юго-восточного воздушного потока, что оказывает влияние на температурный режим в зоне малоэтажных зданий в северо-западной части района. В окрестностях северо-западного жилого массива локальные значения температуры достигают 32 ℃.

Анализ температурных экстремумов (минимума в 1:00 и максимума в 16:00) демонстрирует, что суточный ход температуры воздуха в районе Ван Фу характеризуется амплитудой от 3,96 ℃ до 6,10 ℃. В кварталах с высотной застройкой температурные колебания менее значительны по сравнению с районами малоэтажной застройки (рис. 3.28а). Данный эффект обусловлен тем, что массив высотных зданий в дневное время интенсивно аккумулирует солнечную радиацию, а в ночное время осуществляет тепловую эмиссию в окружающую среду. Следовательно, температурный режим в зонах высотной застройки является более стабильным. Параллельно с этим наблюдается зависимость влагоёмкости воздуха от температуры: при понижении температуры воздуха его способность удерживать

влагу сокращается, в то время как при её росте влагоёмкость увеличивается (рис. 3.28б).

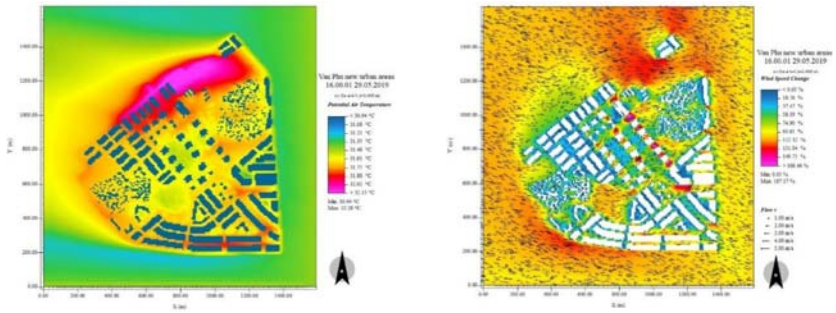


Рисунок 3.27. а-Потенциальная температура воздуха в городском районе Ван Фу в 16:00; б- Скорость и направление ветра в городской зоне Ван Фу в 16:00

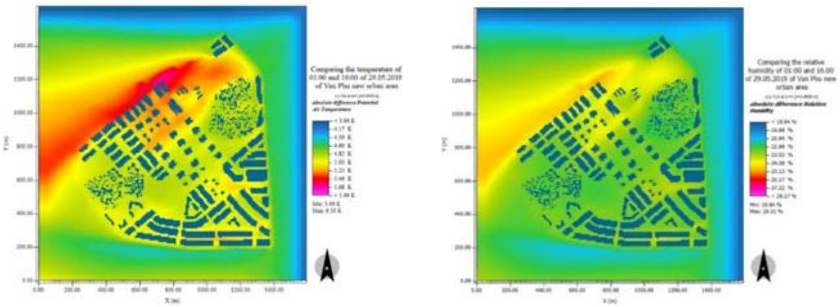


Рисунок 3.28. а- Абсолютная разница потенциалов температуры воздуха; б- Абсолютная разница относительной влажности

Городская среда представляет собой сложную систему, характеризующуюся совокупностью взаимосвязанных факторов, определяющих динамику городского климата. В связи с этим, несмотря на обширную базу данных в литературе по изучению эффекта ГОТ, дифференциация и количественная оценка влияния отдельных факторов остаются сложной задачей.

В данной работе был проанализирован тропический влажный климат района Ван Фу (округ Ха Донг, Ханой) с целью обоснования внедрения элементов городской инфраструктуры, направленных на нивелирование эффекта ГОТ. Коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}94$подтвердил высокую

степень достоверности применения программного комплекса ENVI-met для имитационного моделирования микроклимата в условиях жаркого и влажного тропического пояса.

На следующем этапе исследования будет изучено влияние озеленения и интеграции водных объектов (фонтанов) на показатели теплового комфорта пешеходов и уровень энергопотребления зданий.

Такие параметры, как коэффициент озеленения и доля водных пространств, играют ключевую роль в градостроительном проектировании, однако требуют детального анализа с учётом специфики каждой конкретной территории. Именно в данном аспекте стратегические программы по минимизации эффекта городских островов тепла и достижению целей устойчивого развития в области экологии и энергоэффективности могут продемонстрировать максимальную эффективность.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СНИЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА В Г. ХАНОЙ

4.1. Результаты моделирования по влиянию поверхностных водных объектов на смягчение эффекта ГОТ на примере территории жилого района в Ханое

В настоящее время глобальная проблема изменения климата, обусловленная антропогенным воздействием, приобретает особую актуальность. Данный процесс сопровождается ростом среднеземной температуры воздуха, что наиболее выражено на урбанизированных территориях и проявляется в формировании эффекта городских островов тепла (ГОТ). В этой связи разработка комплексных мер по минимизации температурных аномалий в городах становится приоритетной задачей. Установлено, что развитие городского озеленения в сочетании с сопутствующими мероприятиями позволяет существенно снизить температуру воздуха за счёт увеличения отражательной способности поверхностей (альбедо) в коротковолновом диапазоне. Кроме того, в качестве эффективных инструментов испарительного охлаждения всё чаще рассматриваются системы распылительного увлажнения и создание искусственных водоёмов [150], которые обеспечивают повышение теплового комфорта как в интерьерах зданий, так и в открытых городских пространствах.

Вариативность физических характеристик искусственных водоёмов (площади, глубины и конфигурации чаши) позволяет регулировать интенсивность охлаждения приземного слоя воздуха. В частности, увеличение зеркала водной поверхности интенсифицирует процесс испарения, тем самым увеличивая мощность теплообмена между водной поверхностью и атмосферой.

Инструментарием для количественной оценки эффективности методов охлаждения воздуха служат методы численного моделирования на основе вычислительной гидродинамики (CFD). Применение CFD-моделирования в задачах городской метеорологии и анализа микроклимата демонстрирует устойчивый рост на протяжении последних пяти десятилетий.

Район исследования расположен в округе Ха Донг в юго-западной части города Ханоя (широта 20,96°, долгота 105,76°). Для данной территории характерен тропический климат с жарким и влажным летом. Суточный ход температуры воздуха в типичный летний день характеризуется коле-

баниями в диапазоне от 27,8 °C до 32 °C (рис. 4.1), при этом в периоды экстремальных температур значения могут превышать 40 °C. В условиях плотной городской застройки данный температурный режим осложняется интенсивным нагревом дорожных покрытий, что приводит к дополнительному прогреву окружающего воздуха.

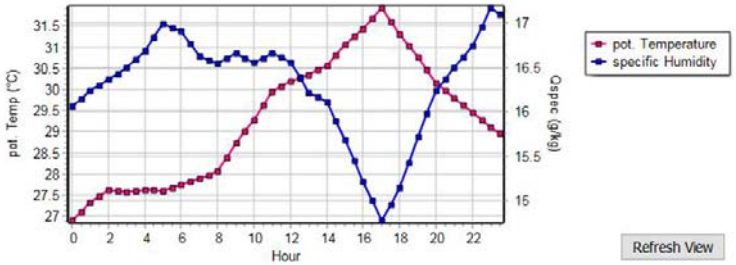


Рисунок 4.1. Температура воздуха, данные метеостанции на 29 мая 2019 года

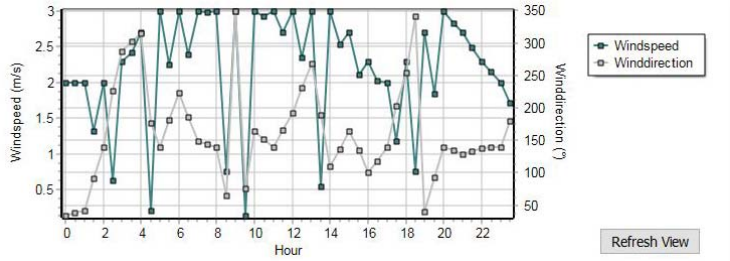


Рисунок 4.2. Скорость ветра, данные метеостанции на 29 мая 2019 года

Ввиду нелинейного характера и сложности климатоэнергетических процессов в городских условиях, применение динамического цифрового моделирования является оптимальным методом сравнительного анализа эффективности предлагаемых градостроительных сценариев. В работе используется программный комплекс ENVI-met, предназначенный для имитационного моделирования городской климатической системы. Данное ПО обеспечивает одновременный и взаимосвязанный расчет радиационного, теплового и гидравлического балансов, а также параметров аэродинамики в городской среде в различных масштабах.

В рамках моделирования осуществляется расчет движения воздушных потоков с учетом влияния элементов озеленения и водных объектов на

микроклимат, теплообмена между почвой и ограждающими конструкциями зданий, а также процессов рассеивания загрязняющих веществ [151].

Тем не менее, программный комплекс ENVI-met характеризуется двумя существенными ограничениями: отсутствием возможности моделирования энергообмена внутри зданий и высокой вычислительной трудоемкостью (расчет суточного цикла климатических процессов в условиях плотной застройки может занимать более 15 суток даже на высокопроизводительных вычислительных станциях). Несмотря на это, ENVI-met остается одним из немногих инструментов, обеспечивающих высокую степень реалистичности моделирования микроклимата. Программное обеспечение ориентировано на анализ процессов в масштабе городской застройки с горизонтальным разрешением расчетной сетки от 0,5 до 10 м и временным интервалом до 24 часов с шагом от 1 до 5 секунд, что позволяет детально исследовать микромасштабные взаимодействия [151].

Параметры расчетной сетки для исследуемой территории составляют 187 x 192 x 35 элементов с шагом 8 м. С помощью ENVI-met было выполнено моделирование двух вариантов развития территории: базового сценария (текущее состояние) и проектного сценария (с интеграцией искусственных водоёмов и фонтанов), результаты которых представлены на рисунке 4.3 для сравнительного анализа.

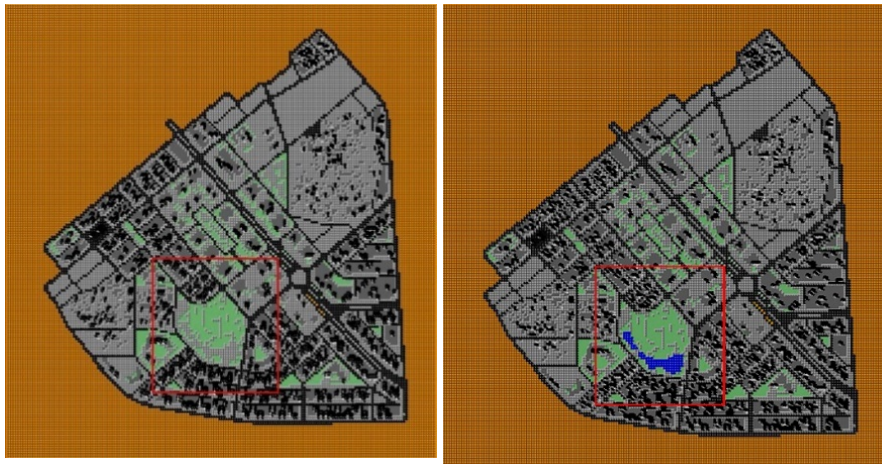


Рисунок 4.3. Исследуемые сценарии в квартале Ван Фу города городов

Для инициализации динамического расчета городского микроклимата требуется определение граничных условий модели. Поскольку исследуемый городской квартал Ван Фу расположен в административном районе Ха Донг, в качестве входных параметров цифровой модели были приняты данные соответствующей районной метеостанции. В рамках данной работы для анализа использовались метеоданные за 29 мая 2019 года, которые также послужили основой для последующей верификации модели.

При определении скорости и направления ветра были использованы средние значения наземных измерений с применением логарифмической пространственной и линейной временной интерполяции. Это позволило сформировать одномерный вертикальный профиль ветра, задающий граничные условия для боковых границ 3D-модели. Направление ветра принималось неизменным на всех уровнях, а влажность атмосферы интерполировалась линейно на основе данных наземных наблюдений.

Эффект городского острова тепла (ГОТ) проявляется в течение всего года в both дневное и ночное время, при этом его интенсивность детерминирована типом и составом городских поверхностей. Максимальный температурный градиент между городской и сельской местностью обычно наблюдается ясными вечерами, что обусловлено более высокой скоростью охлаждения воздуха в сельских районах по сравнению с городской застройкой, характеризующейся высокой тепловой инерцией зданий и дорожных покрытий.

На тепловой карте квартала Ван Фу, смоделированной в программном комплексе ENVI-met, представлено распределение температур воздуха в дневной и ночной периоды. Повышенные температуры воздуха наблюдаются в зонах асфальтированных дорог, прилегающих к жилым и общественным пространствам (рисунок 4.4).

Интеграция водных объектов способствует формированию зон с пониженной температурой и повышенной влажностью; в частности, зафиксировано снижение температуры на 2,87°C на исследуемом участке и прилегающей к жилому району территории (рисунок 4.5). Ввиду преобладающего юго-восточного направления ветра (от водоёмов в сторону застройки), происходит эффективный перенос прохладного воздуха на значительную часть рассматриваемой территории.

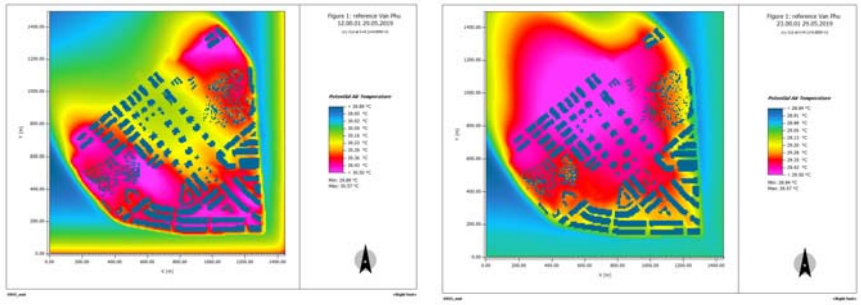


Рисунок 4.4. Карта распределения температуры воздуха днем в 12:00 (слева) и ночью в 23:00 (справа)

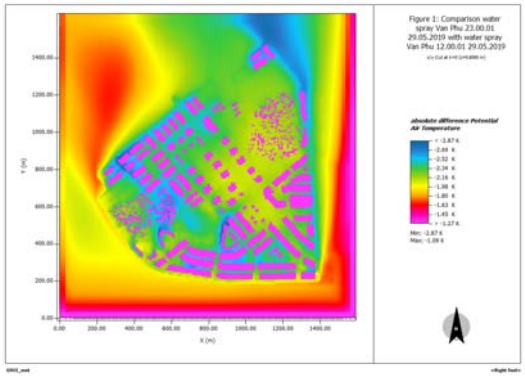


Рисунок 4.5. Разница температур воздуха днем и ночью при возведении водных объектов

Согласно результатам моделирования, 29 мая 2017 года в 16:00 максимальная температура воздуха в базовом сценарии составила 31,964°C, тогда как в проектном сценарии (с организацией искусственного озера и фонтанов) данный показатель снизился до 30,401°C (рисунок 4.6). Следовательно, обустройство искусственных водоёмов общей площадью 6088 м² в городском пространстве Ван Фу обеспечило снижение температуры воздуха на 1,563°C в период максимальной инсоляции.

Рисунок 4.6. Температура воздуха в базовом сценарии и сценарии с организацией искусственных озёр и фонтанов в городском квартале Ван Фу города городов, модель рассчитана для 24-хчасового периода

Обустройство искусственных водоёмов и фонтанов приводит к интенсификации испарения воды с открытых поверхностей, что сопровождается ростом относительной влажности воздуха. В частности, в 16:00 при базовом сценарии влажность воздуха составляет 53,164%, тогда как в проектном сценарии (с созданием озера Нхан Чу и фонтанов) данный показатель возрастает до 62,253% (рисунок 4.7). Несмотря на охлаждающий эффект, вызванный испарением с открытых акваторий, сопутствующее повышение влажности может привести к снижению уровня теплового комфорта.

Рисунок 4.7. . Влажность воздуха в базовом сценарии и сценарии с организацией искусственных озёр и фонтанов в городском районе Ван Фу города городов, модель рассчитана для 24-хчасового периода

Сравнение результатов моделирования в случае использования искусственных озёр и фонтанов (таблица 4.1) показывает, что температура воздуха в рабочее время (с 8:00 до 18:00) находится примерно в диапазоне 28°C - 30°C, а влажность воздуха около 62% - 72%, что соответствует требованиям нормативной документации Вьетнама.

Таблица 4.1

Условия под открытым небом, температура, влажность, скорость движения воздуха и интенсивность теплового излучения в рабочей зоне [152].

Тип труда	Диапазон температур воздуха, (°C)	Влажность воздуха, (%)	Скорость воздуха, (м/с)	Интенсивность теплового излучения в зависимости от площади контакта, Вт/м^2
лёгкий	20 - 34	40 - 80	0,1 – 1,5	35- при воздействии на 50% площади человеческого тела 70 – при облучении 25% - 50% площади тела человека 100 – при облучении менее 25% поверхности тела
средний	18 - 32	40 - 80	0,2 – 1,5	
тяжелый	16 -30	40 - 80	0,3 – 1,5	

Из рисунка 4.8 хорошо видно, что участки вблизи водных объектов имеют более низкую температуру воздуха и более высокую относительную влажность по сравнению с окружающими территориями в городе. Однако, водные объекты оказывают значительное влияние на температуру и влажность воздуха в пределах 1-2 метров от акватории. Поэтому можно сделать вывод, что испарительное охлаждение с поверхности водных объектов оказывает влияние и на соседние пространства.

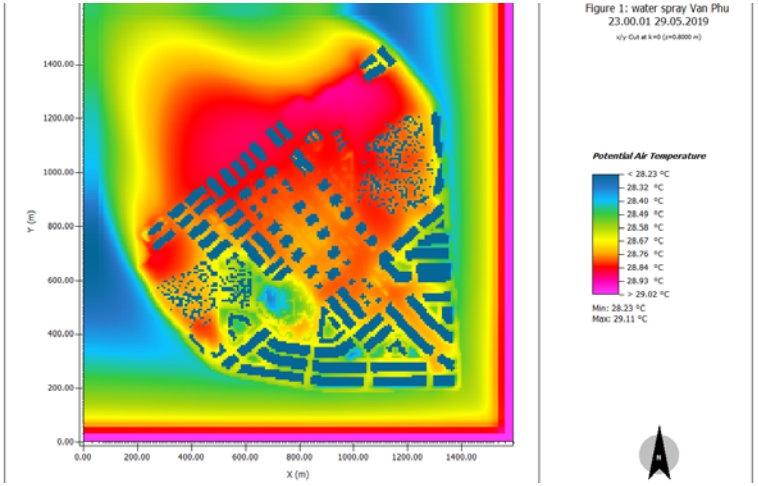


Рисунок 4.8. Карта температуры воздуха по итогам моделирования для исследуемой территории в 23:00 в варианте с использованием искусственных озёр и фонтанов

4.2. Результаты моделирования по влиянию озеленения на смягчение эффекта ГОТ и на улучшение качества жизни на примере территории жилого района в Ханое

В результате продолжающегося процесса урбанизации многие города по всему миру, особенно мегаполисы, превратились в плотные «бетонные джунгли», перегруженные транспортом и характеризующиеся обилием искусственных поверхностей (Токио, Шанхай, Джакарта, Сеул, Ханой и др.). Повышение температуры воздуха в городах вследствие изменения микроклимата, интенсивного выброса тепловой энергии, снижения испарения влаги и слабой вентиляции является серьёзной и распространенной проблемой [153, 154]. На данный момент около 50% мирового населения (3,4 миллиарда человек) уже проживает в городах, а по прогнозам, к 2030 году эта доля стремительно возрастет и достигнет 66% (5,0 миллиарда человек) [155]. Такие городские проблемы, как перегрев поверхностей и атмосферного воздуха, наводнения и загрязнение среды, возникают всё чаще, оказывая негативное воздействие на городскую экосистему [156]. Причины возникновения эффекта городского острова тепла различаются в зависимости от климатических условий, однако в качестве основных факторов выступают низкое альбедо поверхностей, геометрия застройки и недостаток зеленых насаждений [157]. Дополнительными причинами, способствующими усилению данного эффекта, являются сжигание ископаемого топлива транспортом и общемировой парниковый эффект.

Катастрофы, вызванные экстремально высокими температурами в городах за последние десятилетия, привлекли значительное внимание к последствиям воздействия городских островов тепла. В связи с этим при проектировании и городском планировании необходимо разрабатывать стратегии по минимизации данного влияния. Концепция «зеленой инфраструктуры» всё чаще рассматривается в качестве стратегической меры по снижению теплового стресса в застроенной среде.

Использование городской растительности различной плотности и оптимизация соотношения видов деревьев могут способствовать повышению тепловой эффективности территорий, смягчению эффекта городского острова тепла и снижению энергопотребления. В научной работе было показано, что при доле растительного покрова 33% от общей площади территории температура воздуха снижается на 5 °C, а при 67% — на 16 °C [158]. В другом исследовании, проведенном в Гонконге, сравнивались сценарии с различным процентным соотношением озеленения (0%, 8%, 16%, 34%, 56%) для поиска оптимального варианта охлаждения городского воздуха. Результаты демонстрируют, что все сценарии озеленения обладают значительным охлаждающим эффектом, при этом наиболее эффективным оказался вариант с растительным покровом, занимающим 56% территории [159].

Плотность городской застройки влияет на интенсивность солнечной радиации и аккумулирование тепла различными поверхностями. Плотно застроенные районы с высотными зданиями характеризуются более низким коэффициентом естественной освещенности, вследствие чего поверхности в них оказываются более затененными и прохладными по сравнению с районами с низкой плотностью застройки. Таким образом, плотность застройки и конфигурация улиц влияют на эффект городского острова тепла, изменяя степень воздействия солнечных лучей на поверхность [160]. Исследования показывают, что в районах с низкой плотностью застройки рекомендуются к высадке деревья с высоким стволом. В частности, опыт Гонконга показал, что небольшие парки с высокими деревьями в зонах с хорошей видимостью неба эффективно снижают температуру воздуха. Озеленение оказывается более эффективным в условиях низкой плотности застройки (при высокой открытости неба), чем при высокой плотности. В

менее застроенных районах деревья создают более интенсивное затенение. Кроме того, значительное затенение повышает дневную и ночную теплоэффективность, а использование деревьев с переплетающимися кронами уменьшает видимость неба и способствует снижению температуры воздуха [161].

Деревья в городских районах снижают температуру наружного воздуха, что ведет к уменьшению энергопотребления зданий в летний период. Модельные исследования показывают, что увеличение отражательной способности поверхностей снижает энергозатраты зданий в теплое время года на 3–5% [162]. Применение «зеленых крыш» способствует снижению энергопотребления здания на 3%. При этом городская растительность (кустарники, деревья) снижает энергозатраты более эффективно, чем газоны [163].

Экологичные материалы, городское озеленение, искусственные водные объекты и грамотное городское планирование позволяют снизить интенсивность выброса избыточной тепловой энергии и способствуют её эффективному отведению. Среди этих мер «зеленые крыши» считаются одним из наиболее эффективных способов охлаждения городского воздуха благодаря процессам эвапотранспирации и затенению [164]. Кроме того, замена темных бетонных поверхностей кровли на озелененные способствует улучшению теплоизоляционных свойств здания [165]. На рисунке 4.9 представлен механизм охлаждения воздуха при помощи озеленения крыш. Солнечное тепло задерживается листьями растений вследствие транспирации и снижения коэффициента поглощения лучистой энергии, что приводит к понижению температуры поверхности кровли и снижению интенсивности её теплового излучения [165].

Однако результаты этих исследований не могут быть универсально применены ко всем городам, поскольку каждый из них обладает уникальной морфологией, специфическими характеристиками застройки и собственным микроклиматом. В связи с этим целью данной работы является определение наиболее подходящего варианта озеленения (по типу и масштабу), который следует реализовать в Ханое для минимизации эффекта городского острова тепла.

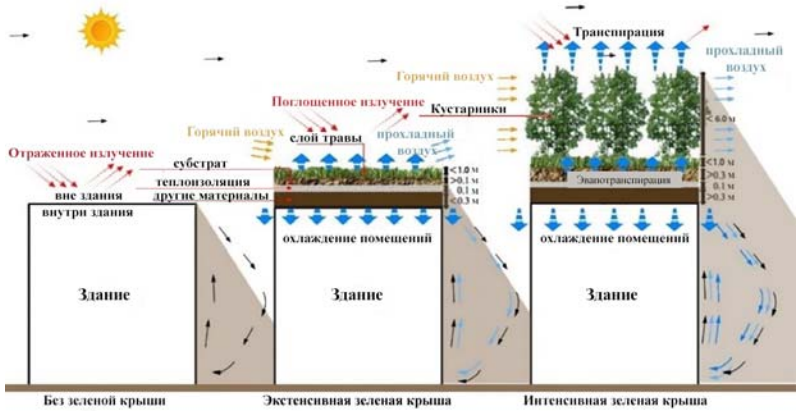


Рисунок 4.9. Схемы конструкции зеленой крыши и механизм дневного охлаждения воздуха при помощи озеленения крыш зданий

Исследование направлено на поиск оптимального сценария размещения растительности в плотно застроенных городских районах с целью смягчения эффекта городского острова тепла и снижения энергопотребления зданий. В качестве объекта исследования был выбран район Ван Фу (г. Ханой), так как он характеризуется плотной застройкой и является одной из наиболее подверженных перегреву зон города. Моделирование данной территории осуществлялось с помощью программного комплекса ENVI-met 4.4.5. В работе рассматриваются три новых сценария озеленения: 1) увеличение количества деревьев на 30%; 2) увеличение количества деревьев на 50%; 3) увеличение количества деревьев на 30% при одновременном увеличении общей площади газонов, «зелёных крыш» и «зелёных фасадов» на 70%. Полученные результаты сравниваются с базовым (эталонным) сценарием по таким показателям, как температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность и физиологически эквивалентная температура (PET — physiological equivalent temperature), чтобы определить наиболее эффективный вариант озеленения для снижения тепловой нагрузки и повышения энергоэффективности зданий.

В микроклиматических моделях растительность должна быть детализирована таким образом, чтобы входные и выходные данные расчёта максимально точно отражали фактические характеристики среды. Высота, диаметр, цвет, материал и количество отдельных элементов озеленения, глубина корневой системы и форма кроны, а также пространственное рас-

пределение растений определяют энерго- и массообмен между листвой, атмосферой и почвой. В модели каждое растение (в частности, деревья) представлено в виде упрощённых объектов, состоящих из элементов, имитирующих ствол и крону. Таким образом, основным параметром растения является распределение листвы, которое характеризуется индексом листовой поверхности (LAI, м²/м²), представляющим собой отношение общей площади листьев к единице площади подстилающей поверхности [166].

В морфологии растений прослеживаются определённые закономерности формирования кроны (пропорции, геометрическая форма). В данной модели кроны представлены простыми геометрическими телами, основным параметром которых является высота. Форма кроны дерева может быть упрощена и представлена как твердотельный объект, описываемый уравнением эллипса. Поскольку крона обычно осесимметрична, её можно представить в виде трёхмерных фигур, таких как сфера, эллипсоид или конус. Идеализированная форма позволяет определить общий геометрический контур кроны, однако она не отображает внутреннее распределение листьев. Модели крон и соответствующие им трёхмерные фигуры представлены на рисунке 4.10.

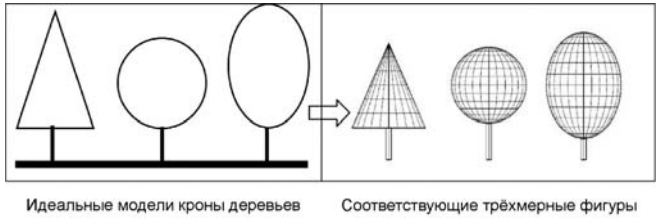


Рисунок 4.10. Модели кроны и соответствующие им трёхмерные фигуры

С помощью статистического метода была выявлена взаимосвязь между морфологией растений и индексом листовой поверхности, что обуславливает изменение параметров моделей деревьев на разных уровнях высоты. При нормализации и корректировке индекса листовой площади (LAI) в модели, объём элементов озеленения может быть разделен на горизонтальные сечения. На рисунке 4.11 представлены четыре варианта описания растительности статистическим методом: 1) идеализированная модель кроны, 2) идеализированная модель кроны с поперечным сечением, 3) статистическая модель и 4) модель на основе стандартной статистики.

Данный подход является эффективным для построения расчетных сеток при решении задач гидрогазодинамики и обеспечивает сходимость решения [167]. Этот метод реализован в модуле упрощенного моделирования растительности программного комплекса ENVI-met.

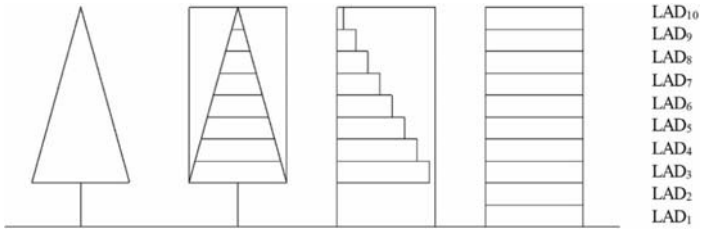


Рисунок 4.11. Описание растений статистическим методом

Статистический метод является эффективным инструментом для описания равномерного распределения листвы в кроне. Тем не менее, результирующая форма после стандартизации может существенно отклоняться от фактической морфологии конкретного растения, что оказывает значительное влияние на точность расчёта затенения и радиационного обмена. С целью устранения данной проблемы было проведено уточнение геометрии растений для более достоверного воспроизведения их реальных характеристик. Данная задача была реализована с помощью специализированного редактора растений «Albero» (рисунок 4.12).

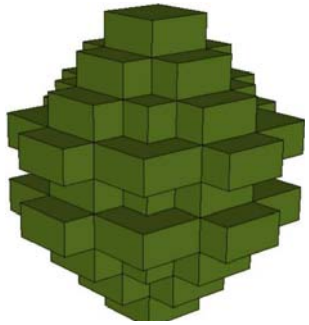


Рисунок 4.12. Геометрическое описание растения, где каждый участок в модели имеет определённую плотность кроны

Согласно статистическим данным по городу Ханой, наиболее распространенными видами городской растительности являются фирмиана платанолистная (*Firmiana simplex*) и хайя сенегальская (*Khaya senegalensis*). Фирмиана платанолистная характеризуется наличием многочисленных ветвей, высотой 10–20 м, светло-серой гладкой корой и широко раскидистой кроной. Хайя сенегальская представляет собой крупное дерево высотой 30–40 м с серо-коричневой гладкой корой и диаметром ствола 0,8–2 м (рис. 4.15).

Район Ван Фу рассматривается как типичный пример плотной городской застройки. Моделирование предлагаемых сценариев озеленения осуществлялось с помощью программного комплекса ENVI-met. Всего было проанализировано четыре сценария: 1) базовый (текущее состояние застройки), 2) увеличение плотности посадки деревьев на 30%, 3) увеличение плотности посадки деревьев на 50%, 4) комбинированный сценарий: увеличение числа деревьев на 30% и расширение общей площади газонов, «зелёных крыш» и «зелёных фасадов» на 70% (рис. 4.14).

Сравнительный анализ базового и предлагаемых сценариев демонстрирует общую тенденцию к снижению температуры воздуха при увеличении доли озеленения территории. Максимальный положительный эффект зафиксирован в четвертом сценарии, где снижение температуры воздуха составило 3,896 °C (рис. 4.16). Данный эффект обусловлен синергией двух факторов: интенсивным затенением поверхности в течение дня и транспирацией (испарением) влаги в ночное время. Таким образом, данный вариант озеленения признан оптимальным с точки зрения минимизации эффекта городского острова тепла и повышения тепловой эффективности зданий, поскольку он обеспечивает наиболее существенное снижение температурных показателей.

Текущее состояние квартала

Сценарии с увеличением количества деревьев на 30%

Сценарий с увеличением количества деревьев на 50%

Сценарий с увеличением количества деревьев на 30% и общей площади газона, зелёных крыш и зелёных фасадов на 70%

Рисунок 4.14. Текущая ситуация в районе Ван фу, г. Ханой, Вьетнам и схемы 3 предложенных сценариев

Рисунок 4.15. Типы деревьев, используемых в модели

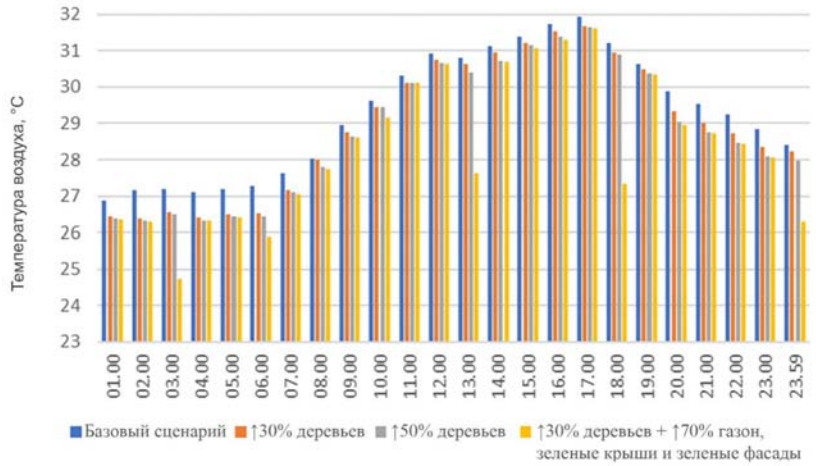


Рисунок 4.16. Сравнение показателей температуры воздуха при текущем состоянии квартала и при трёх предлагаемых сценариях озеленения исследуемой территории

Во всех предлагаемых вариантах озеленения территории скорость ветра значительно снижается по сравнению с исходным сценарием (рисунок 4.17). Несмотря на это, температура воздуха на участке моделирования всё равно значительно снижается из-за влияния растительности.

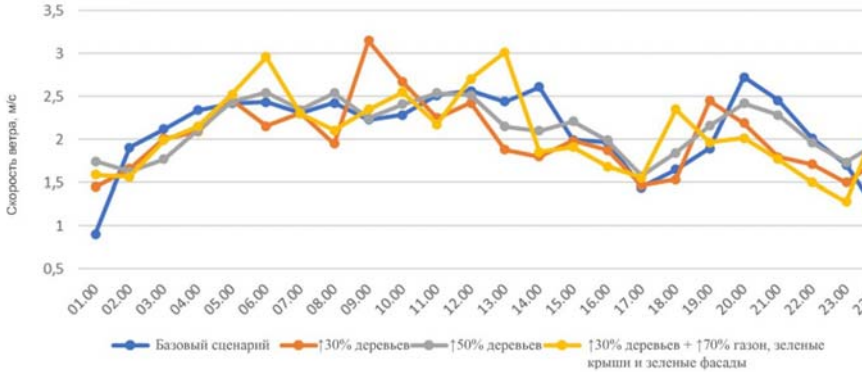


Рисунок 4.17. Сравнение скорости ветра при текущем состоянии квартала и при трех предлагаемых сценариях озеленения исследуемой территории

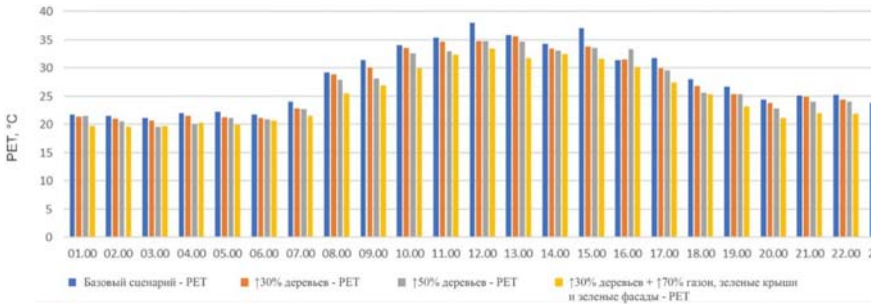


Рисунок 4.18. Сравнение показателя PET при текущем состоянии квартала и при трех предлагаемых сценариях озеленения исследуемой территории.

Физиологически эквивалентная температура (PET) — это температурный показатель, характеризующий тепловое состояние организма человека. PET используется для оценки влияния внешней среды на тепловой комфорт. Все предлагаемые сценарии озеленения территории Ван Фу способствуют снижению показателей PET, особенно в дневное время, благодаря эффекту затенения и эвапотранспирации (испарению влаги с поверхности листьев и почвы). Значение PET снижается и в ночное время, однако в период с 00:00 до 05:00 это снижение незначительно и не превышает 1,941 °C (рисунок 4.18).

Как и в большинстве мегаполисов, центральные районы городов характеризуются высокими летними температурами из-за недостатка растительности и преобладания водонепроницаемых поверхностей. Это увеличивает нагрузку на системы кондиционирования, которыми оснащено большинство жилых зданий в Ханое. Высокая потребность в электроэнергии для охлаждения помещений ложится тяжелым финансовым бременем на местных жителей, чей средний ежемесячный заработок составляет около 200 долларов. Правительство Вьетнама призвало граждан сократить энергопотребление за счет использования энергоэффективных светодиодных ламп. Однако эта мера малоэффективна, так как основная часть электроэнергии расходуется не на освещение, а на кондиционирование воздуха.

Поэтому данное исследование направлено на поиск новых способов снижения энергопотребления путем понижения температуры наружного воздуха и, следовательно, снижения нагрузки на системы кондиционирования. Результаты показывают, что сценарий с увеличением количества

деревьев на 30% и общей площади газонов, «зелёных крыш» и «зелёных фасадов» на 70% является наиболее эффективным для снижения температуры воздуха в городских районах с плотной застройкой.

Следовательно, проектирование озеленения в районах с плотной городской застройкой имеет большое значение. Организацию зелёных насаждений в Ван Фу предлагается проводить в соответствии со следующими принципами:

- Для эффективного регулирования микроклимата деревья должны быть размещены достаточно близко друг к другу для формирования «зелёных коридоров», что оптимизирует естественную вентиляцию воздуха;

- Нормативная площадь зелёных насаждений должна составлять не менее 7 м²/чел.;

- Элементы озеленения должны быть подобраны с учетом климатических условий города;

- Зеленые пространства должны создавать оптимальные условия для культурного досуга и общественной деятельности людей. Проект озеленения должен быть эффективным при минимальных финансовых затратах;

- Проект должен предусматривать возможность дальнейшего развития городской инфраструктуры (прокладку новых инженерных коммуникаций, создание подземных паркингов и т. д.);

- При организации озеленения необходимо уделять особое внимание сохранению старых деревьев, имеющих эстетическую ценность.

Озеленение городского квартала Ван Фу включает в себя парки:

- Радиус доступности парковых зон должен составлять не более 1 км, при этом площадь зелёных насаждений должна составлять 75–85% от общей площади парка;

- Участки с высокой плотностью посадки деревьев должны сочетаться с водными объектами (озёрами, небольшими каналами, искусственными водопадами, фонтанами);

- Ландшафт должен быть сформирован разнообразными видами деревьев.

Озеленение улиц:

- Уличное озеленение должно представлять собой непрерывную систему с единым стилем подбора растений;

- На улицах длиной менее 2 км озеленение должно состоять из одного или двух видов деревьев. На улицах протяженностью более 2 км или на поворотах — из одного-трех видов деревьев;

- Озеленение центральной части улицы не должно ограничивать обзор водителя и должно быть организовано в соответствии с шириной проезжей части и полосы озеленения (см. таблицу 4.1);

- Растения по обеим сторонам дороги должны располагаться в соответствии с шириной тротуара (таблица 4.2, рисунок 4.19).

Таблица 4.1

Требования к озеленению центрального участка улицы

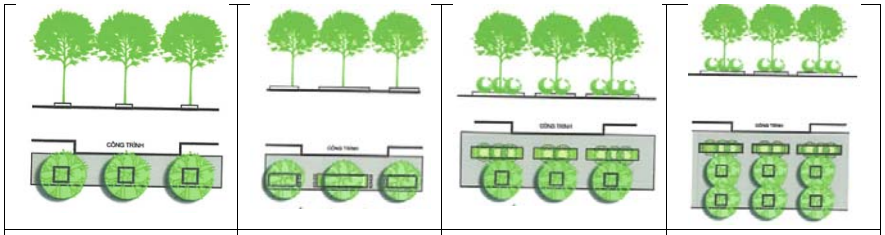
Ширина центральной полосы озеленения	Тип растительности
<2 м	Трава, невысокие кустарники, цветы
>2 м	Деревья с прямыми стволами, растения с узкой кроной должны быть высажены на расстоянии 3-5м от границ центральной полосы озеленения

Растения по обеим сторонам дороги располагаются по ширине тротуара.

Таблица 4.2

Требования к расположению деревьев в зависимости от ширины тротуара

Ширина тротуара	Высота деревьев	Минимальное расстояние между деревьями	Минимальное расстояние до бордюра	Применение
>5м	> 15м	12м	1м	Если ширина тротуара составляет > 9 м, то возможно расположить 3 ряда деревьев с увеличением высоты от дороги
3-5м	от 10 до 15м	4м	0.8м	
<3м	<10м	4м	0.6м	Используются существующие деревья, необходимо обращать внимание на расстояние до строения



Озеленение тротуара шириной менее 3м	Озеленение тротуара шириной 3-5м	Озеленение тротуара шириной более 5м	Озеленение тротуара шириной более 9м

Рисунок 4.19. Схемы расположения деревьев на тротуаре.

Предложенные рекомендации к размещению зеленых насаждений вдоль тротуаров для наиболее оптимального использования эффекта затенения, позволяют уменьшить интенсивность теплового излучения, падающего на дорожное покрытие (рисунок 4.20).

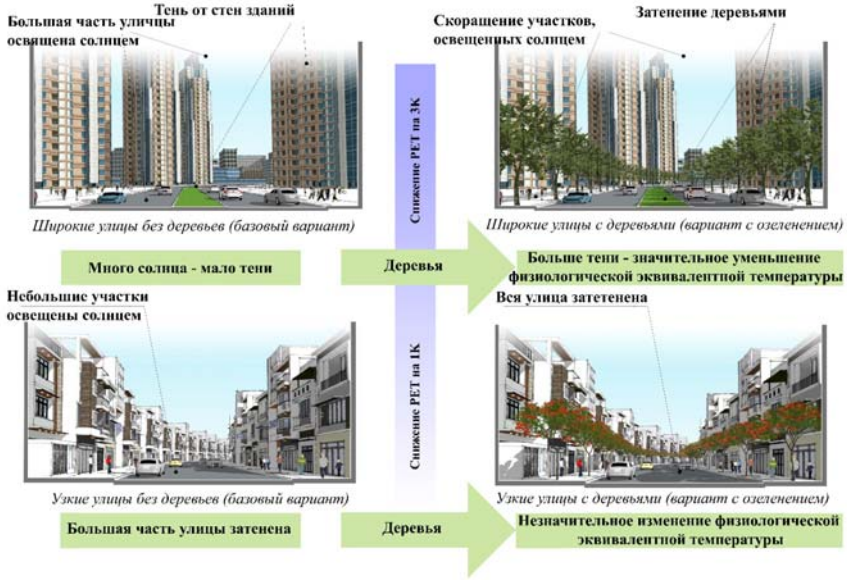


Рисунок 4.20. Влияние деревьев на PET в двух различных по плотности застройках района

– Озеленение на территориях частных домовладений:

+ Необходимо более компактно группировать частные дома, чтобы получить возможность организации садов, включающих деревья, кустарники, цветы и т.д.;

+ Предлагается использовать зелёные крыши для выращивания овощей, пряных трав и т.д.;

+ Возможна посадка большего количества вьющихся растений на Западной и Юго-Западной фасадах зданий для ограничения поступления солнечной радиации внутрь помещений.

– Озеленение участков с малоэтажными зданиями:

+ Предлагается организовать общественные зелёные зоны площадью от 0,5-1 га с радиусом доступности 500м;

+ На террасах предлагается расставить кадки с зелёными насаждениями, которые формируют декоративные ландшафты.

– Озеленение для многоэтажных зданий:

+ Рекомендуется использовать зелёные крыши и зелёные фасады;

+ Озеленение, устраиваемое на покрытиях зданий, приводит к увеличению их теплоизоляции и охлаждению. Озеленение может быть представлено рулонным газоном, имеющим высокую скорость роста и способность удерживать влагу в субстрате, и кустарниками (используются растения, пригодные для жаркого, сухого и солнечного климата).

4.3. Результат исследования по влиянию показателя альбедо на снижение температуры поверхности

Альбедо представляет собой коэффициент отношения потока отражённого излучения к потоку падающего электромагнитного излучения. Значение данного параметра варьируется в диапазоне от 0 (полное поглощение) до 1 (полное отражение). При поглощении солнечного излучения поверхностью происходит её нагрев с последующей эмиссией энергии в инфракрасном спектре.

Цветовые характеристики поверхности являются определяющим фактором альбедо. Так, для свежевыпавшего снега значение альбедо составляет ≈ 0,9, тогда как для чернозёма и асфальта оно варьируется от 0,05 до 0,2, а для цементного бетона — от 0,2 до 0,4. Использование материалов с более высокой яркостью (светлых тонов) позволяет минимизировать поглощение солнечной радиации и, следовательно, снизить термический на-

грев земной поверхности. Примером успешной реализации данного подхода является опыт города Лос-Анджелес по окрашиванию дорожного полотна в белый цвет, что привело к снижению температуры поверхности на 5–7 °C и улучшению микроклимата в прилегающих кварталах.

Методы оптимизации альбедо активно внедряются в практику устойчивого городского проектирования. Одним из наиболее эффективных способов снижения тепловой нагрузки является озеленение территорий. Тем не менее, замена традиционных материалов покрытия зачастую сопряжена с увеличением капитальных затрат и технологическими сложностями при интеграции в существующую инфраструктуру. Для достижения максимального охлаждающего эффекта целесообразно применение покрытий с высоким коэффициентом отражения, сопоставимым с альбедо снега, что способствует снижению температуры как внешних конструкций, так и внутреннего пространства зданий.

В рамках стандарта LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) рекомендуются решения по снижению температуры городских поверхностей посредством применения светлых асфальтобетонных смесей с высоким показателем альбедо [168]. Согласно данным требованиям, не менее 50% площади твердых покрытий (автодорог, тротуаров, парковок) должны быть выполнены из материалов с коэффициентом солнечного отражения $\geq 0{,}29$. Разработка таких материалов направлена на обеспечение альтернативы традиционным покрытиям при сохранении эксплуатационных характеристик, соответствующих критериям LEED 7.1.

При разработке полимер-модифицированных покрытий в бетонную смесь вводятся полимерные композиты; при этом проводится анализ отражательной способности смеси и готового покрытия анализа на месте. Коэффициент отражения стандартных асфальтобетонных покрытий близок к нулю, в то время как для состаренных (выветренных) покрытий он составляет около 0,06.

На рисунках 4.21 и 4.22 представлены образцы дорожных покрытий на основе композитного эпоксидного клея. Данный связующий материал позволяет существенно повысить отражательную способность поверхности, однако стоимость его применения примерно в 5 раз выше стоимости традиционного асфальтобетона.

Рисунок 4.21. Пример внешнего вида нового асфальтобетонного покрытия с коэффициентом отражения солнечного излучения около 0

Рисунок 4.22. Пример внешнего вида выветренного асфальтобетонного покрытия с коэффициентом отражения солнечного излучения около 6

Показан также пример внешнего вида светлого асфальтобетонного покрытия (рисунок 4.23).

Рисунок 4.23. Пример светлого покрытия асфальтобетонного покрытия дорожного покрытия текущих исследований

Чтобы запроектировать дорожное покрытие, соответствующее стандартам LEED, необходимо выполнить следующие три требования:

– дорожные покрытия должны быть выполнены в ярких цветах. Минимальное значение индекса отражения солнечной радиации по нормам LEED составляет 29;

– дорожные покрытия должны состоять из определённых компонентов (Marshall
или Superpave);

– не должно быть отрицательного влияния на характеристики покрытия.

Основные преимущества технологии укладки светлого асфальта, помимо соответствия требованиям LEED, включают:

– снижение эффекта ГОТ;

– соответствие зелёному стандарту внедряется рядом городов, причем продукт имеет цены, эквивалентные обычным продуктам, и приносит эквивалентную эффективность;

– повышение долговременной прочности и трещиностойкости за счёт снижения скорости окисления;

– улучшенные характеристики трения и улучшение текстуры материала, по крайней мере на ранних стадиях дорожного покрытия;

– экономия энергии за счет снижения потребности в освещении.

В таблице 4.3 представлены показатели солнечной радиации некоторых распространённых типов дорожных покрытий. Коэффициент отражения солнечной энергии у нового бетона (серого и белого) равен требуемому значению 29.

Таблица 4.3

Типичные значения индекса солнечного отражения
из рейтинговой системы экологичных зданий LEED [169]

Материал	Излучательная способность	Коэффициент отражения	Индекс солнечной отражательной способности
Типичный новый серый бетон	0,9	0.35	35
Типичный выветренный серый бетон	0,9	0.20	19
Типичный новый белый бетон	0,9	0.70	86
Типичный выветрившийся белый бетон	0,9	0.40	45
Новый асфальт	0,9	0.05	0
Выветрившийся асфальт	0,9	0.10	6

Когда бетон стареет, он темнеет, и значение отраженного солнечного излучения будет уменьшаться с течением времени. Обратное верно для случая, в котором показатель, отражающий солнечное излучение, будет увеличиваться в зависимости от времени, когда мембранный асфальт изнашивается. Индекс отражает точность солнечного излучения асфальта, которая будет зависеть в первую очередь от типа заполнителя, используемого в смеси, и количества покрытия асфальта, снятого с поверхности заполнителя. В таблице 4.3 показаны типичные значения индекса солнечного отражения из рейтинговой системы экологичных зданий LEED.

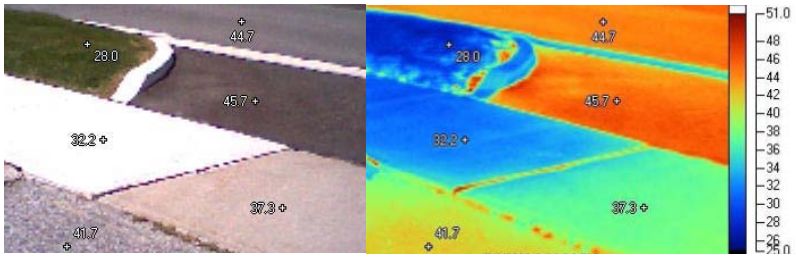


Рисунок 4.24. Тепловое изображение пяти смежных поверхностей

На рисунке 4.24 показано тепловое изображение пяти смежных поверхностей. Самая низкая температура (28°C) наблюдается на поверхности газона, причём значение индекса практически совпадает с индексом выветренного асфальтобетонного покрытия (41,7°C). Это явление подчеркивает важность измерения температуры в дополнение к показателю отражения солнечной радиации. Самая высокая температура была выявлена для более тёмного нового асфальтобетонного покрытия (45,7°C). Температура бетонного дорожного покрытия составляет 32,2 °C для новой заливки бетона и 37,3°C для выветренного бетона.

4.4. Экологическая оценка и система моделирования температуры деятельной поверхности города городов

4.4.1. Рекомендации по расчёту температуры деятельной поверхности. Алгоритм моделирования температуры деятельной поверхности

Как правило, городская среда сформирована из строительных материалов с низкой отражательной способностью (кирпич, сталь, бетон, асфальт), характеризующихся тёмной цветовой гаммой. Поверхности данных материалов интенсивно поглощают солнечную радиацию с её последующим преобразованием в тепловую энергию, что вызывает перегрев поверхностей и повышение температуры приземного слоя атмосферы. Напротив, поверхности светлых тонов обладают более высоким коэффициентом отражения, что минимизирует преобразование солнечной энергии в тепло и снижает термическую нагрузку.

Урбанизация сопровождается трансформацией естественного почвенного покрова в антропогенные водонепроницаемые поверхности, что существенно изменяет условия среды и гидрологические процессы в почве [170, 66]. Теплофизические свойства и альбедо поверхности определяются типом земного покрова. Низкие значения альбедо в городской застройке являются одним из ключевых факторов, усугубляющих эффект городского острова тепла (ГОТ). Преобладание таких материалов, как цемент, брусчатка и асфальт, исключает возможность инфильтрации воды, что резко отличает их от естественных растительных покровов.

Средний температурный градиент между городскими центрами и пригородными сельскими районами составляет 4–7 °C. Несмотря на кажущуюся умеренность, данный температурный сдвиг может привести к ухудшению состояния здоровья населения (включая обезвоживание и тепловое истощение), а также к существенному росту энергопотребления системами кондиционирования. В связи с этим актуальной задачей является разработка методики прогнозирования и регулирования температуры городских поверхностей для смягчения эффекта ГОТ и оптимизации городского охлаждения. Общий алгоритм моделирования температуры активной поверхности представлен на рисунке 4.25.

Структурными элементами системы моделирования являются: подсистема мониторинга микроклимата (сеть метеостанций), информационная база данных и модуль оптимизации градостроительного планирования.

Моделирование температуры поверхности, представленное на рисунке 4.25, реализуется посредством пяти функциональных блоков обработки данных (A1–A5). Блок A1 предназначен для сбора первичной информации об объектах моделирования. После этапа классификации объектов и сопоставления их с параметрами микроклимата территории данные передаются в блоки A2, осуществляющие построение расчетных моделей. В блоках A2 формулируются технические требования к модели. При условии полноты данных из блока A1, управление передается блоку A3, который выполняет имитационное моделирование с использованием программного комплекса ENVI-met, основанного на методах вычислительной гидродинамики (CFD). В случае недостаточности данных на этапе A2, алгоритм предусматривает возврат к блоку A1 для уточнения исходных параметров.

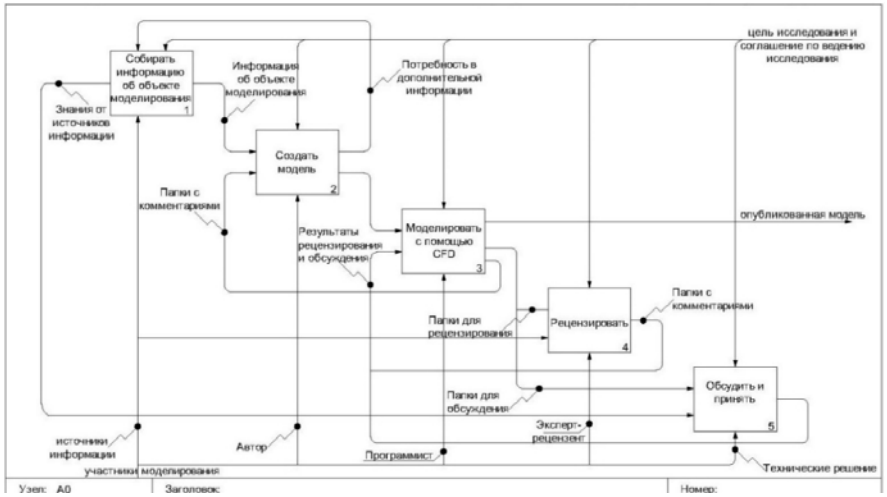


Рисунок 4.25. Общий алгоритм моделирования температуры деятельной поверхности города

Данные моделирования, полученные в функциональном блоке A3, поступают в блок A4, где проводится верификация и оценка точности имитационной модели. В блоке A5 осуществляется комплексный анализ и ин-

терпретация результатов. В случае несоответствия модели заданным критериям точности, производится корректировка параметров в блоке А3. В блоке А5 происходит синтез технических решений, которые определяют требования к модификации модели; данные требования ретранслируются в блок А3 для проведения последующих итераций моделирования до достижения оптимальных показателей. Сравнительный анализ результатов позволяет определить конфигурацию модели, обеспечивающую максимальное снижение термического воздействия на поверхность. После верификации оптимального варианта имитационная модель принимается как итоговая. На рисунке 4.25 представлена схема алгоритма управления взаимодействием всех функциональных блоков системы.

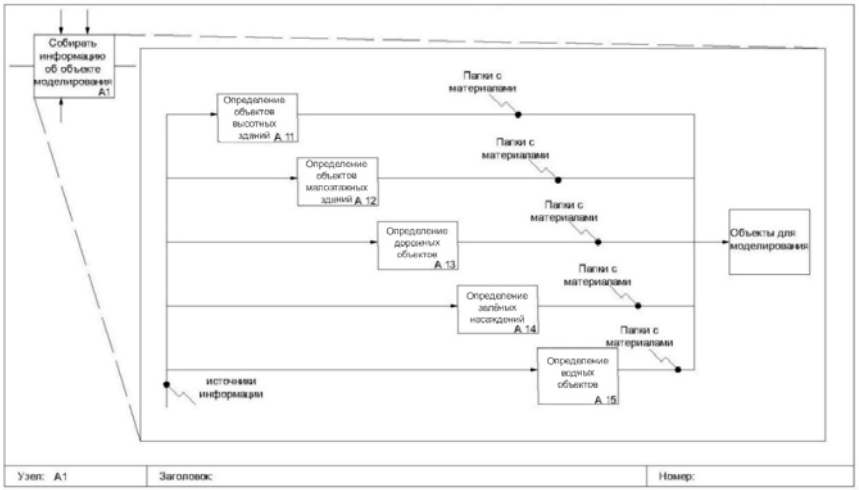


Рисунок 4.26. Схема классификации объектов для моделирования

На рисунке 4.26 приведена схема функционального блока А1, предназначенного для сбора и классификации объектов имитационного моделирования. Типичные элементы городской среды включают в себя многоэтажную и малоэтажную застройку, дорожную сеть (проезжую часть и тротуары), зеленые насаждения, а также поверхностные водные объекты (водоёмы, фонтаны и т.д.). Процесс классификации объектов в условиях городской среды предполагает определение состава материала поверхности, его коэффициента альбедо и геометрических параметров (в частности, высоты объектов).

Структурная схема блока А2, в котором реализуется построение имитационных моделей, представлена на рисунке 4.27. Согласно диаграмме, формирование модели микроклимата требует использования климатических данных, зафиксированных метеостанциями на исследуемой территории. Моделирование поверхностного теплового потока осуществлялось с помощью программно-вычислительного комплекса ENVI-met. Алгоритмы расчётов, используемые в ENVI-met, а также присущие им ограничения, были рассмотрены в разделе 2.4 главы 2.

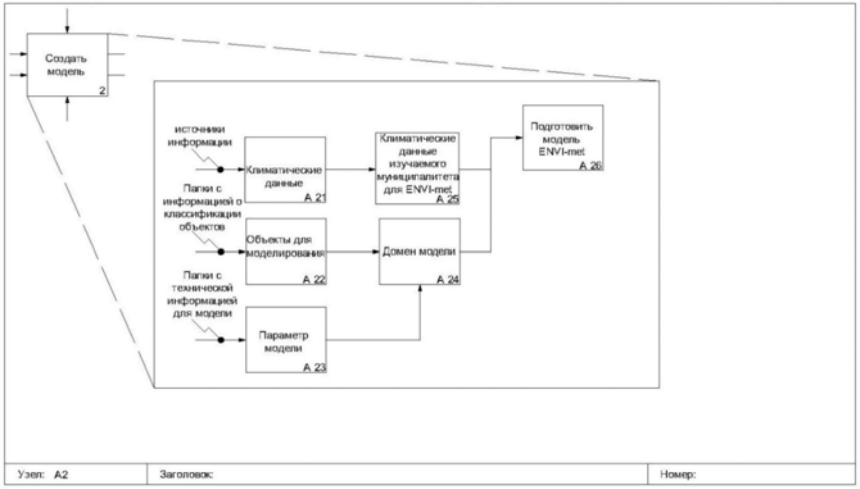


Рисунок 4.27. Схема настройки модели

Функциональный блок А3 включает описание методов и алгоритмов моделирования, а также анализ системы уравнений ENVI-met (см. главу 2, раздел 2.4.4) и результаты расчёта температуры поверхности, изложенные в параграфе 3.4 главы 3.

Функционал блока А4 заключается в верификации результатов. На основании сравнительного анализа расчетных значений температуры воздуха и фактических данных, полученных с городских метеостанций, была подтверждена высокая степень достоверности имитационной модели.

В блоке А5 осуществляется интерпретация данных и синтез итоговой модели. Здесь производится оптимизация площадей зеленых насаждений и водных объектов с целью обеспечения комфортного теплового режима городской среды и разработки практических рекомендаций (подробно описано в главе 3). В результате сравнительного анализа различных конфигу-

раций застройки и ландшафта выбранного района был определен наиболее эффективный вариант. Соответствующие рекомендации изложены в разделах 4.1, 4.2 и 4.3 главы 4.

4.4.2. Рекомендации по использованию результатов моделирования для управления температурой деятельной поверхности городов

Рекомендации, разработанные на основе результатов имитационного моделирования температуры городской поверхности, ориентированы на решение следующих задач:

Оптимизацию управления и мониторинга микроклиматических факторов городской среды, включая критический анализ существующих экономических механизмов и организационной структуры управления.

Повышение энергоэффективности городской застройки посредством разработки соответствующих технических предложений.

Модернизацию нормативно-правовой базы и стандартов в области городского озеленения.

Разработку вспомогательного инструментария и баз данных, необходимых для верификации и апробации имитационной модели городского климата.

Прецизионное определение температуры поверхности города с помощью имитационной модели, интегрирующей данные плановых карт и показатели метеостанций. Внедрение принципов «зелёного» городского дизайна способствует снижению температуры поверхности, что непосредственно влияет на условия жизнедеятельности населения.

Реализация данных мероприятий позволит создать комплекс информационных средств для мониторинга термического режима городской среды, обеспечения теплового комфорта и экологической безопасности, а также совершенствования экономических аспектов системы климатического мониторинга.

Помимо получения количественных данных, имитационное моделирование открывает возможности для углубленного анализа феномена «городского острова тепла». В связи с этим представляется целесообразным разработать стратегический план по увеличению доли зеленых насаждений и водных объектов, либо скорректировать подходы к градостроительному планированию с целью минимизации теплового воздействия на жителей города.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке имитационной модели, позволяющей прогнозировать формирование городского острова тепла (ГОТ), оценивать способы смягчения данного эффекта, снижать его негативное воздействие на окружающую среду, а также обеспечивать тепловую безопасность городской застройки (на примере г. Ханоя).

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

Основные результаты исследования:

1. По результатам анализа научных источников сформулировано развёрнутое понятие термина «городской остров тепла». Впервые предлагается разделять ГОТ на два типа: «надземный» и «атмосферный». Установлено негативное влияние ГОТ на здоровье населения и окружающую среду в условиях жаркого и влажного климата.

2. Изучено влияние планировочной структуры города с учётом гигиенических норм Вьетнама на формирование микроклимата и развитие ГОТ. Произведён расчёт воздушных потоков между зданиями с учётом альбедо поверхностей, тепломассообмена, а также влияния озеленения и водных объектов (фонтанов и искусственных озёр) на микроклимат городской территории. Рассмотрены три сценария озеленения квартала Ван Фу: 1) с добавлением 30% деревьев; 2) с добавлением 50% деревьев; 3) с увеличением количества деревьев на 30% при одновременном увеличении общей площади газонов, «зелёных» крыш и фасадов на 70%. Для многоэтажной центральной части города характерно сочетание высокого показателя закрытости горизонта (свыше 0,8) и низкой доли растительного покрова (около 30%), что обуславливает максимальную интенсивность ГОТ и низкий аэрационный потенциал.

3. Определены пороговые значения в шести категориях индекса дисперсии теплового поля в городах. Для анализа изменения микроклиматических показателей и моделирования тепловой среды городских улиц был использован метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics — CFD). Применение программного комплекса ENVI-met (вер-

сия 4.4.5) позволило детально смоделировать и проанализировать развитие городских островов тепла.

4. Разработана блок-схема моделирования параметров микроклимата с помощью ENVI-met и прогнозирования формирования ГОТ, позволяющая идентифицировать все необходимые информационные объекты.

5. Результаты исследования демонстрируют тесную взаимосвязь между распределением ГОТ, структурой землепользования и температурой поверхности земли. Установлено, что определяющую роль в формировании уровня теплового комфорта в приземном слое атмосферы играют зелёные насаждения и системы обводнения. На основе степени теплового комфорта городские территории были разделены на две зоны: районы с неудовлетворительным тепловым состоянием (UTFVI > 0,02) и районы с оптимальным тепловым состоянием (UTFVI < 0).

6. Учитывая нелинейность и сложность климатических и тепловых процессов в городской среде, было применено динамическое численное моделирование, позволившее провести сравнительный анализ базового варианта и различных предлагаемых мероприятий. В условиях тропического влажного климата района Ван Фу (округ Ха Донг, г. Ханой) была исследована возможность оптимизации городской инфраструктуры для смягчения эффекта ГОТ. Значение коэффициента детерминации R2 = 0,94 подтвердило высокую достоверность расчётов в ENVI-met, что доказывает применимость данной программы для моделирования тропического городского климата.

7. Для снижения интенсивности ГОТ предложены принципы озеленения и обводнения территории квартала Ван Фу. Разработан общий алгоритм моделирования температуры активных поверхностей города. Доля растительного покрова в модели учитывается как фактор, способствующий снижению интенсивности ГОТ. Дана оценка плотности застройки как косвенного показателя изменения теплового баланса вследствие накопления тепла и длинноволнового излучения вертикальных конструкций из искусственных материалов. Применение предложенной методики моделирования в проектах градостроительного планирования позволяет привести показатели микроклиматического комфорта городской среды к нормативным гигиеническим значениям.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки тематики

В целях повышения экологической безопасности городской среды и минимизации воздействия эффекта ГОТ предлагаются следующие рекомендации:

1. Результаты настоящего исследования могут быть использованы в качестве теоретической и методической основы для разработки инструментов количественной оценки тепловой защиты территорий и снижения интенсивности ГОТ.

2. Целесообразно рассмотреть вопрос внедрения полученных результатов в систему гигиенических нормативов качества городской среды, а также в регламенты градостроительного проектирования с учётом факторов, определяющих формирование микроклимата.

3. При осуществлении градостроительного планирования необходимо применять комплексный подход к учёту средозащитных свойств озеленения и объектов обводнения, что обеспечит достижение нормативных значений микроклиматического и экологического комфорта городской среды.

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении связаны с углубленным анализом гидрологических и климатических характеристик активных поверхностей городских территорий в условиях тропического климата с целью оптимизации условий жизнедеятельности населения.

Сформулированные теплотехнические, теплофизические и экономические подходы к проектированию городской застройки представляют собой перспективные направления развития градостроительной экологии и гигиены жилой среды.

Авторы работы выражают готовность к сотрудничеству со всеми заинтересованными организациями и специалистами по вопросам совершенствования планировочных решений городской застройки.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГИС – Геоинформационная система
ГОТ – Городской остров тепла
ГОП – Городской остров прохлады
ГОПП – Городской остров протяжённости прохлады
ГОПИ – Городской остров интенсивности прохлады
СТПЗ – Средняя температура поверхности земли
ТПЗ / LST – Температура поверхности земли / Land surface temperature
ПЗЭ – Пороговое значение эффективности
CFD – Numerical simulation using computational fluid dynamics
Вычислительный гидродинамический анализ
ETM+ – Enhanced Thematic Mapper Plus
Улучшенный тематический картограф
LAD – Leaf area density
Плотность площади листьев
LAI – Leaf area index
Индекс площади листьев
NDBI – Normalized Difference Built-up Index
Нормализованный дифференциальный индекс застроенности земельных участков
NDVI – Normalized Difference Vegetative Index
Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс
OLI – Operational Land Imager
Оперативный наземный тепловизор
PET – Physiological equivalent temperature
Физиологический эквивалент температуры
RAD – Root area density
Плотность корневой зоны
TM – Thematic Mapper
Тематический картограф
UTFVI – Urban Thermal Field Variance Index
Индекс дисперсии городского теплового поля

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. -1982. -Vol. 108 (455). -P. 1-24.
2. Джедид Мурад. "Биоклиматическая архитектура: обзор опыта создания внешнего комфорта городской среды в условиях сухого и жаркого климата" Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, no. 3 (33), 2015, pp. 13-23.
3. Дудорова Н.В., Белан Б.Д. Оценка факторов, определяющих формирование городского острова тепла в г. Томске // Оптика атмосферы и океана. -2016. -Том 29. -№ 5. В печати.
4. Нахаев М.И., Кузнецова И.Н. Условия формирования экстремальных значений городского острова тепла в московском мегаполисе//ХН Международ¬ная конференция молодых ученых «Состав атмосферы, атмосферное электричество Климатические процессы», Корок.-2008. С. 99.
5. И. В. Попова, С. А. Куролап, П. М. Виноградов . Моделирование городского острова тепла» средствами геоинформационного анализа // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. -2018. -№ 2(5).
6. Оленьков В.Д., Бирюков А.Д., Сухоруков В.А. Исспользование данных дистанционного зондирования земли для построения карты городского острова тепла. //Российская академия архитектуры и строительных наук. Москва. -2020. -С. 286-294.
7. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Методика дешифрирования разновременных космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. -2014. - №3. -С. 35-41.
8. Шукуров И.С., Ле Минь Туан, Шукурова Л.И., Дмириева А.Д. Влияние эффекта "городского острова тепла" на устойчивое развитие городов // Градостроительство и архитектура.-2020.-Том 10, Вып. 2(39). -С. 62-70.
9. Мягков М.С., Алексеева Л.И. Особенности ветрового режима типовых форм городской застройки // AMIT. -2014. -Том 1 (26). -С 3-14.
10. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Формирование и особенности острова тепла в большом городе // Доклады РАН. Геофизика. -2000. -Том 370, № 2. -С. 249 - 252.

11. Howard, L. The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places Around it // London, Harvey and Darton. -1833.
12. Renou, E. ‘Instructions météorologiques’ // Annuaire Société Météorologie de France. -1855. -Vol. 3(1). -P. 73–160.
13. Renou, E. ‘Différences de température entre, Paris et Choisy-le-Roi’. Annuaire Société // Météorologique de France. -1862. -Vol. 10. -P. 105–109.
14. Renou, E. ‘Differences de temperature entre la ville et la campagne // Annuaire Société Météorologie de France. -1868. -Vol. 3. -P. 83–97.
15. Schmidt,W. ‘Zum Einfluss grosser Städte auf das Klima’// Naturwissen. -1917. -Vol. 5. -P. 494–495.
16. Schmidt,W. ‘Die Verteilung der Minimum temperaturen in der Frostnacht des 12 Mai 1927 im Gemeindegebiet von Wien’// Fortschritte der Landwirtschaft. -1929. -Vol. 2(21). -P. 681–686.
17. Mitchell, J. M. ‘On the causes of instrumentally observed secular temperature trends // Journal of Meteorology. -1953. -Vol. 10. -P. 244–261.
18. Mitchell, J. M. ‘The temperature of cities // Weatherwise. -1961. -Vol. 14. -P. 224–229, 258..
19. Ле Минь Туан. Влияние планировки города на возникновение островов тепла в мегаполисах с тропическим климатом (г. Ханой) // Вестник МГСУ. -2019. -№2 (125). -С. 148-157.
20. Денисов В. В., Гутенев В. В., Луганская И. А., "Экология". - М.: Вузовская книга. -2002. -С. 726.
21. Кондратьев К.Я., Матвеев Л.Т. Основные факторы формирования острова тепла в большом городе // Доклады академии наук. -1999. -Том 367, №2. -С. 253-256.
22. Вязапкин А.С., Вязанкии С.А., Жадин Е.А., Кадыгров Е. Н.Анализ вертикального распределения температуры в пограничном слое атмосферы в пригороде и мегаполисе// Метеорология и гидрология.- М. -2003. -№ 7. - С. 5-12.
23. Стулов Е.А., Постнов А.А. О некоторых особенностях формирования «островов» тепла в атмосферном пограничном слое // Тр. Центр. Аэрол. Обсерв. -1991. -№ 175. -С. 34 - 40.
24. Бызова Н.Л. Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте.- М.: Гидрометеоиздатю -1982. -С. 69.

25. Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. - Л.: Гидрометеоиздат. -1986. -С. 183.
26. Исаев А.А. Экологическая климатология. - М.: Научный мир. -2003. -С. 472.
27. Безуглая Э.Ю. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере.- Л.: Гидрометеоиздат, 1983.- 328 с.
28. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. - Л.: Гидрометеоиздат, 1991, 255 с.
29. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. - Л.: Гидрометеоиздат, 1991, 255 с.
30. Игнатов В. Г., Кокин А. В. Экология и экономика природопользования. - Ростов-на-Дону, изд. "Феникс". -2003. -С. 508.
31. Матвеев Ю.Л., Меркурьева Н.А. Особенности формирования температурно-влажностного режима в большом городе // Оптика атмосферы и океана. -1997. -Том 10, №10. -С. 1181-1187.
32. Исаев А.А., Каллистратова М.А., Локощенко М.А., Пекур М.С. Термическая структура атмосферного пограничного слоя над Москвой. Оптика атмосфе¬ры и океана. -1994. -Том 7, № 05. - С. 650-664.
33. Кадыгров Н.Е., Кручештцкий Г.М., Лыков А.Д. Количественные оценки возмущений, вносимых мегаполисом в поле температуры атмосферного пограничного слоя // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. -2007. -Том 43, N° 1. -С. 1-13.
34. Егорычев О.О., Дуничкин И.В. Вопросы прогнозирования микроклимата городской среды для оценки ветроэнергетического потенциала застройки // Вестник МГСУ. -2013. -№6. -С. 123—131.
35. Антонович В.В., Белан Б.Д., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Фофонов А.В. Выделение вклада города в изменение термодинамических характеристик воздуха на примере г. Томска // Оптика атмосферы и океана. -2005. -Том 18, № 08. -С. 638-642.
36. Клипов Ф.Я. К вопросу о распределении температуры, скорости и направления ветра с высотой в нижнем слое ат.мосферы // Метеорология и гидроло¬гия. - 1968. -№5. -С. 83-86.
37. Белан Б.Д. К вопросу о формировании «шапки» загрязнений над промышленными центрами // Оптика атмосферы и океана. -1996. -Том.9, №4. -С. 460-463.
38. Гиясова И.В., Гиясов Т.Б. Формирование микроклимата городской застройки высотными зданиями // Ивд. -2020. -№2(62).

39. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. - Л.: Гидрометеоиздат. -1980. - С. 184.
40. Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений. - Л.: Химия. - 1989, 288 с.
41. Ле минь Туан, Алексашина В. В. Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса // Проблемы региональной экологии. -2018. - №5. -С. 36-40.
42. Григорьев В. А., Огородников И. А., Проблемы экологизации городов в мире, России, Сибири - Новосибирск. -2001г. -С. 148.
43. Кратцер П.А. Климат города. - М.: Изд. иностр. литер. -С. 1958. - 239.
44. Гусев М.А. Некоторые особенности термического режима в погранич¬ном слое атмосферы над Москвой. //Труды ЦВГМО,- М. -1975. - Вып. 3. - С. 36-43.
45. Дудорова Н.В., Белан Б.Д. Оценка интенсивности и размеров острова тепла и влаги в г.Томск на основе прямых измерений // Оптика атмосферы и океана. -2016. -№ 5. В печати.
46. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. Формирование и особенности острова тепла в большом городе // Доклады РАН. Геофизика. 2000. Т.370. № 2. С. 249 - 252.
47. Абдуллаев С. М., Кораблева Е. Г., Сапельцева Ю. А., Егорова А. В., Бабинцева В. А., Неверова Е. А. Оценка жизненного цикла природно-антропогенных систем // Вестник ЧелГУ. -2008. -№17.
48. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. - Л.: Г идрометеоиздат. -1974. -С. 568.
49. Малахов В.М., Сенич В.Н. Тепловое загрязнение окружающей среды промышленными предприятиями // Новосибирск: ГПНТБ СО РАН. - 1997. -С. 68.
50. Гуния Г.С. О метеорологических аспектах загрязнения атмосферы в районах промышленных городов горных регионов Г рузии // Метеорология и гидрология. -2006. -№2. -С. 51-58.
51. Маккормик Р.А. Метеорология и загрязнение воздуха в городах//Бюллетень ВМО.-1989. -Том 18, № 3. - С. 189-196.
52. Бримблкумб П. Состав и химия атмосферы. - М.: Мир, 1988. - 352 с.
53. Степанова Н. В., Шлычков А. П. Влияние комплекса метеорологических условий на загрязнение атмосферного воздуха города // Казанский мед.ж.. -2004. -№5.

54. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Маринайте И.И., Пененко В.В., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Фофонов А.В., Ходжер Т.В. Сравнительная оценка состава воздуха промышленных городов Сибири // Оптика атмосф. и океана. -2007. -Том 20, № 5. -С. 428 - 437.
55. Белан Б.Д., Колесников Л.А., Лукьянов О.Ю., Микушев М.К., Семьянова О.И., Толмачев Г.Н., Усманова В.М. Изменение концентрации озона в приземном слое воздуха. Оптика атмосферы и океана. -1992. - Том 5, №6. -С. 635-638.
56. Белан Б.Д., Скляднева Т.К. Суточный ход концентрации приземного озона в районе г. Томска // Метеорология и гидрология. -2001. -№5. - С.50-59.
57. Звягинцев А.М., Какаджанова Г., Тарасова О.А. Изменчивость приземного озона и других малых газовых составляющих атмосферы в мегаполисе и сельской местности // Оптика атмосферы и океана. - 2010. -Том 23, №1. -С. 32-37.
58. Берлянд М. Е., Кондратьев К. Я. Города и климат планеты,- Л.: Гидрометеоиздат. -1992. -С. 40.
59. Белан Б.Д., Пелымский О.А., Ужегова Н.В. Исследование антропогенной составляющей теплового баланса города // Оптика атмосферы и океана. -2009. -Том 22, № 6. -С. 558 - 561.
60. Oke T.R. City size and the urban heat island // Atmospheric Environment. - 1967. -Vol. 7 (8). -P. 769-779.
61. Pearlmutter D., Berliner P. and Shaviv E. Urban climatology in arid regions: current research in the Negev desert // International Journal of Climatology. -2007. -Vol. 27 (14). -P. 1875-1885.
62. Harman I.N. The energy balance of urban areas // Unpublished, Doctor of Philosophy Thesis, University of Reading,Reading, UK. -2003.
63. Oke T.R. Boundary Layer Climates. Methuen, London and New York. - 1987.
64. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеоиздат. -1956. -С. 242.
65. Николаенко А.П. Концепция теплового баланса планеты и глобальное потепление // Радиофизика и электроника. -2008. -Том 13. №3. -С. 572 - 576.
66. Voogt JA, Oke TR. hermal remote sensing of urban areas // Remote Sensing of Environment. -2003. -Vol. 86. -P. 370-384.

67. Ле минь Туан, Алексашина В. В. Проблемы градостроительства в условиях тропического климата (на примере города Ханой) // сборник докладов международной научно-практической конференции. Москва. -2018. -С. 183-187.
68. Белан Б.Д., Скляднева Т.К., Ужегова Н.В. Различия альбедо подстилающей поверхности г. Новосибирска и его окрестностей // Оптика атмосферы и океана. -2005. -Том 18, № 3. -С. 238 - 241.
69. Коваленко П. П. Градостроительная климатология : Учеб, пособие // Горький Горьков. гос. ун-т. - 1980. -С. 38.
70. Коваленко П. П., Орлова Л. Н. Городская климатология. М.: Стройиздат. -1993. -С. 70.
71. Лицкевич В.К., Мягков М.С., Губернский Ю.Д., Конова Л.И. Город, архитектура, человек и климат // Издательство: Архитектура. -2007. -С. 344.
72. Ландсберг Г.Е. Климат города. - Л.: Гидрометеоиздат. С. 1983. - 248.
73. Демин В.И., Козелов Б.В., Елизарова Н.И., Меньшов Ю.В. Влияние рельефа на микроклиматическую изменчивость зимней температуры воздуха в городе Апатиты // Вестник Кольского научного центра РАН. -2016. -№3 (26).
74. Гусев, Н. М. Основы строительной физики : Учеб, пособие по спец. "Архитектура". - М. :Стройиздат. -1975. -С. 440.
75. Есаулов, Г.В. Устойчивая архитектура - От принципов к стратегии развития // Вестник ТГАСУ. -2014. -№ 6. - С. 9-24.
76. Ле Минь Туан, Шукуров И. С., Шукурова Л. И., Дмитриева А. Д.. Влияние эффекта городского острова тепла на развитие устойчивого градостроительства (на примере города Ханой) // Градостроительство и архитектура. -2020. Том 10, №2. -С. 62-70.
77. Куприянов В.Н. Градостроительная климатология: Учебное пособие. - Казань: КГАСУ. -2012. -С. 147.
78. Серебровский Ф.Л. Климат и архитектура. Перевод с английского архитектора В. Б. Соколова М.: Госстройиздат ISBN. -1959.
79. Лицкевич В.К. Жилище и климат. - М.: Стройиздат. -1984. -С. 288.
80. “Cổng thông tin điều hành ủy ban nhân dân thành phố Hà Nội. https://www.thudo.gov.vn/hnmap.aspx,” [Trực tuyến].
81. Fayard. Histoire de Hanoi (История городов). Papin, Philippe. -2001. -P. 381-386.

82. Mật độ dân số tại thời điểm 01.04.1999 phân theo địa phương.Tổng cục thống kê Việt Nam. -1999.
83. Đánh giá chung tình hình dân số. Phụ lục 2.Ủy ban nhân dân thành phố Hà Nội. -2011.
84. Diện tích và dân số. Cổng điện tử Hà Nội. -2009. http://hanoi.gov.vn/bomaychinhquyen/-/hn/n5xfywjC3UDf/1102/30229/dan-so-va-dien-tich.html;jsessionid=Wh-qwwe2n9XRalcu7np1qNdd.app2.
85. Ле Минь Туан, Шукуров И.С.Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г.Ханое. //Вестник МГСУ. -2020. -Том 15. -Вып. 3. -С. 368-379.
86. TEDI. Báo cáo khoa học "Quy hoạch phát triển giao thông công cộng thủ đô Hà Nội". Hà Nội. -2013.
87. Trung tâm tư liệu và dịch vụ thống kê. https://www.gso.gov.vn/default.aspx?tabid=713.
88. Дубровская С.А., Ряхов Р. Тепловые структуры и аномалии города магнитогорска по результатам дешифрирования мультиспектральных изображений. Журнал: Вестник оренбургского государственного университета. -2015. -С. 286-288.
89. Кадыгров Е.Н., Колдаев А.В., Миллер Е.А., Соколов В.В., Хайкин М.Н. Исследование неоднородности острова тепла в г. Нижний Новгород с помощью мобильного дистанционного измерителя профилей температуры атмосферы //Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С54-66.
90. Кадыгров Е. Н., Коддасв А.В. Миллер Е. А., Соколов В. В. и др. Исследование неоднородности острова тепла в г. Нижний Новгород с помощью мобильного дистанционного измерителя профилей температуры атмосферы // Метеорологияигидрология. -2007. -№2. -С. 54-66.
91. Oke T. R. Urban climates // Cambridge University Press. -2017. -P. 546.
92. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 1.0. June 2015. Sioux Falls, South Dakota: EROS. -2015. -P. 106.
93. Попова, И. В. Архитектурно-климатический анализ городской среды (на примере г. Воронежа) / И. В. Попова Э. В. Сазонов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфра- структура. -2017. – № 4(3). – С. 61-69.
94. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на

основе дистанционных данных // Доклады Академии наук. -2002. -Том 385, № 4. -С. 541-548.

95. Е. А. Балдина, М. Ю. Грищенко, М. Константинов. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне// ДЗЗ для будущей Земли. Земля из космоса. «СПЕЦВЫ- ПУСК», 2015. – С.38-42.
96. Richards, John A. Remote Sensing Digital Image Analysis // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. -2013. -P. 195-196.
97. Исаков Сергей Владимирович, Шкляев Владимир Александрович Определение суммарного влияния антропогенноизменных поверхностей на возникновение эффекта «Городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // Вестник ОГУ. -2014. - №1 (162).
98. Congalton, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data // Remote Sens. Environ. -1991. -Vol. 37. -P. 35–46.
99. Congalton, R.G.; Green, K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices // CRC press: Boca Raton, FL, USA. -2008.
100. Vani, V.; Mandla, V. Comparative Study of NDVI and SAVI vegetation Indices in Anantapur district semi-arid areas // Int. J. Civ. Eng. Technol. -2017. -Vol. 8. -P. 287–300.
101. Zhang, Y.; Odeh, I.O.; Han, C. Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. -2009. -Vol. 11. P. 256–264.
102. He, C.; Shi, P.; Xie, D.; Zhao, Y. Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach // Remote Sens. Lett. -2010. -Vol. 1. -P. 213–221.
103. Zha, Y.; Gao, J.; Ni, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // Int. J. Remote Sens. -2003. -Vol. 24. -P. 583–594.
104. Guha, S.; Govil, H.; Dey, A.; Gill, N. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. Eur. // J. Remote Sens. -2018. -Vol. 51. P. 667–678.
105. Quintano, C.; Fernández-Manso, A.; Calvo, L.; Marcos, E.; Valbuena, L. Land surface temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems. Int // J. Appl. Earth Obs. Geoinf. -2015. -Vol. 36. -P. 1–12.

106. Sobrino, J.A.; Jimenez-Munoz, J.C.; Paolini, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // Remote Sens. Environ. -2004. -Vol. 90. -P. 434–440.
107. Tan, K.C.; San Lim, H.; MatJafri, M.Z.; Abdullah, K. Landsat data to evaluate urban expansion and determine land use land cover changes in Penang Island, Malaysia // Environ. Earth Sci. -2010. -Vol. 60, -P. 1509–1521.
108. Guha, S.; Govil, H.; Mukherjee, S. Dynamic analysis and ecological evaluation of urban heat islands in Raipur city, India // J. Appl. Remote Sens. -2017. -Vol. 11, 036020.
109. Zhang, Y.; Yu, T.; Gu, X.; Zhang, Y.; Chen, L. Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect. J // Remote Sens. Beijing. -2006. -Vol. 10. P. 789.
110. Исаков С.В., Шкляев В.А. Определение суммарного влияния антропогенноизмененных поверхностей на возникновение эффекта «городского острова тепла» с использованием геоинформационных систем // Вестник ОГУ. -2014. -Том 161, № 1. -С. 178-182.
111. Yu, Z., Guo, X., Jørgensen, G., Vejre, H. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? Ecological Indicators. -2017. -Vol. 82. -P. 152-162.
112. Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence // Landscape and urban planning. - 2010. - Vol. 97. P. 147-155.
113. Zhaowu Yu, Xieying Guo, Yuxi Zeng, Motoya Koga, Henrik Vejre. Variations in land surface temperature and cooling efficiency of green space in rapid urbanization: The case of Fuzhou city, China//Urban Forestry & Urban Greening. -2018. -Vol. 29. -P. 113-121.
114. Подольский Владислав Петрович, Нгуен Ван Лонг, and Ле Ван Чунг. "Повышение эксплуатационных параметров земляного полотна с использованием геоматериалов в условиях Вьетнама" Вестник МГСУ. -2013. -Том 1. -Р. 139-147.
115. Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D.N.,Papakatsikas, C. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate//Build. En-viron.-2011.V46 (1).P.38-44.
116. Gorsevski, V., Taha, H., Quattrochi, D., Luvall, J. Air pollution prevention through urban heat island mitigation: an update on the Urban Heat Island

Pilot Project // In proceedings of the ACEEE Summer Study, Asilomar, CA. -1998. -Vol. 9. P. 23-32.
117. Golden, J.S., Kaloush, K.E. Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects // Int. J. Pavement Eng. -2006. -Vol. 7 (1). -P. 37-52.
118. Kovalev Y.N. Road-climatic zoning of the territory of the BSSR for the construction of asphalt concrete pavements. -1966. -P. 64-71.
119. Asphalt Institute Superpave, 1997. 1. p 67.
120. Голицын Г.С., Мохов И.И. Турбулентность, динамика атмосферы и климата // Сборник трудов. -С. 703.
121. Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Сапогова А.Е. Компьютерное моделирование аэрационного режима жилой застройки с целью проветривания и ветрозащиты. //Вестник Южно-Уральского государственного университета. -2021. -Том. 21. -Вып. №1. -С. 5-12.
122. Bruse Michael // ENVI-met website (n.d.) retrieved on September 16, 2007 from: http://www.envi-met.com/.
123. М. С. Мягков, Л. И. Алексеева. Оценка усиления городского "острова тепла" за счет применения фотоэлектрических установок // Экология урбанизированных территорий. -2020. -№2.
124. Liu J., Chen J.M., Black T.A., Novak M.D. E-ε modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge // Boundary−Layer Meteorol. -1996. -Vol. 77. -P. 21-44.
125. Bruse M. Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima. Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur-, und Feuchtverteilung in städtischen Strukturen// PhD Thesis, Univ. Bochum. 1999.
126. Mellor G.L., Yamada T. A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data // J. Atmos. Sci. -1975. -Vol. 32. -P. 2309-2329.
127. Launder B., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flow // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. -1974. -Vol. 3. -P. 269-289.
128. Liu J., Chen J.M., Black T.A., Novak M.D. E-ε modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge // Boundary−Layer Meteorol. -1996. -Vol. 77. -P. 21-44.
129. Bussinger J.A., Wyngaard J.C., Izumi Y., Bradley E.F. Flux-Profile relationships in the atmospheric surface layer // J. Atmos. - 1971. Sci. Vol. 28. P 181-189.

130. Paltridge G.W., Platt C.M.R. Radiative processes in Meteorology and Climatology // Elsevier. New York. -1976.
131. Houghton J.T.: The physics of the atmosphere. Cambridge University press. New York. -1977.
132. Liljequist G. H. Meteorologie. Dept. of Meteorology. Univ. of Uppsala. Sweden. -1979.
133. Brown G., Isfält E. Solar irradiation and shading devices // Nat. Swedish Council for Building Research, Stockholm. - 1974.
134. Taesler R., Anderson C. A method for solar radiation computing using routine meteorological observations // Energy and Buildings. -1984. -Vol. 7. -P. 341-352.
135. Asaeda T., Ca V.T. The subsurface transport of heat and moisture and its effects on the environment: a numerical model // Boundary Layer Meteorol. - 1993. - Vol. 65, . P 159-179.
136. Markus T.A., Morris E.N. Buildings, Climate and Energy. Pitman. London. -1980.
137. Clapp R.B., Hornberger G. Empirical equations for some soil hydraulic properties // Water Resource Research. -1978. -Vol. 14. -P. 601-604.
138. Deardoff R.W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation // J. Geophys. Research. -1978. -Vol. 83. -P. 1189-1903.
139. Jacobs C.M.J. Direct Impact of atmospheric CO2 enrichment in regional transpiration PhD Thesis // Wageningen Agricultural University. Netherlands. -1994.
140. Bruse, M. ENVI-met implementation of the Jacobs .A - gs Model to calculate the stomata conductance. - 2004. http://envi-met.com/documents/new_a_gs.pdf.15.04.2015, 2004b.
141. Liu Z., Zheng S., Zhao L. Evaluation of the ENVI-Met Vegetation Model of Four Common Tree Species in a Subtropical Hot-Humid Area // Atmosphere. -2018. -Vol. 9. -P. 198. DOI:10.3390/atmos9050198.
142. Chatzinikolaou E., Chalkias C., Dimopoulou E. Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model, Int. Arch. Photogramm // Remote Sens. Spatial Inf. - 2018. Sci., XLII- Vol. 4. - P. 69–76. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-69-2018.
143. П. И. Константинов, М. Ю. Грищенко, М. И. Варенцов . Картографирование островов тепла городов Заполярья по совмещенным данным

полевых измерений и космических снимков на примере г. Апатиты (Мурманская область). -2015, № 3. -С. 27–33.
144. Грищенко М.Ю, Константинов П.И . Изучение острова тепла москвы 2014-2015 гг. по космическим и наземным данным // Статья в сборнике трудов конференции. -2016. -С. 472-476.
145. Е. А. Балдина, М. Ю. Грищенко, М. Константинов. Исследование городских островов тепла с помощью данных дистанционного зондирования в инфракрасном тепловом диапазоне// ДЗЗ для будущей Земли. Земля из космоса. «СПЕЦВЫ- ПУСК». -2015. –С. 38-42.
146. Ле Минь Туан, Шукуров И.С., Нгуен Тхи Май. Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки / // Строительство: наука и образование. -2019. -Vol. 9. Issue 3 (33). -С. 1-22.
147. Thông tin về khí hậu của Thành phố Hà Nội. Trung tâm dịch vụ và tài liệu thống kê, Tổng cục Thống kê. -2016. -P. 32.
148. Pham Ngoc Dang, Pham Duc Nguyen, Luong Minh. Vat ly xay dung (phan 1, nhiet va khi hau). NXB. Xay dung. hanoi. -1981.
149. Pham Ngoc Dang. Huong dan thiet ke do an nhiet va khi hau kien truc. Hanoi. -1980.
150. Huang, C., Ye, D., Zhao, H., Liang, T., Lin, Z., Yin, H., Yang, Y. The research and application of spray cooling technology in Shanghai Expo. Appl. Therm. Eng. -2011. -Vol. 31. -P. 3726 – 3735.
151. Bruse, M. (2009). Numerical modeling of the urban climate – a preview on Envi-met 4.0 // 7th International Conference on Urban Climate. Proceedings…ICUC 2009. Yokohama, Japon. -2009.
152. TCVN 5508:2009. Không khí vùng làm việc - Yêu cầu về điều kiện vi khí hậu và phương pháp do. Tổng cục tiêu chuẩn đo lường chất lượng, Bộ khoa học và công nghệ.
153. Ле Минь Туан, Шукуров И.С. Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое // Вестник МГСУ. -2020. -Том 15, Вып. 3. -С. 368–379. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.368-379.
154. Minh Tuan Le et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 661 012090.
155. Population Reference Bureau. Word population data sheet. -2014. -P. 1-20.
156. United Nations. Report on World urbanization prospects : The 1999 revision., United Nations. -2015. -P. 1–14.
157. Ле Минь Туан, Шукуров И.С., Нгуен Тхи Май. Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки //

Строительство: наука и образование. -2019. -Том 9, Вып. 3. Ст. 2. URL: http://nso-journal.ru. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.2.
158. 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.
159. Ле Минь Туан. Исследование влияния озеленения городов 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.
160. 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.
161. 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.
162. 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.
163. 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.
164. 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.
165. Ле Минь Туан. Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса / Ле Минь Туан, Алексашина В.В. // Проблемы региональной экологии. - 2018. - № 5. - С. 36-40.
166. H. Taha, Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat // Energy Build. -1997. -Vol. 25. -P. 99–103.
167. E. Ng, L. Chen, Y. Wang, C.H. Yuan, A study on the cooling effects of greening in a high-density city: an experience from Hong Kong // Build. Environ. -2012. -Vol. 47. -P. 256–271.

168. T. Morakinyo, L. Kong, K. Lau, C. Yuan, E. Ng, A study on the impact of shadow - cast and tree species on in-canyon and neighbourhood's thermal comfort // Build.Environ. -2017. Vol. 115. -P. 1–17.
169. H. Akbari, C. Cartalis, D. Kolokosta, Local climate change and Urban Heat Island mitigation techniques – the state of the art // J. Civ. Eng. Manag. -2016. -P. 1822–3605.
170. Z. Jandaghian, U. Berardi, Effects of increasing urban albedo in Greater Toronto area // 10th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings. -2019.
171. Z. Wang, X. Zhao, J. Yang, J. Song, Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city // Appl. Energy. -2016. Vol. 161. -P. 437–444.
172. Cascone, S.; Coma, J.; Gagliano, A.; Pérez, G. The evapotranspiration process in green roofs: A review // Build. Environ. - 2018. - Vol. 14. P. 337–355.
173. Li, D.; Bou-Zeid, E.; Oppenheimer, M. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. Environ. Res. Lett. -2014. - Vol. 9, 055002.
174. S. Liang, X. Li, J. Wang, Advanced Remote Sensing (Chapter 11) // Academic Press. -2012. -P. 347–381.
175. L. Li, X. Li, B. Lin, Y. Zhu, Improved two-equation turbulence model for canopy flow, Atmos. Environ. -2006. -Vol. 40. -P. 762–770.
176. LEED for New Construction. Heat Island Effect: Non-Roof. Credit 7.1 - Version 2.2. -2010.
177. City of Toronto, "Toronto Green Standard", City of Toronto, Toronto, ON, December 31, 3010.
178. Fu, P., Weng, Q. A time series analysis of urbanization induced land use and land cover change and its impact on land surface temperature with Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. -2016. -Vol. 175. -P. 205-214.
179. 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.
180. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Данные по температуре воздуха за период 2011-2025гг., полученные станцией «Ланг» в г. Ханое

Год / °C	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Среднегодовое значение
2011 г.	17,7	19,5	22,5	25,9	27,7	29,6	29,4	28,4	27,6	25,2	21,2	18,9	24,5
2012 г.	16,9	20,8	21,9	26,2	29,0	30,0	29,8	29,1	27,8	26,6	23,9	18,5	25,0
2013 г.	17,2	18,1	20,7	24,2	26,6	29,8	29,2	29,1	28,3	26,1	23,1	19,3	24,3
2014г.	16,2	17,8	19,2	24,2	29,2	30,3	29,6	28,8	28,7	26,3	22,7	17,4	24,2
2015 г.	18,3	18,4	20,3	25,4	27,3	30,2	30,0	28,1	28,2	27,4	24,7	18,3	24,7
2016г.	16,9	21,9	21,1	23,4	27,3	30,2	30,4	29,2	27,2	25,8	21,4	20,4	24,6
2017г.	15,2	13,8	21,4	24,7	27,6	28,6	29,4	29,0	28,3	26,5	21,4	18,4	23,7
2018 г.	16,0	22,5	21,0	24,7	27,1	30,3	29,6	29,9	29,1	26,8	21,9	19,9	24,9
2019 г.	18,1	20,9	21,9	23,5	28,7	30,9	30,7	28,6	28,7	25,7	22,1	19,4	24,9
2020 г.	12,8	17,7	17,1	23,8	27,2	29,5	29,9	28,9	27,5	24,5	23,9	17,4	23,4
2021 г.	14,6	16,1	20,2	26,2	28,9	30,3	29,6	29,3	27,9	26,8	23,4	18,7	24,3
2022 г.	15,3	19,9	24,0	25,0	28,9	30,0	28,8	29,1	27,0	25,6	22,8	16,3	24,4
2023 г.	17,7	17,2	19,9	25,3	29,3	30,1	29,5	28,9	29,2	27,0	22,9	17,6	24,6
2024 г.	18,1	19,2	21,6	25,4	30,6	30,9	30,4	29,0	28,5	27,2	24,6	18,5	25,3
2025г.	17,1	16,9	20,2	25,6	28,8	31,5	30,7	29,6	29,4	28,1	23,3	21,4	25,2

Приложение Б. Данные по количеству осадков за период 2011-2025 гг., полученные станцией «Ланг» в г. Ханое

Год / мм	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	сентябрь	ноябрь	декабрь	Среднегод. значение
2011 г.	9	24	11	59	214	240	262	202	179	128	51	60	119,9
2012 г.	41	37	13	61	282	274	243	375	251	13	4	6	133,3
2013 г.	6	29	45	161	335	229	366	247	107	8	24	28	132,1
2014г.	11	36	27	33	221	278	278	377	366	18	92	27	147,0
2015 г.	0	25	31	18	140	97	247	354	183	28	116	1	103,3
2016г.	3	25	29	98	118	211	286	330	388	145	5	21	138,3
2017г.	27	14	20	122	184	234	424	305	199	469	259	11	189,0
2018 г.	4,9	8	49,1	74,3	229	242,4	550,5	215,7	154,6	78,8	1,2	3,6	134,3
2019 г.	80,9	8,1	5,8	55,6	149,7	175,4	280,4	274,4	171,8	24,9	0,6	11,6	103,3
2020 г.	9,3	17,5	105,8	42	149	395,5	254,4	313,2	247,6	177,6	31,8	51,5	149,6
2021 г.	20,3	16,5	16,9	31,8	387,7	268,9	388,3	478,1	54,7	77,5	34,8	25,7	150,1
2022 г.	13,8	17,7	46,1	23,3	242,5	216,7	305,9	541,4	374,3	61,2	69,6	22,2	161,2
2023 г.	0,7	16,1	68,6	170,4	106,1	221,7	357,3	314,7	237,3	119,4	36,5	11,8	138,4
2024 г.	25,6	12,5	59,4	21,6	74,2	241,1	96,8	354,2	345,4	99,7	158	31,5	126,7
2025г.	96,9	4,2	24,7	104,5	249	95,1	280,4	534,5	178,5	45	9,3	9	135,9

Приложение В. Данные по влажности воздуха за период 2011-2025гг., полученные станцией «Ланг» в г. Ханое

Год / %	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	сентябрь	ноябрь	декабрь	Среднегодовое значение
2011 г.	78	85	82	82	81	80	79	81	76	78	72	81	79,6
2012 г.	76	82	77	81	78	75	80	82	81	72	71	70	77,1
2013 г.	79	83	81	85	82	75	79	83	81	67	75	73	78,6
2014г.	79	85	83	83	78	77	79	83	78	76	79	69	79,1
2015 г.	74	86	84	80	78	75	78	83	72	76	76	75	78,1
2016г.	69	81	88	79	75	77	78	81	81	77	67	77	77,5
2017г.	80	72	82	84	79	81	79	83	80	80	76	75	79,3
2018 г.	72	84	82	82	81	74	79	78	76	75	66	73	76,8
2019 г.	81	80	78	85	81	74	74	82	79	70	71	77	77,7
2020 г.	71	83	80	80	76	80	77	80	80	78	76	67	77,3
2021 г.	82	83	82	79	77	74	78	78	76	75	79	79	78,5
2022 г.	82	86	80	81	78	74	82	81	82	73	73	68	78,3
2023 г.	71	79	87	88	77	80	81	82	78	73	79	67	78,5
2024 г.	78	82	88	78	75	75	72	82	83	72	80	75	78,3
2025г.	82	67	83	83	77	70	74	78	75	71	71	64	74,6

Приложение Г. Средняя скорость (м/с) и повторяемость ветра (%) по направлениям за период 2019-2024 гг. в Ханое

Месяц / год	январь		февраль		март		апрель		май		июнь		июль		август		сентябрь		октябрь		ноябрь		декабрь		Среднегодовое значение	
	Основное направление ветра																									
	С-В		Ю-В		Ю-В		Ю-В		Ю-В		Ю-В		Ю-В		Ю-В		Ю-В		С-В		С-В		Ю-В			
	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с	повторяемость, %	скорость, м/с
2019	23	1,9	17,9	2,1	22	2	23,1	2,1	19,4	2,2	15,7	1,8	17,9	1,8	25,6	1,6	33,1	1,6	30,2	1,7	28,5	1,7	27,6	1,7	23,7	1,9
2020	26	1,8	22	1,9	24	1,9	26	1,8	18	1,8	18	1,8	20,6	1,9	29,4	1,5	38	1,4	35	1,3	32,8	1,4	31,7	1,5	27	1,7
2021	24,5	1,7	20	2	22,3	2	23,5	2,1	15,7	1,8	17,2	1,7	18,1	1,6	30,1	1,3	36	1,3	33,2	1,3	30,3	1,2	28,3	1,2	25	1,5
2022	22,3	1,5	17,4	1,8	21,3	1,8	22,4	2	18,8	1,8	15	1,7	17,4	1,6	24,8	1,3	33	1,3	29,3	1,3	27,6	1,2	26,8	1,2	23	1,5
2023	23,4	2,1	18,4	1,9	21,8	1,7	23	1,8	17,3	1,9	16,1	1,8	17,7	2	27,5	1,6	34,3	1,8	31,2	2,1	29	2	27,5	1,9	23,9	1,9
2024	22,3	2,2	18,5	1,7	21,7	1,9	23,1	1,8	17,5	1,9	16,2	1,8	17,5	2,1	28,5	1,8	36,3	1,9	34,1	2	29,5	2,1	28,1	1,8	23,9	1,9

Приложение Д. Данные по продолжительности солнечного сияния (ч) в Ханое за период 2011-2025 гг., полученные станцией «Ланг» в г. Ханое

Год / Месяц	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2011 г.	69	43	66	124	147	136	102	149	146	139	100	62
2012 г.	113	94	76	121	176	177	225	127	149	148	131	104
2013 г.	36	64	46	74	141	185	121	160	122	148	136	161
2014г.	41	22	36	88	193	125	190	137	165	105	131	70
2015 г.	74	32	26	102	159	170	145	97	170	125	152	111
2016г.	69	75	25	88	146	218	209	157	129	107	181	58
2017г.	63	26	68	73	143	116	144	124	123	92	148	114
2018 г.	105	74,9	50,1	85,6	142,8	166,6	142,9	171,7	132,3	125	138,3	78,1
2019 г.	34,2	94,2	53	51,1	124,8	158,5	180,5	121,3	146,1	108,6	104,6	79,1
2020 г.	4	37,9	15	57	138,5	127,2	151,4	151	102,7	76,8	106,5	95,6
2021 г.	4,8	18,5	24,3	94,9	0	107,7	145,4	160,3	112	99,9	99,7	42,2
2022 г.	12,2	38,9	75,4	69	158	161,7	119,9	140,9	89,4	134,9	68,8	158,7
2023 г.	119	31,9	14,9	13,5	181,5	120,3	133	107,6	137,7	134,6	86,3	87,5
2024 г.	98,9	43,8	32,4	114,3	204,7	178	124	157,7	101	139	83,6	44,6
2025г.	39,6	91,7	22,7	64,6	143,5	192,8	152,4	129,4	119,4	144,5	104,2	135

Приложение Е. Среднемесячные значения максимальной температуры воздуха (°C) за период 2220-2025 гг. в г. Ханое

Температура, °C												
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
2020г.	18.4	20.4	21.8	23.9	29.5	31.4	31.5	28.9	29.1	25.9	22.5	19.8
2021 г.	12.9	18.2	17.4	24.4	27.7	30.0	30.7	29.6	27.9	24.8	24.2	17.8
2022 г.	14.8	16.4	20.5	26.8	29.6	30.8	30.2	29.6	29.7	27.2	23.7	18.7
2023 г.	15.5	20.3	24.5	25.5	29.4	30.5	29.3	29.3	27.0	25.9	23.0	19.1
2024 г.	17.9	17.4	20.0	27.7	30.0	30.5	30.1	29.2	29.4	27.2	23.0	17.6
2025 г.	18.1	19.0	21.6	25.7	31.1	31.3	30.7	30.1	28.5	28.1	24.4	19.4
Среднегодовое значение	16.3	18.6	21.0	25.7	29.6	30.7	30.4	29.5	28.6	26.5	23.5	18.7

Научное издание

Ле Минь Туан

Шукуров Илхомжон Садриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСТРОВА ТЕПЛА ГОРОДОВ

Монография

ISBN 978-5-00291-172-1

Компьютерная верстка и макет *Горохов А.А.*

Подписано в печать 20.07.2026.
Формат 60x84/16. Бумага офисная
Уч.-изд. л. 8,7. Усл. печ. л. 9,7. Тираж 500 экз. Заказ 3637

Отпечатано в типографии
Закрытое акционерное общество «Университетская книга»
305018, г. Курск, ул. Монтажников, д. 12
ИНН 4632047762 ОГРН 1044637037829 дата регистрации 23.11.2004 г.
Телефон +7-910-730-82-83 www.nauka46.ru