

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ
(МИИГАиК)**

На правах рукописи



Дегбегнон Кевин Мари

**МЕТОДИКА ЗОНИРОВАНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ С УЧЕТОМ
ПРИРОДНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ (НА ПРИМЕРЕ
РЕСПУБЛИКИ БЕНИН)**

1.6.15 — Землеустройство, кадастр и мониторинг земель

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук, профессор
Илюшина Татьяна Владимировна

Москва — 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ЗОНИРОВАНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ БЕНИН	14
1.1. Физико-географические, экологические и социально-демографические условия территории Республики Бенин	14
1.1.1. Физико-географическое положение	14
1.1.2. Население и административно-территориальное деление страны	17
1.1.3. Климатические, гидрографические и почвенно-растительные условия	18
1.2. Основные термины и определения, используемые в исследовании	22
1.3. Нормативно-правовое обеспечение кадастрового учёта и зонирования населённых пунктов Республики Бенин.....	25
1.4. Состояние изученности проблемы и международный опыт зонирования населённых пунктов	30
1.5. Классификация населённых пунктов Республики Бенин и функциональных зон их земель	36
1.6. Модель функционального зонирования населённых пунктов Республики Бенин.....	42
1.6.1. Проекты зонирования населённых пунктов Республики Бенин и их основные задачи.....	42
1.6.2. Зонирование территории г. Котону как объекта апробации методики	44
1.7. Разработка порядка утверждения границ населённых пунктов в Республике Бенин	46
1.7.1. Этапы установления и утверждения границ населённых пунктов	46
1.7.2. Методы измерения границ населённых пунктов и оформление результатов межевания.....	53
1.8. Выводы по главе 1	58

Глава 2. МЕТОДИЧЕСКОЕ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗОНИРОВАНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ С УЧЁТОМ ПРИРОДНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	61
2.1. Составление карт-схем зонирования населённых пунктов на примере города Котону с учётом природных и экологических особенностей	61
2.2. Природные и экологические особенности территорий населённых пунктов Республики Бенин, учитываемые при зонировании	65
2.2.1. Земли населённых пунктов, подверженные затоплению, подтоплению и береговой абразии.....	65
2.2.2. Земли разведки и добычи полезных ископаемых в границах населённых пунктов	77
2.2.3. Земли особо охраняемых природных территорий в границах населённых пунктов	84
2.3. Обоснование ширины буферных зон водных объектов, ООПТ и объектов добычи полезных ископаемых	91
2.4. Геодезическое обеспечение межевания при зонировании земель населённых пунктов	101
2.5. Геоинформационный метод масок и контролируемая классификация космических изображений в мониторинге развития населённых пунктов	108
2.5.1. Спектральные характеристики космических систем Landsat-5, Landsat-7 и Landsat-8	109
2.5.2. Исследуемая территория, расчёт индексных изображений MNDWI и NDBI и формирование масок	112
2.5.3. Сравнительный анализ методов классификации космических изображений.....	122
2.6. Мониторинг развития населённых пунктов Республики Бенин по данным дистанционного зондирования и ГИС-технологий (города Котону и Бохикон)..	130
2.7. Выводы по главе 2	142

Глава 3. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ЗОНИРОВАНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ БЕНИН И ЕЁ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	144
3.1. Разработка методики зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей.....	144
3.2. Алгоритм совершенствования системы зонирования населённых пунктов Республики Бенин.....	150
3.3. Структура геоинформационной базы данных населённых пунктов с разделом природно-экологических характеристик.....	153
3.4. Разработка структуры геоэкологического паспорта водного объекта	161
3.5. Анализ причин и последствий затопления территорий населённых пунктов и меры по предупреждению наводнений	164
3.6. Аprobация методики зонирования на примере городов Котону и Бохикон и оценка достоверности выделенных границ.....	167
3.7. Предложения по составу территориальных зон и содержанию градостроительного регламента.....	171
3.8. Эколого-экономическая оценка предлагаемых решений	173
3.9. Выводы по главе 3	176
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	179
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	186
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	189
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА	207
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Классификация земель населённых пунктов Республики Бенин по функциональному назначению и природно-экологическим ограничениям....	213
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Структура геоинформационной базы данных населённых пунктов Республики Бенин.....	215
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Форма геоэкологического паспорта водного объекта	218

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В условиях урбанизации, изменения климата и усиления антропогенного воздействия на природные системы проблема рационального землепользования и пространственного планирования в населённых пунктах приобретает особую значимость. Особенно остро этот вопрос стоит в Республике Бенин — стране с высокой антропогенной нагрузкой, динамичным ростом городских агломераций, интенсивной хозяйственной деятельностью и повышенной уязвимостью к природным рискам, таким как сезонные наводнения и береговая абразия. Используемые методы землеустройства не позволяют в полной мере учитывать пространственно-временную динамику природных процессов и современные требования устойчивого развития территорий. В этой связи требуется научно обоснованная методика зонирования населённых пунктов, адаптированная к местным природно-климатическим условиям и социально-экономическим особенностям страны. Особую важность приобретает учёт природных и экологических особенностей территории при обеспечении экологической безопасности и предупреждении последствий опасных природных процессов: такой учёт способствует повышению точности и достоверности кадастровых данных, позволяет минимизировать конфликты землепользования и повысить эффективность управления земельными ресурсами на уровне муниципальных образований. Использование космических снимков и технологий геоинформационных систем (ГИС-технологий) позволяет вести оперативный мониторинг состояния земель населённых пунктов и обеспечивает объективную основу для создания актуализированных карт землепользования, что особенно важно в условиях быстрого территориального развития и климатических изменений. Таким образом, разработка и внедрение методики зонирования, учитывающей природные и экологические особенности населённых пунктов, представляется актуальной задачей, имеющей теоретическое значение и

практическое применение в сфере государственного управления, регулирования урбанизации и экологически устойчивого развития территорий Республики Бенин.

Степень разработанности темы. Основой исследования являются работы, посвящённые развитию кадастрового учёта, землеустройства, территориального планирования и зонирования населённых пунктов Республики Бенин. Вопросы правового регулирования, пространственного развития, динамики землепользования и устойчивого развития территорий в условиях природных ограничений рассматривались в трудах бенинских исследователей Жозе Эдгара Гнеле (José Edgard Gnélé) [101], Боларинвы Улисса Эме Банколе (Bolarinwa Ulysse Aimé Bankolé) [2], Бенуа Дамьена Н'Бессы (Benoît Damien N'Bessa) [122], Джона Иге (John O. Igué) [108] и Тамеона Бенуа Данвиде (Tameon Benoît Danvidé) [90]. Теоретико-методологическую основу применения геодезии, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), картографирования и геоинформационного анализа при решении задач землеустройства и мониторинга земель составили труды российских учёных В. А. Малинникова [33], В. В. Браткова [5], В. В. Беленко [3], А. П. Сизова [58—60], Т. В. Илюшиной [27], А. В. Кошкарёва [30], В. А. Николаева [35] и других исследователей. Несмотря на значительный вклад указанных авторов, для Республики Бенин остаются недостаточно разработанными вопросы комплексного учёта природных и экологических факторов при зонировании населённых пунктов, построении кадастровых баз данных и мониторинге пространственной динамики застройки.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка методики зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей территорий на основе комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли, геодезических материалов и геоинформационного анализа. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Разработать классификацию населённых пунктов Республики Бенин по численности населения и классификацию земель населённых пунктов по функциональному назначению и природно-экологическим ограничениям.

2. Проанализировать современные системы спутникового зондирования и методы их применения для зонирования, учёта, оценки и мониторинга развития населённых пунктов Республики Бенин.

3. Обосновать применение автоматизированной обработки космических снимков для выявления зон затопления и заболачивания и иных природных ограничений использования территории.

4. Обосновать применение геоинформационного метода масок, выполнить сравнительный анализ метода минимального расстояния и метода максимального правдоподобия для выбора рабочего инструмента классификации космических изображений и разработать на этой основе алгоритм применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий при зонировании населённых пунктов Республики Бенин.

5. Разработать комплексную методику зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей страны, включая порядок установления и утверждения границ населённых пунктов.

6. Разработать структуру геоинформационной базы данных населённых пунктов Республики Бенин, включающую кадастровые, природные и экологические характеристики территорий.

7. Разработать структуру геоэкологического паспорта водного объекта и алгоритм совершенствования системы зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом их природных и экологических особенностей.

Комплексный характер зонирования обеспечивается учётом природных и экологических особенностей территории: единый пространственный слой зон затопления и заболачивания, выделенный по разновременным космическим изображениям, с построенными на его основе средствами ГИС буферными зонами (включая полосу берега океана) используется одновременно для градостроительного регулирования (раздел 3.7), кадастрового учёта (3.3), установления буферных зон (2.3), мониторинга застройки (2.6) и оценки

предотвращаемого ущерба (3.8). Без этого слоя зонирование имеет лишь градостроительное назначение.

Объект исследования — процесс зонирования населённых пунктов Республики Бенин в системе землеустройства, кадастра и мониторинга земель; **предмет исследования** — методы, модели и процедуры учёта природных и экологических факторов при зонировании, кадастровом обеспечении и мониторинге пространственного развития населённых пунктов.

Научная новизна исследования заключается в разработке методики зонирования населённых пунктов Республики Бенин, ориентированной на комплексный учёт природных и экологических особенностей территорий в задачах землеустройства, кадастра и мониторинга земель.

В рамках полученного научного результата автором впервые для условий Республики Бенин:

- разработана методика зонирования населённых пунктов, отличающаяся включением в единую процедуру данных многозонального дистанционного зондирования, геодезических материалов, геоинформационного анализа и оценки природных рисков, в том числе дифференцированной шкалы ширины буферных зон (50—500 м), относительной шкалы риска затопления (категории I—III) и порядка установления и утверждения границ населённых пунктов с обязательным этапом учёта природных ограничений, что позволяет обосновывать границы функциональных зон на территориях с выраженными природными ограничениями;

- предложены классификация населённых пунктов Республики Бенин по численности населения, отличающаяся выделением четырёх категорий поселений, и классификация земель населённых пунктов по функциональному назначению и природно-экологическим ограничениям, отличающаяся от традиционных схем зонирования включением в единый классификационный контур селитебных, общественно-деловых, производственных, сельскохозяйственных, ландшафтно-рекреационных, охранных зон, зон инженерной и транспортной инфраструктуры и зон специального назначения с

учётом природных рисков и ограничений землепользования, что обеспечивает дифференцированный учёт состава функциональных зон и природных ограничений для населённых пунктов разных категорий — крупных, средних, малых городов и посёлков;

- разработана структура геоинформационной базы данных населённых пунктов, отличающаяся системной интеграцией кадастровых сведений, границ функциональных зон, характеристик землепользования, природно-экологических условий и рисков опасных процессов в едином информационном ресурсе для задач зонирования, кадастра и мониторинга;

- разработан алгоритм применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий, отличающийся адаптацией процедур пространственного анализа и мониторинга к условиям Республики Бенин и обеспечивающий выявление зон затопления и заболачивания, учёт береговой абразии и иных ограничений землепользования при подготовке решений по зонированию с общей точностью классификации космических изображений 93,30 % и коэффициентом каппа Коэна 0,90;

- предложены структура геоэкологического паспорта водного объекта и алгоритм совершенствования системы зонирования, отличающиеся объединением сведений о гидрологическом режиме, площадях зон затопления и заболачивания, границах буферных зон и видах разрешённого использования прилегающих земель в едином документе, что обеспечивает информационную поддержку принятия решений по зонированию прибрежных территорий.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии научно-методических положений зонирования населённых пунктов на основе интеграции методов ДЗЗ, геоинформационного анализа и кадастрового описания территорий. Полученные результаты развивают подходы к учёту природных рисков и экологических ограничений в землеустройстве и мониторинге земель, уточняют состав пространственных данных, необходимых для обоснования функционального зонирования, и формируют методическую основу для адаптации кадастровых процедур к условиям быстро меняющейся городской среды.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения разработанной методики органами государственного управления и территориального планирования Республики Бенин при подготовке схем зонирования, уточнении границ функциональных зон, ведении кадастровых баз данных и мониторинге пространственного развития населённых пунктов. Методика обеспечивает выявление зон затопления и заболачивания, учёт береговой абразии и иных территориальных ограничений, а разработанная структура базы данных, реализованная в виде прототипа, может использоваться при формировании геопорталов, геоэкологических паспортов водных объектов и информационном обеспечении генеральных планов.

Методология и методы исследования. Аналитический метод использован для оценки научных источников, нормативных документов и существующей практики зонирования населённых пунктов Республики Бенин. Картографический и геодезический методы применялись при анализе границ населённых пунктов, подготовке карт-схем и обосновании пространственных параметров зонирования. Методы дистанционного зондирования Земли использованы для дешифрирования космических снимков, выделения водных объектов, зон затопления, заболачивания и динамики застройки. Метод геоинформационного анализа применялся для интеграции разнородных пространственных данных, построения тематических слоёв, оценки изменений территорий и формирования структуры геоинформационной базы данных. Полевые методы включали рекогносцировочное обследование затапливаемых территорий г. Котону с фотофиксацией и топографическую съёмку земельного участка с составлением кадастрового плана (2019—2020 гг.), а также сбор кадастровых и градостроительных материалов в Национальном агентстве государственного имущества и земельных ресурсов (ANDF) и в мэрии г. Котону и опрос практикующих геодезистов и специалистов о порядке межевания (2019—2022 гг.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Критериями для территориального зонирования земель населенных пунктов Республики Бенин являются природные и экологические факторы, ограничивающие использование и застройку этих земель.
2. Данные дистанционного зондирования Земли в сочетании с геодезическими и кадастровыми материалами служат основой для создания базы данных и методики зонирования земель населенных пунктов в Республике Бенин.
3. Разработанную методику территориального зонирования целесообразно реализовывать на основе структуры геоинформационной базы данных и алгоритма совершенствования системы зонирования населенных пунктов Республики Бенин.

Соответствие паспорту научной специальности 1.6.15. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 37. Применение геоинформационных систем и технологий в целях системного анализа состояния и использования земель, объектов недвижимости, природных и окружающей среды. 38. Зонирование и районирование территории различного происхождения и содержания.

Личный вклад автора. Автором самостоятельно выполнены: постановка цели и задач исследования; сбор и систематизация нормативно-правовых, картографических и кадастровых материалов Республики Бенин, в том числе полученных в ANDF и в мэрии г. Котону (2019—2022 гг.); рекогносцировочное обследование затопливаемых территорий г. Котону с фотофиксацией (2019—2020 гг.); топографическая съёмка земельного участка и составление его плана в AutoCAD (рисунок 11); опрос практикующих геодезистов о сложившейся практике межевания (2019—2022 гг.); подбор и предварительная обработка разновременных многозональных космических изображений Landsat-5, Landsat-7 и Landsat-8; формирование обучающих выборок и контролируемая классификация изображений методами минимального расстояния и максимального правдоподобия с построением матриц ошибок и расчётом

коэффициента каппа Коэна; разработка классификации населённых пунктов и земель населённых пунктов; разработка методики зонирования, структуры геоинформационной базы данных и её прототипа, структуры геоэкологического паспорта водного объекта и алгоритма совершенствования системы зонирования; составление авторского оригинала карты-схемы структуры застройки г. Котону с учётом природных и экологических особенностей; подготовка публикаций и апробация результатов на научных конференциях. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат постановка задач, обработка космических изображений, геоинформационный анализ и формулировка выводов.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов обеспечивается сравнением двух методов классификации по матрицам ошибок: контрольные полигоны не участвовали в обучении, эталонные классы определены визуальным дешифрированием изображений в цветовых синтезах и по кадастровым материалам (общая точность 93,30 % при коэффициенте каппа Коэна 0,90 для метода максимального правдоподобия). Её подтверждают также единство сезона съёмки и порогового значения индекса для всех дат ряда, контроль баланса площадей классов в границах исследуемого фрагмента, сопоставление оценок с независимыми результатами картографирования риска наводнений в агломерации Большого Нокуэ и с хронологией наводнений, а также согласованность выделенных зон затопления с данными рекогносцировочного обследования, выполненного автором в 2019—2020 гг.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования были доложены и обсуждены: на 74-й, 75-й, 76-й и 77-й научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК (Москва, 2019—2022 гг.); на XXIV Международном симпозиуме имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2020); на Международной научно-технической онлайн-конференции «Пространственные данные в условиях цифровой трансформации» (Москва, 2020); на Международной научно-практической конференции «Современные

проблемы земельно-имущественных отношений, урбанизации территории и формирования комфортной городской среды» (Тюмень, 2021); на XX Всероссийской конференции-конкурсе «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2024); на научной конференции МИИГАиК «Пространственные данные: наука и технологии» (Москва, 2025).

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 10 научных работ, из них 4 статьи — в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, и 6 работ — в прочих научных изданиях и сборниках научных конференций.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка иллюстративного материала и трёх приложений. Общий объём диссертации — 219 страниц, включая 48 рисунков, 26 таблиц и 3 приложения. Список литературы содержит 143 наименования.

Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ЗОНИРОВАНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ БЕНИН

Целью настоящей главы является формирование теоретико-методологической основы разрабатываемой методики. Для этого в главе установлен состав природных и экологических ограничений землепользования, характерных для населённых пунктов Республики Бенин (раздел 1.1), определена используемая терминология (1.2), выявлены пробелы действующего нормативно-правового обеспечения зонирования (1.3, таблица 4), оценено состояние изученности проблемы и обобщён международный опыт совместного использования пространственных данных при зонировании (1.4). На этой основе разработаны классификация населённых пунктов и функциональных зон их земель (1.5), модель функционального зонирования (1.6) и порядок установления и утверждения границ населённых пунктов (1.7), которые служат исходными положениями методики, разрабатываемой в главах 2 и 3.

1.1. Физико-географические, экологические и социально-демографические условия территории Республики Бенин

1.1.1. Физико-географическое положение

Республика Бенин, расположенная на западе Африканского континента, является частью Гвинейского побережья и занимает территорию от $6^{\circ}14'$ до $12^{\circ}25'$ северной широты и от $0^{\circ}46'$ до $3^{\circ}51'$ восточной долготы. Протяжённость страны с юга на север составляет около 700 км, а наибольшая ширина — около 320 км. На юге страна омывается водами Гвинейского залива Атлантического океана, что определяет важное транспортно-географическое положение страны как одного из ключевых звеньев в системе межрегиональных связей Западной Африки [2; 79].

Для территории Республики Бенин характерна выраженная широтная зональность природных условий. Территория страны относится к древним

платформенным областям Африканского континента, где в основании лежит докембрийский фундамент, сложенный метаморфическими породами — гнейсами, сланцами, кварцитами и гранитами. Верхние горизонты коры выветривания представлены красными и жёлтыми ферралитными почвами, характерными для тропических широт с высокими увлажнением и температурой воздуха [79].

Прибрежная полоса, протянувшаяся вдоль береговой линии Гвинейского залива, имеет слабонаклонный рельеф с чередованием песчаных дюн, пляжных валов, лагун и заболоченных низменностей. Основные прибрежные водоёмы — озеро Нокуэ и лагуна Порто-Ново — служат естественными водоприёмниками поверхностного стока и формируют специфический микроклимат прибрежных городов. Южная часть страны испытывает повышенную антропогенную нагрузку, связанную с развитием портовой инфраструктуры, промышленности и плотной застройкой, что отражается на состоянии экосистем прибрежных мангровых зарослей и болотистых участков [79].

Центральная часть страны представляет собой слабовсхолмлённое плато, где высоты колеблются от 100 до 200 м над уровнем моря. Над поверхностью плато поднимаются отдельные останцовые массивы. Рельеф формируется под воздействием эрозионных процессов, которые активно развивались в условиях тропического климата с чётко выраженными сухим и влажным сезонами. Речная сеть здесь хорошо развита: крупнейшие реки — Уэме, Моно, Куффо — принадлежат к бассейну Атлантического океана и впадают в систему прибрежных лагун; к бассейну реки Нигер относятся только реки крайнего севера страны (Алибори, Сота, Мекру) [79].

Северная часть Республики Бенин относится к области докембрийского кристаллического фундамента и перекрывающего его осадочного чехла. В пределах цепи Атакора распространены метаморфизованные породы неопротерозойского возраста — кварциты, сланцы и филлиты, а в осадочном чехле — песчаники, алевролиты и известняки. Здесь же находятся наибольшие высоты страны: цепь Атакора на северо-западе, где отметки достигают 600—

660 м (гора Сокбаро, 658 м, — высшая точка Республики Бенин) [79]. Гидрографическая сеть менее плотная, чем в центральной части, что связано с пониженным уровнем увлажнения. Основные реки — Алибори, Мекру и Сотта — имеют сезонный режим стока и пересыхают в сухой период года [79].

Физико-географическое положение определяет характер использования земель и обуславливает применение геоинформационного анализа и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для выявления границ населённых пунктов, зон затопления, особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и земель добычи полезных ископаемых [19; 110].

Карта-схема Республики Бенин с указанием городов, выбранных для апробации методики, приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 — Карта-схема Республики Бенин с указанием городов, выбранных для апробации методики: Котону (крупный город, департамент Литораль) и Бохикон (средний город, департамент Зу) (картографическая основа — Esri National Geographic World Map)

1.1.2. Население и административно-территориальное деление страны

Сформировавшаяся в колониальный период административно-территориальная структура оказала длительное влияние на современное пространственное устройство страны [20]. В настоящее время страна разделена на 12 департаментов [47], которые, в свою очередь, включают 77 коммун (таблица 1).

Таблица 1 — Административное деление Республики Бенин

№	Название на русском	Название на французском	Административный центр	Число коммун	Площадь, км ²	Население (RGPH4, 2013), чел.	Плотность населения, чел./км ²	Карта
1	Алибори	Alibori	Канди	6	26 242	867 463	33,1	
2	Атакора	Atacora	Натитингу	9	20 499	772 262	37,7	
3	Атлантический	Atlantique	Аллада	8	3 233	1 398 229	432,5	
4	Боргу	Borgou	Параку	8	25 856	1 214 249	47,0	
5	Коллин	Collines	Дасса-Зуме	6	13 931	717 477	51,5	
6	Куффо	Couffo	Аплахуэ	6	2 404	745 328	310,0	
7	Донга	Donga	Джугу	4	11 126	543 130	48,8	
8	Литораль	Littoral	Котону	1	79	679 012	8 595,1	
9	Моно	Mono	Локоса	6	1 605	497 243	309,8	
10	Уэме	Ouémé	Порто-Ново	9	1 281	1 100 404	859,0	
11	Плато	Plateau	Побе	5	3 264	622 372	190,7	
12	Зу	Zou	Абомей	9	5 243	851 580	162,4	

Примечание — численность населения приведена по результатам четвёртой всеобщей переписи населения и жилищного фонда Республики Бенин (RGPH4, май 2013 г.). Подготовка пятой переписи (RGPH5) начата в 2023 г., её результаты

на момент выполнения работы не опубликованы. Использование данных RGPН4 обеспечивает единую дату наблюдения для всех коммун; официальные прогнозные оценки численности населения публикуются Национальным институтом статистики и демографии Республики Бенин (INStaD) только на уровне департаментов [129], поэтому отнесение коммун к категориям классификации (раздел 1.5) подлежит проверке по результатам RGPН5. Административно-территориальное деление страны с указанием объектов исследования и распределение плотности населения по департаментам приведены на рисунке 2.

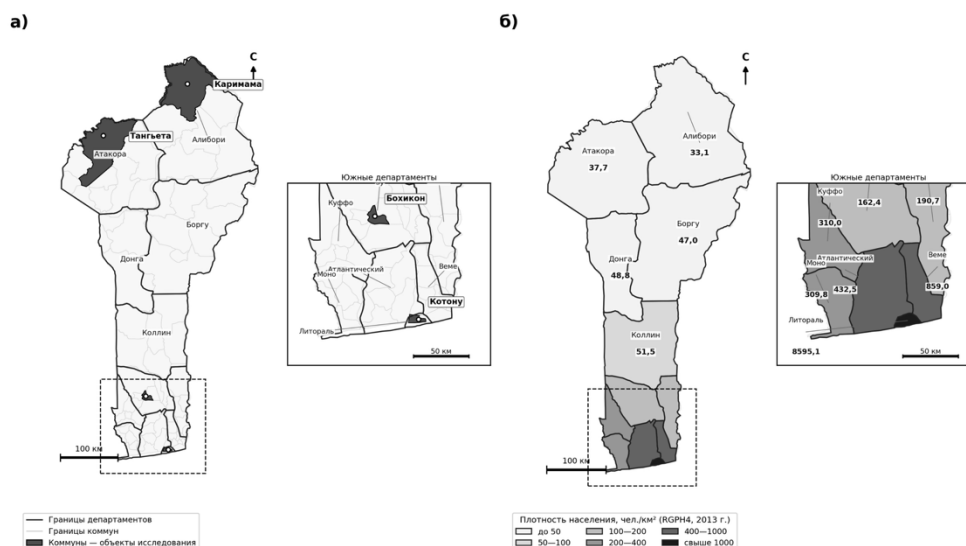


Рисунок 2 — Республика Бенин: а) административно-территориальное деление с указанием объектов исследования; б) плотность населения по департаментам (по данным переписи RGPН4, 2013 г.)

1.1.3. Климатические, гидрографические и почвенно-растительные условия

Разнообразие климатических, гидрографических и почвенно-растительных условий Республики Бенин обусловлено её положением в тропическом поясе и протяжённостью территории с юга на север (раздел 1.1.1). Именно это разнообразие определяет состав природных ограничений землепользования, различный для прибрежных и внутренних районов страны, и делает необходимым учёт природно-климатических факторов при зонировании населённых пунктов.

Климат Республики Бенин относится к переходным тропическим типам с выраженной широтной дифференциацией. В южной части страны, непосредственно у побережья Гвинейского залива, преобладает

субэкваториальный климат с двумя дождевыми сезонами: основным — с апреля по июль и вторичным — с сентября по октябрь. Годовое количество осадков здесь достигает 1300 мм, а средняя температура воздуха составляет около $+27^{\circ}\text{C}$. Высокая влажность и значительное испарение формируют специфический микроклимат прибрежных водоёмов — озера Нокуэ и лагуны Порто-Ново, который влияет не только на экосистемы, но и на условия проживания населения, особенно в условиях сезонных затоплений и береговой абразии [79; 138].

Центральная часть страны находится под влиянием саванного климата, для которого характерен один дождевой сезон (июнь—сентябрь) и продолжительный сухой период. Осадки здесь снижаются до 900—1000 мм в год, а температура воздуха в сухой сезон достигает $+30^{\circ}\text{C}$ при среднегодовом значении около $+27^{\circ}\text{C}$. Резкие суточные колебания температур, особенно в сухой сезон, способствуют активному выветриванию горных пород и развитию процессов почвенной эрозии. Возрастающая антропогенная нагрузка, связанная с расширением сельскохозяйственных угодий и добычей полезных ископаемых, усиливает деградацию ландшафтов, что необходимо учитывать при зонировании и мониторинге состояния земель [79; 138].

Северная часть Республики Бенин относится к зоне суданских саванн; климат тропический континентальный с ярко выраженной сезонностью. Дождевой сезон ограничен несколькими месяцами (июнь—сентябрь), а годовое количество осадков снижается с 1100—1200 мм в предгорьях Атакоры до 800—900 мм в крайних северо-восточных районах, в долине реки Нигер. Температуры в сухой период могут превышать $+35^{\circ}\text{C}$, что создаёт предпосылки для дефляции почв и опустынивания. Среднегодовая температура воздуха изменяется по стране незначительно — от $+27^{\circ}\text{C}$ на юге до $+28^{\circ}\text{C}$ на севере, тогда как амплитуда сезонных и суточных колебаний возрастает к северу. Эти регионы особенно уязвимы к климатическим изменениям и требуют разработки адаптивных механизмов управления земельными ресурсами, учитывающих как природные, так и социально-экономические факторы [79; 138].

Средние многолетние климатические характеристики по данным метеорологических наблюдений приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Климатическая характеристика южной (прибрежной) части Республики Бенин (г. Котону)

Показатель	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сен	Окт	Нояб	Дек	Год
Средний максимум, °С	30,8	31,6	31,9	31,6	31,0	29,2	28,0	27,8	28,4	29,6	30,9	30,8	30,1
Средняя температура, °С	27,3	28,5	28,9	28,6	27,8	26,5	25,8	25,6	26,0	26,7	27,6	27,3	27,2
Средний минимум, °С	23,8	25,4	25,9	25,6	24,6	23,7	23,7	23,4	23,6	23,8	24,3	23,8	24,3
Норма осадков, мм	9	36	73	137	196	356	147	64	99	126	41	19	1303

Примечание — значения относятся к метеорологической станции Котону (индекс ВМО 65344); стандартная климатическая норма этой станции за 1991—2020 гг. опубликована Всемирной метеорологической организацией [138].

Южная прибрежная зона представлена аллювиальными и делювиальными равнинами, пересечёнными лагунами и заболоченными участками; литологический состав пород центральной и северной частей страны рассмотрен в разделе 1.1.1 [79; 135]. Разнообразие литологического состава влияет на гидрогеологические условия, степень устойчивости склонов и возможность возникновения геологических рисков при застройке.

Гидрографическая сеть страны хорошо развита, но отличается выраженной сезонностью стока. Основные реки — Нигер (по северной границе страны), Уэме, Моно и Куффо — играют ключевую роль в обеспечении водными ресурсами и формировании речных пойм, подверженных сезонным затоплениям. Лагуны и озёра, такие как Нокуэ, находятся в связи с морскими водами через узкие проливы и характеризуются переменным солевым режимом. По данным гидрогеологических исследований [79], подземные воды сосредоточены в

аллювиальных отложениях пойм, корях выветривания кристаллических пород и трещиноватых известняках. Загрязнение подземных вод неглубоко залегающих водоносных горизонтов в пределах населённых пунктов, в том числе г. Котону, обуславливает необходимость усиления экологического контроля и регулирования водопользования [79].

Почвенный покров страны также отражает сочетание литологических, климатических и биологических факторов. На приморских плато юга преобладают ферраллитные почвы, известные под местным названием «*terre de barre*», тогда как в лагунно-пойменной полосе развиты гидроморфные и торфяные почвы. Центральные и северные районы заняты тропическими железистыми почвами, отличающимися высоким содержанием оксидов железа, но часто дефицитными по основным питательным элементам; они склонны к эрозии, дефляции и снижению плодородия при интенсивном использовании [135].

Растительность страны характеризуется чёткой широтной зональностью. Юг страны расположен в пределах Дагомейского разрыва (Dahomey Gap), где полоса влажных экваториальных лесов прерывается саваннами; естественная древесная растительность (каучуконосы, махагони, масличные пальмы) сохранилась фрагментарно — в виде священных рощ и охраняемых массивов (Лама, Ниаули), а также галерейных лесов вдоль водотоков. Центральная зона представлена саваннами и вторичными лесами, образующими переходную зону между тропическим лесом и саваннами. Север представлен открытой саванной с кустарниковой растительностью и участками сухих лесов баобабов и акаций. Особое значение имеют особо охраняемые природные территории (ООПТ), такие как национальный парк Пенджари и национальный парк W (Parc National du W) [28; 128]. Таким образом, природные и экологические ограничения землепользования в населённых пунктах страны образуют три группы, рассматриваемые далее в разделах 2.2.1—2.2.3: сезонное затопление, подтопление и береговая абразия (прибрежная зона юга); нарушение земель при разведке и добыче полезных ископаемых; ограничения, связанные с землями особо охраняемых природных территорий.

1.2. Основные термины и определения, используемые в исследовании

В настоящем исследовании используются термины и определения земельного и имущественного законодательства Республики Бенин (Code foncier et domanial) [39]; для понятий градостроительного зонирования, не раскрытых в законодательстве Республики Бенин, приведены определения, принятые в российской практике и используемые в настоящей работе в качестве методического ориентира [8; 26]. Основные термины и их понятия приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Термины и определения, используемые в исследовании

Термин	Определение
Зонирование	регулирование и контроль землепользования при планировании развития территорий и поселений, разделение муниципальной территории на зоны и определение разрешённых видов использования земель [2].
Зонирование с учётом природных и экологических особенностей	выделение функциональных и территориальных зон, выполняемое по единой процедуре и на единой пространственной основе для одновременного решения задач землеустройства, кадастра, мониторинга земель и охраны окружающей среды (определение предложено автором)
Кадастр	система картографических и описательных документов о земельных участках, ведущаяся на национальном или местном уровне и включающая графическую часть и прилагаемые к ней текстовые сведения; предназначена для идентификации, регистрации и описания земель всей национальной территории по коммуна в соответствии с её разделением на земельные участки [39].
Сертификат на землю в сельской местности	акт регистрации и подтверждения прав на землю, установленных или приобретённых в соответствии с местными обычаями и стандартами. Представляет собой выписку из плана сельских земель, удостоверяющую презумпцию приобретённых прав, действующую до тех пор, пока обратное не доказано в судебном порядке.
Градостроительный сертификат	документ с указанием условий, при которых земля может быть застроена.
Частное имущество (domaine privé)	часть имущества государства или территориальных коллективов, правовой режим которой подчиняется материально-правовым нормам частного права, применимым к собственности и управлению ею.
Защищённая земля	территория, находящаяся под охраной публичной власти.

Термин	Определение
Публичное имущество (domaine public)	неотчуждаемая часть имущества государства или территориальных коллективов, на которую распространяются публично-правовой режим и юрисдикция административных судов.
Земельное право	совокупность правил, применимых к собственности и её составным частям, а также к связанным с ней природным ресурсам, когда объектом является земля.
Регистрация	налоговая формальность, состоящая в анализе правового акта или внесении сведений о нём в реестр, влекущая или не влекущая уплату пошлины в пользу государства или местных органов власти и придающая достоверную дату актам, совершённым в простой письменной форме; внесение записи об акте или судебном решении в публичные реестры.
План сельских земель	документ, в котором перечислены сельские земли с регистрацией закреплённых за ними прав, а также их владельцев для удовлетворения индивидуальных и коллективных потребностей в земельной безопасности, планировании и инвестициях.
Сельские земли	вся земля, занятая сельскохозяйственной, пастбищной, лесной и рыболовной деятельностью или предназначенная для того или иного из этих видов деятельности. Сельские земли расположены за пределами городских территорий, районов, подлежащих урбанизации, или районов будущей урбанизации, как это определено в градостроительных документах.
Городские земли	земли, расположенные в городских районах, районах, подлежащих урбанизации, или районах будущей урбанизации, как это определено в документах городского планирования; эти земли выделены или предназначены в основном для жилищного строительства, торговли, промышленности, создания общественных служб и в целом для деятельности, связанной с городской жизнью. Они регулируются специальными нормами о городских землях.
Реестр городских земель	планово-картографические материалы земельных участков и данные соответствующих землевладельцев.
Сертификат о праве собственности на землю	документ, подтверждающий право собственности на землю, выданный после процедуры подтверждения прав на землю или после завершения реализации плана сельских земель.
Межевание	комплекс работ по установлению, восстановлению и закреплению на местности границ земельного участка, определению его местоположения и площади (определение принято по российской практике).
Особо охраняемые природные территории	чётко определённые географические территории, выделенные и управляемые правовыми или иными средствами в целях долгосрочного сохранения природы и культурных ценностей.
Градостроительная деятельность	деятельность государственных органов, органов местного самоуправления, физических и юридических лиц в области градостроительного планирования развития города, определения видов использования земельных участков, проектирования, строительства и реконструкции объектов недвижимости с учётом интересов граждан, общественных и государственных интересов, а также историко-культурных, экологических и природных особенностей города.
Градостроительная	документация о градостроительном планировании развития территорий

Термин	Определение
документация	и поселений и об их застройке.
Градостроительный регламент	совокупность установленных правилами застройки параметров и видов использования земельных участков и иных объектов недвижимости в городских и сельских поселениях, других муниципальных образованиях, а также допустимых изменений объектов недвижимости при осуществлении градостроительной деятельности в пределах каждой зоны.
Сервитут	право ограниченного пользования чужим земельным участком, устанавливаемое для обеспечения прохода, проезда, прокладки и эксплуатации линейных объектов и иных нужд, которые не могут быть обеспечены без такого пользования.
Земельный участок	часть поверхности земли (в том числе почвенный слой), границы которой определены и удостоверены в установленном порядке.
Объекты недвижимости	объекты, в отношении которых осуществляется градостроительная деятельность.
Населённый пункт	населённое место (поселение), первичная единица расселения людей в пределах одного застроенного земельного участка (город, посёлок, село).
Квартал (quartier)	административная единица города, входящая в состав округа (arrondissement) и подразделяемая на фрагменты квартала — участки застройки, ограниченные улицами; в настоящей работе квартал принят единицей кадастрового зонирования.
Наводнение	быстрый подъём воды, затопление и подтопление прилегающей местности.
Затопление	покрытие территории водой в период половодья или паводков.
Подтопление	повышение уровня подземных вод, приводящее к нарушению хозяйственной деятельности на данной территории (ГОСТ 19185-73).
Зона затопления	территория вне постоянных акваторий, выделяемая в настоящей работе операционально по разновременным космическим изображениям в соответствии с критериями, приведёнными ниже.
Береговая абразия	размывание и разрушение берегов океанов, морей, озёр и лагун в результате естественных и техногенных процессов.

Различие между двумя первыми терминами таблицы 3 существенно для настоящей работы. При раздельном выполнении зонирования для каждой задачи — градостроительного регулирования, кадастрового учёта, охраны окружающей среды — границы одних и тех же зон в разных документах могут не совпадать. Под зонированием с учётом природных и экологических особенностей в работе понимается выделение зон по единой процедуре и на единой пространственной

основе, построенной по разновременным космическим изображениям и геодезическим измерениям, так что один и тот же контур зоны используется одновременно во всех этих задачах (раздел 3.1, рисунок 39). «Зона затопления» понимается далее операционально: участки вне постоянных акваторий, выделенные по изображениям сухого сезона при значении модифицированного нормализованного разностного водного индекса $MNDWI > 0,30$ (раздел 2.5.2), — нижняя оценка зоны затопления, а не зона, определяемая по уровню воды расчётной обеспеченности.

1.3. Нормативно-правовое обеспечение кадастрового учёта и зонирования населённых пунктов Республики Бенин

Современное законодательство Республики Бенин в области землепользования и градостроительства сформировано на основе ряда ключевых правовых актов, среди которых выделяются: Земельный и имущественный кодекс Республики Бенин («Code foncier et domanial»), введённый законом № 2013-01 от 14 августа 2013 г., которым учреждено Национальное агентство государственного имущества и земельных ресурсов (ANDF — Agence Nationale du Domaine et du Foncier); а также закон № 2016-06 от 26 мая 2016 г. «Об основах территориального планирования» [36; 47; 48; 67; 89; 93].

В соответствии с положениями Земельного и имущественного кодекса все земельные отношения в стране регулируются на основе принципов публичности, легитимности и устойчивости использования ресурсов. Кадастровый учёт и зонирование рассматриваются как обязательные этапы формирования правового режима земельных участков, особенно в пределах населённых пунктов, где существует повышенная концентрация объектов недвижимости и потенциальных экологических рисков [39]. Закон № 2013-01 закрепил за ANDF функцию центрального органа, ответственного за ведение единой государственной системы кадастра [67].

Особое значение имеет закон № 2016-06, который вводит понятие регламента территориального развития (*règlement d'aménagement*) на уровне схемы коммуны и обязывает органы местного самоуправления разрабатывать генеральные схемы обустройства коммун (*schéma directeur d'aménagement communal*, SDAC; в тексте закона — *schémas directeurs d'aménagement des territoires décentralisés*, ст. 41) с обязательным учётом природно-климатических условий и экологических ограничений [48], но не устанавливает градостроительного регламента для каждой территориальной зоны (раздел 3.7).

Кроме того, процессы зонирования обеспечиваются подзаконными актами и методическими документами: межведомственным приказом о минимальных требованиях к операциям по разбивке территории [46], декретом о порядке выдачи разрешений на строительство [43] и руководствами по разработке SDAC [103; 104].

Нормативно-правовая система Республики Бенин также предусматривает необходимость согласования проектов зонирования с другими отраслями права, такими как экологическое, водное и горное законодательство.

На местном уровне градостроительное регулирование осуществляется генеральными схемами обустройства коммун (SDAC) и планами разбивки территории (*plans de lotissement*), которые разрабатываются на уровне коммун и утверждаются местными советами. Закон № 2024-27 от 28 июня 2024 г. «О градостроительстве в Республике Бенин» [38] ввёл генеральный план городского развития (*plan directeur d'urbanisme*, PDU), который определяет назначение земель и правила их использования по зонам и включает градостроительный регламент (*règlement d'urbanisme*) (ст. 101, 103, 106). Закон относит к незастраиваемым, кроме случаев специальных предписаний, земли, подверженные природным рискам, в том числе затоплению и эрозии (ст. 44), и предусматривает их отображение в графических материалах PDU (ст. 105). Вместе с тем перечень основных видов территориальных зон общего применения законом не установлен; коммуна с особым статусом предоставлен срок до пяти лет для утверждения PDU (ст. 168). Национальный градостроительный регламент, утверждённый

декретом № 2024-1034 [42], устанавливает общие правила размещения, плотности и высоты застройки, но не содержит перечня видов территориальных зон и режимов использования земель в зонах затопления. Для прибрежной полосы декретом № 2024-1051 [52] утверждён отраслевой градостроительный регламент с перечнем зон (жилые прибрежные, природоохранные, туристические, промышленные) и запретом застройки земель, подверженных риску затопления; в г. Котону он охватывает лишь приморскую полосу округов 1, 4, 5 и 12, тогда как побережье озера Нокуэ и основная часть берегов лагуны в его границы не входят.

Нерешённой остаётся задача оформления прав на земельные участки, находящиеся в традиционном владении без надлежащих документов [86; 120]. Поправками к Земельному и имущественному кодексу, внесёнными законом № 2017-15, включено положение о возможности легализации таких участков через коллективную процедуру подтверждения прав на землю, в том числе прав, основанных на обычае [36]; реализация этих норм требует дополнительного правового регулирования и усиления контроля со стороны государственных органов. Действующие нормативные акты, предмет их регулирования, выявленные пробелы и предлагаемые способы их восполнения сведены в таблице 4.

Таблица 4 — Нормативно-правовое обеспечение зонирования населённых пунктов Республики Бенин: предмет регулирования, выявленные пробелы и предлагаемые способы их восполнения

Нормативный акт, уровень регулирования	Предмет регулирования	Пробел, выявленный в настоящем исследовании	Предлагаемое восполнение (раздел работы)
Земельный и имущественный кодекс («Code foncier et domaniale»), закон № 2013-01 от 14 августа 2013 г. с изменениями, внесёнными законом № 2017-15 — национальный уровень	Земельные отношения, регистрация прав и кадастровый учёт; учреждение ANDF как центрального органа ведения единой государственной системы кадастра; соблюдение режима	Не устанавливает числовых допусков на среднюю квадратическую погрешность положения характерных точек границ земельных участков	В качестве нормативного ориентира принят приказ Росреестра от 23 октября 2020 г. № П/0393; обоснована необходимость установления аналогичных допусков национальным нормативом (раздел

Нормативный акт, уровень регулирования	Предмет регулирования	Пробел, выявленный в настоящем исследовании	Предлагаемое восполнение (раздел работы)
	водоохранных зон и использование земель вблизи ООПТ		2.4)
Закон № 2016-06 от 26 мая 2016 г. «Об основах территориального планирования» (Loi-cadre sur l'aménagement du territoire) — национальный уровень	Вводит регламент территориального развития (règlement d'aménagement) на уровне схемы коммуны; обязывает органы местного самоуправления разрабатывать генеральные схемы обустройства коммун (SDAC) с учётом природно-климатических условий и экологических ограничений	Не устанавливает градостроительного регламента для каждой территориальной зоны; нормативно закреплённый перечень основных видов территориальных зон общего применения в законодательстве отсутствует (перечень зон установлен только для прибрежной полосы декретом № 2024-1051 [52])	Состав восьми функциональных зон и градостроительный регламент территориальной зоны, принятые по аналогии с частью 1 статьи 35 Градостроительного кодекса Российской Федерации (разделы 1.5 и 3.7, приложение А)
Генеральные схемы обустройства коммун (Schéma directeur d'aménagement communal) и планы разбивки территории (plans de lotissement) — местный уровень	Градостроительное регулирование на уровне коммуны; разрабатываются коммунами и утверждаются местными советами	Закон № 2024-27 [38] предусматривает PDU с градостроительным регламентом; утверждённые правила землепользования имеются не во всех коммунах; типовой регламент руководства по разработке SDAC [103] запрещает застройку понижений и заболоченных земель (ст. 49), но не устанавливает ширины водоохранных зон и дифференцированных режимов использования земель в зависимости от степени риска затопления	Рекомендации по составу правил землепользования и застройки и по режимам использования земель в границах зон затопления и буферных зон (разделы 3.6 и 3.7)
Действующий порядок установления и утверждения границ населённых пунктов — уровень правоприменительной практики	Подготовка исходных материалов, полевые измерения, юридическая экспертиза и регистрация результатов	Природные ограничения не входят в состав обязательных исходных данных; отсутствует формализованное основание для отказа в	Введение этапа учёта природных ограничений, формального основания для отклонения проекта и требования

Нормативный акт, уровень регулирования	Предмет регулирования	Пробел, выявленный в настоящем исследовании	Предлагаемое восполнение (раздел работы)
	межевания	утверждении границы, проходящей по ежегодно затапливаемой территории; периодическая верификация утверждённых границ с учётом изменения береговой линии в рассмотренных положениях нормативных актов не предусмотрена	периодической верификации границ (раздел 1.7.1)
Кадастровая база данных ANDF — ведомственный уровень	Состав сведений о земельном участке: правовые, геометрические и фискальные характеристики, сведения об объектах инфраструктуры [67]	В составе сведений, описанном ANDF, не предусмотрены природно-экологические характеристики, что не позволяет установить факт расположения земельного участка в границах зоны затопления или буферной зоны	Структура геоинформационной базы данных, дополненная разделами общей характеристики населённого пункта и природно-экологических характеристик (раздел 3.3, приложение Б)
Общий налоговый кодекс Республики Бенин [85], статья 158 — национальный уровень	Налогообложение незастроенных земель по административной оценке, которая определяется муниципальными советами исходя из рыночной стоимости и может пересматриваться каждые пять лет	Кадастровая стоимость по результатам государственной кадастровой оценки не устанавливается и в кадастре ANDF не учитывается; административная оценка земель имеет фискальное назначение	Оценка предотвращаемого ущерба по опубликованным данным о фактическом ущербе от наводнений и о стоимости инженерных мероприятий по защите территории (раздел 3.8)

Интеграция пространственных данных в государственную систему управления землями является одной из задач программы цифровизации администрации, реализуемой правительством Республики Бенин [67; 116].

Таким образом, нормативно-правовая база Республики Бенин в сфере кадастрового учёта и зонирования населённых пунктов представлена многоуровневой системой актов — от Земельного и имущественного кодекса и

рамочного закона о территориальном планировании до генеральных схем обустройства коммун.

1.4. Состояние изученности проблемы и международный опыт зонирования населённых пунктов

Состояние изученности проблемы. Методической основой применения данных дистанционного зондирования для мониторинга земель застраиваемых территорий служат работы В. А. Малинникова [33], В. В. Беленко [3] и А. П. Сизова [58—60], геоэкологические и ландшафтные основы оценки территорий — работы В. В. Браткова [5] и В. А. Николаева [35], геоинформационные основы — работы А. В. Кошкарёва [30], а также руководства по тематическому дешифрированию космических изображений [55; 63]; правовые основы землеустройства и кадастра изложены в [27]. Градостроительное зонирование как основа информационного обеспечения кадастровых работ на землях населённых пунктов рассмотрено в работе [9], установление границ зон затопления, подтопления и иных зон с особыми условиями использования территорий — в работах [23; 64]; эти работы опираются на нормативно установленные границы зон ограничений, которые в Республике Бенин отсутствуют (таблица 4). Применительно к Республике Бенин Б. У. Э. Банколе [2] разработал структуру автоматизированной информационной системы государственного земельного кадастра с учётом экологических особенностей страны, однако задачи зонирования населённых пунктов и выделения зон природных ограничений по космическим изображениям в этой работе не ставились. Динамика градостроительного планирования г. Котону исследована Ж. Э. Гнеле [101], формирование городского двуединства Порто-Ново — Котону — Б. Д. Н'Бессой [122], пространственная организация Западной Африки — Дж. О. Иге [108], взаимосвязь градостроительного планирования и управления наводнениями в г. Котону — Т. Б. Данвиде [90]; земельно-правовые преобразования рассмотрены в работах [70; 86; 114; 116]. Картографирование

риска наводнений в агломерации Большого Нокуэ и в коммуне Абомей-Калави выполнено средствами ГИС и многокритериального анализа [105; 106], на национальном уровне — в рамках проекта Программы развития ООН (ПРООН) [112], гидрологическое моделирование водосборов и озера Нокуэ — в [68; 142], оценка береговой абразии побережья г. Котону — в [88; 91; 125]. Общим для этих работ является то, что полученные карты риска не связываются с функциональным зонированием, кадастровым учётом земельных участков и установлением режима использования земель и остаются самостоятельным результатом, не входящим в состав документов территориального планирования. Зарубежные методы картографирования городской структуры по данным ДЗЗ [77; 80; 117; 143] разработаны для иных природных условий и не учитывают сезонного затопления и неформальной застройки, характерных для прибрежных городов Республики Бенин. В российской практике контур зоны затопления определяется по уровню воды заданной обеспеченности и относится к зонам с особыми условиями использования территорий (статья 105 Земельного кодекса РФ [26]), тогда как в Республике Бенин нормативно установленные границы зон затопления отсутствуют (таблица 4) и основным повсеместно доступным источником их контуров являются разновременные космические изображения. Таким образом, нерешённой остаётся задача разработки единой процедуры, в которой природные и экологические ограничения, выделенные по разновременным космическим изображениям, служат основой одновременно для функционального зонирования, кадастрового учёта и мониторинга земель населённых пунктов; её решению посвящена настоящая работа.

Для формирования методики проанализированы системы зонирования, применяемые в Соединённых Штатах Америки (США), Франции, Англии и России — странах, где вопросы территориального планирования и управления земельными ресурсами имеют устойчивую правовую и технологическую основу [134; 137].

В США система зонирования базируется на принципе децентрализованного управления, где нормативно-правовая база разрабатывается на уровне штатов и

муниципалитетов. Основным инструментом является локальный градостроительный регламент (Zoning Ordinance), который определяет допустимые виды использования земель, плотность застройки, коэффициенты использования территории (Floor Area Ratio, FAR) и параметры инфраструктуры [132]. В структуре функционального зонирования выделяются следующие категории: жилая (residential), коммерческая (commercial), промышленная (industrial), смешанная (mixed-use), а также специальные зоны (например, охраняемые природные территории и исторические районы).

Во Франции применяется система местных градостроительных планов (Plan Local d'Urbanisme, PLU), которая заменила ранее действовавшие планы землепользования (Plans d'Occupation des Sols, POS). PLU содержит детализированные правила землепользования, включая ограничения по высоте зданий, площадь застройки, расстояния до красных линий и режимы использования особо охраняемых участков. Кроме того, во французском законодательстве закреплена необходимость разработки схем территориальной согласованности (Schémas de Cohérence Territoriale, SCoT) — межмуниципальных документов стратегического планирования, обеспечивающих согласованность зонирования на региональном уровне. Это особенно важно для городских агломераций, где требуется учёт не только социальных, но и геоэкологических факторов, таких как уровень подземных вод, наличие оползнеопасных склонов и степень загрязнения почв [6; 18].

Английская система территориального планирования принципиально отличается от зонирования: она построена на дискреционном разрешительном порядке (development control), при котором решение о застройке принимается по каждой заявке индивидуально с учётом местного плана (Local Plan) и Национальной концепции политики планирования (National Planning Policy Framework, NPPF, 2012 г. с последующими редакциями). Местный план не имеет силы карты зонирования прямого действия, а определяет политику развития территории и содержит перечень площадок, предназначенных под жилую, торговую, производственную и рекреационную застройку. Отличительной чертой

английского подхода является обязательное проведение оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) перед утверждением любого крупного градостроительного проекта [121]. Тем самым до утверждения крупных проектов оценивается их возможное воздействие на окружающую среду, в том числе на риск наводнений и береговой абразии.

Российская практика зонирования основана на положениях Градостроительного кодекса РФ [8]; правила землепользования и застройки (ПЗЗ) разрабатываются для каждого муниципального образования в соответствии со статьями 30—33 Градостроительного кодекса РФ, а состав территориальных зон установлен статьёй 35 того же кодекса. Согласно части 1 статьи 35 Градостроительного кодекса РФ, в результате градостроительного зонирования могут определяться жилые, общественно-деловые, производственные зоны, зоны инженерной и транспортной инфраструктур, зоны сельскохозяйственного использования, зоны рекреационного назначения, зоны особо охраняемых территорий, зоны специального назначения, зоны размещения военных объектов и иные виды территориальных зон; водоохранные и санитарно-защитные зоны относятся к зонам с особыми условиями использования территорий и устанавливаются самостоятельно [8; 26]. Градостроительным кодексом РФ закреплено понятие «градостроительный регламент», детализирующее параметры использования земель и строительства, включая минимальные размеры участков, требования к благоустройству и экологическим нормам.

Российская система принята в работе в качестве основного источника методических аналогий, несмотря на историческое влияние французской системы на градостроительное право Республики Бенин. Выбор обусловлен не её прямым переносом на условия Бенина, а наличием в ней двух инструментов, отсутствующих в законодательстве Республики Бенин (таблица 4), — перечня функциональных видов территориальных зон общего применения и внесения сведений о зонах с особыми условиями использования территорий в Единый государственный реестр недвижимости, — а также опытом нормативного регулирования использования земель в границах территориальных зон

посредством градостроительных регламентов; аналогичный инструмент (*règlement d'urbanisme*) введён в Республике Бенин законом № 2024-27 [38]. Французский опыт рассматривается как дополнительный источник аналогий, в частности в области градостроительного планирования и учёта риска наводнений; зарубежные подходы используются избирательно, с учётом их применимости к условиям Республики Бенин.

На основе анализа вышеуказанных моделей можно выделить ряд ключевых элементов, которые представляют интерес для применения в Республике Бенин: обязательная интеграция экологических факторов в процесс зонирования, включая учёт рисков затопления, береговой абразии, эрозии почв и наличия особо охраняемых природных объектов; наличие многоуровневой системы планирования, включающей как муниципальные правила землепользования, так и региональные стратегии пространственного развития; применение геоинформационных технологий (ГИС) и спутниковых данных для автоматизации процессов анализа и мониторинга состояния застроенных территорий; обязательная публичная экспертиза и общественные слушания при утверждении проектов зонирования; единые стандарты оформления кадастровых данных, обеспечивающие достоверность и актуальность информации о границах функциональных зон и их использовании.

Отдельного внимания заслуживает то, как в рассмотренных странах решается задача совместного использования одних и тех же пространственных данных разными ведомствами. Понятие комплексного кадастра (*multipurpose cadastre*) было сформулировано Национальным исследовательским советом США в докладах 1980 и 1983 гг. [124; 127]: единая кадастровая основа, привязанная к государственной геодезической сети, служит одновременно для регистрации прав, налогообложения, планирования землепользования и охраны окружающей среды, а тематические сведения присоединяются к ней в виде слоёв. Та же идея положена в основу концепции «Кадастр 2014», предложенной Международной федерацией геодезистов [111], где кадастр рассматривается как отражение полной правовой ситуации на землю, включая публичные права и ограничения. В

Европейском союзе этот принцип закреплён директивой INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community) [92], обязывающей государства-члены обеспечить совместимость и совместное использование пространственных данных органами власти всех уровней; аналогичные национальные инфраструктуры пространственных данных создаются и в развивающихся странах [130].

Практическое выражение принцип получает в национальных системах. Во Франции план предупреждения рисков наводнений (Plan de prévention des risques d'inondation) после утверждения приобретает силу сервитута общественной пользы и прилагается к PLU, так что один и тот же контур зоны затопления действует одновременно в градостроительном регламенте и в режиме использования земельных участков. В Англии зоны затопления, публикуемые Агентством по окружающей среде (Flood Zones 2 и 3), используются местными органами планирования при применении последовательного теста, предусмотренного NPPF [121]. В России сведения о зонах с особыми условиями использования территорий (глава XIX Земельного кодекса Российской Федерации [26]) вносятся в Единый государственный реестр недвижимости и с этого момента учитываются и при кадастровом учёте, и при градостроительном зонировании.

Для Республики Бенин это означает, что зонирование населённых пунктов целесообразно строить не как отдельную градостроительную процедуру, а как единую пространственную основу, пригодную одновременно для землеустройства, кадастрового учёта, мониторинга земель и охраны окружающей среды. Такой подход положен в основу методики зонирования, разрабатываемой в главе 3.

Таким образом, эффективная система зонирования должна сочетать нормативно-правовое регулирование, современные технологии сбора и анализа данных и учёт природно-экологических особенностей территории; для Республики Бенин, прибрежные населённые пункты которой подвержены сезонным наводнениям и береговой абразии (раздел 2.2.1), особенно важны адаптивные модели зонирования [6; 12; 48; 69; 73].

1.5. Классификация населённых пунктов Республики Бенин и функциональных зон их земель

В рамках настоящего исследования разработана классификация населённых пунктов Республики Бенин по численности населения, предложенная автором для условий страны, где ни один населённый пункт не достигает 1 млн жителей, а сеть расселения образована преимущественно средними и малыми городами. Границы интервалов приняты с учётом фактического распределения численности населения коммун по данным переписи RGPH4 и сопоставимы с градацией СП 42.13330.2016 (пункт 4.4) [61], однако состав и наименования категорий приняты применительно к условиям Республики Бенин: категория крупнейших городов (свыше 1 млн чел.) не выделяется, интервалу свыше 100 до 250 тыс. чел. соответствуют средние города, интервалу свыше 50 до 100 тыс. чел. — малые города, а населённые пункты с численностью 50 тыс. чел. и менее отнесены к посёлкам. Единицей классификации принята коммуна, поскольку в соответствии с законом № 2016-06 именно на уровне коммуны разрабатываются документы территориального планирования (раздел 1.3), для которых предназначена методика зонирования; категория присваивается коммуне в целом (с населением её сельских округов), а приведённые ниже характеристики застройки и инфраструктуры относятся к её главному населённому пункту. Населённые пункты подразделяются на следующие категории:

1. Крупные города — численность населения свыше 250 тыс. до 1 млн человек включительно. Характеризуются многофункциональной структурой застройки.

2. Средние города — численность населения свыше 100 тыс. до 250 тыс. человек включительно. Имеют выраженные центральные и периферийные зоны.

3. Малые города — население свыше 50 тыс. до 100 тыс. человек включительно. Отличаются ограниченным количеством функциональных зон.

4. Посёлки — население 50 тыс. человек и менее. Преобладают одноэтажная застройка и аграрный сектор, характерен дефицит коммунальной инфраструктуры [4; 104].

Применение разработанной классификации ко всем 77 коммунам Республики Бенин показало следующее распределение коммун по категориям: 5 крупных городов, 42 средних города, 27 малых городов и 3 посёлка (по данным переписи RGPН4, май 2013 г.); к крупным городам отнесены коммуны Котону, Абомей-Калави, Джугу, Порто-Ново и Параку, к посёлкам — коммуны Тукунтуна, Агеге и Бону, остальные коммуны распределены между средними и малыми городами. Численность населения коммун составляет от 39,8 до 679,0 тыс. человек (медиана 111 тыс., у половины коммун — 80—133 тыс.). Граница 100 тыс. — классификационное решение автора, согласующееся с этим распределением: она близка к медиане и делит основную группу коммун на средние и малые города; граница 250 тыс. выделяет пять коммун, превышающих медиану в 2,3—6,1 раза. Поскольку численность коммуны включает её сельское население, категория характеризует коммуну как единицу территориального планирования и может превышать категорию её главного населённого пункта (например, коммуна Джугу); для коммуны Котону, полностью занятой городом, такое расхождение отсутствует.

Город Котону, экономическая столица и крупнейший город Республики Бенин, относится согласно данной классификации к категории крупных городов. По данным переписи RGPН4 (2013 г.), численность населения департамента Литораль, полностью занятого городом Котону, составляет 679 012 человек, агломерация Большого Нокуэ, объединяющая коммуны Котону, Абомей-Калави, Семе-Поджи, Порто-Ново и Уида, насчитывала около 2,0 млн жителей (сумма по пяти коммуна́м), что обуславливает необходимость комплексного подхода к планированию и зонированию их территории.

Пространственная структура Котону относится к расчленённому типу городской застройки, обусловленному наличием естественного гидрографического препятствия — лагуны Котону, соединяющей озеро Нокуэ с

Атлантическим океаном. Лагуна делит город на две части: западную, более старую и плотно застроенную, и восточную, где развивается новая жилая и коммерческая инфраструктура.

Разработанная классификация земель населённых пунктов по функциональному назначению и природно-экологическим ограничениям включает восемь функциональных зон (состав объектов и устанавливаемые ограничения — в приложении А, таблица А.1); применительно к г. Котону они включают: селитебная зона — жилая застройка, включающая как районы регулярной (плановой) планировки, так и стихийно застроенные территории (неформальные поселения), характеризующиеся хаотичной застройкой и недостаточной инфраструктурой; общественно-деловая зона — объекты образования, здравоохранения, культуры и социального обслуживания, торговые и административные учреждения, религиозные объекты; производственная зона — промышленные предприятия, складские комплексы, терминалы порта Котону, который является одним из ключевых транспортных узлов Западной Африки; зона инженерной и транспортной инфраструктуры — магистральные улицы, железнодорожные линии, автомобильные дороги международного значения, объекты портовой и инженерной инфраструктуры; сельскохозяйственная зона — сельскохозяйственные угодья в границах города и территории временного хранения сельскохозяйственной продукции; ландшафтно-рекреационная зона — парки, береговые полосы, пляжи, а также особо охраняемые природные объекты, такие как акватории озера Нокуэ; охранный зона — водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы, охранные зоны ООПТ, санитарно-защитные зоны, зоны регулируемой застройки и архитектурных памятников; зона специального назначения — территории добычи песка и других местных строительных материалов, объекты размещения отходов потребления, кладбища и иные объекты специального назначения [16; 104]. Природно-экологические ограничения учтены в классификации двояко: выделением охранный зоны и установлением для остальных зон ограничений, дифференцированных по категории риска затопления (раздел 2.2.1, приложение А). Категория населённого пункта определяет

минимальный состав функциональных зон схемы зонирования; охранный зона выделяется в населённых пунктах всех категорий при наличии объектов, для которых устанавливаются буферные зоны, санитарно-защитные зоны или зоны регулируемой застройки (приложение А).

Контуры природных ограничений — водных объектов, зон затопления и заболоченных территорий, а также фактически застроенной территории — выделяются по данным дистанционного зондирования (Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI) методами ГИС-анализа; границы функциональных зон устанавливаются по кадастровым материалам ANDF и видам разрешённого использования земель в границах кварталов с наложением на них выделенных контуров. Методика выделения контуров и оценка её точности приведены в разделах 2.5.2 и 2.5.3, результаты кадастрового зонирования кварталов г. Котону — в разделе 2.2.1.

Северные районы Котону, примыкающие к озеру Нокуэ, испытывают регулярное подтопление во время дождевого сезона. Это связано как с природными факторами (низменный рельеф, высокий уровень грунтовых вод), так и с антропогенными процессами (неупорядоченная застройка, уничтожение природных буферных зон). Для минимизации рисков в работе принята буферная зона шириной 200 м вдоль береговой линии озера Нокуэ в черте г. Котону с учётом установленной статьёй 77 закона № 2018-10 о прибрежной зоне [49] 200-метровой охранный полосы естественных участков берегов (обоснование — раздел 2.3, таблица 8); в границах этой зоны запрещается возведение капитальных строений и проводится рекультивация нарушенных земель [18].

Особенности использования земель в зоне добычи песка и других строительных материалов рассмотрены в разделе 2.2.2. Такие участки располагаются в пределах городской черты и характеризуются деградацией почвенного покрова и снижением устойчивости склонов; предложены меры по их восстановлению методами рекультивации и создания искусственных водоёмов для рекреационных целей [78; 126].

Результаты зонирования легли в основу проекта карты-схемы города Котону (раздел 2.1); зонирование одного из кварталов г. Котону, приведённое в качестве примера с детализацией всех функциональных зон, выполнено в программе AutoCAD Map 3D (рисунки 14, 15); кадастровым зонированием охвачены 84 квартала города (раздел 2.2.1, таблица 7).

Виды разрешённого использования земельного участка и их описания, принятые за основу по Классификатору видов разрешённого использования земельных участков [53], приведены в таблице 5.

Таблица 5 — Виды разрешённого использования земельного участка и их описания (по Классификатору видов разрешённого использования земельных участков Российской Федерации, принятому автором за основу для формирования перечня видов разрешённого использования земель населённых пунктов Республики Бенин)

Наименование вида разрешённого использования земельного участка	Описание вида разрешённого использования земельного участка
Сельскохозяйственное использование	Ведение сельского хозяйства, размещение зданий и сооружений, используемых для хранения и переработки сельскохозяйственной продукции.
Жилая застройка	Размещение зданий, предназначенных для постоянного проживания, включая районы регулярной планировки и стихийно застроенные территории (неформальные поселения); не включает гостиницы, объекты лечения и социального обслуживания с проживанием и служебное жильё на производственных объектах.
Здравоохранение	Размещение объектов оказания медицинской помощи (больницы, поликлиники, центры здоровья, родильные дома).
Образование и просвещение	Размещение объектов воспитания и образования (детские сады, школы, лицеи, колледжи, профессиональные училища, университеты).
Культурное развитие	Размещение музеев, выставочных залов, домов культуры, библиотек, кинотеатров и площадок для празднеств.

Наименование вида разрешённого использования земельного участка	Описание вида разрешённого использования земельного участка
Религиозные учреждения	Размещение объектов для проведения религиозных обрядов (церкви, мечети, молельные дома) и связанных с ними образовательных и благотворительных учреждений.
Общественное управление	Размещение органов государственной власти, органов местного самоуправления коммун, судов и обеспечивающих их деятельность организаций, а также общественных объединений.
Деловое управление	Размещение органов управления производством, торговлей, банковской и страховой деятельностью, не связанных с государственным или муниципальным управлением.
Рынки	Размещение объектов постоянной или временной торговли (рынки, ярмарки).
Общественное питание	Размещение объектов платного общественного питания (рестораны, кафе, столовые).
Гостиничное обслуживание	Размещение гостиниц и иных зданий для временного проживания.
Отдых (рекреация)	Устройство мест для прогулок, отдыха, наблюдения за природой, пикников и рыбалки.
Спорт	Размещение спортивных клубов, залов, бассейнов, площадок и полей для спортивных игр.
Энергетика	Размещение тепловых и иных электростанций, гидротехнических и обслуживающих сооружений электроэнергетики.

Наименование вида разрешённого использования земельного участка	Описание вида разрешённого использования земельного участка
Транспортная инфраструктура	Обслуживание автотранспорта (гаражи, автозаправочные станции, мойки, ремонтные мастерские); наземный транспорт (автомобильные дороги, объекты обслуживания движения и пассажиров, стоянки и депо); воздушный транспорт (аэродромы, аэропорты и обеспечивающие их объекты).
Водные объекты (океан, озеро, лагуна)	Ручьи, реки, озёра, болота, океаны и другие водные объекты.

Примечание — описания приведены в сокращённом виде применительно к условиям Республики Бенин; объекты, не характерные для населённых пунктов страны (объекты ядерной энергетики, режимные учреждения), из описаний исключены.

1.6. Модель функционального зонирования населённых пунктов Республики Бенин

1.6.1. Проекты зонирования населённых пунктов Республики Бенин и их основные задачи

В рамках разработки проектов зонирования выделены следующие ключевые задачи:

1. Разграничение функциональных зон — разделение территории в соответствии с классификацией раздела 1.5 на восемь функциональных зон, от селитебной до зоны специального назначения, включающей участки добычи полезных ископаемых. Такое деление позволяет определить режим использования земель, установить ограничения и пределы допустимой антропогенной нагрузки, а также минимизировать конфликты землепользования между различными категориями пользователей [16; 20].

2. Учёт природно-климатических особенностей — анализ рельефа, гидрогеологических условий, почвенного покрова и климатических характеристик региона. Например, города юга страны, такие как Котону и Порто-Ново, подвержены сезонным наводнениям, что требует установления

водоохранных зон дифференцированной ширины — от 50 м для водных объектов вне зоны интенсивной застройки до 200 м для озера Нокуэ и лагуны Котону (обоснование — раздел 2.3, таблица 8). Центральные и северные районы характеризуются сухими саваннами и высокой степенью эрозии почв, что обуславливает необходимость ограничений на расширение сельскохозяйственных угодий и строительство вблизи склонов [2; 18].

3. Выявление зон природного риска — в условиях изменения климата и усиления экстремальных погодных явлений (затопления, береговая абразия, оползни) необходимо выявлять участки повышенного риска и прогнозировать динамику опасных процессов. В настоящей работе такие участки выявляются по разновременным космическим изображениям средствами ГИС-анализа (глава 2) и исключаются из состава функциональных зон, предназначенных для постоянного проживания или капитального строительства; привлечение цифровых моделей рельефа рассматривается как направление уточнения границ этих участков (раздел 3.6).

4. Интеграция пространственных данных в единую систему государственного управления — эффективное зонирование невозможно без формирования единой геоинформационной базы данных, объединяющей данные о границах населённых пунктов, параметрах землепользования, состоянии окружающей среды и результатах мониторинга природных процессов. Структура такой базы, разрабатываемая в разделе 3.3, включает три раздела: общая характеристика населённых пунктов, кадастровые данные и природно-экологические характеристики территории, что обеспечивает комплексный подход к управлению земельными ресурсами [10; 104].

5. Установление буферных зон вокруг водных объектов и ООПТ. В рамках проектов зонирования предусматривается создание буферных зон шириной от 50 до 200 м вокруг озёр и рек и 500 м вокруг ООПТ национального значения, где запрещено возведение капитальных строений и проводится рекультивация нарушенных земель [18].

Разработка схем зонирования территорий населённых пунктов Республики Бенин должна осуществляться с учётом сложившейся застройки, транспортной и инженерной инфраструктуры и основных элементов планировочной структуры каждого населённого пункта и обеспечивать их развитие на основе рационального природопользования и ресурсосбережения (рисунок 3).



Рисунок 3 — Основные положения схемы зонирования территорий населённых пунктов [16]

1.6.2. Зонирование территории г. Котону как объекта апробации методики

Зонирование территории г. Котону рассмотрено с детализацией до уровня квартала. Карта-схема города приведена на рисунке 4 [16; 104]. Административно-территориальное деление города, включающее 13 округов (arrondissements), и его положение между озером Нокую и побережьем Атлантического океана приведены на рисунке 5.



Рисунок 4 — Карта-схема города Котону (картографическая основа — OpenStreetMap) [16]

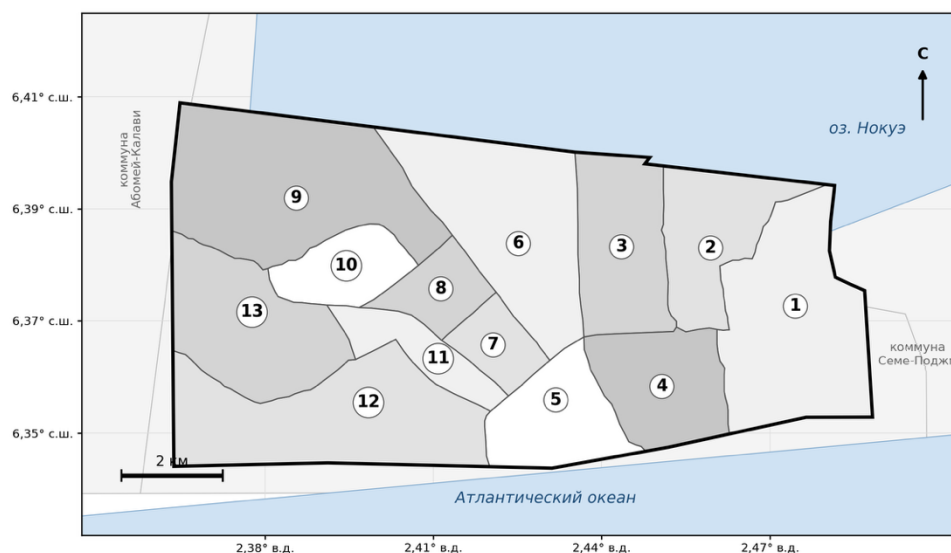


Рисунок 5 — Административно-территориальное деление города Котону: 13 округов (arrondissements), озеро Нокуэ и побережье Атлантического океана

Город Котону выбран для проверки предложенной модели как населённый пункт, в границах которого одновременно представлены все восемь выделенных функциональных зон и все три группы природно-экологических ограничений (раздел 1.1.3): сезонное затопление, подтопление и береговая абразия; нарушение земель при добыче строительных материалов в черте города; земли ООПТ — водно-болотные угодья международного значения (Рамсарский участок № 1018, включающий озеро Нокуэ). По результатам кадастрового зонирования кварталов г. Котону (раздел 2.2.1, таблица 7) селитебная зона занимает около четырёх пятых их площади, тогда как на все остальные виды разрешённого использования приходится около одной пятой. Такое соотношение отражает преимущественно жилой характер застройки города; расположение жилой застройки в зонах затопления, примыкающих к кварталам со стороны океана (раздел 2.2.1, таблица 7), показывает, что природные ограничения затрагивают прежде всего её, чем и определяется специфика модели зонирования Котону по отношению к общей модели (рисунок 6).

Контурные застроенных территорий, водных объектов и заболоченных участков выделяются контролируемой классификацией разновременных снимков Landsat, зоны затопления — по маске модифицированного водного индекса;

границы функциональных зон устанавливаются по кадастровым материалам ANDF с учётом этих контуров (разделы 2.2.1, 2.5.2 и 2.5.3).

Таким образом, определён возможный состав функциональных зон в населённых пунктах Республики Бенин (рисунок 6). При этом общий состав зон дополняется особенностями каждого конкретного населённого пункта.

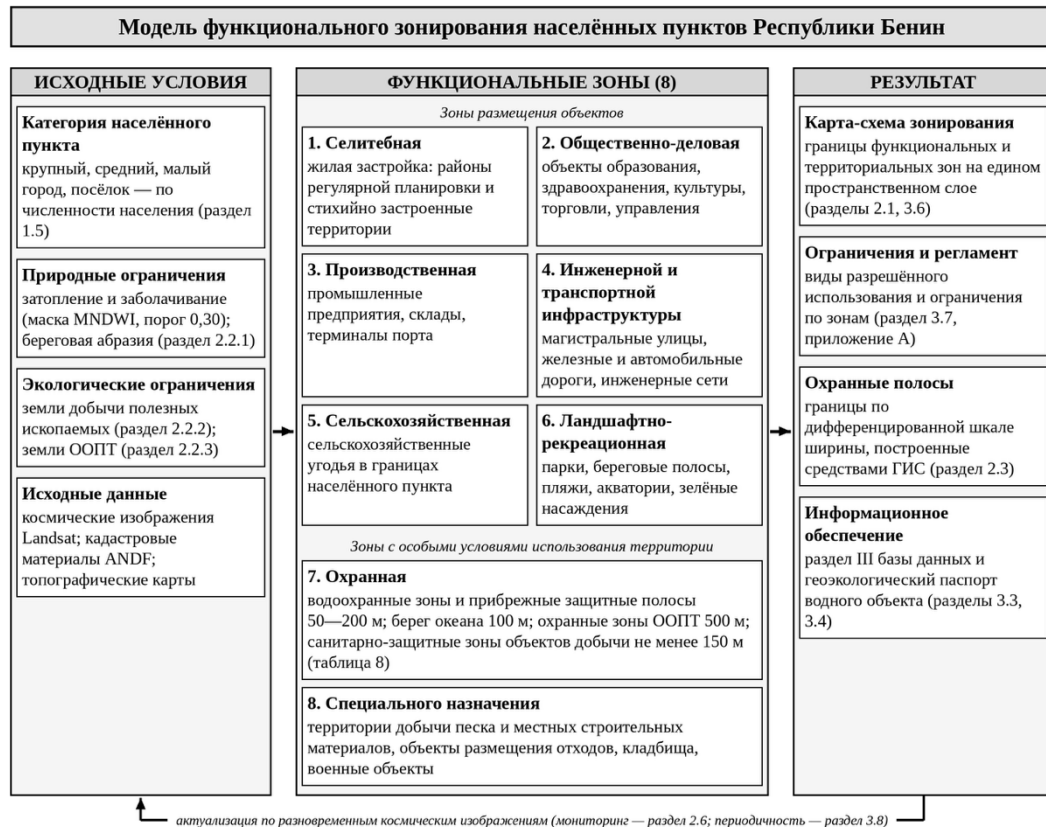


Рисунок 6 — Модель функционального зонирования населённых пунктов Республики Бенин

1.7. Разработка порядка утверждения границ населённых пунктов в Республике Бенин

1.7.1. Этапы установления и утверждения границ населённых пунктов

Точное определение административных границ обеспечивает юридическую достоверность кадастровых данных, минимизирует споры о землевладении, а также служит основой для разработки градостроительных регламентов,

функционального зонирования и управления природными рисками [12; 26; 48]. В настоящем исследовании предложен порядок установления границ населённых пунктов, учитывающий местные физико-географические условия, антропогенные преобразования ландшафтов и опыт зарубежных систем зонирования (раздел 1.4). Пример границы округа г. Котону приведён на рисунке 7.



Рисунок 7 — Пример границы округа г. Котону на космическом изображении (Esri World Imagery; граница нанесена автором)

Нормативную основу сложившейся практики в Республике Бенин составляют Земельный и имущественный кодекс [39] и закон № 2016-06 об основах территориального планирования [48]. По результатам опроса практикующих геодезистов ANDF и частных геодезических предприятий, проведённого автором в 2019—2022 гг. в форме интервью и анкетирования, границы населённых пунктов утверждаются на основе следующих документов: генеральная схема обустройства коммуны (SDAC), содержащая стратегию долгосрочного развития территории; генеральные планы городского развития (PDU, SDAU) и планы разбивки территории (plans de lotissement); кадастровые карты и материалы полевых измерений, выполненные с использованием геодезических, спутниковых и фотограмметрических методов [20].

Опрос носил качественный (экспертный) характер и был направлен на описание сложившейся практики, включая состав исходных данных, порядок согласования и пересмотра границ. Анализ полученных сведений с учётом

положений Земельного и имущественного кодекса, закона № 2016-06 и закона № 2024-27 [38] (ст. 5, 95—97, 101, 105, 112—114) позволил выделить три недостатка существующей практики, которые в рассмотренных положениях нормативных актов не устранены: природные ограничения не входят в состав обязательных исходных данных при установлении границ и учитываются только по инициативе коммуны (закон № 2024-27 предусматривает отображение зон риска в графических материалах PDU, но определяет периметр агломерации по административным границам); процедура согласования не содержит формализованного основания для отказа в утверждении границы, проходящей по ежегодно затапливаемой территории; периодическая верификация утверждённых границ с учётом изменения береговой линии не предусмотрена (закон № 2024-27 устанавливает лишь срок действия PDU — 15 лет), тогда как при расчётной скорости абразии 16 м/год, принятой для восточного участка побережья г. Котону (раздел 2.2.1), смещение береговой линии за 2010—2024 гг. без учёта берегозащитных сооружений восточнее порта составило бы около 224 м, вследствие чего границы, установленные по материалам 2010 г., могут не соответствовать фактическому положению берега. Предлагаемый порядок из семи этапов устраняет эти недостатки за счёт учёта природных и экологических ограничений (этап 4), формализованного основания для отклонения проекта (этап 5) и требования периодической верификации границ (этап 6).

1. Подготовительный этап

На данном этапе проводится сбор исходной информации, включающей: данные государственного кадастра; топографические карты масштаба 1:5 000—1:10 000; разновременные космические снимки Landsat (таблицы 15 и 17); материалы геодезических (кадастровых) съёмок ANDF; нормативно-правовые акты, регулирующие вопросы землепользования и административно-территориального устройства.

Особое внимание уделяется анализу динамики урбанизации, выявлению неформальных поселений и изменений в структуре застройки, что позволяет учитывать официальные и фактические границы населённых пунктов [16; 104].

2. Полевой этап

В ходе полевых работ осуществляется: топографическая съёмка с применением приёмников глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS); маркировка и закрепление межевых знаков на ключевых точках границы; фотофиксация объектов и элементов местности, имеющих значение для установления границы; обследование водоохранных зон, ООПТ и участков с высокой степенью экологического риска.

Этап должен выполняться с использованием геодезических технологий, обеспечивающих по паспортным характеристикам среднюю квадратическую погрешность положения точек не более 0,10 м, что соответствует нормативному ориентиру, принятому в работе (раздел 2.4) [12; 54].

3. Картографирование и ГИС-анализ

Для создания актуальной карты границ населённых пунктов применяются ГИС, позволяющие интегрировать данные дистанционного зондирования, кадастровые слои и результаты полевых измерений. На этом этапе формируются: тематические слои затопляемых и заболоченных территорий, выделенные по индексным изображениям; проекции буферных зон вокруг водных объектов и ООПТ; тематические карты, отражающие типы землепользования, плотность застройки и уровень антропогенной нагрузки.

4. Учёт природных и экологических ограничений

При утверждении границ населённых пунктов в обязательном порядке учитываются следующие факторы: зоны сезонного затопления, выявленные по разновременным спутниковым данным; буферные зоны вокруг водоёмов шириной от 50 до 200 м и охранные зоны ООПТ национального значения шириной 500 м (раздел 2.3); оползнеопасные склоны и участки с эрозионной деградацией почв — при наличии данных о рельефе (цифровой модели рельефа); зоны добычи песка и других строительных материалов, требующие рекультивации нарушенных земель.

5. Правовой этап

После завершения технической части документы направляются в ANDF и органы местного самоуправления для юридической экспертизы. Проект утверждения границ проходит следующие процедуры: публичное обсуждение среди местных жителей и общественных организаций; экспертная оценка с участием специалистов в области права, геодезии и экологии; юридическое оформление в форме решения муниципального совета, принимаемого под контролем законности со стороны префекта департамента; внесение данных в кадастровую базу данных ANDF.

В предлагаемом порядке прохождение проектируемой границы населённого пункта по участку, отнесённому к категории риска III (раздел 2.2.1), является основанием для отклонения проекта на стадии экспертной оценки; для участков категорий I и II допускается прохождение границы с учётом ограничений, установленных для соответствующей категории. В действующем порядке такое основание для отклонения проекта не предусмотрено. Важным элементом данного этапа является согласование границ с владельцами смежных земельных участков, особенно в условиях неформального землевладения, характерного для большинства городских районов страны [2; 20].

6. Регистрация и мониторинг

После утверждения границ они вносятся в кадастровую базу данных ANDF, где координаты характерных точек границы приводятся в единой системе координат и каждому участку присваивается уникальный идентификатор. Также создаётся механизм постоянного мониторинга изменений в границах населённых пунктов, основанный на регулярном обновлении спутниковых данных и полевых проверках.

7. Интеграция в автоматизированную информационную систему

Разработанный порядок утверждения границ предусматривает их интеграцию в единую геоинформационную базу данных населённых пунктов (раздел 3.3); порядок согласования и подготовки градостроительной документации приведён на рисунках 8—10.



Рисунок 8 — Формирование и согласование генерального плана в связи с зонированием и установлением границ населённых пунктов: состав схем и обосновывающих материалов (чёрным цветом выделены существующие положения, коричневым — предлагаемые)

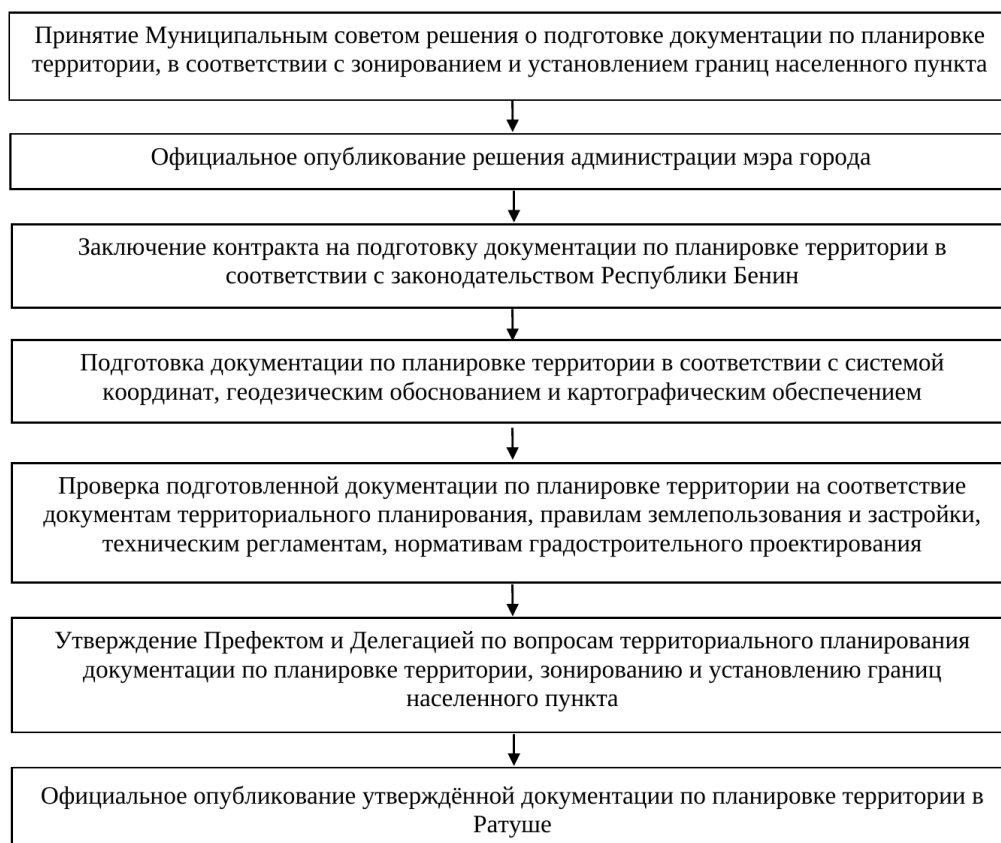


Рисунок 9 — Определение порядка подготовки документации по планировке территории в соответствии с зонированием и установлением границ населённых пунктов

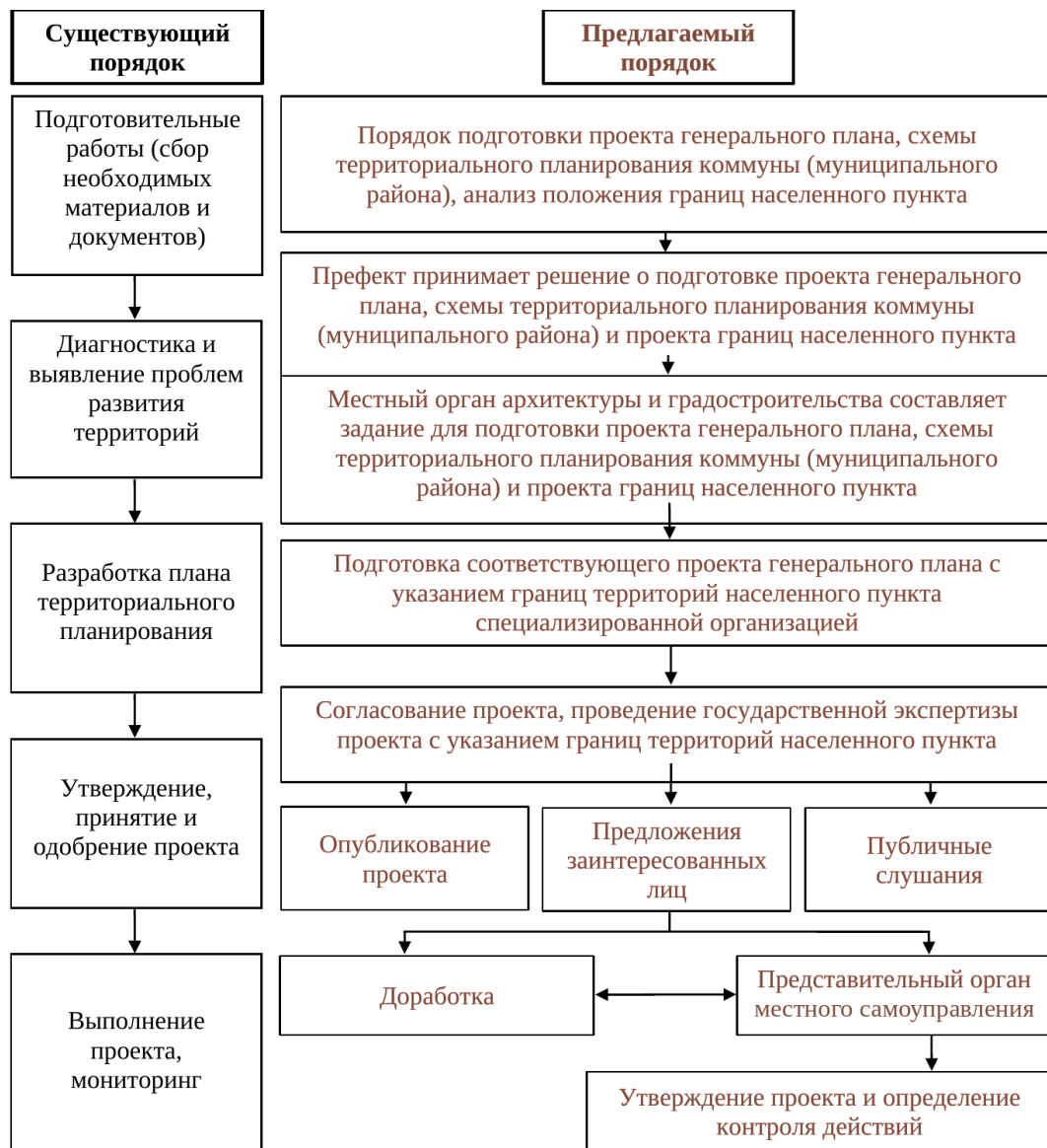


Рисунок 10 — Определение порядка подготовки проекта генерального плана и схемы зонирования коммуны с границами территорий населённых пунктов (чёрным цветом выделены существующие положения, коричневым — предлагаемые)

1.7.2. Методы измерения границ населённых пунктов и оформление результатов межевания

В практике кадастровых и землеустроительных работ Республики Бенин для определения административных границ применяются три основных метода: геодезический, фотограмметрический и спутниковый [12; 20]. Эти методы различаются по технической оснащённости, точности и применимости в

конкретных условиях, что обуславливает их использование в зависимости от сложности рельефа, плотности застройки, доступности оборудования и юридических требований.

Геодезический метод является наиболее традиционным и используется при выполнении полевых работ на местности. Он предполагает применение наземных измерительных приборов — теодолитов, нивелиров, электронных тахеометров и GNSS-приёмников — для установления координат межевых знаков и закрепления границ. Этот подход обеспечивает среднюю квадратическую погрешность положения межевых знаков порядка $\pm 0,10$ м при использовании электронных тахеометров, что соответствует нормативному ориентиру, принятому в работе (раздел 2.4). Однако геодезический метод трудоёмок, зависит от квалификации специалистов и требует значительных временных затрат, особенно при работе на участках с нестандартной конфигурацией или в условиях плотной городской застройки. Тем не менее он остаётся основным при оформлении правоустанавливающих документов, поскольку позволяет точно определить поворотные точки контуров, установить межевые знаки и создать достоверный межевой план для последующего внесения информации в государственный кадастр [2; 39].

Фотограмметрический метод основан на интерпретации аэрофотоснимков и цифровой обработке изображений. Он применяется при крупномасштабном межевании, особенно в районах с регулярной планировочной структурой. Технология включает этапы аэросъёмки местности, создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) и ортофотопланов, а также выделение характерных элементов — дорог, зданий, водных объектов и естественных рубежей. Полученные данные интегрируются в ГИС, где они подвергаются сравнению с кадастровыми картами и актуализируются в соответствии с текущими изменениями в застройке и ландшафтной среде. Преимуществом данного метода является возможность оперативного получения информации о больших территориях, однако его эффективность снижается в условиях плотной застройки, где затруднена интерпретация изображений и возникают проблемы с точностью определения

границ. Кроме того, качество результатов зависит от масштаба аэросъёмки и состояния атмосферы во время её проведения [16; 104].

Спутниковый метод (GNSS-измерения, Global Navigation Satellite System) основан на использовании сигналов спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou для определения координат межевых точек. Современное оборудование, работающее в режиме RTK (Real-Time Kinematic), обеспечивает погрешность измерений до $\pm 0,03$ — $0,05$ м, что делает данный метод особенно перспективным для зонирования территорий с высокой антропогенной нагрузкой, таких как Котону. Процесс включает подготовку исходных данных, полевые измерения с использованием двухчастотных приёмников, постобработку полученных координат, коррекцию ошибок, связанных с ионосферными и тропосферными задержками, и создание межевых планов, интегрированных в единую систему координат WGS-84 (World Geodetic System 1984). Спутниковый метод имеет преимущества перед другими: минимальная зависимость от погодных условий, возможность работы в труднодоступных районах и высокая скорость выполнения работ. Однако широкое внедрение этого метода в практику Республики Бенин сталкивается с рядом проблем: ограниченным бюджетом муниципальных органов, недостатком обученного персонала и отсутствием единой сети спутниковых дифференциальных поправок, обеспечивающей требуемую точность измерений [12; 19].

В городах юга страны (Котону, Порто-Ново) при межевании учитываются сезонные наводнения и береговая абразия, изменяющие положение береговых линий и, как следствие, административных границ: границы устанавливаются с учётом буферных зон водных объектов по шкале раздела 2.3, а при наличии данных о рельефе — участков эрозии почв и оползнеопасных склонов [18].

Правовые требования к межеванию установлены Земельным и имущественным кодексом Республики Бенин [39]; в рассмотренных положениях кодекса и закона № 2024-27 [38] требование периодической верификации границ не предусмотрено. Необходимость такой верификации, обоснованная в разделе 1.7.1, связана с тем, что в условиях урбанизации и климатических изменений

происходит изменение береговых линий, увеличение площади застроенных территорий и изменение границ водоохранных зон [91; 125]. Таким образом, границы населённых пунктов требуют периодической актуализации.

Для повышения надёжности измерений и минимизации ошибок рекомендуется комбинировать методы. Например, спутниковые измерения используются для определения координат опорных межевых точек, а наземные геодезические измерения — для сгущения сети и контроля результатов. Такой подход должен обеспечивать среднюю квадратическую погрешность положения опорных межевых точек не более 0,05 м, а точек сгущения — не более 0,10 м (по техническим характеристикам аппаратуры), что удовлетворяет требованию $Mt \leq 0,10$ м для земель населённых пунктов (раздел 2.4); спутниковые измерения выполняются в режиме RTK либо в статическом режиме с последующей камеральной обработкой [12; 56]. При расчётной скорости абразии 16 м/год (раздел 2.2.1) расчётное расхождение между положением береговой линии по картографическим материалам г. Котону 2010 г. и её положением в 2024 г. на восточном участке побережья составило бы порядка 224 м (14 лет $\times$ 16 м/год); фактическое смещение зависит от действия берегозащитных бун восточнее порта, поэтому границы актуализируются спутниковыми измерениями (раздел 2.4) [10; 16].

Форма кадастрового плана земельного участка для ведения предлагаемой базы данных (раздел 3.3) принята по аналогии с [27]; пример кадастрового плана, составленного автором по результатам топографической съёмки (2019—2020 гг.), приведён на рисунке 11. Схема коммуны Керу (рисунок 12) иллюстрирует случай, когда граница населённого пункта проходит вблизи земель ООПТ (охотничьи угодья Атакора): при установлении такой границы на этапе 4 (раздел 1.7.1) учитывается охранный зона ООПТ шириной 500 м (раздел 2.3).

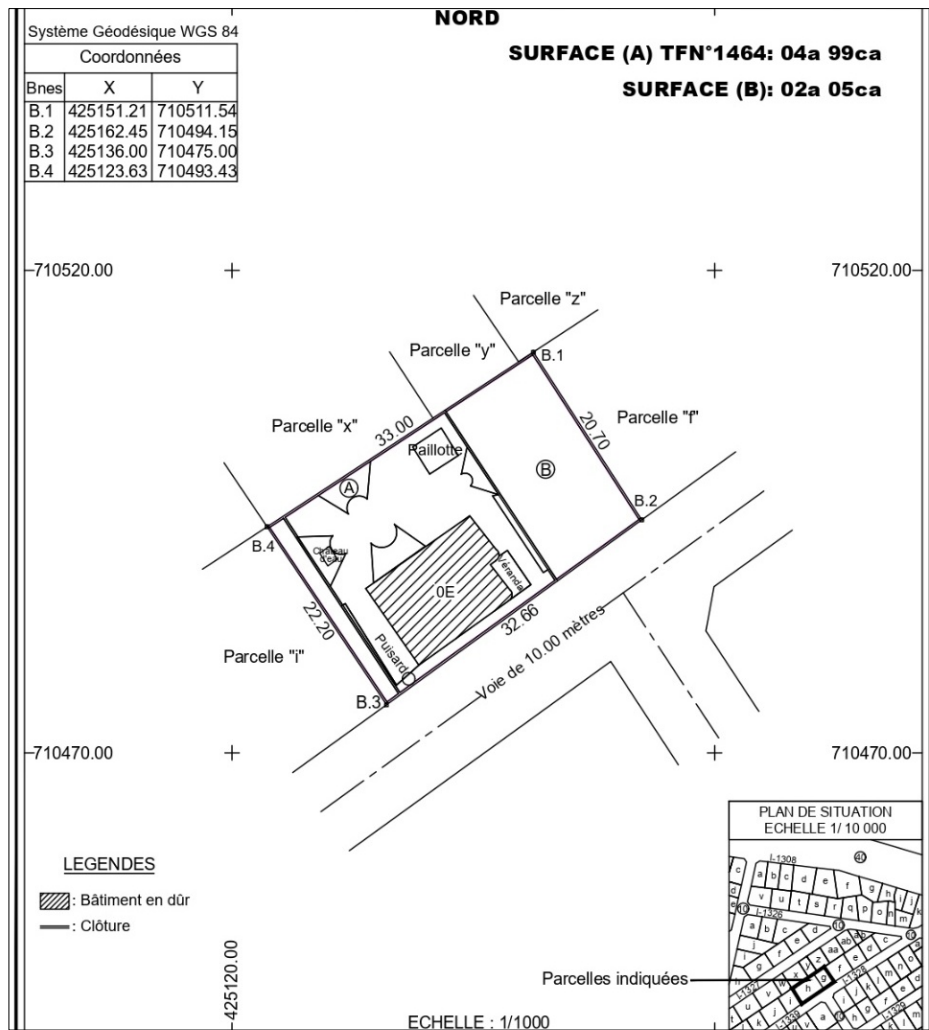


Рисунок 11 — Пример кадастрового плана земельного участка (топографическая съёмка и чертёж в AutoCAD выполнены автором)

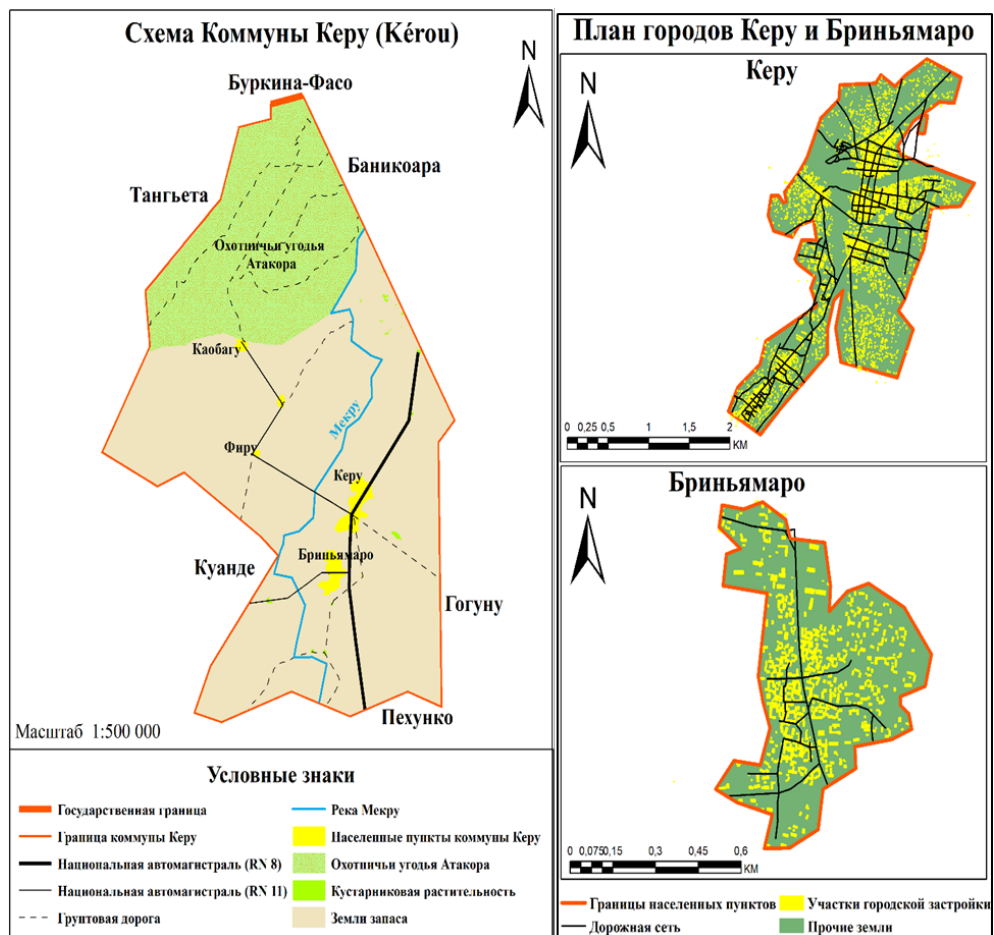


Рисунок 12 — Схема коммуны Керу с жилыми районами и зонами ООПТ — охотничьи угодья Атакора

1.8. Выводы по главе 1

1. Установлено, что природные и экологические ограничения землепользования в населённых пунктах Республики Бенин образуют три группы, различные для прибрежных и внутренних районов страны: сезонное затопление, подтопление и береговая абразия (южная прибрежная зона с двумя дождевыми сезонами и годовой суммой осадков до 1300 мм); нарушение земель при разведке и добыче полезных ископаемых; ограничения, связанные с землями ООПТ. Этот состав ограничений определяет содержание охранной зоны в классификации земель населённых пунктов и перечень классов, выделяемых по космическим изображениям в главе 2.

2. Анализ нормативно-правового обеспечения (таблица 4) выявил шесть пробелов, учитываемых в работе: отсутствие числовых допусков на точность положения характерных точек границ (раздел 2.4); отсутствие нормативно закреплённого перечня основных видов территориальных зон общего применения, который не установлен и законом № 2024-27 [38], предусматривающим PDU с градостроительным регламентом (разделы 1.3, 1.5, 3.7); отсутствие в типовом регламенте руководства по разработке SDAC [103] ширины водоохранных зон и режимов использования земель, дифференцированных по степени риска затопления (разделы 3.6, 3.7); отсутствие в рассмотренных положениях нормативных актов и в действующем порядке утверждения границ обязательного этапа учёта природных ограничений и требования периодической верификации (раздел 1.7.1); отсутствие в кадастровой базе данных ANDF раздела природно-экологических характеристик (раздел 3.3); отсутствие кадастровой стоимости по результатам государственной кадастровой оценки при наличии административной оценки фискального назначения, предусмотренной статьёй 158 Общего налогового кодекса; в работе экономическая эффективность зонирования оценена по предотвращаемому ущербу (раздел 3.8).

3. Анализ состояния изученности проблемы и международного опыта показал, что выполненные в Республике Бенин работы по картографированию риска наводнений не связаны с функциональным зонированием и кадастровым учётом, тогда как в рассмотренных зарубежных системах (комплексный кадастр, INSPIRE, планы предупреждения рисков наводнений во Франции, зоны затопления в Англии, зоны с особыми условиями использования территорий в России) один и тот же контур зоны природного ограничения действует одновременно в градостроительном регулировании и в кадастре. Этот принцип принят в основу методики, разрабатываемой в главах 2 и 3.

4. Разработана классификация населённых пунктов Республики Бенин по численности населения (крупные — свыше 250 тыс. до 1 млн чел., средние — свыше 100 до 250 тыс., малые — свыше 50 до 100 тыс., посёлки — 50 тыс. чел. и

менее); её применение ко всем 77 коммунах страны дало 5 крупных, 42 средних, 27 малых городов и 3 посёлка. Объектами апробации приняты г. Котону (крупный город) и г. Бохикон (средний город).

5. Разработана модель функционального зонирования населённых пунктов (рисунок 6), включающая восемь функциональных зон, в том числе охранную зону, объединяющую водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы, охранные зоны ООПТ и санитарно-защитные зоны (приложение А). На примере г. Котону показано, что все восемь зон и все три группы ограничений представлены в границах одного населённого пункта, причём в зонах затопления выявлена прежде всего жилая застройка (раздел 2.2.1).

6. Предложен порядок установления и утверждения границ населённых пунктов из семи этапов, отличающийся от действующего введением обязательного этапа учёта природных и экологических ограничений, формализованного основания для отклонения проекта границы, проходящей по затопливаемой территории, и требования периодической верификации границ (рисунки 8—10). Обосновано комбинирование применяемых в стране геодезического, фотограмметрического и спутникового методов измерения границ: спутниковые измерения — для опорных межевых точек (средняя квадратическая погрешность не более 0,05 м), наземные — для сгущения сети и контроля (не более 0,10 м) (раздел 1.7.2).

7. Обосновано, что при отсутствии установленных границ зон затопления основным повсеместно доступным источником их контуров являются разновременные космические изображения, что определило выбор методов главы 2 и состав методики главы 3.

Глава 2. МЕТОДИЧЕСКОЕ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗОНИРОВАНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ С УЧЁТОМ ПРИРОДНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Целью настоящей главы является разработка методического и геодезического обеспечения методики: выявление природных и экологических ограничений по разновременным космическим изображениям (разделы 2.1, 2.2, 2.5, 2.6), обоснование ширины буферных зон (2.3), требований к точности геодезического закрепления границ (2.4) и выбор метода классификации с оценкой его точности (2.5.3).

2.1. Составление карт-схем зонирования населённых пунктов на примере города Котону с учётом природных и экологических особенностей

Создание карт-схем зонирования населённых пунктов является ключевым этапом управления урбанизированными территориями. Объектом детального исследования в настоящей работе выбран город Котону [2; 20].

Карта-схема зонирования г. Котону составлена средствами ГИС по данным ДЗЗ. Основой для построения пространственных моделей послужили разновременные космические снимки Landsat за период 2002—2024 гг. (таблица 17), а также данные кадастрового учёта, предоставленные ANDF [16; 104]. Геопространственные данные интегрированы в программное обеспечение ArcGIS, что обеспечило совместное использование разнородных слоёв и возможность их оперативного обновления в соответствии с изменениями в городской среде.

Анализ территории выполнен в разрезе восьми функциональных зон, состав которых определён в разделе 1.5; границы охранный зоны установлены с учётом водоохранных зон шириной не менее 50 м и охранных зон ООПТ (раздел 2.3).

Для выделения контуров применялась контролируемая классификация космических снимков методом максимального правдоподобия в сочетании с

методом масок; оценка точности классификации приведена в разделе 2.5.3 (таблицы 13 и 14). Состав полученных данных соответствует разработанной автором структуре геоинформационной базы данных, включающей три раздела: общая характеристика населённых пунктов, кадастровые данные и природно-экологические характеристики территории (раздел 3.3) [10; 104].

Карта-схема представляет собой набор тематических слоёв, объединяющих сведения о функциональном использовании земель, зонах затопления и заболачивания и буферных зонах. Она выполнена в программе ArcGIS; зонирование отдельного квартала оформлено в программе AutoCAD Map 3D (рисунки 14, 15) [10; 16].

Сопоставление результатов дешифрирования с данными действующего кадастра выявило расхождения, связанные с устаревшими границами и отсутствием учёта природных рисков: часть участков, отнесённых к жилой застройке, расположена в границах зон затопления и водоохранных зон (в том числе 23 случая застройки в границах буферных зон, раздел 3.6) и требует пересмотра видов разрешённого использования. Аналогичные расхождения выявлены в зоне добычи песка (раздел 2.2.2).

Порядок составления карт-схем включает следующие этапы: сбор исходных данных — кадастровые (геодезические) материалы ANDF, разновременные космические изображения; предварительная обработка изображений — коррекция геометрических искажений, нормализация яркости, дешифрирование объектов; пространственный анализ — выделение зон затопления и заболачивания по индексным изображениям, определение зон повышенной антропогенной нагрузки, выделение ООПТ; создание тематических слоёв — формирование отдельных картографических слоёв для каждой функциональной зоны; интеграция в единую схему — объединение всех слоёв в комплексную карту-схему зонирования; юридическое оформление — согласование границ с органами местного самоуправления, общественное обсуждение, регистрация в государственном кадастре [70; 104].

Применение геоинформационного метода масок (раздел 2.5) и последующая контролируемая классификация позволили выделить участки устойчивого затопления в северной части города, примыкающей к озеру Нокуэ.

В условиях тропического климата с выраженной сезонностью зонирование требует регулярного обновления данных по новым снимкам и полевым наблюдениям, что позволяет учитывать изменение береговой линии, развитие неформальной застройки и деградацию природных ландшафтов [2; 18].

Карта-схема зонирования г. Котону служит основой для подготовки правил землепользования и застройки: состав территориальных зон и содержание градостроительного регламента для каждой из них обоснованы в разделе 3.7 и приложении А, а конкретные числовые значения предельных параметров разрешённого строительства относятся к компетенции национальных градостроительных нормативов [42].

Карта-схема зонирования рассматривается как инструмент управления земельными ресурсами: в работе предусмотрены мониторинг изменений по разновременным космическим изображениям с полевой верификацией на этапе внедрения (таблица 20, этап 4.4) и периодическая актуализация схемы зонирования (раздел 3.2), что позволяет реагировать на динамику урбанизации и климатических изменений. Примеры территориального зонирования фрагмента г. Котону с учётом природных и экологических особенностей приведены на рисунке 13.

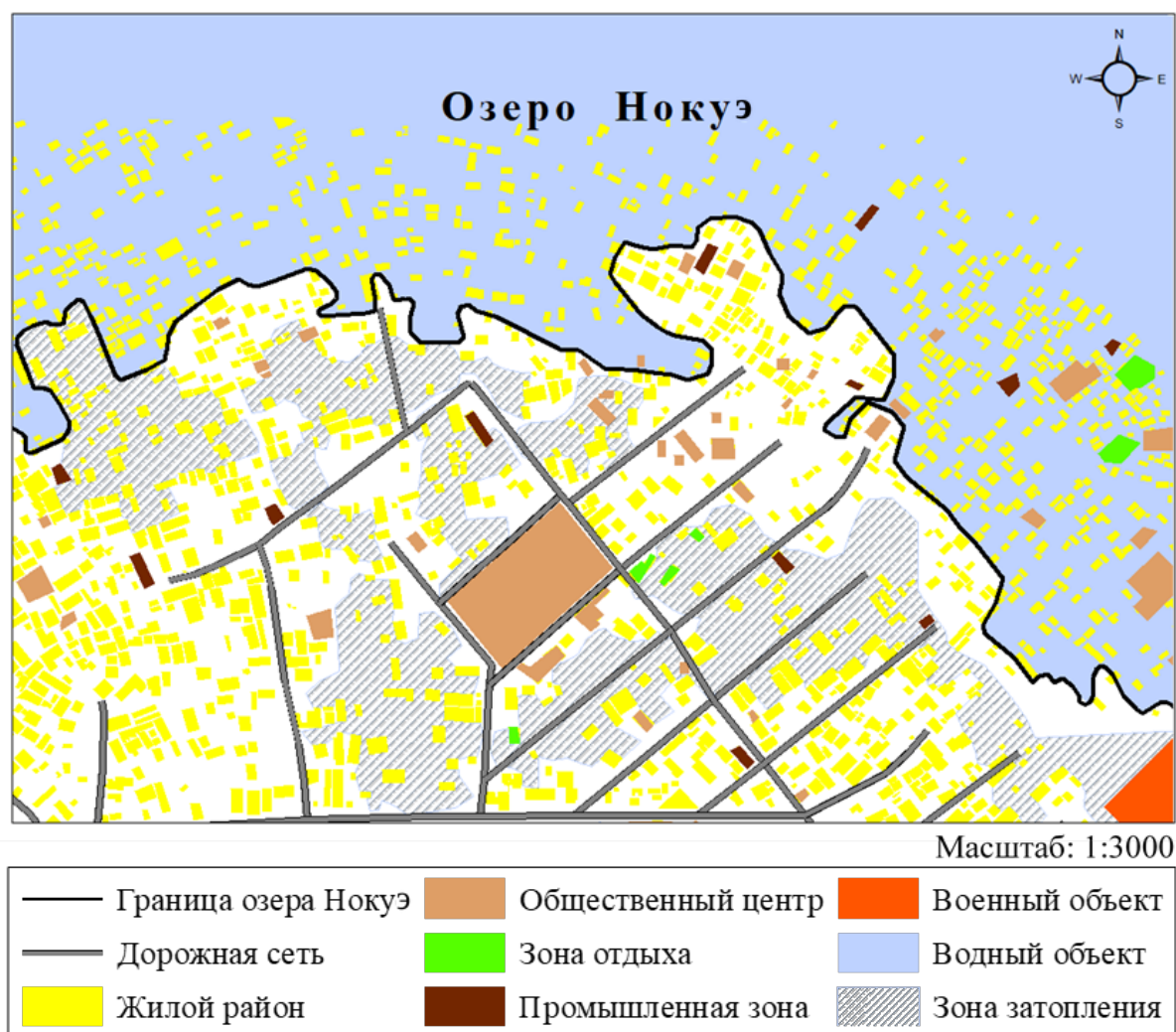


Рисунок 13 — Примеры территориального зонирования фрагмента г. Котону с учётом природных и экологических особенностей

Таким образом, составление карты-схемы зонирования г. Котону показало возможность совместного использования данных дистанционного зондирования, геодезических материалов и кадастровых сведений при выделении функциональных зон с учётом природных и экологических ограничений. Полученные материалы могут быть использованы при подготовке проектов правил землепользования и застройки, корректировке градостроительных регламентов и формировании единой системы государственного управления земельными ресурсами [62].

2.2. Природные и экологические особенности территорий населённых пунктов Республики Бенин, учитываемые при зонировании

Территории населённых пунктов, включая земли социальных объектов и жилых кварталов, располагаются на землях, подверженных опасным природным и антропогенным процессам (затопление, подтопление и береговая абразия; эрозия и загрязнение земель при добыче полезных ископаемых; деградация растительности).

В состав населённых пунктов Республики Бенин входят земли ООПТ, а также земли, на которых ведётся разведка и добыча полезных ископаемых. Три группы природных и экологических ограничений, учитываемых при зонировании, рассмотрены последовательно: затопление, подтопление и береговая абразия — в разделе 2.2.1, земли разведки и добычи полезных ископаемых — в разделе 2.2.2, земли ООПТ — в разделе 2.2.3.

2.2.1. Земли населённых пунктов, подверженные затоплению, подтоплению и береговой абразии

Сезонные наводнения и береговая абразия оказывают существенное влияние не только на состояние природных ландшафтов, но и на безопасность населения, инфраструктуру и функциональное использование земель, особенно в крупных городах, таких как Котону, Порто-Ново и Абомей-Калави [2; 20]. Учёт гидрологических, геоморфологических и климатических факторов позволяет повысить точность выявления рисков территорий и разработать адаптивные меры по регулированию хозяйственной деятельности в пределах населённых пунктов.

В южной части страны, где расположены основные портовые и административные центры, особую актуальность приобретают процессы затопления пойменных и прибрежных зон, обусловленные как естественными гидрометеорологическими явлениями, так и антропогенным воздействием —

застройкой в водоохранных зонах, деградацией мангровых зарослей и изменением гидрологического режима озера Нокуэ и лагуны Котону. В период дождевых сезонов (апрель—июль и сентябрь—октябрь) уровень воды в этих акваториях может повышаться на 0,8—1,5 м, что приводит к затоплению прилегающих районов, особенно в местах с пониженным рельефом и слабой дренажной сетью [18; 142].

Для объективного анализа были использованы данные ДЗЗ, включая разновременные космические снимки Landsat, позволяющие выделить зоны затопления и проследить их динамику во времени. Метод масок в сочетании с контролируемой классификацией позволил выделить участки, попадающие в зону затопления. Достоверность выделения этих зон подтверждена результатами оценки точности классификации (раздел 2.5.3, таблицы 13 и 14). Динамика площади зон затопления и заболоченных территорий за период 2002—2024 гг. рассмотрена в разделе 2.6 (таблица 18) [2; 10].

Результаты мониторинга (раздел 2.6) показывают, что застройка расширяется преимущественно за счёт освоения периодически затапливаемых и заболоченных участков, вследствие чего возрастает число объектов недвижимости, расположенных в границах зон затопления. Особенно уязвимыми являются районы, где отсутствуют буферные зоны вокруг водных объектов или они имеют недостаточную ширину. В соответствии с принятой в настоящей работе дифференцированной шкалой (раздел 2.3) минимальная ширина водоохранной зоны составляет 50 м при установленной законодательством Республики Бенин прибрежной полосе (франк-борд, franc-bord) шириной 25 м, что направлено на ограничение подверженности застройки затоплению и создание условий для восстановления естественных экосистем [2; 18].

Береговая абразия, вызванная волновым воздействием Атлантического океана и активной деятельностью портов, также представляет собой серьёзную угрозу для урбанизированных территорий. Восточная часть побережья г. Котону, расположенная к востоку от молов порта, ниже по направлению вдольберегового переноса наносов, испытывает ежегодное отступление береговой линии, скорость

которого по опубликованным данным зависит от периода и протяжённости рассматриваемого участка: до 16 м/год в 1963—2005 гг. по данным Kaki et al., приведённым в [141], в среднем 10,5 м/год в 2002—2013 гг. [91] и около 7 м/год для всего побережья восточнее Котону с 2000 г. [125], что требует пересмотра границ населённых пунктов и корректировки правил землепользования. После сооружения бун в 2013 г. береговая линия на защищённом участке стабилизировалась, а зона интенсивного размыва сместилась восточнее [91]. В настоящей работе значение 16 м/год используется не как современная средняя скорость отступления береговой линии, а как расчётная величина при определении ширины прибрежной защитной полосы (раздел 2.3) и периодичности её актуализации (раздел 3.8). По данным [18], наибольшее разрушение происходит в районах с искусственными сооружениями — набережными, причалами и дамбами, которые нарушают естественную динамику песчаных наносов и усиливают эрозию береговой линии.

Для оценки степени риска затопления предложена относительная шкала, применяемая при ведении базы данных и паспорта водного объекта по маскам всех дат ряда. Категория риска устанавливается по числу дат ряда, на которых участок выделен как затопленный при дешифрировании разновременных изображений, полученных в один и тот же сезон: высокий (III) — на всех датах ряда; средний (II) — более чем на одной, но не на всех; низкий (I) — не более чем на одной дате. Ряд наблюдений сформирован по изображениям сухого сезона (декабрь—февраль), поэтому шкала характеризует устойчивость обводнения в наименее водный период года и даёт нижнюю оценку подверженности территории затоплению: участок категории III обводнён даже в сухой сезон, тогда как участок категории I может затапливаться в сезон дождей, не будучи выявленным по данному ряду. Поэтому отнесение участка к категории III служит основанием для установления ограничений, а отнесение к категории I основанием для их снятия не является; оценка годового максимума затопления требует привлечения радиолокационных данных сезона дождей и цифровой модели рельефа (раздел 3.6; перспективы — в заключении). Шкала является

относительной: она характеризует устойчивость затопления в пределах сформированного ряда наблюдений и не выражает повторяемость затопления в годах. Для каждой категории разработаны соответствующие рекомендации по использованию земель: I — допускаются ограниченные виды хозяйственной деятельности при условии соблюдения защитных мер; II — допускаются только временная застройка и рекреационное использование, размещение парков и открытых спортивных объектов; III — запрет капитального строительства, создание защитных дамб, переселение населения из наиболее опасных участков [2; 10].

Геоморфологические особенности страны играют важную роль в формировании зон затопления. Южные районы Республики Бенин характеризуются аллювиальными равнинами, сложенными песчано-суглинистыми отложениями с низкой фильтрационной способностью. Это усиливает эффект застоя воды и увеличивает продолжительность наводнений. Центральные и северные районы, напротив, имеют более выраженные склоновые процессы, что связано с развитием тропических железистых почв, склонных к поверхностной эрозии при интенсивном выпадении осадков. В этих условиях необходимо применять противоэрозионные мероприятия и контролировать застройку на склонах крутизной более 10° [18].

Расширение портовой инфраструктуры и урбанизированной зоны вдоль побережья за последние два десятилетия изменило береговую динамику и усилило абразию [14; 91; 125]. Добыча песка в прибрежной зоне, особенно в окрестностях Котону, вызывает деградацию пляжных массивов и ускоряет темп разрушения береговой линии. В этой связи целесообразно контролировать добычу строительных материалов, составить карты потенциально опасных участков, подлежащих рекультивации, а также создать специальные полигоны для их экологически безопасной добычи.

Экологическое состояние затапливаемых территорий также требует учёта. По данным [2; 18], в зонах регулярного подтопления наблюдается снижение качества почв вследствие переувлажнения, развития процессов засоления и

вторичного заболачивания. Кроме того, вода, застаивающаяся в межквартирных пространствах, становится источником загрязнения и способствует распространению инфекционных заболеваний, что требует комплексного подхода к планированию городской среды и разработке мер по реабилитации пострадавших участков.

Карты, объединяющие данные о гидрографической сети, зонах затопления, видах использования земель и функциональных зонах (рисунки 14, 15), могут служить основой проекта правил землепользования и застройки (ПЗЗ) г. Котону. Карта-схема зонирования включает в себя: контуры зон затопления; буферные зоны вокруг водоёмов; участки с различной степенью риска; функциональные зоны с регламентами использования.

В рамках исследования разработана структура геоэкологического паспорта водного объекта (раздел 3.4, приложение В), содержащего сведения о гидрологическом режиме, хронологии наводнений, состоянии береговой линии и динамике площадей зон затопления по датам ряда наблюдений. Например, площадь зон затопления в границах исследуемого фрагмента г. Котону изменяется от даты к дате под влиянием климатических условий и антропогенного преобразования прибрежных ландшафтов (раздел 2.6, таблица 18) [2; 20].

Важным элементом работы стало определение порядка взаимодействия между государственными органами, ответственными за землеустройство, мониторинг окружающей среды и градостроительное проектирование. Порядок информационного обмена между ANDF, муниципальными органами и научными центрами закреплён распределением участников по этапам алгоритма совершенствования системы зонирования (раздел 3.2, таблица 22) и направлен на повышение оперативности принятия решений и на актуализацию кадастровых данных с учётом природных изменений [10; 104]. Зонирование одного из кварталов г. Котону выполнено в программе AutoCAD Map 3D (рисунки 14, 15).

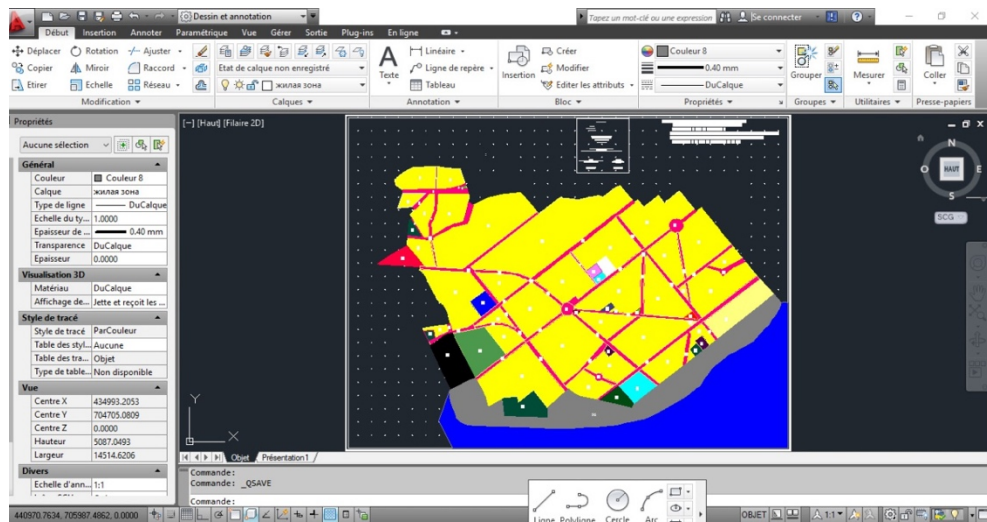


Рисунок 14 — Фрагмент работы по зонированию кварталов г. Котону в программе AutoCAD Map 3D [18]



Рисунок 15 — Карта-схема зонирования кварталов г. Котону с зоной затопления (номера кварталов — по таблице 7; условные цвета видов разрешённого использования земель — по таблице 6)

Для зонирования кварталов г. Котону составлена таблица видов разрешённого использования земель, которая включает в себя следующие основные виды: сельскохозяйственное использование; жилая застройка; различные учреждения — здравоохранения, образования, культуры, спорта, а также религиозные учреждения; учреждения общественного и делового управления, рынки, места общественного питания, гостиничного обслуживания, обслуживания автотранспорта, места рекреаций; предприятия энергетики, автомобильного и воздушного транспорта; зона затопления квартала и водные объекты. По результатам геоинформационных измерений (таблица 7) границы кварталов приняты по кадастровым материалам ANDF, их обработка и вычисление площадей выполнены автором в геодезическом (кадастровом) предприятии Республики Бенин; суммарная площадь 84 кварталов, охваченных кадастровым зонированием, составляет 1 389,56 га (13 895 615,55 м²), из них селитебная зона занимает 1 094,41 га, или 78,76 %; на остальные виды использования в границах кварталов приходится 295,15 га, или 21,24 %. Площадь транспортной зоны (улично-дорожная сеть и территория аэропорта), не входящей в указанную сумму, составляет 160,26 га. Площадь зон затопления, примыкающих к кварталам со стороны океана и не входящих в указанную сумму, равна 190,39 га; она вычислена в программе AutoCAD Map 3D по контуру зоны затопления, нанесённому при зонировании кварталов (рисунки 14, 15), и не совпадает с площадью класса «зона затопления» по космическим изображениям (таблица 18), полученной для другого контура; на этих участках расположены объекты жилой застройки.

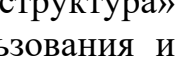
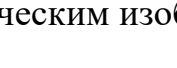
Следует различать два контура, использованных в работе. Кадастровое зонирование выполнено по 84 кварталам общей площадью 1 389,56 га; классификация разновременных космических изображений выполнена по фрагменту г. Котону площадью 32 720,13 га, включающему акватории (раздел 2.6, таблица 18). Границы этих контуров не совпадают, поэтому приведённые здесь площади видов разрешённого использования и площади классов земного покрова таблицы 18 относятся к разным контурам и не подлежат прямому сопоставлению:

значение 1 094,41 га характеризует площадь кварталов, отнесённых к селитебной зоне по видам разрешённого использования, а значение 9 291,42 га (таблица 18) — площадь фактически застроенных участков, выделенных по результатам дешифрирования.

Жилые зоны (№ 2 в таблице видов разрешённого использования земель) предназначены для размещения жилой застройки различной этажности; выделение подзон определяется сложившейся структурой жилого фонда, включая традиционное расселение родовых общин. Зона сельскохозяйственного использования (№ 1) предназначена для ведения сельского и фермерского хозяйства, развития объектов сельскохозяйственного назначения. Общественно-деловые зоны (№ 3—11) созданы для упорядочения нескольких видов использования территории и реализации торговой, офисной, административной, культурно-образовательной, обслуживающей и развлекательной функций. Эти функции объясняют их размещение в центральной части города и в пределах других территорий, отличающихся транспортной и инфраструктурной обеспеченностью. В производственных зонах, зонах инженерной и транспортной инфраструктуры (№ 12, 15—17) размещаются объекты производственного назначения, энергетики и транспорта. В состав ландшафтно-рекреационной зоны (№ 13, 14) могут включаться зоны, занятые городскими скверами, озёрами, водохранилищами, пляжами, используемые для отдыха, туризма, занятий спортом, а также земельные участки, имеющие особое природоохранное, историко-культурное, оздоровительное и иное особо ценное значение (в границах рассматриваемых кварталов не представлены). В состав зон специального назначения входят земли, занятые кладбищами, крематориями, скотомогильниками, объектами размещения отходов потребления и иными объектами, размещение которых недопустимо в других зонах [18].

Виды разрешённого использования земель, применённые при зонировании кварталов, приведены в таблице 6.

Таблица 6 — Виды разрешённого использования земель

№	Условный цвет заливки	Наименование вида разрешённого использования земельного участка
1		Сельскохозяйственное использование
2		Жилая застройка
3		Здравоохранение
4		Образование и просвещение
5		Культурное развитие
6		Религиозные учреждения
7		Общественное управление
8		Деловое управление
9		Рынки
10		Общественное питание
11		Гостиничное обслуживание
12		Обслуживание автотранспорта
13		Отдых (рекреация)
14		Спорт
15		Энергетика
16		Автомобильный транспорт
17		Воздушный транспорт
18		Водные объекты (океан, озеро, лагуна)
19		Зоны затопления

Примечание — позиции 12, 16 и 17 детализируют вид «Транспортная инфраструктура» таблицы 5; позиция 19 не является видом разрешённого использования и введена как класс природного ограничения, выделяемый по космическим изображениям (раздел 2.5.2).

Площади кварталов и зон затопления, вычисленные в программе AutoCAD Map 3D, приведены в таблице 7.

Значения площадей в таблице 7 приведены с разрядностью вычисления в ГИС (до сотых долей квадратного метра) в целях сопоставления; фактическая

погрешность определения площадей существенно выше и оценена в разделе 2.5.3, а в кадастровой практике такие значения округляются. Площадь в гектарах приведена для наглядности.

Таблица 7 — Площадь кварталов города Котону

№ квартала	Площадь, м²	Площадь, га	№ квартала	Площадь, м²	Площадь, га
1	178 458,37	17,85	43	682 918,04	68,29
2	7 938,75	0,79	44	57 787,10	5,78
3	115 263,65	11,53	45	632 094,10	63,21
4	138 905,38	13,89	46	76 600,69	7,66
5	4 125,17	0,41	47	195 694,50	19,57
6	251 115,81	25,11	48	3 378,35	0,34
7	33 449,62	3,34	49	12 918,90	1,29
8	109 999,51	11,00	50	1 505,26	0,15
9	134 395,51	13,44	51	5 230,59	0,52
10	898 303,97	89,83	52	458 574,23	45,86
11	128 017,30	12,80	53	42 045,32	4,20
12	499 122,74	49,91	54	254 465,60	25,45
13	88 356,02	8,84	55	39 142,14	3,91
14	14 919,09	1,49	56	3 097,56	0,31
15	35 027,31	3,50	57	447 031,14	44,70
16	1 306 355,27	130,64	58	79 829,15	7,98
17	18 398,94	1,84	59	213 524,64	21,35
18	35 219,86	3,52	60	153 436,62	15,34
19	4 684,10	0,47	61	486 448,44	48,64
20	35 763,43	3,58	62	372 314,72	37,23
21	47 467,67	4,75	63	58 979,55	5,90
22	3 166,69	0,32	64	44 777,03	4,48
23	293 429,99	29,34	65	20 562,63	2,06
24	330 485,49	33,05	66	447 245,83	44,72
25	138 615,26	13,86	67	86 922,47	8,69
26	21 973,72	2,20	68	31 929,18	3,19
27	19 151,86	1,92	69	11 723,66	1,17
28	14 042,09	1,40	70	8 896,41	0,89
29	403 426,49	40,34	71	241 128,80	24,11
30	23 449,16	2,34	72	18 110,24	1,81
31	370 249,02	37,02	73	19 912,92	1,99
32	26 762,80	2,68	74	25 402,19	2,54
33	20 649,45	2,06	75	16 101,35	1,61
34	49 718,27	4,97	76	14 634,02	1,46

№ квартала	Площадь, м ²	Площадь, га	№ квартала	Площадь, м ²	Площадь, га
35	443 957,94	44,40	77	356 033,04	35,60
36	29 432,72	2,94	78	61 453,65	6,15
37	470 356,60	47,04	79	844 813,17	84,48
38	41 455,23	4,15	80	214 335,31	21,43
39	31 018,21	3,10	81	44 904,76	4,49
40	31 544,76	3,15	82	12 603,52	1,26
41	41 972,28	4,20	83	10 490,35	1,05
42	190 661,68	19,07	84	5 811,20	0,58
Сумма				13 895 615,55	1 389,56
Общая площадь зон затопления, примыкающих к кварталам города				1 903 862,33	190,39
Общая площадь селитебной зоны				10 944 104,58	1 094,41
Общая площадь транспортной зоны (улично-дорожная сеть и территория аэропорта)				1 602 629,05	160,26

Примечание — значения площадей округлены до двух знаков после запятой; сумма округлённых значений по столбцу «Площадь (га)» может отличаться от итога на 0,04 га.

Ниже приведены рекомендации по зонированию городских территорий и мерам защиты от ежегодных наводнений и береговой абразии.

Важнейшим этапом зонирования является определение границ зон затопления и подтопления, которое должно проводиться в соответствии с законодательством о водных ресурсах, с использованием геодезических измерений, картографических материалов, отметок характерных уровней воды и расчётных параметров, полученных на основе многолетних наблюдений. Особенно актуальна эта задача для юга страны (города Котону, Порто-Ново и Абомей-Калави), где сезонные наводнения приводят к затоплению жилых районов, разрушению инфраструктуры и ухудшению качества жизни населения [2; 18]. Для выявления этих участков применяются разновременные космические снимки Landsat; для моделирования распространения воды и прогноза наиболее уязвимых мест в случае повышения уровня водоёмов дополнительно могут привлекаться цифровые модели рельефа [19; 118].

Важное значение имеет создание буферных зон шириной не менее 50 м вокруг водных объектов, особенно в прибрежных и пойменных районах. Эти территории играют ключевую роль в снижении скорости поверхностного стока,

фильтрации загрязняющих веществ и предотвращении эрозии почвенного покрова. Например, в Котону, где озеро Нокуэ испытывает значительное антропогенное воздействие, соблюдение принятой для него буферной зоны шириной 200 м (раздел 2.3) направлено на частичную компенсацию последствий урбанизации и восстановление естественных экосистем, таких как мангровые заросли и болотистые участки [2; 18]. Кроме того, в этих зонах должны быть организованы мероприятия по рекультивации нарушенных земель, включая посадку водных растений и создание искусственных водоёмов для дренажа [78; 126].

Контролируемая классификация методом максимального правдоподобия положена в основу выделения природных ограничений при функциональном зонировании земель населённых пунктов (раздел 3.1). Для класса «зона затопления и заболоченная территория» метод максимального правдоподобия обеспечил точность 80,94 % по сравнению с 62,99 % у метода минимального расстояния (таблицы 13 и 14). Это дало возможность более точно определить участки, находящиеся в зоне повышенного риска, и скорректировать режимы их использования. Так, в границах исследуемых кварталов г. Котону выявлены участки жилой застройки, расположенные в зонах затопления, примыкающих к кварталам со стороны океана (таблица 7, рисунок 15). Для таких участков предложено изменить вид разрешённого использования, отнести их к ландшафтно-рекреационной либо охранной зоне (приложение А), с запретом капитального строительства и обеспечением минимального антропогенного давления [10; 104].

Анализ причин и последствий затопления (раздел 3.5) показывает, что урбанизация оказывает негативное влияние на гидрологический режим. Расширение портовой инфраструктуры, плотная застройка и отсутствие систем дренажа усиливают эффект застоя воды, увеличивают продолжительность наводнений и угрожают здоровью населения. Поэтому необходимо внедрять гидромелиоративные мероприятия, включающие углубление и очистку каналов, строительство дренажных систем и устройство регулируемых шлюзов для контроля уровня воды в озере Нокуэ [81].

Береговая абразия на восточном участке побережья г. Котону требует специальных мер защиты. Отступление береговой линии, расчётная скорость которого принята равной 16 м/год, связано с волновым воздействием Атлантического океана, деятельностью порта и смещением размыва за пределы участка, защищённого бунами [14; 91; 125]. В этой связи предложено: продление берегозащитных сооружений — габионов, волноломов и бун; применение мягких методов защиты берега — посадка мангровых зарослей вдоль береговой линии, способствующих закреплению песчаных масс и снижению энергии волнового воздействия; устройство буферных зон шириной не менее 100 м (таблица 8), где запрещается любая хозяйственная деятельность, кроме научно-исследовательских работ и рекреации [18].

2.2.2. Земли разведки и добычи полезных ископаемых в границах населённых пунктов

Анализ природно-экологических особенностей земель, используемых для добычи полезных ископаемых внутри черты населённых пунктов Республики Бенин, является важным этапом в системе пространственного планирования и устойчивого управления урбанизированными территориями. Добыча песка, гравия, строительных камней и других нерудных материалов на городских окраинах играет ключевую роль в обеспечении строительной отрасли сырьём, однако сопряжена с рядом серьёзных экологических последствий: деградацией почвенного покрова, снижением устойчивости склонов, загрязнением поверхностных и подземных вод, а также изменением микроклимата застроенных районов [2; 18; 37].

На территории Республики Бенин, особенно в южных и центральных районах, земли добычи полезных ископаемых располагаются в пределах городской черты и характеризуются выраженной антропогенной трансформацией ландшафтов. Это связано как с ростом спроса на местные строительные материалы, так и с ограниченностью природных ресурсов, доступных для

промышленной разработки вне городских границ. Например, в Котону, где плотность застройки достигает 80 % в ряде кварталов, активная добыча песка проводится в аллювиальных отложениях озера Нокуэ и лагуны Котону, что усиливает эрозию береговой линии и увеличивает риск сезонных наводнений [10; 104]. Подобные процессы наблюдаются и в Порто-Ново, где карьеры расположены вдоль склоновых равнин, сложенных красно-жёлтыми ферраллитными почвами, склонными к дефициту структурной устойчивости и развитию поверхностной эрозии при интенсивном выпадении осадков [18].

Исследование земель добычи полезных ископаемых выполнено на примере коммуны Каримама (Karimama). В качестве источника данных был выбран архив цифровых космических снимков программы Landsat, предоставляемый Геологической службой США (USGS). Снимки представлены в проекции UTM (Universal Transverse Mercator), зона 31N, датум WGS-84, в формате GeoTIFF; данные поставляются в виде ZIP-архива. Схема коммуны Каримама приведена на рисунке 16.



Рисунок 16 — Фрагмент схемы коммуны Каримама с жилыми районами и горнодобывающим районом Лумбу-Лумбу

Коммуна Каримама расположена на северо-востоке Республики Бенин в департаменте Алибори (Alibori). Согласно данным переписи RGPН4 (2013 г.), численность населения коммуны составляет 66 353 человека; хозяйственная деятельность населения связана с сельским хозяйством, а перспективы её изменения — с освоением железорудного месторождения Лумбу-Лумбу [19]. Район Лумбу-Лумбу, находящийся в составе коммуны, обладает крупным месторождением железа: по данным USGS ресурсы месторождения Лумбу-Лумбу оцениваются в 226 млн т, месторождения Мадекали — в 240 млн т при содержании железа 46—52 % [71]; по сообщению отраслевой прессы суммарные ресурсы двух месторождений составляют около 500 млн т руды с содержанием железа около 50 % [75]. Приведённые величины относятся к прогнозным ресурсам, оценки которых по разным источникам различаются. Освоение месторождений имеет значение для экономики страны, однако усилит антропогенное воздействие на природные комплексы и требует обоснованного подхода к пространственному планированию и экологическому зонированию.

Физико-географические условия коммуны Каримама характеризуются слабовсхолмлённым плато, сложенным метаморфическими породами докембрийского возраста — гнейсами, сланцами и кварцитами. Высоты колеблются от 100 до 400 м над уровнем моря, что создаёт благоприятные условия для развития склоновых процессов, таких как почвенная эрозия, оползни и просадочные явления, особенно после интенсивных дождей в дождевой сезон (июнь—сентябрь). Почвенный покров представлен тропическими железистыми почвами, отличающимися высокой степенью выветрелости и низкой агрохимической активностью. Растительность соответствует типу саванн с элементами вторичных лесов, которые также подвержены деградации под влиянием антропогенных факторов, включая распашку земель и горнодобывающую деятельность [2; 20].

Важной особенностью коммуны является наличие зоны разведки и добычи железной руды в районе Лумбу-Лумбу, занимающей площадь 68,00 га в границах коммуны площадью 604 100 га. Дешифрированием космических снимков

Landsat-8 OLI выделены контур зоны разведочных работ и прилегающие к ней нарушенные земли. Дешифрирование выполнено визуально, с векторизацией контуров в ArcGIS. Границы зоны разведочных работ и предлагаемой санитарно-защитной зоны установлены по результатам дешифрирования изображений Landsat-8 OLI с точностью, определяемой размером пикселя (30 м); их закрепление на местности геодезическими измерениями предусмотрено при переходе к промышленной добыче (раздел 2.4).

Вокруг зоны разведки и добычи железной руды в Лумбу-Лумбу площадью 68,00 га в работе предложена санитарно-защитная зона шириной не менее 150 м в соответствии со шкалой раздела 2.3; её площадь определяется построением буфера указанной ширины по контуру промышленной зоны средствами ГИС. Санитарно-защитная зона предназначена для снижения воздействия горнодобывающего производства — запылённости воздуха, шума и других неблагоприятных факторов — на близлежащие жилые районы и сельскохозяйственные угодья. По результатам дешифрирования на отдельных участках предлагаемой зоны уже расположена жилая застройка и ведутся временные посевы; при переходе к промышленной добыче это снизит эффективность защитных мероприятий и потребует переселения либо изменения вида использования этих участков [19].

Месторождение находится на стадии геологоразведочных работ, промышленная добыча не ведётся. Геоэкологический анализ территории позволил определить основные виды воздействия на окружающую среду, ожидаемые при переходе к промышленной добыче:

1. Деграция почвенного покрова вследствие снятия верхнего гумусового горизонта, уплотнения грунтов и формирования техногенных отвалов.

2. Изменение гидрологического режима — разрушение естественного стока, формирование временных оврагов и просадочных воронок, увеличение риска водной эрозии.

3. Загрязнение поверхностных и подземных вод продуктами выщелачивания, содержащими сульфаты железа и марганца, а также соединения других тяжёлых металлов.

4. Уничтожение растительности и животного мира — сокращение площади саванных и вторичных лесов, потеря среды обитания видов, включённых в Красный список Международного союза охраны природы (МСОП).

5. Антропогенная трансформация ландшафтов — формирование техногенных образований, таких как карьерные ямы, отвалы породы, временные водоёмы и пылевые источники, которые нарушают микроклимат и ведут к ухудшению экологической обстановки [18].

По космическим снимкам Landsat выполнено дешифрирование, позволившее выделить участки с повышенной эрозионной активностью и определить границы нарушенных земель. Включение этих данных в кадастровую базу данных ANDF (раздел 3.3) позволит оперативно обновлять сведения о состоянии горнодобывающих объектов и контролировать соблюдение режима использования земель [10; 104].

Контур зоны разведочных работ и буфер предлагаемой санитарно-защитной зоны построены средствами ГИС по результатам дешифрирования; при переходе к промышленной добыче их границы подлежат закреплению на местности межевыми знаками по результатам спутниковых геодезических измерений (раздел 2.4) с последующим внесением изменений в кадастровый план коммуны. Полученные данные легли в основу проекта карты-схемы, выполненной в программе ArcGIS, с выделением селитебной, производственной, ландшафтно-рекреационной и охранной зон.

Рассмотрен также риск затопления смежных с карьерами участков. Хотя коммуна расположена в зоне сухих саванн, в период дождевого сезона (июнь—сентябрь) возможны локальные затопления в пониженных частях ландшафта, особенно в районах, где нарушена естественная дренажная сеть. Для выделения зон затопления методикой предусмотрено дешифрирование разновременных космических изображений методом масок (раздел 2.5) с отнесением участков к

категориям риска по числу дат ряда, на которых участок выделен как затопленный (раздел 2.2.1). Наводнение 2020 г. затронуло коммуну Каримама (таблица 12); наиболее подвержены затоплению низменные участки поймы реки Нигер вдоль русла; их категория риска подлежит определению по такому ряду изображений. Эти сведения необходимо учитывать при корректировке градостроительных регламентов и планировании новых зон добычи [18].

Население района Лумбу-Лумбу (2 659 человек по переписи RGPН4) в основном занято в сельском хозяйстве, ремёслах, торговле и транспортном обслуживании. Переход к промышленной добыче может вызвать приток рабочей силы, рост неформальных поселений и обострение социально-экологической ситуации. В связи с этим предложено разработать градостроительные мероприятия, направленные на: ограничение расширения добычи вблизи жилых районов; создание санитарно-защитных зон шириной не менее 150 м вокруг карьеров; внедрение программ рекультивации нарушенных земель; строительство очистных сооружений для снижения загрязнения поверхностных вод; разработку механизмов общественного участия в принятии решений по зонированию [2; 10].

Освоение железорудного месторождения в районе Лумбу-Лумбу затрагивает не только природные комплексы, но и социально-экономическую структуру населения. Перевод месторождения из стадии геологоразведочных работ в стадию промышленной добычи повлечёт за собой перераспределение занятости в пользу добывающего сектора и развитие сопутствующей инфраструктуры, что одновременно усилит нагрузку на природные ресурсы. Ожидаемые изменения в землепользовании: сокращение площади сельскохозяйственных угодий, рост доли нарушенных земель и изменение структуры застройки. В этой связи предложено ввести контрольные параметры, такие как: допустимый объём изъятия земель из сельскохозяйственного оборота; минимальные расстояния между карьерами и жилыми районами; обязательное восстановление растительного покрова на законсервированных участках; регулярный мониторинг состояния водных объектов и почвенного покрова [19].

Особо охраняемые природные территории (ООПТ), расположенные в непосредственной близости от промышленных зон, требуют усиления мер по их защите. Территория коммуны Каримама в значительной части — по опубликованным данным, пять шестых её площади — входит в состав трансграничной биосферной резервации «W», ядром которой является национальный парк W (Parc National du W, 563 280 га, учреждён в 1954 г.), отнесённый к объектам всемирного наследия ЮНЕСКО и к водно-болотным угодьям международного значения. Помимо земель парка, в коммуне представлены открытые саванны, редкие виды деревьев и местные популяции млекопитающих. Участок Лумбу-Лумбу расположен в округе (arrondissement) Монсей, вне границ парка; в соответствии с принятой в разделе 2.3 шкалой вокруг границы парка как особо охраняемой природной территории национального значения устанавливается охранная зона шириной 500 м, в пределах которой размещение объектов добычи полезных ископаемых не допускается. Освоение железорудного месторождения, находящегося в настоящее время на стадии геологоразведочных работ, создаёт для этих экосистем прямую угрозу изъятия и фрагментации земель, которую следует учесть заблаговременно, на стадии зонирования. В этой связи разработаны предложения по расширению охранных зон и установлению режима ограниченного использования земель вокруг ООПТ [11].

Разработанная автором структура геоинформационной базы данных (раздел 3.3) предусматривает хранение этой информации в унифицированном формате для принятия решений в сфере землеустройства и экологического регулирования; доступ к базе должен быть обеспечен через национальный геопортал, чтобы органы местного самоуправления могли оперативно вносить изменения и согласовывать проекты зонирования с государственными структурами и местным населением [10; 104].

2.2.3. Земли особо охраняемых природных территорий в границах населённых пунктов

ООПТ в границах населённых пунктов Республики Бенин выполняют природоохранные и рекреационные функции, поэтому в условиях урбанизации, изменения климата и техногенной нагрузки их необходимо учитывать при функциональном зонировании. Это требует не только точного определения границ таких территорий, но и установления режима их использования с учётом геоморфологических, гидрологических и ландшафтных характеристик [11; 20].

В соответствии с декретом № 2011-394 от 28 мая 2011 г. к категории ООПТ в Республике Бенин относятся участки суши и акватории заливов, предназначенные для сохранения и восстановления естественных экосистем и поддержания биоразнообразия природных комплексов, имеющие особый юридический статус и режим охраны; их категоризация установлена в соответствии с номенклатурой МСОП [40; 41]. По различным оценкам, земли ООПТ занимают от 19 до 30 % территории страны, включая как удалённые заповедники, так и участки, находящиеся непосредственно в черте городов и посёлков [28]. Особенности таких участков являются: наличие уникальных растительных сообществ; повышенная чувствительность к антропогенному воздействию; необходимость формирования буферных зон; ограничения на хозяйственную деятельность и строительство; высокая значимость для научных исследований и экотуризма.

Расположение ООПТ в пределах населённых пунктов обуславливает специфику их функционирования. Например, в коммуне Тангьета (Tanguiéta) расположена часть национального парка Пенджари (Pendjari), который частично пересекается с городскими и сельскими поселениями. Для анализа состояния ООПТ и прилегающих земель могут использоваться разновременные космические снимки Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI (проекция UTM, зона 31N, датум WGS-84, формат GeoTIFF), позволяющие оценивать трансформацию ландшафта и изменение растительного покрова по методике, применённой в

настоящей работе к г. Бохикон (раздел 2.6) [11; 60; 128]. Для коммуны Тангьета в работе построены схема размещения ООПТ (рисунок 17) и охранная зона парка шириной 500 м (раздел 2.3); мониторинг динамики растительного покрова в границах охранной зоны отнесён к задачам ведения геоинформационной базы данных (раздел 3.3).

Особое значение имеют природные и экологические характеристики ООПТ, которые необходимо учитывать при формировании функциональных зон. Сюда относятся: гидрологические параметры водных объектов, такие как уровень подземных вод, сезонное затопление, береговая абразия; состояние растительности, включая степень фрагментации лесных массивов, мангровых зарослей и прибрежных экосистем; почвенный покров, характеризующийся разной степенью эрозии, уплотнения и загрязнения в результате смежного влияния промышленности и жилой застройки; антропогенные факторы, такие как добыча песка, выбросы в атмосферу, размещение отходов производства и потребления, а также неконтролируемое расширение урбанизированных зон [2; 18].

В работе определены границы охранных зон вокруг ООПТ, в которых устанавливается режим ограниченного или запрещённого использования земель. Законодательство Республики Бенин устанавливает общую защитную полосу водных объектов: согласно статье 5 закона № 2010-44 от 24 ноября 2010 г. «Об управлении водными ресурсами» к франк-бордам отнесена полоса шириной 25 м по обе стороны от берегов рек, озёр и лагун [50], а статья 28 закона № 93-009 от 2 июля 1993 г. «О режиме лесов» запрещает в пределах той же полосы сведение древесно-кустарниковой растительности [44]. Наряду с этой величиной законодательством установлены и иные ширины защитных полос для отдельных видов берегов (раздел 2.3). Вместе с тем установленные нормативные значения не дифференцированы ни по гидрологическому значению объекта, ни по антропогенной нагрузке и степени риска затопления прилегающих земель, что обосновывает предлагаемую шкалу ширины буферных зон (таблица 8) [20]. Такие зоны выполняют защитную функцию, препятствуя прямому контакту между

хозяйственной деятельностью и природными экосистемами, а также способствуя восстановлению нарушенных участков.

На основе проведённого анализа были выделены основные виды ООПТ, встречающиеся в составе населённых пунктов:

1. Национальные парки — крупные природные комплексы, включающие несколько типов ландшафтов и служащие местом сохранения редких видов флоры и фауны.

2. Заказники — участки, где сохраняются отдельные виды животных, птичьи колонии или редкие растительные сообщества.

3. Памятники природы — небольшие по площади, но имеющие уникальные геоморфологические или биоценотические особенности.

4. Городские парки и скверы — специально выделенные зоны в черте города, выполняющие рекреационную, оздоровительную и экологическую функции.

Приведённое деление отражает функциональный подход, принятый в настоящем исследовании. Национальная номенклатура охраняемых территорий Республики Бенин, установленная декретом № 2017-331 от 6 июля 2017 г. в соответствии с классификацией МСОП, дополнительно выделяет классифицированные леса, зоны охотничьего хозяйства, водно-болотные угодья Рамсарской конвенции, ботанические и зоологические сады, сельскохозяйственные учебные и исследовательские центры, а также священные (религиозные) леса и комплексы [40]. К водно-болотным угодьям международного значения относится и озеро Нокуэ в границах г. Котону — часть Рамсарского участка № 1018 «Нижняя долина Уэме, лагуна Порто-Ново, озеро Нокуэ» площадью 652 760 га после расширения 2019 г. [72].

Каждая из этих категорий требует своего подхода к зонированию и установлению режима использования. Например, в черте Котону расположены прибрежные зоны озера Нокуэ и лагуны Котону. Здесь выделены буферные зоны шириной до 200 м — по ширине водоохранной зоны соответствующего водного объекта (таблица 8). В границах этих зон запрещено возведение капитальных

сооружений, проводится рекультивация нарушенных земель и организуются мероприятия по восстановлению мангровых зарослей, играющих важную роль в регуляции уровня воды и снижении скорости волнового воздействия на береговую линию [18].

Особо охраняемые природные территории в черте населённых пунктов оказывают влияние на режим застройки и зонирования. В соответствии с законом № 2002-16 «О режиме фауны» [45] при наличии ООПТ в границах муниципального образования действуют следующие ограничения: запрет строительства, земляных работ и изменения растительности в границах ООПТ строгого режима (статья 16); режим буферной зоны (*zone tampon*), допускающий только виды деятельности, совместимые с целями ООПТ (статьи 11, 25); обязательная оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) для любых работ, способных нарушить целостность ООПТ (статья 50). Дополнительно в работе предлагаются запрет на предоставление новых земельных участков в границах охранной зоны и обязательное согласование проектов землеустройства с органами охраны природы.

Сведения об ограничениях использования земель в границах ООПТ и их охранных зон предусмотрены в структуре геоинформационной базы данных (раздел 3.3).

Буферные зоны ООПТ построены средствами ArcMap 10.4.1 (Analysis Tools → Proximity → Buffer); картографические материалы, объединяющие данные о границах ООПТ, охранных зон, водных объектов и видах использования земель, оформлены в ArcGIS и могут служить основой проекта схемы зонирования для администраций городов и коммун. Также предложены меры по корректировке градостроительных решений: исключение из состава жилой застройки участков, попадающих в зону ООПТ; перенос объектов инфраструктуры на безопасное расстояние; создание рекреационных зон, совместимых с режимом охраны природы; внедрение механизмов мониторинга состояния ООПТ с использованием спутниковых данных и наземных наблюдений [19].

Экологические особенности ООПТ делятся на две категории: природные и антропогенные. Первая включает в себя процессы затопления, береговой абразии и почвенной эрозии, вторая — загрязнение недр и почв в результате добычи полезных ископаемых, размещение отходов производства и потребления, деградацию растительности [18].

Коммуна Тангьета (564 750 га) расположена в департаменте Атакора на северо-западе Республики Бенин; её население составляет 74 675 человек (RGPH4, 2013 г.). Экологическими проблемами являются сельскохозяйственная экспансия, неограниченная охота (браконьерство), вырубка лесов, использование запрещённых орудий рыбной ловли и др. В границах коммуны Тангьета частично расположены национальный парк Пенджари (Pendjari) общей площадью 275 000 га и охотничьи угодья Пенджари; природоохранный комплекс Пенджари охватывает также территории коммун Матери и Керу (рисунок 17).



Рисунок 17 — Схема коммуны Тангьета с населёнными пунктами и зонами ООПТ — Национальным парком Пенджари (Pendjari) и охотничьими угодьями Пенджари

Для снижения негативного воздействия на ООПТ, расположенные на землях или граничащие с землями населённых пунктов, рассматриваются три направления деятельности.

Первым направлением является деятельность по правовому регулированию и установлению режима охраны ООПТ в пределах населённых пунктов. Режим ООПТ и их буферных зон установлен законом № 2002-16 [45] (запрет строительства и земляных работ в границах ООПТ строгого режима, ограничение деятельности в буферной зоне видами, совместимыми с целями охраны), а учёт этих ограничений в документах территориального планирования коммун предусмотрен законом № 2016-06 [48]. Это позволяет снизить антропогенное давление на природные комплексы и предотвратить дальнейшее расширение урбанизированной зоны за счёт естественных экосистем. При этом важно, чтобы сведения о местоположении земельных участков, находящихся в границах ООПТ, обязательно включались в документы, удостоверяющие права собственности или аренды, что обеспечивает юридическую прозрачность и легитимность установленных ограничений [11].

Границы водоохраных зон установлены по дифференцированной шкале раздела 2.3 (таблица 8): не менее 50 м, а для объектов с высокой антропогенной нагрузкой — 100—200 м; ширина охранной зоны ООПТ национального значения — 500 м. Например, в г. Котону такие полосы построены вокруг озера Нокуэ и лагуны Котону, где наблюдается активная деятельность портов, добыча песка и неформальная застройка. Положение этих границ уточняется по разновременным спутниковым данным Landsat средствами ГИС; методика классификации и достигнутая на территории г. Котону точность приведены в разделе 2.5.3. Метод масок обеспечивает объективное выделение водных объектов и зон затопления, а по разновременным изображениям — участков сокращения растительного покрова.

Вторым направлением является восстановление нарушенных экосистем и проведение мероприятий по охране окружающей среды, особенно в районах, где произошло уничтожение растительности и дегумификация почв. В коммуне

Тангьета (Tanguiéta), где расположен национальный парк Пенджари (Pendjari), с 2017 г. под управлением фонда African Parks проводятся работы по восстановлению природных комплексов, включая посадку деревьев местных видов (более 5 000 деревьев в 2024 г.) и мероприятия по снижению конфликтов между населением и дикими животными [66]. В период с 1990 по 2010 г. темпы потери биоразнообразия несколько замедлились, однако часть видов флоры и фауны по-прежнему остаётся под угрозой исчезновения, что связано с такими факторами, как изменение климата, потеря местообитаний животных, добыча песка в прибрежных лагунах и вырубка лесов [11; 28]. Поэтому необходимы мероприятия по: восстановлению мангровых зарослей; предотвращению эрозии склонов; контролю за состоянием поверхностных вод; ограничению хозяйственной деятельности в зоне воздействия ООПТ.

Реализация планов совместного управления, подготовленных при поддержке государственных проектов, таких как «Проект по поддержке управления лесами» и «Проект по исследованию и категорированию ООПТ», направлена на устойчивое управление этими территориями и их охрану [11]. Такие программы предусматривают не только научное сопровождение, но и общественное участие, что способствует повышению экологической культуры и легитимности принимаемых решений.

Третьим направлением является контроль за соблюдением режима охраны, который должен осуществляться через геоинформационную базу данных, структура которой разработана в исследовании (раздел 3.3); доступ к данным может быть организован через национальный геопортал [10; 104].

При формировании охранных зон учитываются природно-климатические условия и антропогенные факторы: на юге страны, где расположены крупные города, — сезонные наводнения и береговая абразия (полосы шириной до 200 м, раздел 2.3), в центральных районах — эрозия тропических железистых почв при интенсивном использовании [2; 18; 20].

2.3. Обоснование ширины буферных зон водных объектов, ООПТ и объектов добычи полезных ископаемых

Определение границ буферных зон вокруг водных объектов, ООПТ и зон добычи полезных ископаемых направлено на снижение антропогенного воздействия на природные комплексы и обеспечение устойчивого развития городской среды; точное пространственное выделение таких зон необходимо органам местного самоуправления при подготовке документов зонирования [18; 20].

В настоящей работе разграничиваются три режима охраны, различающиеся правовым основанием, объектом охраны и составом ограничений. Водоохранная зона устанавливается вдоль водных объектов и предназначена для предотвращения их загрязнения, засорения и истощения. Санитарно-защитная зона устанавливается вокруг объектов, являющихся источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека, — карьеров, промышленных предприятий, объектов размещения отходов. Охранная зона особо охраняемой природной территории устанавливается на прилегающих к ООПТ участках для снижения внешнего антропогенного воздействия. Термин «буферная зона» применяется далее как обобщающее наименование всех перечисленных полос, а в нормативных предложениях заменяется соответствующим видовым термином. Принятая в работе дифференцированная шкала ширины этих полос составляет: 50 м — минимально допустимая ширина водоохранной зоны вне зоны интенсивной застройки; 100—200 м — для водных объектов с высоким гидрологическим значением или антропогенной нагрузкой (река Куффо — 100 м, озеро Нокуэ и лагуна Котону — 200 м); 100 м — прибрежная защитная полоса берега Атлантического океана на участках абразии; не менее 150 м — санитарно-защитная зона вокруг карьеров и объектов добычи полезных ископаемых; 500 м — охранная зона особо охраняемых природных территорий национального значения (национальный парк Пенджари). Объекты, режимы охраны, факторы и принятые значения ширины сведены в таблице 8.

Обоснование принятых значений. Законодательством Республики Бенин установлены три значения ширины охранных полос: 25 м — полоса франк-бордов вдоль берегов водных объектов (раздел 2.2.3; статья 12 закона № 2018-10 [49]), 100 м — полоса морского побережья от линии наивысших приливов (статья 264 Земельного и имущественного кодекса [39]; статья 12 закона № 2018-10 [49]) и 200 м — охранный участок берегов в коммунах прибрежной зоны, включая г. Котону (статья 77 закона № 2018-10 [49]); в Генеральной схеме обустройства прибрежной зоны естественные участки г. Котону (заболоченные кварталы северной части города) указаны лишь на уровне кварталов, без картографирования, позволяющего разграничить их вдоль всей береговой линии [51]. Значения шкалы приняты кратными 25 м — 50, 100, 150 и 200 м, то есть в 2, 4, 6 и 8 раз шире полосы франк-бордов, — с увеличением кратности по мере роста гидрологического значения объекта и антропогенной нагрузки на прилегающие земли (таблица 8). Для лагуны Котону ширина 200 м соответствует наибольшей нагрузке (портовая деятельность, добыча песка, неформальная застройка) и обеспечивает размещение в полосе сооружений инженерной защиты и восстанавливаемых мангровых зарослей; для озера Нокуэ в черте г. Котону принято значение 200 м с учётом установленной статьёй 77 закона № 2018-10 [49] охранный участок берегов; поскольку естественные и освоенные участки берега по имеющимся картографическим материалам не разграничены, данное значение применяется ко всей береговой линии озера в черте города как консервативное; для реки Куффо — 100 м по её гидрологическому значению и эрозии берегов. Прибрежная защитная полоса берега океана принята шириной 100 м в соответствии со статьёй 264 Земельного и имущественного кодекса [39] и статьёй 12 закона № 2018-10 [49]; 200-метровая охранный участок статьи 77 того же закона относится к естественным участкам берега, тогда как на исследуемом участке восточнее порта прилегающие к пляжу земли отнесены планом зонирования декрета № 2024-1051 [52] к жилым прибрежным и экономической зонам (в отличие от озера Нокуэ, для которого естественные участки берега не разграничены и принято консервативное значение

200 м). При расчётной скорости абразии 16 м/год полоса шириной 100 м обеспечивает запас около шести лет, кратный принятой периодичности актуализации границ (раздел 3.8); в Генеральной схеме обустройства прибрежной зоны отмечено, что на отдельных участках ширина 100 м может быть недостаточной с учётом темпов эрозии [51], что обуславливает периодический контроль положения береговой линии. Санитарно-защитная зона шириной не менее 150 м принята как минимальная для карьеров нерудных строительных материалов; для объектов промышленной добычи руд её ширина устанавливается по результатам оценки воздействия на окружающую среду и может существенно превышать это значение. Охранная зона ООПТ национального значения шириной 500 м предложена автором: закон № 2002-16 «О режиме фауны» определяет буферную зону (zone tampon) как полосу, окаймляющую охраняемую территорию, но не устанавливает её ширины [45]; принятое значение более чем вдвое превышает наибольшую ширину водоохранной зоны шкалы (200 м) и подлежит уточнению при разработке положения об охранной зоне конкретного парка. Все принятые значения являются минимальными: если выделенная по разновременным изображениям зона затопления выходит за пределы буферной зоны, режим ограничений распространяется на всю зону затопления (раздел 2.2.1). Дифференциация ширины принята по аналогии со статьёй 65 Водного кодекса РФ [7], устанавливающей водоохранные зоны шириной 50, 100 и 200 м в зависимости от протяжённости водотока; в настоящей работе вместо протяжённости использованы гидрологическое значение объекта и антропогенная нагрузка, а уточнение значений по гидрологическим расчётам относится к внедрению.

Таблица 8 — Обоснование дифференцированной шкалы ширины буферных зон водных объектов, объектов добычи полезных ископаемых и особо охраняемых природных территорий

Объект охраны	Вид буферной зоны	Факторы, определяющие принятую ширину	Принятая ширина, м	Площадь полосы, построенной средствами ГИС, га
Водные объекты вне зоны интенсивной застройки	Водоохранная зона	Отсутствие сплошной застройки берега; необходимость фильтрации загрязняющих веществ, снижения скорости поверхностного стока и предотвращения эрозионных процессов	50 (минимально допустимая)	Определяется построением буфера по фактическому контуру водного объекта
Река Куффо (исследованный участок)	Водоохранная зона	Значение реки в гидросистеме юго-западной части страны; усиление эрозионных процессов и изменение состояния пойменных территорий в условиях изменения климата	100	78,00 (по обоим берегам исследованного участка)
Озеро Нокуэ в черте г. Котону	Водоохранная зона	Гидрологическое значение озера для региона и его уязвимость к затоплениям; добыча песка, повлёкшая уничтожение мангровых зарослей и ускорение береговой абразии; охранная полоса естественных участков берегов (статья 77 закона № 2018-10 [49])	200	Определяется построением буфера вдоль береговой линии озера
Лагуна Котону в черте г. Котону	Водоохранная зона	Высокая степень антропогенной нагрузки и сезонное затопление; необходимость сохранения экосистемы мангровых зарослей и прибрежных болот	200	169,00
Берег Атлантического океана (участок абразии восточнее порта г. Котону)	Прибрежная защитная полоса	Отступление береговой линии с расчётной скоростью 16 м/год (раздел 2.2.1); полоса шириной 100 м обеспечивает запас около шести лет при актуализации границ не реже одного раза в два года (раздел 3.8)	100	Определяется построением буфера вдоль береговой линии по изображению последней даты

Объект охраны	Вид буферной зоны	Факторы, определяющие принятую ширину	Принятая ширина, м	Площадь полосы, построенной средствами ГИС, га
Карьеры и объекты добычи полезных ископаемых (зона добычи железной руды Лумбу-Лумбу и участки добычи песка и гравия)	Санитарно-защитная зона	Загрязнение воздуха пылью и шум при работе карьеров; понижение уровня грунтовых вод на 1,2—1,5 м и вторичное заболачивание смежных территорий	не менее 150	Определяется построением буфера по контуру промышленной зоны
Особо охраняемые природные территории национального значения (национальный парк Пенджари)	Охранная зона ООПТ	Рост числа несанкционированных поселений и расширение сельскохозяйственных угодий на смежных с парком участках; деградация лесных массивов и утрата среды обитания редких видов	500	Определяется построением буфера по фактическому контуру парка

Примечание — буферные зоны построены средствами ГИС по материалам: ANDF для лагуны Котону, Министерства жизненной среды и транспорта, ответственного за устойчивое развитие, Республики Бенин (Ministère du Cadre de Vie et des Transports, chargé du Développement Durable; отчёт за 2022 г.) для озера Нокуэ; контур реки Куффо получен по результатам дешифрирования космических изображений (раздел 2.5).

Порядок определения границ буферных зон включает следующие этапы:

1. Сбор исходных данных — основой послужили разновременные космические изображения Landsat и кадастровые материалы ANDF. С использованием программного обеспечения ENVI и ArcGIS выполнено дешифрирование и векторизация, позволившие выделить участки затопления, заболоченные территории и прибрежные линии, подверженные разрушению.

2. Анализ природных и экологических характеристик — по опубликованным данным оценены гидрологическое значение водных объектов, значимость ООПТ и влияние горнодобывающей деятельности на состояние окружающей среды.

3. Учёт нормативных требований — при формировании буферных зон учтены нормативная полоса франк-борда (закон № 2010-44 [50]) и режим буферных зон ООПТ (закон № 2002-16 [45]).

4. Картографирование буферных зон — средствами ГИС созданы тематические слои буферных зон (рисунки 19—21), предназначенные для разработки проекта правил землепользования и застройки (ПЗЗ) г. Котону по аналогии с российской практикой.

5. Интеграция данных — информация предусмотрена в структуре геоинформационной базы данных (раздел 3.3).

Площади буферных зон вычислены для объектов, контур которых оцифрован в ходе исследования: для лагуны Котону (ширина 200 м, контур по материалам ANDF) — 169,00 га, для исследованного участка реки Куффо (100 м, по обоим берегам) — 78,00 га. Для озера Нокуэ (200 м, контур по отчёту Министерства жизненной среды и транспорта, ответственного за устойчивое развитие, Республики Бенин за 2022 г.), национального парка Пенджари (500 м) и зоны добычи Лумбу-Лумбу (не менее 150 м) площадь полосы определяется построением буфера по фактическому контуру объекта.

Чувствительность результата к выбору ширины полосы оценена аналитически. Площадь полосы пропорциональна её ширине:

$$S = L \cdot w, \quad (1)$$

где L — суммарная длина окаймляемой береговой линии; w — ширина полосы. Для лагуны Котону $L = 169,00 \text{ га} / 200 \text{ м} = 8,45 \text{ км}$, поэтому изменение ширины на один шаг шкалы ($\Delta w = \pm 25 \text{ м}$) меняет площадь полосы лагуны на

$$\Delta S = L \cdot \Delta w = \pm 21,13 \text{ га}, \quad (2)$$

а её долю в площади коммуны Котону (7 900 га) — в пределах 1,87—2,41 %. Относительная погрешность ширины полосы, контролируемой по изображениям Landsat, равна

$$\delta = e / w, \quad (3)$$

где $e = 15 \text{ м}$ — половина размера пикселя: для полос шириной от 100 м $\delta \leq 15 \%$, тогда как полосы 25—50 м требуют закрепления межевыми знаками (раздел 2.4). Запас времени прибрежной полосы равен

$$T = w / v, \quad (4)$$

где v — скорость абразии: при $w = 100$ м и $v = 16$ м/год $T \approx 6$ лет, при $v = 25$ м/год $T = 4$ года, то есть не менее двух циклов актуализации.

ООПТ требуют контроля за состоянием и режимом использования. В коммуне Тангьета расположен национальный парк Пенджари, где сохраняются популяции слонов, львов, буйволов и антилоп. Однако по данным дешифрирования разновременных изображений 1998—2018 гг. [65] на смежных с парком участках площадь полей, залежей и поселений увеличилась примерно на 13 % за 1998—2008 гг. и на 45 % за 2008—2018 гг. при сокращении естественной растительности, что вызвало деградацию лесных массивов и утрату среды обитания редких видов. Поэтому предложены меры совместного управления:

- установление буферных зон шириной 500 м;
- соблюдение режима использования земель в границах охранных зон ООПТ, установленного в разделе 2.2.3 [11].

Зоны добычи полезных ископаемых, особенно песка и гравия, также требуют чёткого регламента использования. В северной части Котону, где выходы аллювиальных отложений обеспечивают возможность добычи строительных материалов, наблюдается высокая степень деградации прибрежных ландшафтов. Меры по контролю за добычей строительных материалов и созданию специальных полигонов для их экологически безопасной добычи приведены в разделе 2.2.1; для законсервированных карьеров целесообразно, кроме того, установить режим охраны и рекультивации.

Границы водоохраных зон установлены по фактическим контурам затопления, выделенным по результатам дешифрирования (раздел 2.2.1), а не только по нормативным отступам от уреза воды; порядок корректировки видов разрешённого использования для попавших в них участков изложен в разделе 2.2.1 [10; 104].

Технология создания проекта буферных зон приведена на рисунке 18, построенные буферные зоны — на рисунках 19—21.



Рисунок 18 — Технология создания проекта буферных зон

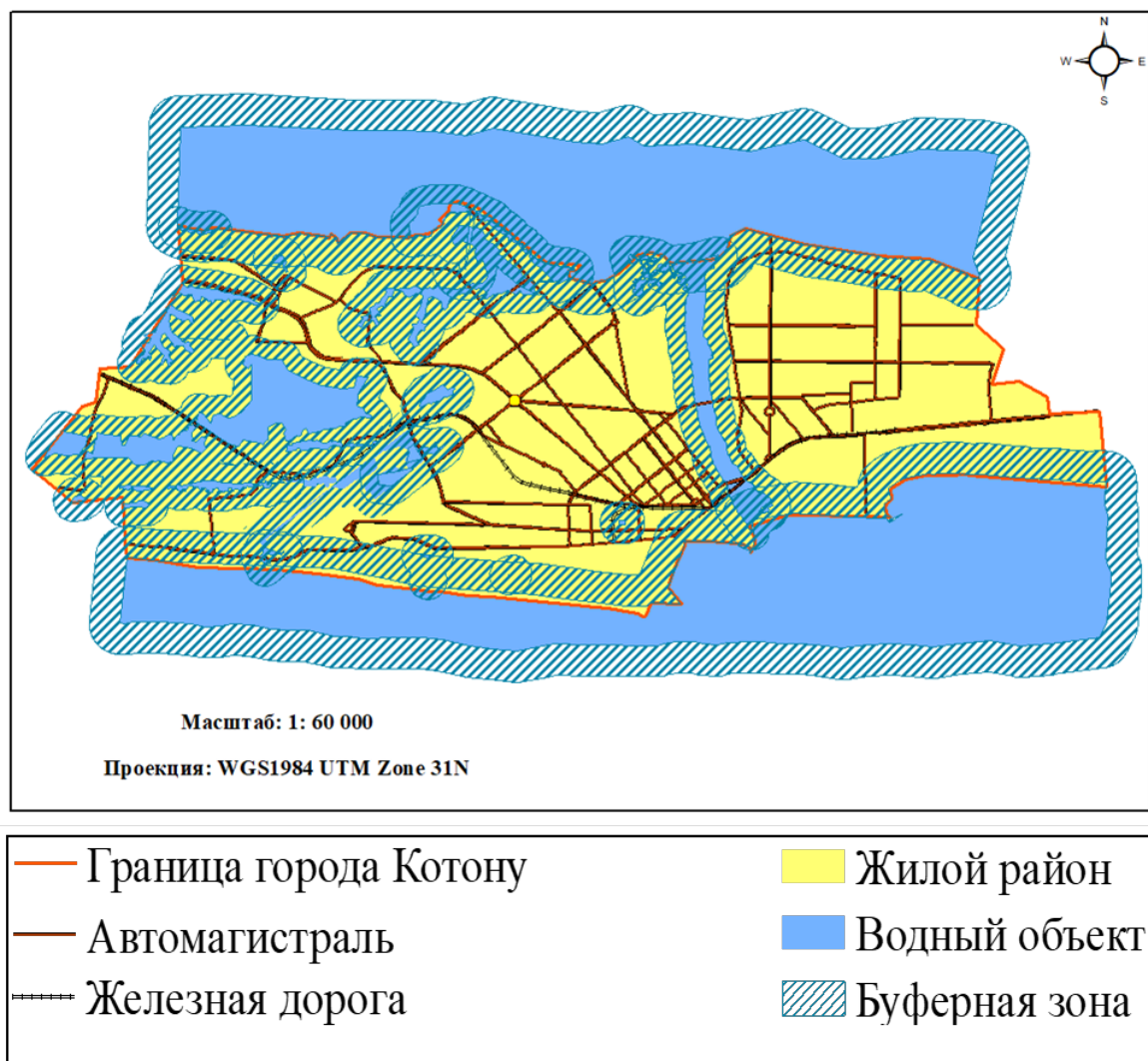


Рисунок 19 — Буферные зоны земель, находящихся в водоохранных зонах и прибрежных полосах вдоль берега океана, рек, озёр и других водных объектов (схема; ширина полос — по таблице 8)

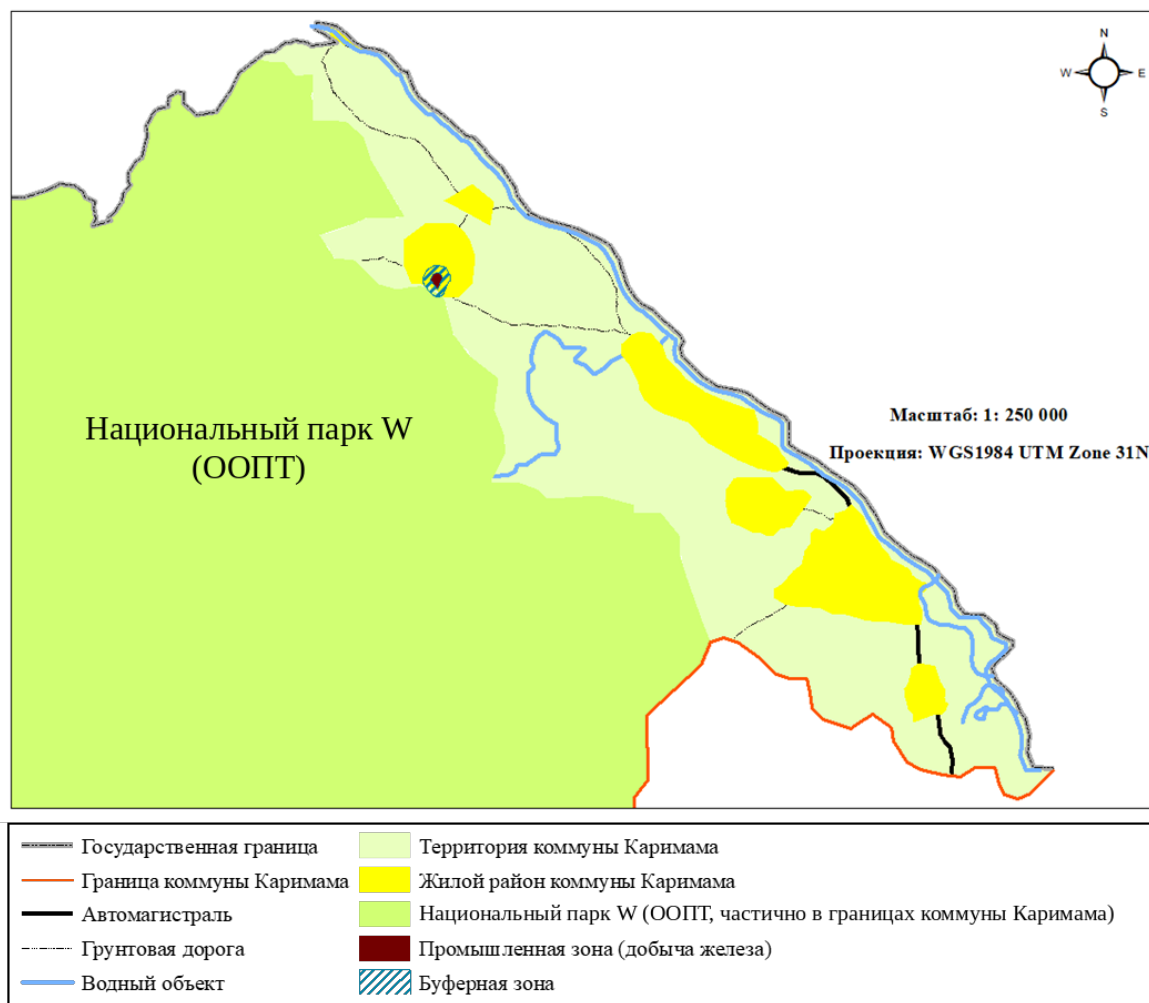


Рисунок 20 — Буферные зоны земель промышленности, разведки и добычи полезных ископаемых

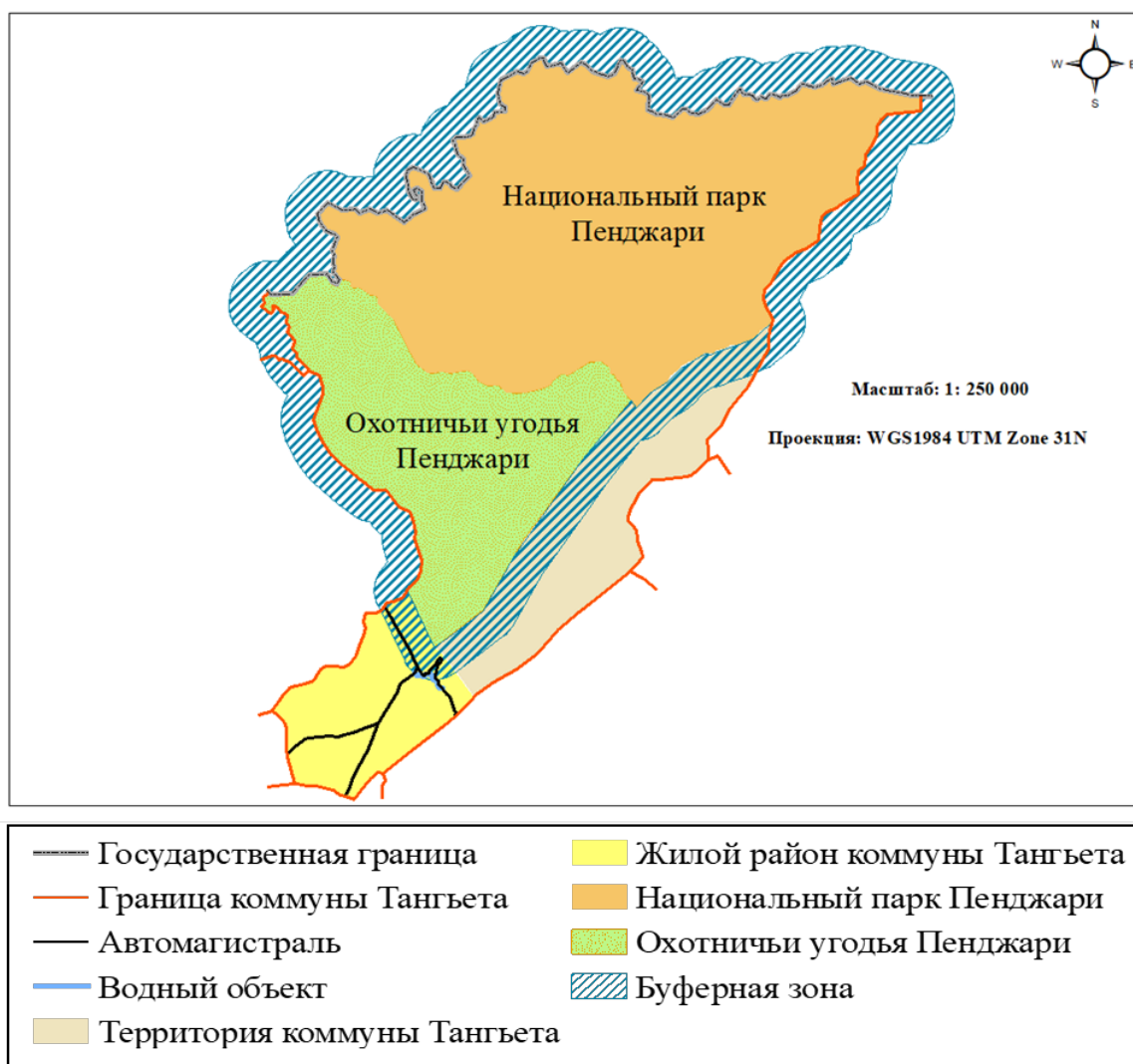


Рисунок 21 — Буферные зоны земель ООПТ

2.4. Геодезическое обеспечение межевания при зонировании земель населённых пунктов

Геодезическое обеспечение межевания позволяет закреплять границы территориальных зон, обеспечивать юридическую достоверность кадастровых данных и минимизировать конфликты землепользования. Для этого применяются наземные и спутниковые (GNSS) геодезические измерения, результаты которых интегрируются с данными ДЗЗ при соблюдении нормативно-правовой базы, регулирующей вопросы установления границ и использования земель.

В рамках исследования были рассмотрены методы геодезических измерений, позволяющие определять координаты поворотных точек контуров

населённых пунктов, устанавливать межевые знаки и создавать достоверные межевые планы для последующего внесения информации в государственный кадастр недвижимости Республики Бенин. Процесс включает несколько этапов: сбор исходных данных (кадастровые карты, правоустанавливающие документы, космические изображения), полевые работы с использованием GNSS-оборудования, камеральную обработку результатов и юридическое оформление границ. Особое внимание уделено требованиям к точности измерений — применение двухчастотных GNSS-приёмников в режиме RTK обеспечивает по своим техническим характеристикам среднюю квадратическую погрешность положения точек не более 0,05 м, что соответствует нормативному ориентиру, принятому в настоящем разделе [12; 54].

Контуры зон затопления, подлежащие геодезическому закреплению, получены методом масок и контролируемой классификацией космических изображений Landsat (раздел 2.5).

Структура геоинформационной базы данных, объединяющей сведения о границах функциональных зон, буферных зонах, участках добычи строительных материалов и состоянии ООПТ, приведена в разделе 3.3; тематические слои оформлены в ArcGIS (рисунки 19—21).

На основе проведённого анализа определена последовательность работ по зонированию, учитывающая природные риски и обеспечивающая их интеграцию в кадастровую систему: сбор и анализ исходных данных — включает кадастровые карты, космические снимки, данные о правах на землю и параметрах застройки; обработка геопространственных данных — проводится с помощью программного обеспечения ENVI и ArcGIS, в том числе дешифрирование с использованием метода максимального правдоподобия и технологии масок; выделение функциональных зон — определение селитебных, производственных, транспортных, рекреационных и охранных зон с учётом природных условий и антропогенной нагрузки; установление буферных зон — шириной не менее 50 м вокруг водных объектов, до 200 м в районах с высоким риском затопления и 500 м вблизи ООПТ национального значения; юридическое оформление границ

— согласование с владельцами смежных участков, общественные слушания, регистрация в государственном кадастре недвижимости.

Эта последовательность реализована на территории г. Котону, где сопоставление результатов дешифрирования с действующими кадастровыми материалами показало необходимость уточнения границ зон затопления; для их выделения принят метод максимального правдоподобия, точность которого по данному классу составляет 80,94 % по сравнению с 62,99 % у метода минимального расстояния (таблицы 13 и 14). Особенно это касается районов, примыкающих к озеру Нокуэ и лагуне Котону, где наблюдается ежегодное затопление и активная береговая абразия. Геодезическое закрепление уточнённых границ с нормативной точностью ($Mt \leq 0,10$ м; требования к точности приведены ниже) предусмотрено на этапе внедрения (таблица 20, этап 4.4) и позволит использовать их как основу для разработки проектов правил землепользования и застройки (ПЗЗ) и корректировки градостроительных регламентов [56].

Государственная геодезическая сеть I класса Республики Бенин (RGB — Réseau Géodésique du Bénin) включает 60 пунктов (RGB101—RGB160), равномерно распределённых по территории страны (рисунок 22); она служит опорой для спутниковых измерений при межевании.

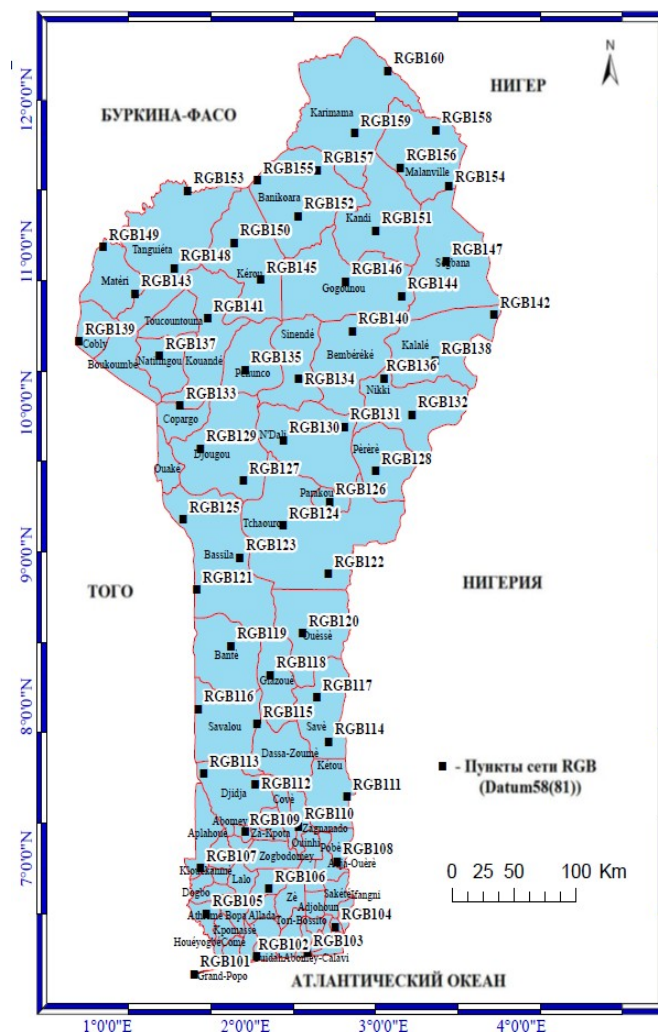


Рисунок 22 — Схема расположения пунктов государственной геодезической сети I класса Республики Бенин (RGB — Réseau Géodésique du Bénin) [12]

Для геодезического обоснования межевых работ и зонирования территорий населённых пунктов применяются теодолиты, электронные геодезические инструменты (тахеометры и др.), а также GNSS-приёмники. При съёмке создаются планы земельных участков (рисунок 23) и заполняются ведомости вычисления координат нивелирных, теодолитных и иных ходов.



Рисунок 23 — План земельных участков в квартале г. Котону (кадастровый план ANDF, исходный масштаб 1:1 500)

В Республике Бенин проведение работ по межеванию земельных участков в населённых пунктах регулируется рядом нормативно-правовых актов и требует строгого соблюдения процедур государственного контроля. Для получения разрешения на межевание необходимо предоставить определённый пакет документов, который обеспечивает юридическую прозрачность процесса, подтверждает правообладание землёй и гарантирует соответствие проектов застройки действующим градостроительным нормам [12].

Согласно межведомственному приказу № 38 от 12 мая 2015 г. (Arrêté interministériel n° 38 du 12 mai 2015), регулирующему минимальные требования к операциям по разбивке территории и консолидации земель в городской среде, заявитель представляет: заявление на бланке администрации; свидетельство о праве собственности на земельный участок (государственное свидетельство о регистрации права либо традиционный сертификат местной администрации); градостроительный сертификат (certificat d'urbanisme) с указанием видов разрешённого использования и ограничений, включая режим ООПТ, водоохранных зон и зон добычи полезных ископаемых; план землевладения масштаба 1:5 000; материалы топографической съёмки, план обустройства территории и план инфраструктуры масштаба 1:2 000; проект планировки территории — при межевании в составе более крупного проекта развития

населённого пункта; разрешение ANDF как центрального органа ведения государственного кадастра [46].

Схема администрирования картографо-геодезической и кадастровой систем в Республике Бенин приведена на рисунке 24.



Рисунок 24 — Схема администрирования картографо-геодезической и кадастровой систем в Республике Бенин

Инструментальные геодезические работы позволяют определять границы населённых пунктов, территориальных зон, земельных участков и объектов недвижимости в Республике Бенин при ведении реестров городских и сельских земель. Правовую основу геодезического обеспечения составляют Земельный и имущественный кодекс [39], межведомственный приказ № 38 от 12 мая 2015 г. [46] и требования к точности, принятые ниже [12].

Требования к точности геодезического обеспечения. Земельный и имущественный кодекс Республики Бенин не устанавливает числовых допусков на среднюю квадратическую погрешность положения характерных точек границ

земельных участков, поэтому в качестве нормативного ориентира принят приказ Росреестра от 23 октября 2020 г. № П/0393, устанавливающий предельную среднюю квадратическую погрешность M_t : для земель населённых пунктов — 0,10 м, для земель промышленности и специального назначения — 0,50 м, для земель особо охраняемых территорий — 2,50 м, для земель водного фонда — 5,00 м [54]. Применяемая в Республике Бенин спутниковая аппаратура GNSS — одночастотный приёмник Trimble R3 в статическом режиме с последующей камеральной обработкой при длине базовых линий не более 10—15 км и двухчастотные приёмники в режиме RTK — обеспечивает по паспортным характеристикам среднюю квадратическую погрешность положения межевых знаков порядка $\pm 0,05$ м. Это значение удовлетворяет наиболее строгому из перечисленных требований — $M_t \leq 0,10$ м для земель населённых пунктов — с двукратным запасом и, следовательно, удовлетворяет требованиям для всех категорий земель, выделяемых в настоящей работе.

Расхождение между границами, закрепляемыми геодезически, и контурами, полученными по космическим изображениям, определяется пространственным разрешением изображений и составляет величину порядка половины размера пикселя (15 м для Landsat); точность геодезического обеспечения, таким образом, на два порядка выше точности контурного дешифрирования, поэтому в предлагаемой методике геодезические измерения выполняют функцию закрепления и уточнения границ, установленных по космическим изображениям, а не альтернативного источника тех же данных. Для Республики Бенин целесообразно закрепить аналогичный допуск ($M_t \leq 0,10$ м для земель населённых пунктов) национальным нормативом, что устранил выявленный пробел Земельного и имущественного кодекса (таблица 4).

2.5. Геоинформационный метод масок и контролируемая классификация космических изображений в мониторинге развития населённых пунктов

Геоинформационные системы (ГИС) и методы ДЗЗ применяются в управлении урбанизированными территориями в условиях антропогенной нагрузки, климатической изменчивости и сезонных природных рисков. В настоящем исследовании метод масок используется как инструмент контролируемой классификации землепользования с целью выявления функциональных зон, зон затопления и заболоченных территорий; границы участков добычи полезных ископаемых и буферных зон вокруг ООПТ строятся средствами ГИС по контурам объектов (раздел 2.3).

Метод масок представляет собой технологию, основанную на создании бинарной матрицы, где пиксели изображения разделяются на два состояния: «объект» и «не объект». Например, для выделения застроенных зон применяется бинарная маска, где значение 1 соответствует застройке, а значение 0 — другим типам землепользования (леса, болота, водоёмы, открытая почва и т. д.). Аналогичный принцип используется при анализе водных объектов, где значения маски позволяют исключать акватории из расчётов или, наоборот, фокусировать внимание на участках суши, подверженных периодическим наводнениям [10; 104]. Такая технология обеспечивает возможность создания тематических карт, отражающих не только текущее состояние территории, но и пространственно-временную динамику её изменения.

Одним из основных этапов применения метода масок стало определение порогового значения модифицированного водного индекса MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index). В качестве порога для выделения водных поверхностей принято значение $MNDWI = 0,30$, при котором визуально отмечено наилучшее соответствие между автоматически выделенными контурами и опорными контурами постоянных акваторий, полученными визуальным дешифрированием цветowych синтезов. Порядок определения порога и результаты его проверки изложены в разделе 2.5.2 [2; 20].

Основным алгоритмом классификации принят метод максимального правдоподобия; его сопоставление с методом минимального расстояния по матрицам ошибок приведено в разделе 2.5.3 (таблицы 13 и 14).

Применение метода масок позволило получить контуры зон затопления, которые в действующих кадастровых материалах отсутствуют. На основе анализа спектральных индексов MNDWI и NDBI (Normalized Difference Built-up Index) создана маска застроенности, позволившая отделить урбанизированные районы от естественных экосистем и выделить участки, обводнённые даже в сухой сезон. Полученные контуры дополняют действующие кадастровые материалы пространственной информацией, необходимой для учёта ограничений использования земель в зонах, подверженных затоплению.

Кроме того, метод масок нашёл применение при мониторинге развития населённых пунктов, особенно в коммунах с высоким темпом урбанизации. В работе были проанализированы данные за период с 1992 по 2024 г., включая космические снимки Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI (таблицы 15 и 17), что позволило проследить динамику расширения городских границ, изменения структуры застройки и антропогенное воздействие на природные комплексы. Так, в границах исследуемого фрагмента г. Котону площадью 32 720,13 га площадь застроенной территории увеличилась с 6 430,41 га в 2002 г. до 9 291,42 га в 2024 г., то есть на 44,49 % (таблица 18).

2.5.1. Спектральные характеристики космических систем Landsat-5, Landsat-7 и Landsat-8

Мультиспектральные снимки позволяют использовать различные варианты цветового синтеза для визуального и автоматизированного дешифрирования объектов земной поверхности [63]. Выбор данных Landsat обусловлен наличием открытого многолетнего архива, позволяющего сформировать для Республики Бенин сопоставимый ряд изображений одного сезона съёмки с единым пространственным разрешением 30 м за исследуемый период. Данные Sentinel-2 с

пространственным разрешением 10 м доступны только для более поздней части рассматриваемого периода (с 2015 г.) и поэтому не обеспечивают сопоставимости со всеми исходными датами исследования [94].

Спутник Landsat-5 (запущен 1 марта 1984 г.), сенсор ТМ (Thematic Mapper), имеет 7 каналов: 6 с разрешением 30 м/пикс в видимом и ближнем инфракрасном (ИК; каналы 1—4) и среднем ИК (каналы 5, 7) диапазонах и один канал (6) с разрешением 120 м/пикс в тепловом диапазоне [63].

Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-5 ТМ приведены в таблице 9.

Таблица 9 — Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-5 ТМ

Landsat-5	
Спектральный канал	Длина волн, мкм
1 — Синий (Blue)	0,45—0,52
2 — Зелёный (Green)	0,52—0,60
3 — Красный (Red)	0,63—0,69
4 — Ближний ИК (NIR, Near Infrared)	0,76—0,90
5 — Средний ИК (SWIR 1, Short-Wave Infrared)	1,55—1,75
6 — Тепловой (Thermal IR)	10,40—12,50
7 — Средний ИК (SWIR 2, Short-Wave Infrared)	2,08—2,35

Спутник Landsat-7 (запущен 15 апреля 1999 г.), сенсор ЕТМ+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Имеет 8 каналов, из них 6 с разрешением 30 м/пикс в видимом и ближнем ИК (каналы 1—4), среднем ИК (каналы 5, 7), один канал (6) с разрешением 60 м/пикс в тепловом диапазоне, а также панхроматический канал (8) с разрешением 15 м/пикс [63]. Следует учитывать, что 31 мая 2003 г. на спутнике Landsat-7 вышел из строя корректор линий сканирования (SLC), вследствие чего снимки, полученные после указанной даты, содержат клиновидные пропуски строк. В настоящей работе к таким снимкам относятся изображения за декабрь 2010 г. (таблица 17) и декабрь 2012 г. (таблица 15); до классификации пропуски строк на них заполнены по другим изображениям Landsat того же сухого сезона, полученным в близкие даты. Приведённые для этих двух дат площади отдельных классов (таблицы 16 и 18) содержат

обусловленную заполнением дополнительную погрешность. Основные количественные выводы о динамике получены сопоставлением крайних дат рядов — 1992 и 2024 гг. для г. Бохикон и 2002 и 2024 гг. для г. Котону, — изображения которых клиновидных пропусков строк не содержат; оценки, относящиеся к промежуточным датам 2010 и 2012 гг., приводятся как ориентировочные.

Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-7 ETM+ приведены в таблице 10.

Таблица 10 — Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-7 ETM+

Landsat-7	
Спектральный канал	Длина волн, мкм
1 — Синий (Blue)	0,45—0,52
2 — Зелёный (Green)	0,52—0,60
3 — Красный (Red)	0,63—0,69
4 — Ближний ИК (NIR, Near Infrared)	0,77—0,90
5 — Средний ИК (SWIR 1, Short-Wave Infrared)	1,55—1,75
6 — Тепловой (Thermal IR)	10,40—12,50
7 — Средний ИК (SWIR 2, Short-Wave Infrared)	2,09—2,35
8 — Панхроматический (15 м/пикс)	0,52—0,90

Спутник Landsat-8 (запущен 11 февраля 2013 г.), сенсоры OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal Infrared Sensor). Имеет 11 каналов, из них 8 с разрешением 30 м/пикс в видимом, ближнем ИК (каналы 1—5) и среднем ИК (каналы 6, 7, 9), 2 канала (10, 11) с разрешением 100 м/пикс в тепловом диапазоне, а также панхроматический канал (8) с разрешением 15 м/пикс.

Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-8 приведены в таблице 11.

Таблица 11 — Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-8

Landsat-8	
Спектральный канал	Длина волн, мкм
Диапазоны OLI (Operational Land Imager)	
1 — Coastal/Aerosol	0,433—0,453
2 — Синий (Blue)	0,45—0,515
3 — Зелёный (Green)	0,525—0,60
4 — Красный (Red)	0,63—0,68
5 — Ближний ИК (NIR)	0,845—0,885
6 — Средний ИК (SWIR 1)	1,56—1,66
7 — Средний ИК (SWIR 2)	2,10—2,30
8 — Панхроматический	0,50—0,68
9 — Cirrus	1,36—1,38
Диапазоны TIRS (Thermal Infrared Sensor)	
10 — Тепловой инфракрасный (Thermal IR 1)	10,60—11,19
11 — Тепловой инфракрасный (Thermal IR 2)	11,50—12,51

2.5.2. Исследуемая территория, расчёт индексных изображений MNDWI и NDBI и формирование масок

В качестве примера для исследования территории был выбран город Котону Республики Бенин. Город Котону находится на береговой линии, которая протянулась от озера Нокуэ (Nokoué) до Атлантического океана и сложена аллювиальными песками. Территория города разделена каналом «лагуна Котону», сооружённым в 1885 г. и связывающим озеро Нокуэ с океаном. Связь между двумя частями города осуществляется посредством трёх мостов. В границах г. Котону расположены южная часть озера Нокуэ — крупнейшего водоёма страны — и несколько водоёмов, представляющих собой водохранилища. В дождевой сезон город подвержен наводнениям (раздел 3.5). Строительство порта вызвало береговую абразию на побережье восточнее него со скоростью до 16 м/год в

1963—2005 гг. [141]. Территория выбрана в качестве примера, поскольку содержит различные типы застройки, объекты инфраструктуры и водные объекты, что позволяет проследить изменения за рассматриваемый период. Наиболее тяжёлым последствием наводнений являются человеческие жертвы и значительное число пострадавших (таблица 12) [95; 109], что определяет необходимость актуальной системы зонирования.

Площадь коммуны Котону в административных границах составляет 79 км² (7 900 га). Исследуемый фрагмент, охваченный классификацией космических изображений, имеет площадь 32 720,13 га (327,20 км²) и включает территорию г. Котону, части коммун Со-Ава, Абомей-Калави, Агеге и Семе-Поджи, акваторию озера Нокуэ, лагуну Котону и участок Атлантического океана; поэтому площадь фрагмента превышает площадь коммуны Котону.

Таблица 12 — Крупные наводнения в населённых пунктах Республики Бенин (1985—2020 гг.)

Год	Затронутые (пострадавшие) департаменты	Последствия наводнений
1985	Моно, Зу, Боргу, Алибори, Уэме, Атлантический	Значительный ущерб был нанесён 43 муниципалитетам, 103 районам, 190 деревням и городам, причём больше всего пострадал департамент Моно. 375 000 человек пострадали, а 61 человек пропал без вести. Были разрушены 11 600 домов, 651 школа, 2 704 км дорог и 201 мост; уничтожены 17 412 га посевов и 7 937 тонн зерна; погибла 5 421 голова скота.
1995	Боргу, Алибори	Наводнения в данных департаментах были вызваны проливными дождями. Департамент Боргу пострадал больше всего: 4 600 домов были разрушены, в результате чего 20 000 человек остались без крова. Было затоплено 19 000 га сельскохозяйственных угодий, а весь урожай был уничтожен. Отмечены также значительные потери скота и разрушения дорожной инфраструктуры.
2005	Литораль	Повал деревьев, разрушение нескольких домов и затопление значительного числа районов.
2010	Все департаменты, 55 из 77 коммун (муниципальных районов) страны	46 погибших, 680 000 пострадавших, из которых 150 000 стали бездомными; более 55 000 домов были повреждены, 455 школ и 92 медицинских центра частично или полностью разрушены.
2015	Котону	Несколько домов повреждены, затоплены улицы и автомагистрали.

Год	Затронутые (пострадавшие) департаменты	Последствия наводнений
2020	Коммуны Канди, Каримама и Маланвиль в департаменте Алибори	Гражданская защита Бенина сообщает, что около 7 000 человек были переселены в результате наводнений в коммунах Канди, Каримама и Маланвиль в департаменте Алибори на северо-востоке Бенина.

В Республике Бенин при крупномасштабном картографировании используется Универсальная поперечная проекция Меркатора (UTM, от англ. Universal Transverse Mercator). Это система картографических проекций, в которой поверхность Земли разделена на 60 вытянутых в меридиональном направлении зон шириной 6 градусов. Рассматривается зона 31N со следующими атрибутами: геодезическая система координат — WGS-84; датум — Мировая геодезическая система 1984 (WGS-84); эллипсоид — WGS-84. Для проведения тематической обработки космического снимка и последующего мониторинга населённых пунктов разработан алгоритм применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий при зонировании (рисунок 25), включающий три блока: предварительную обработку изображений, автоматизированную тематическую обработку с формированием масок и контролируемой классификацией, сравнение методов по матрицам ошибок; его продолжение — мониторинг изменений по разновременным изображениям — представлено на рисунке 34. Учёт береговой абразии в алгоритме обеспечивается выделением береговой линии по маске водных объектов изображения последней даты ряда, по которой строится прибрежная защитная полоса шириной 100 м (раздел 2.3, таблица 8), а периодичность её актуализации определяется по скорости отступления берега (раздел 3.8).

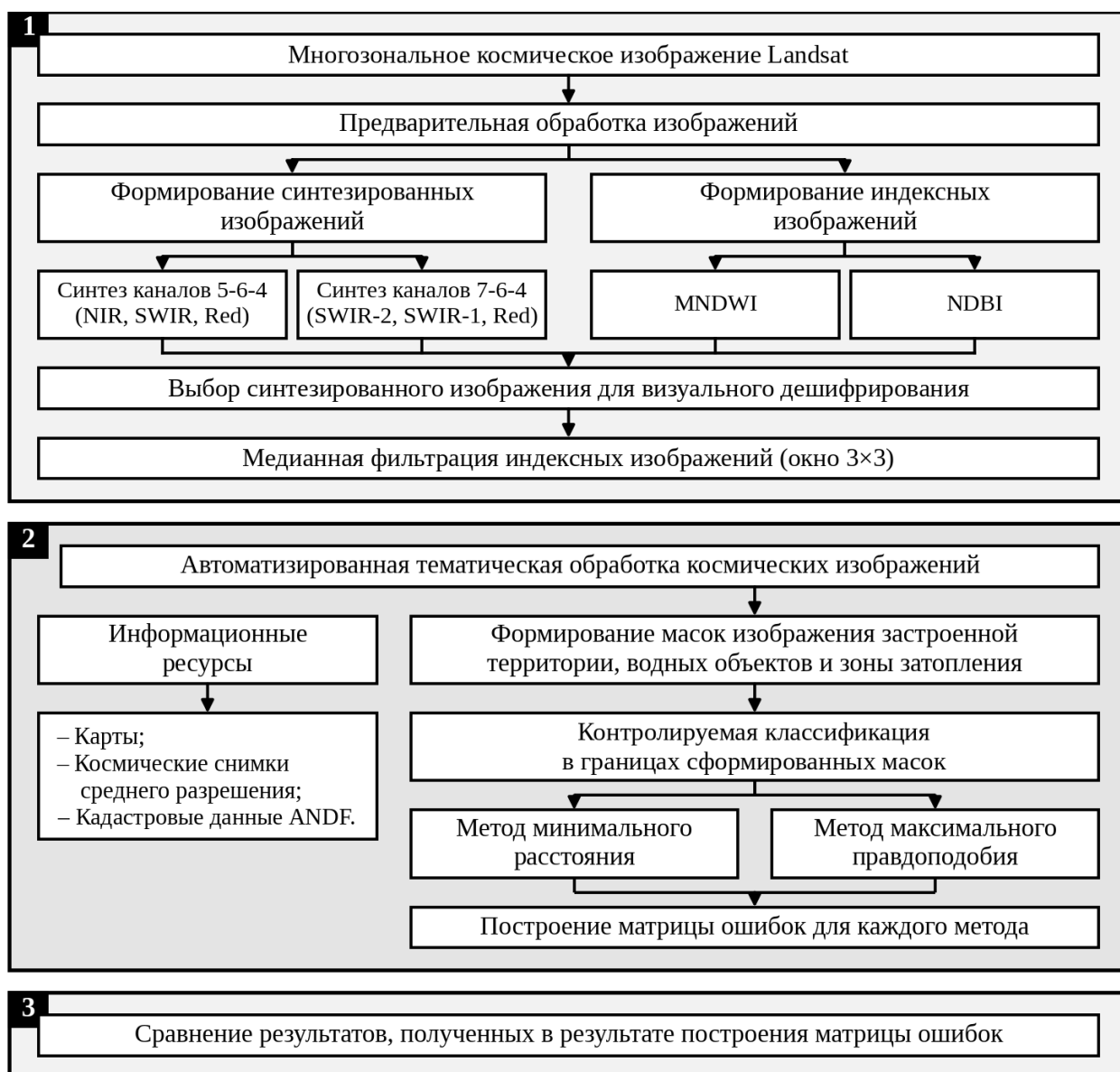
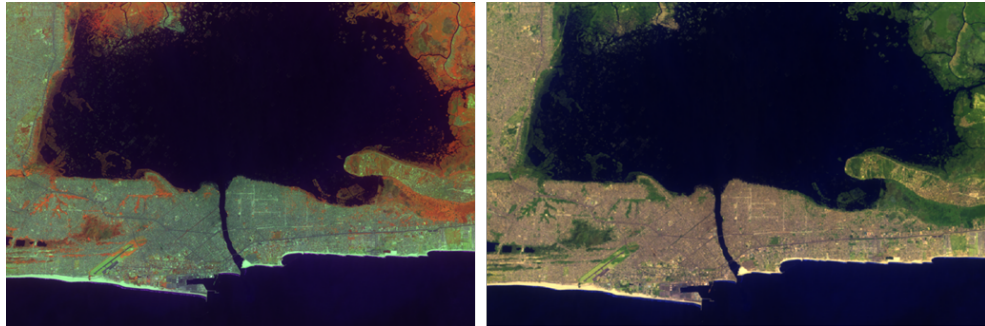


Рисунок 25 — Алгоритм применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий при зонировании населённых пунктов: анализ, сравнение и выбор метода классификации космических изображений

В блоке «Информационные ресурсы» (рисунок 25) суммируются входные данные: топографические карты масштаба 1:5 000—1:10 000, кадастровые и картографические материалы, векторные кадастровые планы.

Топографические карты использовались для геопривязки и сопоставления с разновременными спутниковыми данными. Кадастровые планы позволили идентифицировать категорию земель и связанные с ними правовые режимы, что учитывалось при формировании итоговой модели зонирования.

В процессе дешифрирования космических снимков выполняется подбор и синтезирование изображений с целью визуального выделения границ и построения масок застроенных территорий и водных объектов. На рисунке 26 представлены варианты синтезированных изображений, отражающие исходное состояние территории.



а

б

Рисунок 26 — Синтезированное изображение Landsat-8 OLI (г. Котону, сухой сезон): а) синтез 5:6:4; б) синтез 7:6:4

Для анализа использованы каналы видимого, ближнего и среднего (коротковолнового) инфракрасного диапазонов: для Landsat-8 OLI — каналы 2—7, для Landsat-5 TM и Landsat-7 ETM+ — каналы 1—5 и 7. Используются изображения уровня обработки Level-1 архива USGS. Индексные изображения MNDWI (модифицированный нормализованный разностный водный индекс) и NDBI (нормализованный разностный индекс застроенности) рассчитаны после радиометрической калибровки изображений (Radiometric Calibration, ENVI) по коэффициентам файла метаданных MTL как нормализованные разности [140; 143]; нормализация разностей и выбор безоблачных изображений одного сезона снижают влияние различий атмосферных условий и сенсоров на значения индексов, а единое пороговое значение проверено по опорным контурам постоянных акваторий для каждой даты ряда (раздел 2.5.2): площадь водных объектов на датах 2002, 2017 и 2024 гг. практически постоянна (17 021—17 250 га, таблица 18). Для подавления импульсного шума к индексным изображениям перед пороговым выделением масок применена медианная фильтрация с окном 3×3. Переход к продуктам поверхностной отражательной

способности (Level-2) при продолжении ряда наблюдений отнесён к перспективам работы (заключение). Цветовые синтезы 5:6:4 и 7:6:4 (рисунок 26) используются при этом только для визуального дешифрирования и в расчёте индексов не участвуют.

Под названием NDWI в 1996 г. были предложены два различных индекса. Индекс Б.-Ц. Гао, рассчитываемый по ближнему и коротковолновому инфракрасным каналам, характеризует влагосодержание растительного покрова и для выделения открытых водных поверхностей применяться не может [97]. Индекс С. МакФитерса, рассчитываемый по зелёному и ближнему инфракрасному каналам, предназначен именно для выделения открытых водных поверхностей. В настоящем исследовании использован индекс MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), предложенный Х. Сюем как модификация индекса МакФитерса [140], в которой ближний инфракрасный канал заменён средним (коротковолновым): такая замена усиливает контраст водной поверхности и подавляет ложные срабатывания на застроенных территориях, что принципиально важно для плотно застроенного города Котону. К водной поверхности отнесены пиксели со значением индекса выше 0,30; для застроенных территорий, открытых грунтов и растительности значения индекса отрицательны либо не превышают указанного порога. Пороговое значение 0,30 определено экспериментально по опорным контурам, а выделенные области дополнительно проверены визуально и по кадастровым материалам (раздел 2.5.3). Индекс MNDWI вычисляется по формуле:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR}), \quad (5)$$

где Green и SWIR — значения спектральной яркости в зелёном и среднем (коротковолновом) инфракрасном каналах соответственно (для Landsat-8 OLI — каналы 3 и 6, для Landsat-5 TM и Landsat-7 ETM+ — каналы 2 и 5).

Индекс NDBI предназначен для выделения застроенных территорий. Он основан на том, что застроенные и открытые грунтовые поверхности отражают излучение в средней (коротковолновой) инфракрасной зоне спектра сильнее, чем в ближней инфракрасной, тогда как для растительности характерно обратное

соотношение [3; 25; 55; 107; 119; 143]. Положительные значения индекса соответствуют застроенным территориям. Индекс NDBI вычисляется по следующей формуле:

$$\text{NDBI} = (\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR}), \quad (6)$$

где SWIR и NIR — значения спектральной яркости в среднем (коротковолновом) и ближнем инфракрасных каналах соответственно (для Landsat-8 OLI — каналы 6 и 5, для Landsat-5 TM и Landsat-7 ETM+ — каналы 5 и 4).

Для выделения зон затопления применён метод масок, основанный на расчёте индекса MNDWI и визуальном анализе [17]: по индексным изображениям (рисунок 27) при пороге $\text{MNDWI} = 0,30$ выделена водная поверхность, а выявленные области проверены по кадастровым материалам, хронологии наводнений (таблица 12) и результатам рекогносцировочного обследования территории (2019—2020 гг.).

Обоснование порогового значения индекса. Теоретической границей раздела «вода — суша» для индекса MNDWI является нулевое значение [140]; на практике порог уточняется применительно к конкретной сцене, поскольку зависит от мутности воды, глубины, содержания взвеси и доли застройки на прилегающих берегах. В настоящей работе порог определён путём последовательного сопоставления результатов автоматического выделения водной поверхности с опорными контурами постоянных акваторий, выделенными по изображениям в цветовых синтезах (рисунок 26), — лагуны Котону и южной части озера Нокуэ, — положение которых за период наблюдений не изменилось; при визуальном сопоставлении наилучшее соответствие с этими границами отмечено при значении 0,30. Дополнительным контролем согласованности результатов служит близость площади постоянных водных объектов, выделенных с использованием данного порога на снимках 2002, 2017 и 2024 гг.: расхождение между минимальным и максимальным значениями не превышает 1,4 % (таблица 18). Значение 0,30 принято единым для всех разновременных изображений, что

является обязательным условием корректности сопоставления результатов за разные годы.

Чувствительность результата к выбору порога оценена геометрически. Изменение порога смещает выделяемую границу воды на величину, кратную размеру пикселя. Площадь зоны затопления в границах исследуемого фрагмента г. Котону в 2024 г. составляет 2 575,89 га; периметр контура такой площади не может быть меньше периметра равновеликого круга, то есть 17 992 м. Следовательно, смещение границы на один пиксель Landsat (30 м) изменяет площадь зоны затопления не менее чем на 53,97 га, или на 2,10 %, а для реального, существенно менее компактного контура — сильнее. Отсюда следует, что пороговое значение индекса подлежит обязательной верификации по наземным данным, а результаты, полученные при различных порогах, сопоставлению не подлежат.

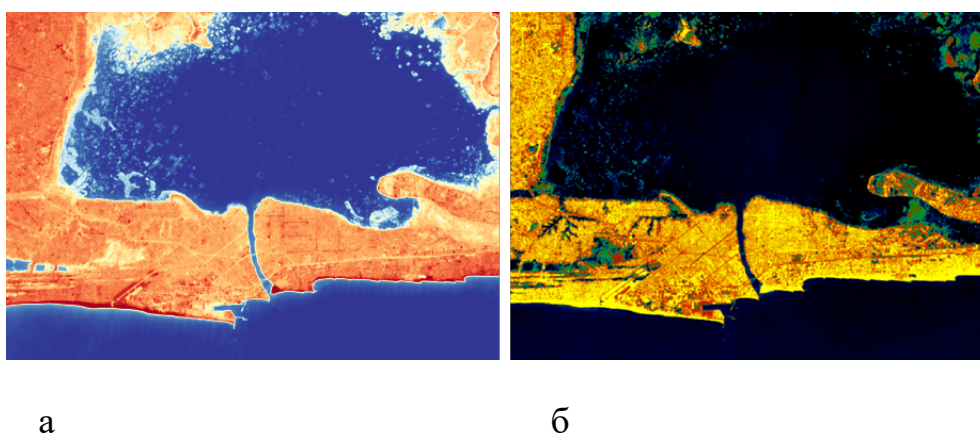


Рисунок 27 — Индексные изображения Landsat-8 OLI (г. Котону, сухой сезон) в цветной палитре: а) MNDWI; б) NDBI

Из представленных синтезированных космических снимков необходимо выбрать наиболее подходящий для последующей обработки. Критерием выбора изображения служит возможность визуально различить на снимке застроенные участки. Дешифрирование застроенной территории, водных объектов и зоны затопления осуществляется в пределах, определённых методом масок, соответствующих участкам застроенных территорий. Создание масок может выполняться в интерактивном режиме и с помощью способа, основанного на

пороговом выделении застроенных территорий. Преимущество данного способа заключается в том, что основное выделение искомых участков выполняется в автоматизированном режиме по пороговому значению индекса; окончательные маски получены в автоматизированном режиме с последующим интерактивным уточнением контуров (рисунки 28—30). На рисунках 28—30 изображение показано в пределах масок: участки со значением «1» — в исходных цветах, участки со значением «0» — чёрным цветом.

Интерактивность процесса связана с тем, что часть контуров уточнялась вручную с использованием ГИС-инструментов (ArcGIS) и опорных карт-схем затоплений за предыдущие годы.



Рисунок 28 — Сформированная геопривязанная маска застроенной территории

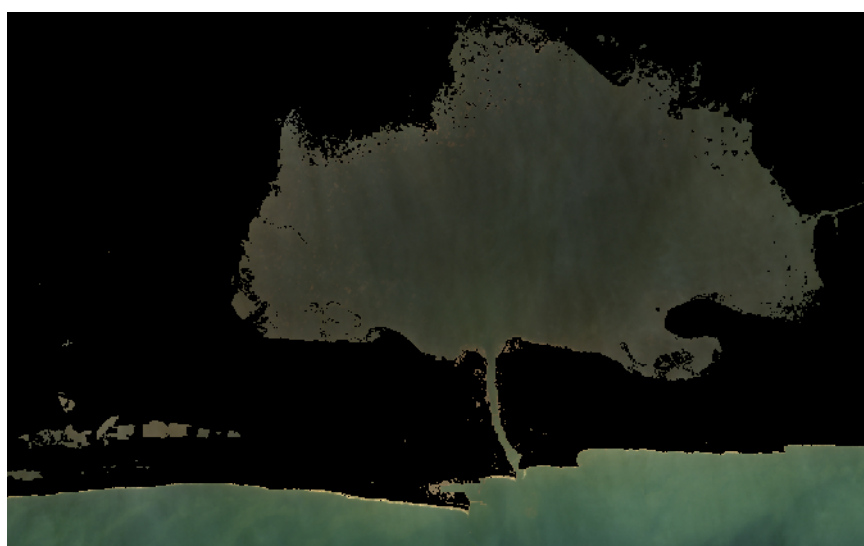


Рисунок 29 — Сформированная геопривязанная маска водных объектов



Рисунок 30 — Сформированная геопривязанная маска зоны затопления

Для тематической классификации снимков использовался метод с обучением (supervised classification), реализованный в программном обеспечении ENVI. Обучающие выборки сформированы по результатам визуального дешифрирования разновременных изображений и кадастровых материалов ANDF (раздел 2.2.1). Всего создано 40 эталонных полигонов (ROI, Region of Interest), распределённых по 5 классам: водные объекты, застроенные территории, леса, сельскохозяйственные земли, а также зоны затопления и заболоченные территории. Единый состав классов обучающей выборки использован для обоих объектов исследования, при этом в матрицах ошибок приводятся только те классы, которые представлены на соответствующей территории: для г. Котону — застроенные территории, водные объекты, зоны затопления и заболачивания (таблицы 13 и 14); классы «леса» и «сельскохозяйственные земли» на фрагменте г. Котону практически не представлены: древесная растительность уничтожена при застройке (раздел 3.5), а открытые грунты при дешифрировании относятся к застроенной территории (раздел 3.6). Для г. Бохикон отдельная матрица ошибок не строилась, поэтому приведённые в таблицах 13 и 14 оценки точности на этот объект не распространяются; изменения площадей по нему приведены в таблице 16. В качестве признаков использовались спектральные каналы Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазонов (раздел 2.5.1), а также рассчитанные индексы MNDWI и NDBI.

Полученные ранее маски (рисунки 28—30) позволили исключить из классификации области вне исследуемого фрагмента.

2.5.3. Сравнительный анализ методов классификации космических изображений

В основе автоматизированной тематической обработки космических изображений населённых пунктов лежит контролируемая классификация, основанная на статистической информации [83]. Для выбора рабочего метода мониторинга автором выполнено сравнение метода минимального расстояния и метода максимального правдоподобия; сравнение выполнено по изображению Landsat-8 OLI января 2024 г. (сухой сезон) на исследуемый фрагмент г. Котону (таблица 17). При использовании метода минимального расстояния общая точность составляет 89,90 % при коэффициенте каппа Коэна 0,84 (рисунок 31, таблица 13), метода максимального правдоподобия — 93,30 % при 0,90 (рисунок 32, таблица 14).

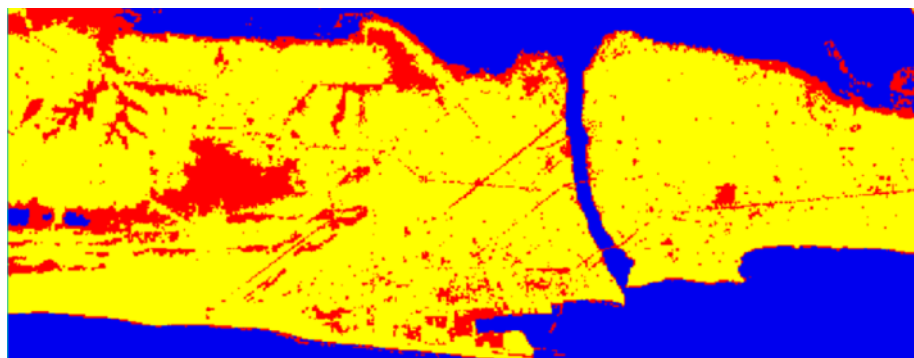
Методы максимального правдоподобия и минимального расстояния реализованы в большинстве ГИС и доступны оператору. Они хорошо изучены и дают предсказуемый результат на данных Landsat в условиях небольшой обучающей выборки [110; 131]. Сопоставление точности выделения отдельных классов двумя методами приведено на рисунке 33.

Помимо рассмотренных методов существуют более современные алгоритмы машинного обучения, включая нейронные сети; их применение способно повысить точность классификации, однако выходит за рамки поставленных в диссертации задач.

Оценка точности классификации выполнена по стандартной процедуре: в границах исследуемого фрагмента сформированы контрольные полигоны, не участвовавшие в обучении, с эталонными классами, определёнными при визуальном дешифрировании изображений в цветовых синтезах и по кадастровым материалам; по пикселям этих полигонов построены матрицы ошибок (таблицы

13, 14) и вычислены общая точность, точности производителя и пользователя и коэффициент каппа Коэна. Контрольная выборка охватывает все три класса, представленные на фрагменте: по итоговым долям матриц ошибок на застроенную территорию приходится около 29 %, на водные объекты — 47 %, на зоны затопления и заболоченные территории — 24 % её пикселей. Поскольку эталонные классы определены по результатам визуального дешифрирования, полученные оценки характеризуют точность классификации относительно эталонных полигонов; они использованы для сопоставления методов классификации при одинаковых условиях оценки. Полевая проверка границ предусмотрена методикой на этапе внедрения (таблица 20, этап 4.4).

Под общей точностью понимается отношение числа правильно классифицированных пикселей ко всему числу пикселей контрольной выборки. Следовательно, метод максимального правдоподобия даёт меньшее число ошибок отнесения пикселей к классам, поэтому он принят в качестве рабочего метода исследования. Наряду с общей точностью по матрице ошибок вычисляются две точности отдельного класса: точность производителя (producer's accuracy) — доля пикселей эталона данного класса, правильно отнесённых классификатором к этому же классу (величина, дополняющая ошибку пропуска), и точность пользователя (user's accuracy) — доля пикселей, отнесённых классификатором к данному классу, которые в действительности ему принадлежат (величина, дополняющая ошибку ложного отнесения). Матрицы в таблицах 13 и 14 нормированы по столбцам эталонных классов, поэтому их диагональные значения представляют собой точность производителя.



	Застроенная территория г. Котону
	Водный объект (озеро Нокуэ, лагуна Котону и Атлантический океан)
	Зона затопления и заболоченная территория г. Котону

Рисунок 31 — Результат дешифрирования космических изображений с использованием метода минимального расстояния

Таблица 13 — Матрица ошибок результатов дешифрирования космических изображений с использованием метода минимального расстояния

Наименование класса	Застроенная территория, %	Водный объект, %	Зона затопления и заболоченная территория, %	Итого, %
Неклассифицированный	0,00	0,00	0,00	0,00
Застроенная территория	97,80	0,00	16,84	32,33
Водный объект	0,00	98,89	20,17	51,28
Зона затопления и заболоченная территория	2,20	1,11	62,99	16,39
Итого	100,00	100,00	100,00	100,00
Общая точность = 89,90 % Коэффициент каппа Козна = 0,84				

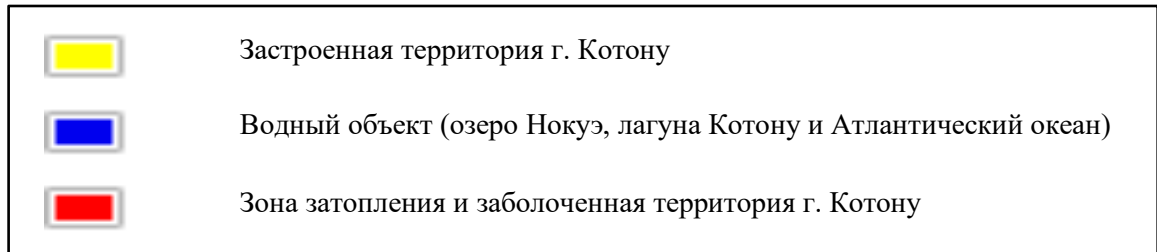
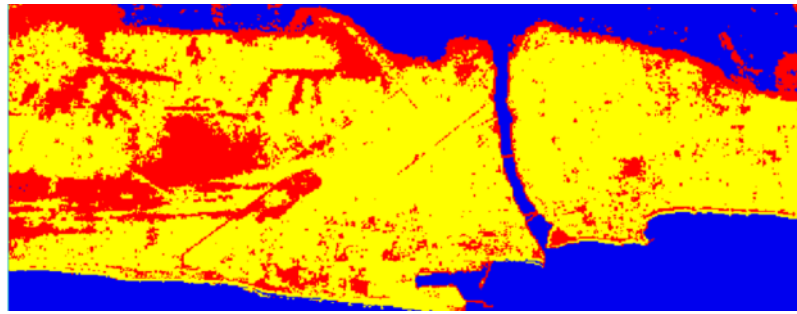


Рисунок 32 — Результат дешифрирования космических изображений с использованием метода максимального правдоподобия

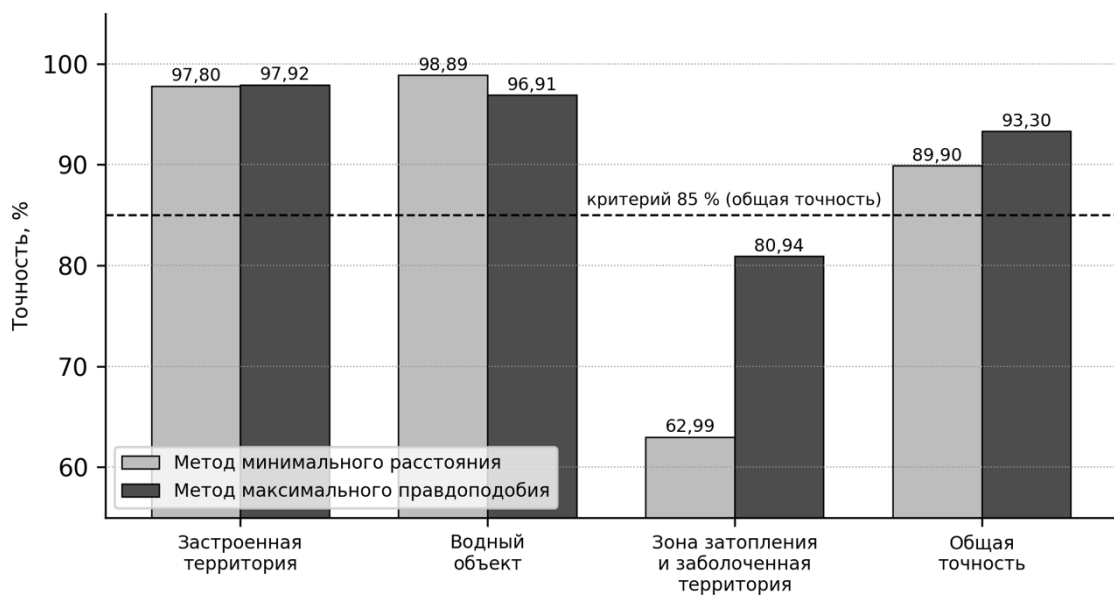


Рисунок 33 — Точность выделения классов земного покрова методом минимального расстояния и методом максимального правдоподобия

Достигнутая точность выделения зон затопления и заболачивания (80,94 %) соответствует уровню, признаваемому рабочим для данных дистанционного зондирования среднего разрешения (Landsat, 30 м/пикс) [63; 83]; точность выделения собственно водных объектов при этом составила 96,91 %. Для принятия управленческих решений по зонированию такая точность приемлема,

однако при проведении инженерных изысканий может потребоваться более высокое разрешение (съёмка с беспилотных летательных аппаратов, коммерческие спутники с разрешением 1—5 м/пикс).

Таблица 14 — Матрица ошибок результатов дешифрирования космических изображений с использованием метода максимального правдоподобия

Наименование класса	Застроенная территория, %	Водный объект, %	Зона затопления и заболоченная территория, %	Итого, %
Неклассифицированный	0,00	0,00	0,00	0,00
Застроенная территория	97,92	0,00	9,73	30,64
Водный объект	0,00	96,91	9,33	47,73
Зона затопления и заболоченная территория	2,08	3,09	80,94	21,63
Итого	100,00	100,00	100,00	100,00
Общая точность = 93,30 % Коэффициент каппа Коэна = 0,90				

Оценка качества контролируемой классификации производится на основе общей точности классификации и коэффициента каппа Коэна, рассчитываемых по формулам (7) и (8) соответственно [3]:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^r N_{ii}}{S} \quad (7)$$

где P — общая точность классификации; N_{ii} — число верно классифицированных пикселей класса i (диагональные элементы матрицы ошибок); S — общее количество пикселей в опорной выборке.

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (8)$$

где K — коэффициент каппа Коэна; r — количество строк в матрице ошибок; x_{ii} — число наблюдений в строке i и столбце i ; x_{i+} — общее количество наблюдений в строке i ; x_{+i} — общее количество наблюдений в столбце i ; N —

общее количество наблюдений, включённых в матрицу.

Сопоставление результатов (таблицы 13 и 14) показывает, что метод минимального расстояния обеспечивает приемлемую точность на крупных однородных объектах — застроенных территориях (97,80 %) и водных объектах (98,89 %), но существенно теряет достоверность на классах со смешанным спектральным откликом: точность производителя для зон затопления и заболачивания составляет 62,99 %. Метод максимального правдоподобия при сопоставимой точности на однородных классах (97,92 % и 96,91 %) повышает точность производителя для зон затопления и заболачивания до 80,94 %, то есть на 17,95 процентного пункта. Точность пользователя для этого класса, вычисленная по итоговым долям строк тех же матриц (16,39 % у метода минимального расстояния и 21,63 % у метода максимального правдоподобия), изменяется в обратную сторону — с 92,9 до 90,5 %: метод максимального правдоподобия относит к зонам затопления и заболачивания несколько больше пикселей, чем следует. Для задач зонирования такое соотношение предпочтительно, поскольку пропуск затопляемого участка влечёт более тяжёлые последствия, чем излишнее ограничение застройки на участке, который в действительности затоплению не подвержен. Устойчивость к спектральным перекрытиям у метода максимального правдоподобия выше, поэтому в настоящей работе он принят в качестве основного метода классификации при мониторинге и функциональном зонировании, а метод минимального расстояния использован для предварительного анализа.

Область применимости полученных оценок точности. Приведённые в таблицах 13 и 14 оценки относятся к территории г. Котону и к классам, выделяемым по многозональным космическим изображениям, что определяет три условия их корректного применения. Во-первых, эталонные полигоны отнесены к контурам, устойчивым во времени, — акваториям, магистральной застройке и границам заболоченных массивов. Именно эти контуры служат опорой при сопоставлении разновременных изображений за период 2002—2024 гг., поэтому принятая схема контроля соответствует поставленной задаче мониторинга

долговременных изменений, а не оценке состояния территории на отдельно взятую дату. Во-вторых, для обоих объектов исследования использован единый состав классов обучающей выборки, что обеспечивает сопоставимость результатов дешифрирования городов Котону и Бохикон между собой, а матрицы ошибок построены по классам, фактически представленным на соответствующей территории. В-третьих, для коммуны Каримама, где решалась задача установления границ зоны разведочных работ и её санитарно-защитной зоны, отдельная контрольная выборка не формировалась: границы установлены по результатам дешифрирования с точностью, определяемой размером пикселя изображения (30 м), что достаточно для построения буферной зоны шириной 150 м, а их закрепление на местности геодезическими измерениями предусмотрено при переходе к промышленной добыче (раздел 2.4).

Источники выделения классов «зона затопления» и «заболоченная территория». Контуров зон затопления получены по маске модифицированного водного индекса MNDWI с порогом 0,30, обоснованным и проверенным по опорным контурам постоянных акваторий (раздел 2.5.2); заболоченные территории выделены контролируемой классификацией в составе объединённого класса «зона затопления и заболоченная территория», из которого зоны затопления затем отделены маской MNDWI. В матрицах ошибок (таблицы 13 и 14) эти два класса объединены, поскольку на изображениях среднего пространственного разрешения они образуют единый спектральный отклик; приведённые значения точности (62,99 и 80,94 %) относятся к их совокупности. Раздельные площади, приведённые в таблице 18, получены наложением маски MNDWI на результат классификации: к зонам затопления отнесены контуры, попадающие в маску, к заболоченным территориям — остальная часть класса.

Различие методов по общей точности (89,90 и 93,30 %) невелико; практически существенным является различие по классу «зона затопления и заболоченная территория»: 62,99 и 80,94 % соответственно, то есть 17,95 процентного пункта; именно этот класс определяет пригодность метода для задач зонирования территорий с природными ограничениями.

Погрешность определения площадей. Значения площадей, приведённые в таблицах 7 и 18, представляют собой результат вычисления в ГИС и отображаются с избыточной дробностью (раздел 2.2.1). Фактическая погрешность определяется не разрядностью вычисления, а размером пикселя и точностью проведения контура. Площадь одного пикселя составляет 0,09 га для изображений Landsat (30 м). Погрешность площади контура, выделенного по растровому изображению, оценивается произведением половины размера пикселя на периметр контура. Периметр не может быть меньше периметра равновеликого круга, что даёт следующие нижние оценки погрешности для изображений Landsat: застроенная территория (9 291,42 га) — не менее 51,26 га, или 0,55 %; зоны затопления (2 575,89 га) — не менее 26,99 га, или 1,05 %; заболоченные территории (3 831,48 га) — не менее 32,91 га, или 0,86 %.

Из полученных оценок следует практический вывод: изменения площади классов, не превышающие указанных величин, не могут считаться установленными по данным среднего пространственного разрешения; для разности двух дат порог возрастает примерно в $\sqrt{2}$ раза и для застроенной территории составляет около 72,49 га. Сокращение застроенной территории на 87,39 га, или на 0,93 %, за период 2017—2024 гг. (таблица 18) лишь незначительно превышает этот геометрический порог и более чем в семь раз меньше погрешности классификации (6,70 % при общей точности 93,30 %, таблица 14), поэтому должно интерпретироваться как стабилизация площади застройки, а не как её сокращение. Напротив, прирост застройки на 2 861,01 га (44,49 %) за период 2002—2024 гг. и сокращение заболоченных территорий на 2 200,77 га (36,48 %) превышают как пороги обнаружения, так и погрешность классификации и являются достоверно установленными.

2.6. Мониторинг развития населённых пунктов Республики Бенин по данным дистанционного зондирования и ГИС-технологий (города Котону и Бохикон)

Мониторинг развития населённых пунктов включает анализ динамики их изменений и составление карт, отражающих структуру городских ландшафтов. В качестве примера рассмотрен средний город Бохикон и крупный город Котону [58; 59; 77]. Взаимное расположение выбранных городов показано на рисунке 1: Котону расположен на побережье Гвинейского залива (департамент Литораль), Бохикон — во внутренней части страны (департамент Зу); расстояние между ними по прямой составляет около 98 км. Такой выбор позволяет проверить методику на двух категориях населённых пунктов принятой классификации и в двух различных природных условиях.

На рисунке 34 представлена технологическая схема мониторинга изменений процесса застройки территорий по многозональным космическим изображениям с учётом природных и экологических особенностей [15; 21]. Она включает два блока: тематическую обработку каждого изображения ряда — подбор, предварительную обработку, классификацию (по алгоритму рисунка 25; матрицы ошибок построены для изображения Landsat-8 OLI, по которому выбран метод, раздел 2.5.3) — и ГИС-анализ результатов: экспорт результатов классификации в ArcGIS, формирование тематических слоёв, составление и анализ карт-схем динамики и составление карты-схемы функционального зонирования.

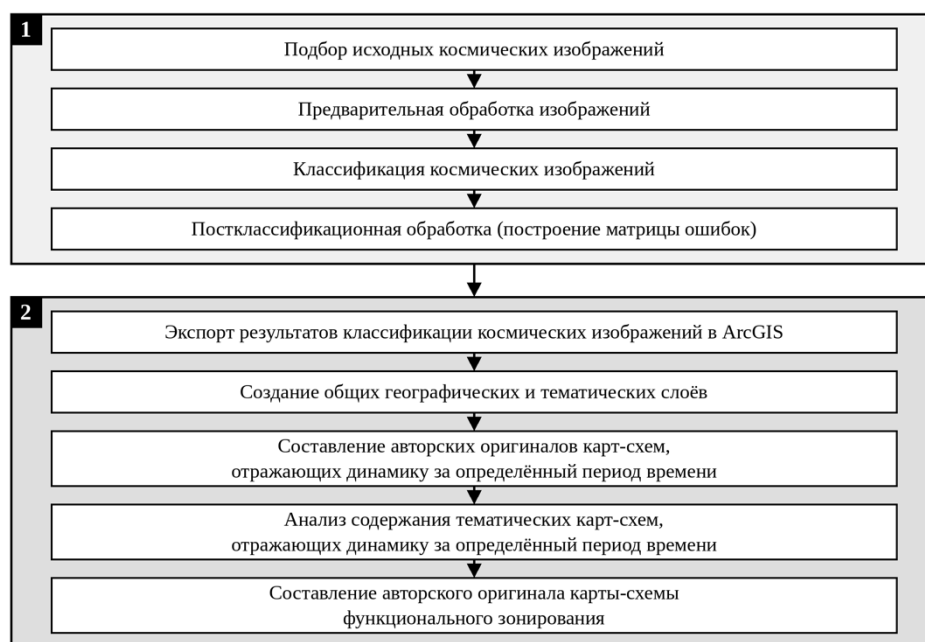


Рисунок 34 — Технологическая схема мониторинга изменений процесса застройки территорий по многозональным космическим изображениям с учётом природных и экологических особенностей

В качестве источника данных (снимков) был выбран архив цифровых космических снимков программы Landsat, предоставляемый USGS. Снимки уровня обработки Level-1 находятся в открытом доступе на портале EarthExplorer Геологической службы США.

Для корректного сопоставления снимки должны отвечать следующим требованиям: сопоставимые спектральные диапазоны съёмочной аппаратуры; один и тот же сезон года (в работе — сухой сезон, декабрь—февраль); отсутствие облачности над исследуемой территорией.

Параметры, которым отвечают отобранные изображения: формат всех снимков GeoTIFF (т. е. с геопривязкой и метаданными); сопоставимые (близкие по границам) спектральные диапазоны и состав спектральных зон; одинаковое по значениям пространственное разрешение спектральных зон; один и тот же участок местности; различный тип сенсора (TM, ETM+, OLI), обусловленный сроками эксплуатации космических аппаратов.

Подобраны космические снимки с космических аппаратов Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI (таблицы 15 и 17).

Этапы мониторинга развития населённых пунктов в общем случае включают: сбор и систематизация данных — использование космических изображений и кадастровых данных для наблюдения за изменением структуры застройки и землепользования; **геостатистический анализ** — применение методов пространственного анализа для выявления тенденций развития территории, изменения плотности застройки и трансформации функциональных зон; **оценка антропогенной нагрузки** — анализ роста городской территории, выявление деградации природных зон, оценка уровня урбанизации; **прогнозирование развития** — моделирование сценариев дальнейшего изменения территорий с учётом социальных, экономических и экологических факторов; **интеграция в систему управления территориями** — использование результатов мониторинга для корректировки генеральных планов, нормативных документов и градостроительных решений. В настоящей работе реализованы этапы сбора данных, тематической обработки разновременных изображений и оценки изменений площадей классов; прогнозирование сценариев развития отнесено к перспективам.

Таблица 15 — Характеристики космических снимков Landsat, использованных для анализа территории г. Бохикон

Дата съёмки (месяц, год)	Спутник (сенсор)	Количество спектральных каналов	Пространственное разрешение, м	Каналы, использованные в работе, λ, мкм
январь 1992 г.	Landsat-5 (TM)	7	30	Green 0,52—0,60 Red 0,63—0,69 NIR 0,76—0,90 SWIR 1 1,55—1,75
январь 2002 г.	Landsat-7 (ETM+)	8	30	Green 0,52—0,60 Red 0,63—0,69 NIR 0,77—0,90 SWIR 1 1,55—1,75
декабрь 2012 г.	Landsat-7 (ETM+)	8	30	
декабрь 2024 г.	Landsat-8 (OLI)	11	30	Green 0,525—0,60 Red 0,63—0,68 NIR 0,845—0,885 SWIR 1 1,56—1,66

Результат классификации космических снимков г. Бохикон представлен на рисунке 35. Диаграмма изменения площадей приведена на рисунке 36.

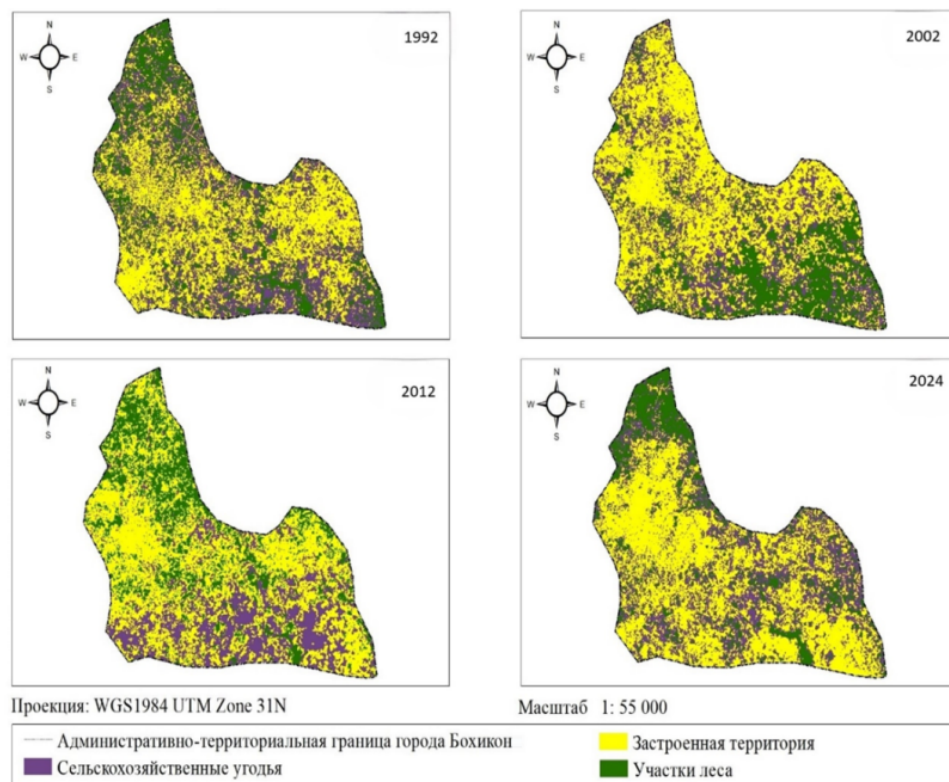


Рисунок 35 — Динамика изменений классов земного покрова г. Бохикон (средний город по классификации населённых пунктов) за период 1992—2024 гг.

Таблица 16 — Изменение площади исследуемой территории г. Бохикон

Класс земного покрова	Площадь, га, на дату съёмки				Скорость изменения площади по периодам, га/год
	1992	2002	2012	2024	Период: 1992—2002, 2002—2012, 2012—2024
Застроенная территория	6 700,41	7 778,25	8 045,01	8 172,63	+107,78; +26,68; +10,63
Сельскохозяйственные угодья	5 976,54	4 928,67	3 854,25	5 217,57	−104,79; −107,44; +113,61
Участки леса	3 064,86	3 034,89	3 842,55	2 351,61	−3,00; +80,77; −124,25

Примечание — знак «+» означает увеличение площади, знак «−» — её сокращение.

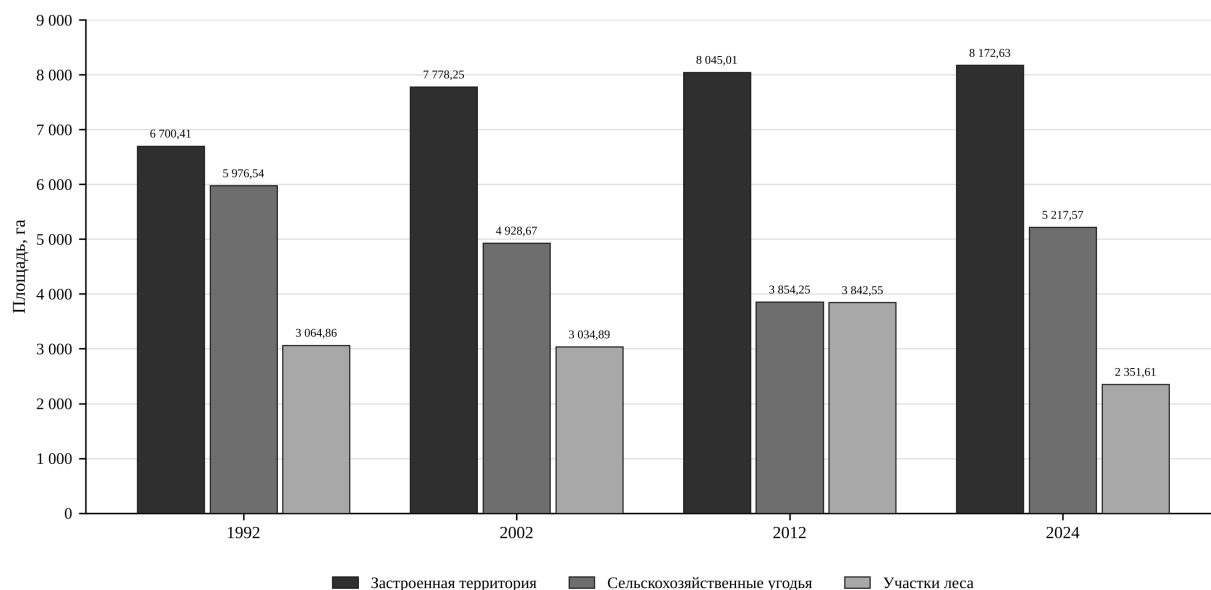


Рисунок 36 — Диаграмма изменения площади земель (сухой сезон) г. Бохикон (1992—2024)

Проведённый анализ показал, что площадь застроенной территории города увеличивалась от каждой даты съёмки к следующей, при этом темп прироста снизился со 107,78 до 10,63 га/год, а соотношение природных и сельскохозяйственных земель изменялось (таблица 16).

За период 1992—2012 гг. площадь сельскохозяйственных угодий сократилась с 5 976,54 до 3 854,25 га (в среднем на 106,11 га/год), тогда как в 2012—2024 гг. она возросла до 5 217,57 га (+113,61 га/год) за счёт распашки лесных участков: площадь леса, увеличившаяся к 2012 г. до 3 842,55 га, к 2024 г. сократилась до 2 351,61 га (–124,25 га/год). Таким образом, расширение застройки в последний период сопровождалось не сокращением сельскохозяйственных угодий, а их восстановлением за счёт лесных земель, что указывает на смещение антропогенной нагрузки на естественную растительность; при этом оценка за 2012 г. получена по изображению с заполненными пропусками строк и носит ориентировочный характер (раздел 2.5.1).

Таблица 17 — Характеристики космических снимков Landsat, использованных для анализа территории г. Котону

Дата съёмки (месяц, год)	Спутник (сенсор)	Количество спектральных каналов	Пространственное разрешение, м	Каналы, использованные в работе, λ, мкм
февраль 2002 г.	Landsat-7 (ETM+)	8	30	Green 0,52—0,60 Red 0,63—0,69 NIR 0,77—0,90 SWIR 1 1,55—1,75
декабрь 2010 г.	Landsat-7 (ETM+)	8	30	
январь 2017 г.	Landsat-8 (OLI)	11	30	Green 0,525—0,60 Red 0,63—0,68 NIR 0,845—0,885 SWIR 1 1,56—1,66
январь 2024 г.	Landsat-8 (OLI)	11	30	

Территория побережья представлена на космических снимках за 2002, 2010, 2017 и 2024 гг., на которых различимы основные источники затопления — озеро Нокуэ, лагуна Котону и береговая линия океана. Выполнена предварительная и тематическая обработка данных дистанционного зондирования и определены следующие параметры: площадь застроенной территории, площадь водных объектов (океан, лагуна и озеро Нокуэ) за четыре временных периода, площадь возможного затопления территории со стороны океана, лагуны и озера Нокуэ, динамика изменений классов земного покрова за период 2002—2024 гг. с учётом природных и экологических особенностей.

Результат классификации космических снимков г. Котону представлен на рисунке 37.

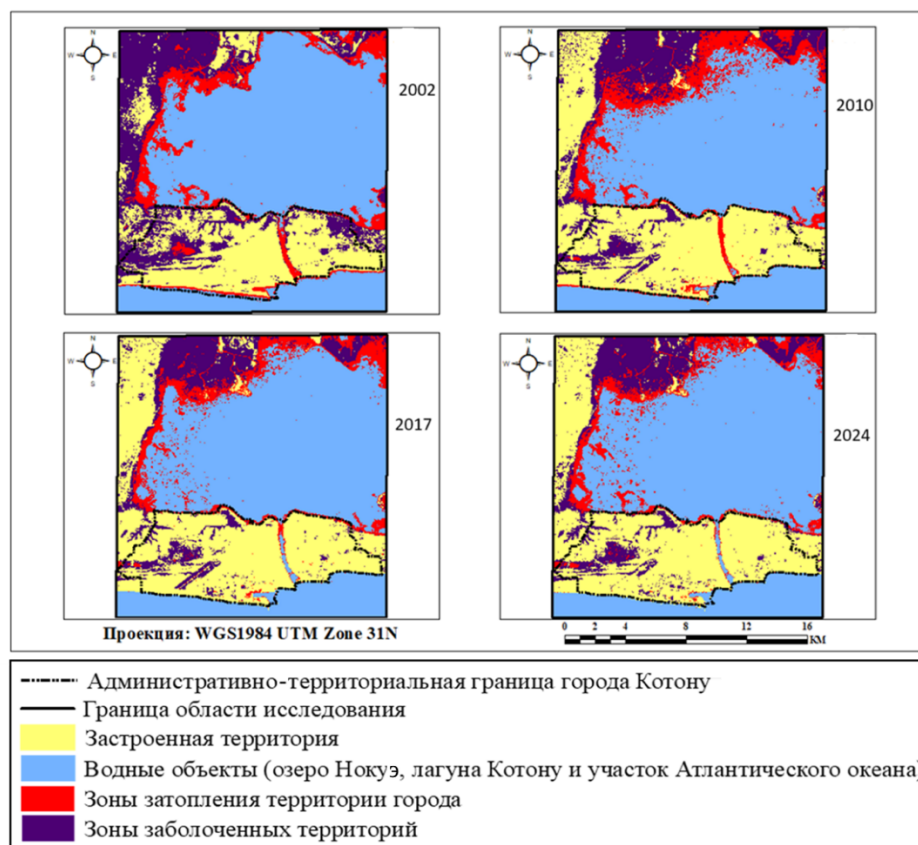


Рисунок 37 — Динамика изменений зон г. Котону за период 2002—2024 гг. с учётом природных и экологических особенностей

Таблица 18 — Изменение площади зон г. Котону за период 2002—2024 гг.

Класс земного покрова	Площадь, га, на дату съёмки				Скорость изменения площади по периодам, га/год
	2002	2010	2017	2024	Период: 2002—2010, 2010—2017, 2017—2024
Застроенная территория	6 430,41	9 104,31	9 378,81	9 291,42	+334,24; +39,21; -12,48
Водные объекты (озеро Нокуэ, лагуна Котону и участок Атлантического океана)	17 250,30	15 511,05	17 050,59	17 021,34	-217,41; +219,93; -4,18
Зоны затопления	3 007,17	3 660,48	2 723,67	2 575,89	+81,66; -133,83; -21,11
Заболоченные территории	6 032,25	4 444,29	3 567,06	3 831,48	-198,50; -125,32; +37,77

Примечание — знак «+» означает увеличение площади, знак «-» — её сокращение. Значения площадей округлены до двух знаков после запятой,

поэтому сумма по столбцу может отличаться от площади фрагмента (32 720,13 га) на 0,01 га.

На рисунке 38 отображены площади четырёх классов земного покрова, определённые по космическим изображениям, полученным в феврале 2002 г., декабре 2010 г., январе 2017 г. и январе 2024 г. (таблица 17), то есть в сухой сезон (декабрь—февраль). Приведённые в таблице 18 значения характеризуют состояние территории на дату съёмки, а не годовой максимум затопления, вследствие чего разнонаправленность рядов требует отдельного пояснения. Выбор дат подчинён требованию сопоставимости: все изображения ряда получены в один и тот же сезон (декабрь—февраль) и обработаны при едином пороговом значении индекса MNDWI, равном 0,30; изображение января 2024 г. является последним снимком сухого сезона для г. Котону в составе сформированного для настоящего исследования набора данных. Включение в ряд изображений иного сезона или обработка их при ином пороговом значении сделали бы оценки площадей несопоставимыми между датами.

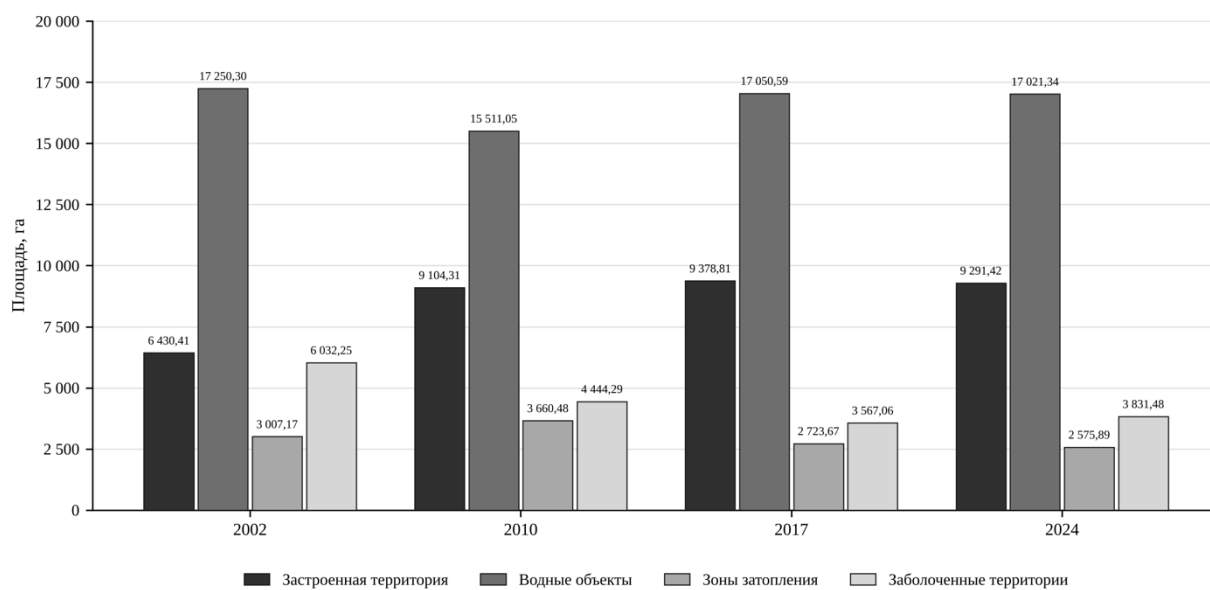


Рисунок 38 — Диаграмма изменения площади земель г. Котону (2002—2024) с учётом природных и экологических особенностей

Застроенная территория возросла с 6 430,41 га в 2002 г. до 9 378,81 га в 2017 г., то есть на 2 948,40 га, или на 45,85 %. Последующее изменение до 9 291,42 га в 2024 г. составляет –87,39 га, или –0,93 %, что более чем в семь раз

меньше погрешности классификации (6,70 %, таблица 14) и должно интерпретироваться как стабилизация площади застройки, а не как её сокращение.

Площадь заболоченных территорий сократилась с 6 032,25 га в 2002 г. до 3 831,48 га в 2024 г., то есть на 2 200,77 га, или на 36,48 %. По балансу площадей классов (таблица 18) прирост застройки за 2002—2024 гг. (+2 861,01 га) более чем на три четверти соответствует сокращению заболоченных территорий, что указывает на освоение застройкой периодически затопливаемых и заболоченных участков и, следовательно, на рост подверженности населения риску подтопления; для отдельных участков вывод подлежит проверке по матрице переходов.

Основная часть сокращения площади зон затопления приходится на период 2010—2017 гг. (–936,81 га; оценка за 2010 г. получена по изображению с заполненными пропусками строк и носит ориентировочный характер — раздел 2.5.1) и предшествует началу строительных работ по Программе ливневого водоотведения г. Котону (Programme d'Assainissement Pluvial de Cotonou, PAPC), что указывает на определяющую роль различий гидрометеорологических условий на даты съёмки; влияние Программы может относиться лишь к изменению 2017—2024 гг. (–147,78 га). Программа охватывает 34 из 50 водосборных бассейнов города и предусматривает строительство 46 км магистральных коллекторов, 90 км водоотводных каналов и накопительных бассейнов; строительные работы начаты в феврале 2022 г. [57]. Составной частью программы является проект Всемирного банка Stormwater Management and Urban Resilience Project (2019 г.), предусматривающий 28,07 км водоотводных сооружений и три накопительных бассейна суммарным объёмом 431 698 м³ [76].

Таким образом, зафиксированное уменьшение площади зон затопления характеризует прежде всего гидрометеорологические условия на даты съёмки и, возможно, в части периода 2017—2024 гг., влияние начатых в 2022 г. работ по Программе, но не снижение природной уязвимости территории. Низменный рельеф с отметками около 0,7 м, гидроморфные песчаные почвы с ограниченной

фильтрационной способностью и застройка бывших заболоченных земель сохраняют высокий уровень риска подтопления, что обуславливает необходимость учёта природных и экологических ограничений при зонировании населённых пунктов.

Полученные оценки не противоречат независимым работам. По результатам многокритериального ГИС-анализа [105] к зоне высокого риска наводнений отнесено около 20 % площади агломерации Большого Нокуэ и 65 % территории г. Котону — наиболее уязвимой из её коммун; в настоящей работе зоны затопления и заболоченные территории, выделенные по изображениям сухого сезона, занимают 40,81 % суши исследуемого фрагмента, что при различии методов и границ территорий может рассматриваться как нижняя оценка относительно [105]. Освоение застройкой периодически затапливаемых земель, выявленное по разновременным изображениям, соответствует выводам [90; 101] о занятии под жильё территорий, непригодных для проживания. Отличие настоящей работы состоит в том, что выделенные контуры используются непосредственно для установления границ территориальных зон и режима использования земель (глава 3), а не только для картографирования риска.

При построении карт динамики землепользования г. Бохикон за 1992, 2002, 2012 и 2024 гг. и г. Котону за 2002, 2010, 2017 и 2024 гг. использовался метод классификации максимального правдоподобия. Для каждой даты съёмки эталонные полигоны уточнялись по доступным на соответствующий период архивным материалам (кадастровые планы, исторические карты) при сохранении единого состава классов, что обеспечивает сопоставимость результатов между датами. Появление на изображении 2012 г. (пропуски строк заполнены, раздел 2.5.1) участка, классифицированного как «лес» на территории, ранее относившейся к категории застроенных земель, может быть обусловлено либо восстановлением древесной растительности вследствие длительного отсутствия хозяйственной деятельности, либо систематическими погрешностями алгоритма классификации, обусловленными особенностями спектральных характеристик временно заброшенных территорий. Уточнение причин требует привлечения

космических снимков более высокого пространственного разрешения и архивных кадастровых материалов; в настоящей работе оценка за 2012 г. рассматривается как ориентировочная (раздел 2.5.1), а основанный на ней вывод о переходе лесных участков в сельскохозяйственные угодья — как предварительный.

Площадь водных объектов в таблице 18 включает акватории, входящие в границы исследуемого фрагмента (участок озера Нокуэ, лагуна Котону и участок океана). Площадь водных объектов на датах 2002, 2017 и 2024 гг. практически постоянна (17 021—17 250 га), а её уменьшение в 2010 г. обусловлено состоянием водной поверхности после наводнения 2010 г.: в паводковый период значительная часть акватории озера Нокуэ покрывается плавающей водной растительностью (водяным гиацинтом), вследствие чего такие участки при дешифрировании не относятся к классу «водные объекты». Наложение слоёв показывает, что часть застроенной территории расположена в границах буферных зон (23 случая, раздел 3.6) и в зонах затопления, что должно учитываться при зонировании города.

В настоящем исследовании результаты ДЗЗ служат основным инструментом для решения задач зонирования населённых пунктов Республики Бенин. С одной стороны, космические снимки позволяют выявлять и количественно оценивать актуальную структуру землепользования (застроенные районы, сельскохозяйственные участки, заболоченные территории, водные объекты), а также динамику этой структуры за многолетний период. С другой стороны, данные анализа изображений позволяют классифицировать территории по степени риска затопления (раздел 2.2.1).

Связь показателей, получаемых по данным ДЗЗ, с задачами функционального зонирования сведена в таблице 19.

Таблица 19 — Связь параметров из ДЗЗ с задачами функционального зонирования

Параметр	Как используется при зонировании
Площадь/геометрия застроенных участков	Определение границ существующей застройки, уточнение зоны жилой, производственной и общественно-деловой застройки
Затопляемые территории	Формирование зон с особыми условиями использования: запрет/ограничение капитального строительства, устройство инженерной защиты

Параметр	Как используется при зонировании
Заболоченные территории	Определение зон рекультивации, планирование дренажа, перевод в ландшафтно-рекреационную зону или использование под рисовые поля
Леса и ООПТ	Установление режимов охраны (запрет вырубki, регламент хозяйственной деятельности), создание рекреационных зон
Береговая полоса	Планирование защитных дамб, перенос градостроительной активности вглубь суши, корректировка границ земельных участков
Сельскохозяйственное землепользование	Развитие аграрных зон, учёт климатических рисков и защиты от затопления

Для кадастрового и градостроительного мониторинга в Республике Бенин в работе приняты следующие сроки обновления информации о состоянии и динамике территорий и требования к точности:

Периодичность получения данных. Съёмка сенсорами Landsat и Sentinel с пространственным разрешением 10—30 м с интервалом от одного года до трёх лет достаточна для общей оценки динамики застройки и для выявления крупных изменений землепользования; для сезонного контроля паводка требуется более частая съёмка, для которой пригодны радиолокационные данные Sentinel-1, не зависящие от облачности, и иные открытые данные ДЗЗ [94].

Пространственное разрешение. Для детального градостроительного проектирования в пределах городской черты требуются изображения с разрешением 1—5 м; для региональной оценки и межмуниципальных проектов достаточно разрешения 10—30 м, обеспечиваемого сенсорами Landsat и Sentinel-2.

Точность классификации. При выявлении зон затопления ошибочно отнесённые пиксели влекут за собой установление неверного правового режима земель, поэтому результаты классификации подлежат обязательной валидации по полевым данным и историческим сведениям о наводнениях; для распознавания застроенных территорий рабочим значением принимается точность не ниже 80 %, для общей точности дешифрирования категорий земного покрова — не ниже 85 % [83]; достигнутые в настоящей работе значения приведены в разделе 2.5.3.

2.7. Выводы по главе 2

1. Определён состав природных и экологических ограничений, подлежащих учёту при зонировании: в границах исследуемого фрагмента г. Котону площадью 32 720,13 га зоны затопления занимают 2 575,89 га и заболоченные территории — 3 831,48 га (2024 г., таблица 18); скорость береговой абразии на восточном участке побережья принята по опубликованным данным равной 16 м/год (расчётная величина); зона разведки и добычи железной руды Лумбу-Лумбу занимает 68,00 га; земли ООПТ — по различным оценкам, от 19 до 30 % территории страны.

2. Разработана относительная шкала риска затопления по числу дат ряда, на которых участок выделен как затопленный (категории I—III); поскольку ряд сформирован по изображениям сухого сезона, полученные площади зон затопления являются нижней оценкой годового максимума, что учтено в режимах использования земель.

3. Разработана дифференцированная шкала ширины буферных зон — 50, 100, 150 и 200 м для водных объектов, 100 м для берега океана, не менее 150 м для карьеров и 500 м для ООПТ национального значения, — значения которой кратны нормативной полосе франк-бордов 25 м; средствами ГИС построены буферные зоны лагуны Котону (169,00 га) и участка реки Куффо (78,00 га) (таблица 8); анализ чувствительности показал, что изменение ширины на один шаг (± 25 м) меняет площадь полосы лагуны Котону на $\pm 21,13$ га.

4. Установлено, что Земельный и имущественный кодекс Республики Бенин не содержит числовых допусков на точность положения характерных точек границ; в качестве нормативного ориентира принят приказ Росреестра № П/0393 ($M_t \leq 0,10$ м для земель населённых пунктов), которому удовлетворяет применяемая в стране спутниковая аппаратура GNSS; обоснована необходимость установления аналогичных допусков национальным нормативом. Геодезические измерения в методике выполняют функцию закрепления и уточнения границ, установленных по космическим изображениям.

5. Обоснован геоинформационный метод масок: водные объекты и зоны затопления выделяются по индексу MNDWI при пороговом значении 0,30, едином для всех дат ряда и проверенном по опорным контурам постоянных акваторий; смещение границы на один пиксель изменяет площадь зоны затопления не менее чем на 2,10 %, что определяет требование единства порога.

6. По результатам сравнения методов классификации рабочим принят метод максимального правдоподобия: общая точность 93,30 % при коэффициенте каппа Коэна 0,90 (у метода минимального расстояния — 89,90 % и 0,84); для класса «зона затопления и заболоченная территория» точность производителя составила 80,94 % по сравнению с 62,99 % (таблицы 13, 14). Последовательность обработки данных ДЗЗ и ГИС-анализа, обеспечившая эти результаты, оформлена как алгоритм применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий при зонировании (рисунки 25, 34).

7. Установлена динамика земель за период наблюдений: в г. Котону за 2002—2024 гг. застроенная территория увеличилась на 2 861,01 га (44,49 %), заболоченные территории сократились на 2 200,77 га (36,48 %), что указывает на освоение застройкой периодически затапливаемых земель; изменение застройки за 2017—2024 гг. (–87,39 га, или –0,93 %) меньше погрешности классификации и означает стабилизацию; в г. Бохикон за 1992—2024 гг. застроенная территория выросла с 6 700,41 до 8 172,63 га, а лесные участки сократились с 3 064,86 до 2 351,61 га (таблицы 16, 18). Оценки по изображениям 2010 и 2012 гг. и по г. Бохикон (без матрицы ошибок) носят ориентировочный характер.

8. Определены требования к мониторингу: периодичность съёмки 1—3 года, для прибрежных охранных зон — не реже одного раза в два года, для сезонного контроля паводка — радиолокационные данные; полученные оценки не противоречат независимым работам по картографированию риска наводнений в агломерации Большого Нокуэ. Результаты главы образуют информационную основу методики зонирования, разрабатываемой в главе 3.

Глава 3. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ЗОНИРОВАНИЯ НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ БЕНИН И ЕЁ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Целью настоящей главы является объединение результатов глав 1 и 2 в методику зонирования (раздел 3.1) и алгоритм совершенствования системы зонирования (3.2), разработка информационного обеспечения — структуры базы данных (3.3) и геоэкологического паспорта водного объекта (3.4) — и апробация методики с эколого-экономической оценкой предлагаемых решений (3.5—3.8).

3.1. Разработка методики зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей

Разработанная методика зонирования населённых пунктов с учётом природных и экологических особенностей базируется на применении комплекса материалов и методов [22; 88; 125]. Основу методики составляет схема-план, представленная в таблице 20, в которой отражены этапы, содержание работ, применяемые методы и получаемые результаты. При её разработке учтены подходы к планированию землепользования с учётом риска наводнений [96; 133], к использованию зелёной инфраструктуры при адаптации городов [99], к регулированию городской формы градостроительными правилами [132], а также оценки динамики урбанизации и изъятия земель под застройку [100; 113; 123; 139].

Классификация земель населённых пунктов, положенная в основу методики, включает восемь функциональных зон, состав которых определён в разделе 1.5. Состав зон принят по аналогии с частью 1 статьи 35 Градостроительного кодекса Российской Федерации [8], поскольку законодательство Республики Бенин, включая закон № 2024-27 [38], не содержит нормативно закреплённого перечня основных видов территориальных зон общего применения (разделы 1.3, 3.7). В отличие от российского перечня, зоны особо

охраняемых территорий и зоны размещения военных объектов не выделены самостоятельно, а отнесены соответственно к ландшафтно-рекреационной зоне и к зоне специального назначения; дополнительно введена охранный зона, объединяющая водоохранные зоны, прибрежные защитные полосы, охранные зоны особо охраняемых природных территорий и санитарно-защитные зоны; такое выделение обусловлено природными и экологическими ограничениями территории Республики Бенин — сезонными наводнениями, береговой абразией, заболачиванием и воздействием объектов добычи полезных ископаемых (разделы 2.2.1—2.2.3).

Полный перечень восьми функциональных зон с указанием состава объектов и устанавливаемых ограничений приведён в приложении А.

Принятые наименования функциональных зон используются единообразно в модели функционального зонирования (раздел 1.6), в структуре геоинформационной базы данных (раздел 3.3) и в геоэкологическом паспорте водного объекта (раздел 3.4, таблица 24).

Таблица 20 — Методика зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей

Этап	Содержание	Методы	Результат
1. Теоретико-методологическая основа	1.1. Анализ физико-географических и экологических условий территории: два дождевых сезона на юге страны (апрель—июль и сентябрь—октябрь); годовое количество осадков изменяется от 800—900 мм на крайнем северо-востоке до 1300 мм на юге (раздел 1.1.3). 1.2. Анализ земельного законодательства Республики Бенин и международного опыта зонирования. 1.3. Классификация населённых пунктов по численности населения: крупные — свыше 250 тыс. до 1 млн чел.; средние — свыше 100 до 250 тыс. чел.; малые — свыше 50 до 100 тыс. чел.; посёлки — 50 тыс. чел. и менее. 1.4. Классификация земель населённых пунктов: восемь функциональных зон — селитебная, общественно-деловая, производственная, инженерной и транспортной инфраструктуры, сельскохозяйственная,	Анализ нормативно-правовых актов; сравнительный анализ международного опыта; систематизация статистических, картографических и кадастровых материалов.	Классификация населённых пунктов, применённая ко всем 77 коммунах страны (единицей классификации принята коммуна — уровень разработки документов территориального планирования, раздел 1.5) (5 крупных, 42 средних, 27 малых городов и 3 посёлка), и перечень восьми функциональных зон с составом объектов и устанавливаемых ограничений (раздел 1.5; таблицы 5, 6; приложение А).

Этап	Содержание	Методы	Результат
	ландшафтно-рекреационная, охранный, специального назначения.		
2. Сбор и подготовка исходных данных	2.1. Подбор разновременных многозональных космических изображений Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI/TIRS за 1992, 2002, 2010, 2012, 2017 и 2024 гг. 2.2. Приведение материалов к единой системе координат: проекция UTM, зона 31N; датум WGS-84; формат GeoTIFF; пространственное разрешение 30 м. 2.3. Сбор кадастровых, топографических и правоустанавливающих документов: топографические карты масштаба 1:5 000—1:10 000, кадастровые планы ANDF масштаба 1:1 500 (рисунок 23). 2.4. Предварительная обработка изображений: синтез каналов (Landsat-8 OLI — 2—7; Landsat-5 TM и Landsat-7 ETM+ — 1—5 и 7) для визуального дешифрирования.	Данные дистанционного зондирования Земли; ГИС-обработка; синтез и фильтрация многозональных изображений.	Разновременный набор подготовленных космических изображений и картографо-кадастровая основа в единой системе координат (таблицы 9—11, 15, 17).
3. Выявление природных и экологических ограничений	3.1. Расчёт индексных изображений MNDWI и NDBI по формулам (5) и (6); медианная фильтрация индексных изображений с окном 3×3. 3.2. Выделение водных поверхностей и зон затопления методом масок по пороговому значению $MNDWI = 0,30$ с последующим интерактивным уточнением контуров. 3.3. Контролируемая классификация изображений: обучающая выборка 40 ROI-полигонов, пять классов — водные объекты, застроенные территории, леса, сельскохозяйственные земли, зоны затопления и заболоченные территории. 3.4. Оценка природных и антропогенных факторов: периодичность наводнений, скорость береговой абразии (расчётная — 16 м/год, г. Котону), заболачивание, объекты добычи полезных ископаемых, режим ООПТ.	Геоинформационный метод масок; спектральные индексы MNDWI и NDBI; контролируемая классификация (метод минимального расстояния и метод максимального правдоподобия); анализ разновременных изображений.	Геопривязанные маски и тематические карты зон затопления, заболачивания, береговой абразии и иных ограничений землепользования; количественные показатели динамики площадей (рисунки 27—32, 35—38; таблицы 16, 18).
4. Контроль достоверности результатов	4.1. Формирование контрольных полигонов, не участвовавших в обучении, с эталонными классами по результатам визуального дешифрирования и кадастровым материалам. 4.2. Построение матриц ошибок и расчёт общей точности, точностей производителя и пользователя и коэффициента каппа Коэна для метода минимального расстояния	Матрица ошибок; общая точность классификации; коэффициент каппа Коэна; требования к точности GNSS-измерений (раздел 2.4).	Рабочим принят метод максимального правдоподобия: общая точность 93,30 % при коэффициенте каппа Коэна 0,90 против 89,90 % и 0,84; точность класса «зона затопления и заболоченная территория» 80,94 % против 62,99 % (таблицы

Этап	Содержание	Методы	Результат
	и метода максимального правдоподобия. 4.3. Выбор рабочего метода классификации по общей точности и коэффициенту каппа Коэна. 4.4. Полевая проверка и геодезическое закрепление границ: установление требований к точности положения межевых знаков (раздел 2.4) с последующим полевым обследованием и закреплением границ спутниковыми измерениями при внедрении (раздел 1.7.1).		13, 14). Требования к точности геодезического закрепления границ: $Mt \leq 0,10$ м для земель населённых пунктов (раздел 2.4).
5. Моделирование зонирования	5.1. Установление границ населённого пункта по порядку, разработанному в разделе 1.7.1 (семь этапов), и границ территориальных и функциональных зон — по результатам дешифрирования и геодезических измерений. 5.2. Построение буферных зон: водные объекты — 50—200 м (лагуна Котону 200 м, озеро Нокуэ 200 м, река Куффо 100 м); берег океана — 100 м; ООПТ национального значения — 500 м; санитарно-защитные зоны карьеров — не менее 150 м. 5.3. Межевание земельных участков, закрепление межевых знаков и оформление межевых планов. 5.4. Дифференцированный учёт состава функциональных зон и природных ограничений в соответствии с категорией населённого пункта (крупный, средний, малый город, посёлок).	ГИС-анализ (построение буферных зон, оверлейные операции); геодезические методы (тахеометрическая съёмка, GNSS); картографирование.	Модель функционального зонирования и карта-схема функционального и территориального зонирования населённого пункта с учётом природных и экологических ограничений (рисунки 6, 13, 15, 18—21, 47).
6. Информационное обеспечение, апробация и рекомендации	6.1. Формирование геоинформационной базы данных из трёх разделов: общая характеристика населённых пунктов; кадастровые данные; природно-экологические характеристики. 6.2. Составление геоэкологического паспорта водного объекта. 6.3. Апробация методики на примере г. Котону (крупный город) и г. Бохикон (средний город); мониторинг развития населённых пунктов по разновременным данным. 6.4. Разработка рекомендаций по совершенствованию процесса зонирования и эколого-экономическая оценка предлагаемых решений.	Проектирование структуры базы данных; анализ динамики разновременных показателей; эколого-экономическая оценка.	Структура геоинформационной базы данных (рисунки 42—45); геоэкологический паспорт водного объекта (таблицы 24, 25); рекомендации по зонированию и оценка их эффективности (разделы 3.7, 3.8).

Результаты, получаемые по единому пространственному слою, используются одновременно в пяти задачах управления земельными ресурсами населённого пункта. Состав используемых данных, форма результата и разделы, в

которых каждый из них обоснован, приведены в таблице 21. Схема их использования приведена на рисунке 39.

Таблица 21 — Использование результатов зонирования населённых пунктов Республики Бенин

Задача, решаемая по результатам зонирования	Используемые данные единого пространственного слоя	Форма результата	Раздел работы
Градостроительное регулирование	Границы функциональных зон, контуры зон затопления и заболачивания, буферные зоны	Состав территориальных зон и устанавливаемые ограничения как основа градостроительного регламента; рекомендации по составу правил землепользования и застройки	Раздел 3.7, приложение А
Кадастровый учёт земельных участков	Границы буферных зон и зон затопления, совмещённые с кадастровыми границами	Раздел природно-экологических характеристик базы данных, позволяющий установить факт расположения участка в границах зоны затопления или буферной зоны	Раздел 3.3, приложение Б
Установление буферных зон водных объектов и ООПТ	Береговые линии, контуры ООПТ и объектов добычи полезных ископаемых, уровень антропогенной нагрузки	Дифференцированная шкала ширины буферных зон от 50 до 500 м и построенные средствами ГИС буферные зоны	Раздел 2.3, таблица 8
Мониторинг развития застройки	Разновременные маски застроенной территории, водных объектов и зон затопления	Количественные показатели динамики площадей классов земного покрова за периоды 1992—2024 гг. (г. Бохикон) и 2002—2024 гг. (г. Котону)	Раздел 2.6, таблицы 16 и 18
Оценка земель и предотвращаемого ущерба	Площади земель, переводимых в охранную зону и в зону с ограничениями землепользования	Выявление случаев застройки в границах буферных зон и оценка предотвращаемого ущерба от наводнений	Разделы 3.6 и 3.8



Рисунок 39 — Использование единого пространственного слоя, полученного по результатам дешифрирования разновременных космических изображений

Оптимизация размещения территориальных и функциональных зон населённых пунктов позволит:

- снизить риск ущерба от сезонных наводнений и береговой абразии за счёт исключения затопляемых и размываемых участков из зон капитальной застройки;
- создать буферные зоны для промышленных предприятий и особо охраняемых природных территорий, находящихся на территориях населённых пунктов;
- определить ширину водоохранных зон водных объектов, что направлено на предотвращение застройки в поймах рек и на территориях, подверженных сезонным наводнениям;
- внедрить в государственную систему земельных отношений и программы развития населённых пунктов ГИС-технологии и данные ДЗЗ для постоянного наблюдения за состоянием окружающей среды и изменениями земель населённых пунктов.

3.2. Алгоритм совершенствования системы зонирования населённых пунктов Республики Бенин

В настоящей работе разграничиваются три самостоятельных объекта, каждый из которых имеет своё назначение. Методика зонирования (таблица 20) определяет состав и последовательность исследовательских работ: какие данные собираются, какими методами обрабатываются и какой результат должен быть получен на каждом из шести этапов. Алгоритм применения данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий (рисунки 25, 34; разделы 2.5.2, 2.5.3) определяет порядок тематической обработки космических изображений — от синтеза спектральных каналов до построения масок и контролируемой классификации. Настоящий раздел посвящён третьему объекту — алгоритму совершенствования системы зонирования, который устанавливает не исследовательскую, а управленческую последовательность действий: кто из участников процесса зонирования, на каком этапе и на основании какого документа принимает решение, завершающееся утверждением PDU, в составе которого разрабатывается схема функционального зонирования населённого пункта.

Схема, представленная на рисунке 40, охватывает весь цикл зонирования населённого пункта — от определения природных и экологических особенностей территории до утверждения схемы зонирования и её периодической актуализации. Для каждого этапа на схеме указаны участники (органы местного самоуправления коммуны, ANDF, органы государственного управления) и разделы диссертации, в которых обоснованы соответствующие действия. Собранные в единую схему информация служит основой для разработки зонирования населённых пунктов Республики Бенин и принятия решений о развитии территории с учётом природных и экологических ограничений.

Алгоритм объединяет пятнадцать действий, сгруппированных в пять этапов: аналитический (действия 1—4), проектный (действие 5), геодезического обеспечения (действия 6 и 7), административный (действия 8—10) и мониторинга

и актуализации (действия 11—15). Исходные данные и результат каждого этапа, а для этапов III—V — и завершающий документ, приведены в таблице 22.

Отличие предлагаемого алгоритма от действующего порядка состоит в трёх положениях. Во-первых, определение природных и экологических ограничений и построение границ буферных зон (действия 1—4) выполняются до определения модели зонирования и до согласования проекта генерального плана, а не после них, вследствие чего границы функциональных зон устанавливаются с учётом этих ограничений, а не корректируются впоследствии. Во-вторых, участники каждого этапа закреплены явно, в соответствии с порядком, установленным в разделе 1.7.1. В-третьих, алгоритм замкнут: составление карт-схем зонирования (действие 15) возвращает процесс к определению природных и экологических особенностей (действие 1) с периодичностью, обоснованной в разделе 3.8 (для границ прибрежных охранных зон — не реже одного раза в два года), что и обеспечивает актуальность схемы зонирования в условиях подвижной береговой линии. Апробация алгоритма на территории г. Котону (раздел 3.6) охватила этап I (контуры зон затопления и заболачивания, границы буферных зон — разделы 2.2, 2.3, 2.6), этап II (модель функционального зонирования — рисунок 6, приложение А) и этап V (карты-схемы зонирования, геоинформационная база данных и геоэкологический паспорт — рисунки 15, 47, таблицы 23—25); этап III выполнен на примере одного земельного участка (рисунок 11), а этап IV, относящийся к компетенции органов местного самоуправления и ANDF, реализуется при внедрении.

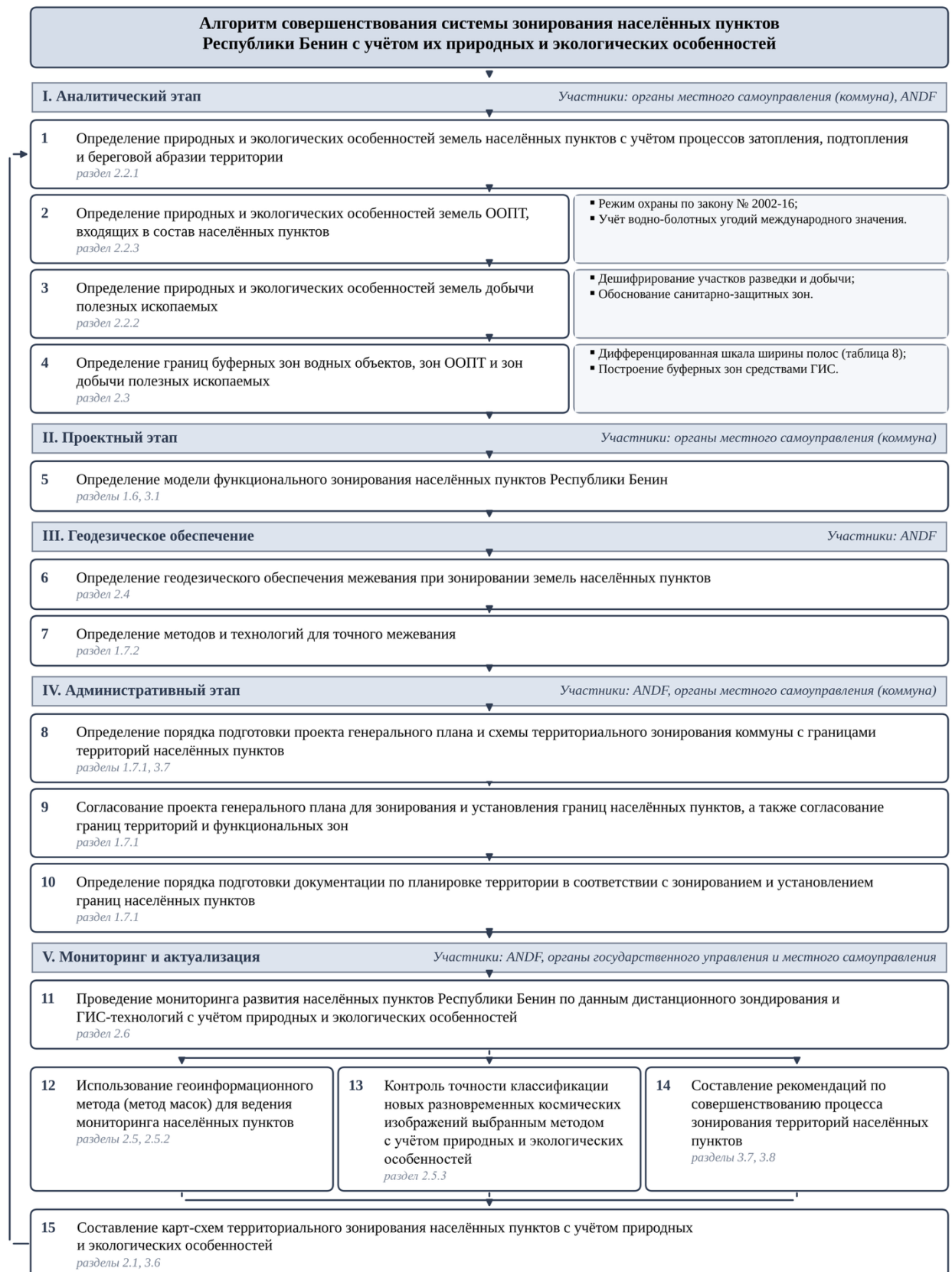


Рисунок 40 — Алгоритм совершенствования системы зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом их природных и экологических особенностей

Таблица 22 — Содержание этапов алгоритма совершенствования системы зонирования населённых пунктов Республики Бенин

Этап	Действия	Исходные данные	Результат этапа и завершающий документ
I. Аналитический	1—4	Разновременные космические изображения Landsat (таблицы 15, 17); топографические карты масштаба 1:5 000—1:10 000; сведения кадастровой базы данных ANDF; данные о наводнениях (таблица 12)	Контуры зон затопления, заболачивания и участков береговой абразии, границы земель ООПТ и земель добычи полезных ископаемых, границы буферных зон по дифференцированной шкале (таблица 8)
II. Проектный	5	Классификация населённых пунктов по численности населения и классификация земель по функциональному назначению (раздел 1.5); результаты аналитического этапа	Модель функционального зонирования населённого пункта (приложение А)
III. Геодезическое обеспечение	6, 7	Материалы полевых геодезических и спутниковых измерений (раздел 1.7.2)	Межевой план; точность положения границ соответствует нормативному ориентиру раздела 2.4
IV. Административный	8—10	Модель функционального зонирования, межевые материалы и сведения о природных и экологических ограничениях	Согласованный проект генерального плана коммуны и документация по планировке территории (рисунки 8—10); схема функционального зонирования в составе генерального плана городского развития (PDU), принятого муниципальным советом и утверждённого Советом министров (закон № 2024-27 [38], ст. 101, 112, 114)
V. Мониторинг и актуализация	11—15	Разновременные космические изображения; маски водных объектов, зон затопления и застроенных территорий (раздел 2.5)	Карты-схемы зонирования (рисунки 15, 47), геоинформационная база данных и геоэкологический паспорт водного объекта (разделы 3.3, 3.4), рекомендации по совершенствованию зонирования

3.3. Структура геоинформационной базы данных населённых пунктов с разделом природно-экологических характеристик

В настоящее время для управления земельными ресурсами в Республике Бенин существует кадастровая база данных. Она включает в себя данные о границах участков; номер права собственности; кадастровый номер объекта недвижимости; название департамента, коммуны, района, квартала, фрагмента квартала, земельного участка; площадь объекта (м²); картографическое

обоснование. Для получения актуальных данных о границах, расположении и площади земельных участков используются повторные геодезические измерения. Такая база данных нуждается в совершенствовании, так как в ней не учитываются такие особенности, как природно-экологические условия, ООПТ и зоны добычи полезных ископаемых [67] (рисунок 41).

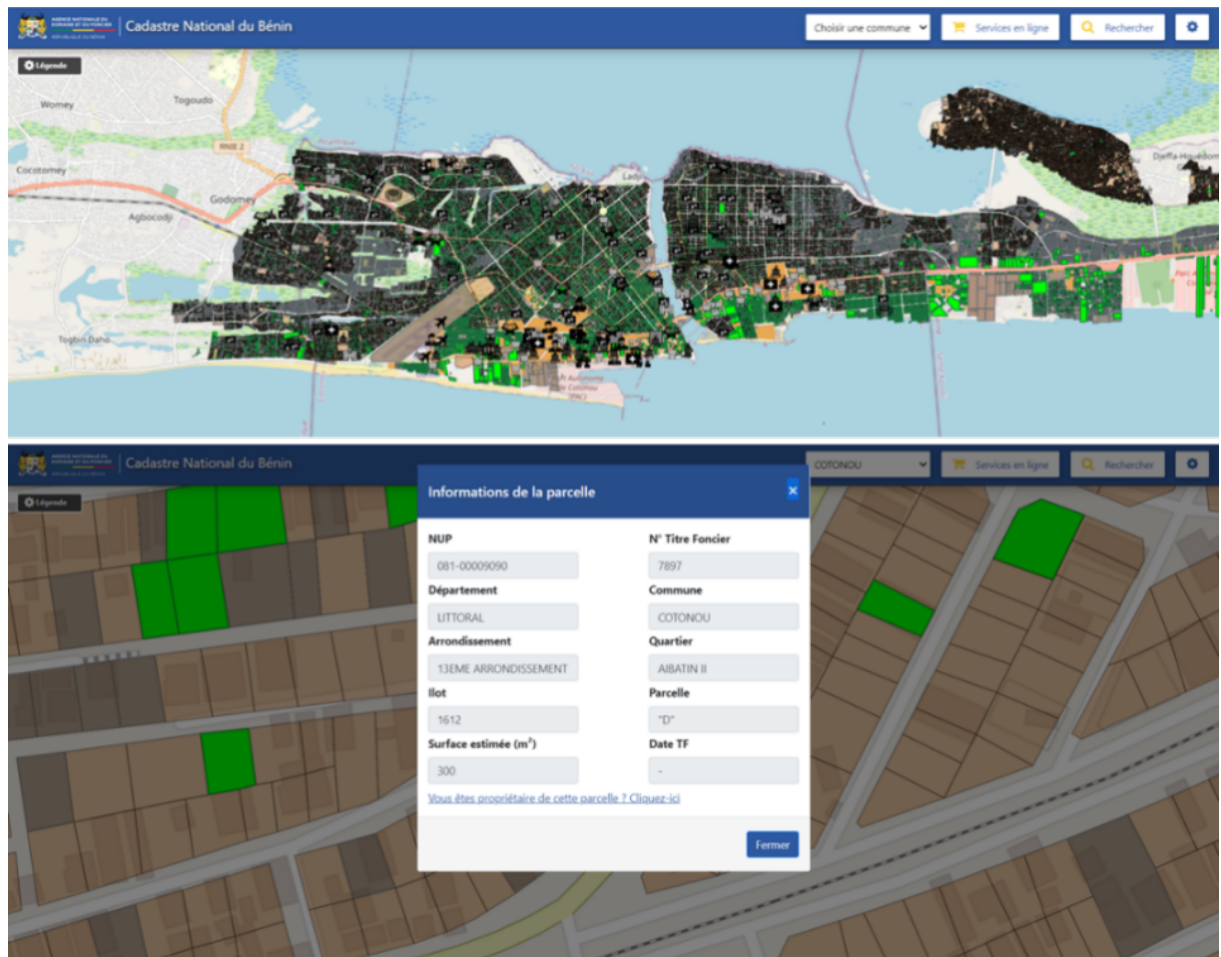


Рисунок 41 — Существующая кадастровая база данных Республики Бенин при Национальном агентстве государственного имущества и земельных ресурсов (ANDF) [82]

Для совершенствования системы кадастра Республики Бенин автором предложена структура базы данных населённых пунктов страны. Она состоит из общей характеристики населённых пунктов, кадастровых данных и природно-экологических характеристик (рисунок 42). Автоматизированный характер базы обеспечивается тем, что слои третьего раздела — маски застроенных территорий, водных объектов и зон затопления — формируются программными средствами по

результатам дешифрирования разновременных космических изображений (разделы 2.5.2, 2.5.3) и обновляются при каждой очередной съёмке в автоматизированном режиме с последующим интерактивным уточнением контуров. Ведение базы данных предусматривается в ANDF и в Министерстве жизненной среды и транспорта, ответственном за устойчивое развитие, Республики Бенин по принципам инфраструктуры пространственных данных [29; 31; 32]. Предложенная структура (рисунки 42—45, приложение Б) предназначена для интеграции в действующую базу данных ANDF и реализуется штатными средствами ГИС — в формате файловой базы геоданных ArcGIS (File Geodatabase), поддерживаемом также QGIS, с векторными слоями таблицы Б.2 и связанными атрибутивными таблицами — без разработки специального программного обеспечения. Структура реализована в виде прототипа базы данных, заполненного данными г. Котону и земельного участка с номером права собственности (titre foncier) TF № 7897 (приложение Б, рисунок Б.1); её развёртывание в информационной системе ANDF относится к внедрению результатов исследования.

Действующая кадастровая база данных ANDF (рисунок 41) содержит правовые, геометрические и фискальные сведения о земельном участке, а также сведения об объектах инфраструктуры; природно-экологические характеристики в составе сведений, описанном ANDF, не предусмотрены [67]. Предлагаемая структура сохраняет эти сведения, дополняет раздел II предложенными автором показателями (на рисунке 44 выделены коричневым цветом) и вводит два новых раздела: общую характеристику населённого пункта и природно-экологические характеристики территории. Состав показателей каждого раздела, источники их заполнения и периодичность обновления приведены в приложении Б (таблица Б.1), состав пространственных слоёв с указанием типа объекта и ключа связи с атрибутивной частью — в таблице Б.2. Именно раздел природно-экологических характеристик обеспечивает возможность, отсутствующую в действующей базе данных, — установление факта расположения земельного участка в границах зоны затопления или буферной зоны, что является условием выявления случаев

застройки, рассмотренных в разделе 3.6. Разделы I и III ведутся на уровне населённого пункта, единицей учёта которого принята коммуна (ключ — код коммуны), раздел II — на уровне земельного участка (ключ — кадастровый номер); связь между уровнями устанавливается по коду коммуны, входящему в состав адресных сведений земельного участка, а соотношение записей разделов I и II — «один ко многим».

Приведённые на рисунках 43—45 значения показателей являются условным примером заполнения формы. В частности, графа «кадастровая стоимость» отнесена к предлагаемым положениям: кадастровая стоимость по результатам государственной кадастровой оценки в Республике Бенин не устанавливается, а административная оценка незастроенных земель имеет фискальное назначение (статья 158 Общего налогового кодекса Республики Бенин [85]); приведённая величина является условной и подлежит уточнению при переходе к кадастровой оценке (раздел 3.8). На рисунке 44 в верхней строке запись приведена в том виде, в каком её формирует ANDF, — на французском языке, официальном языке Республики Бенин, — а в нижней строке дано её представление на русском языке.

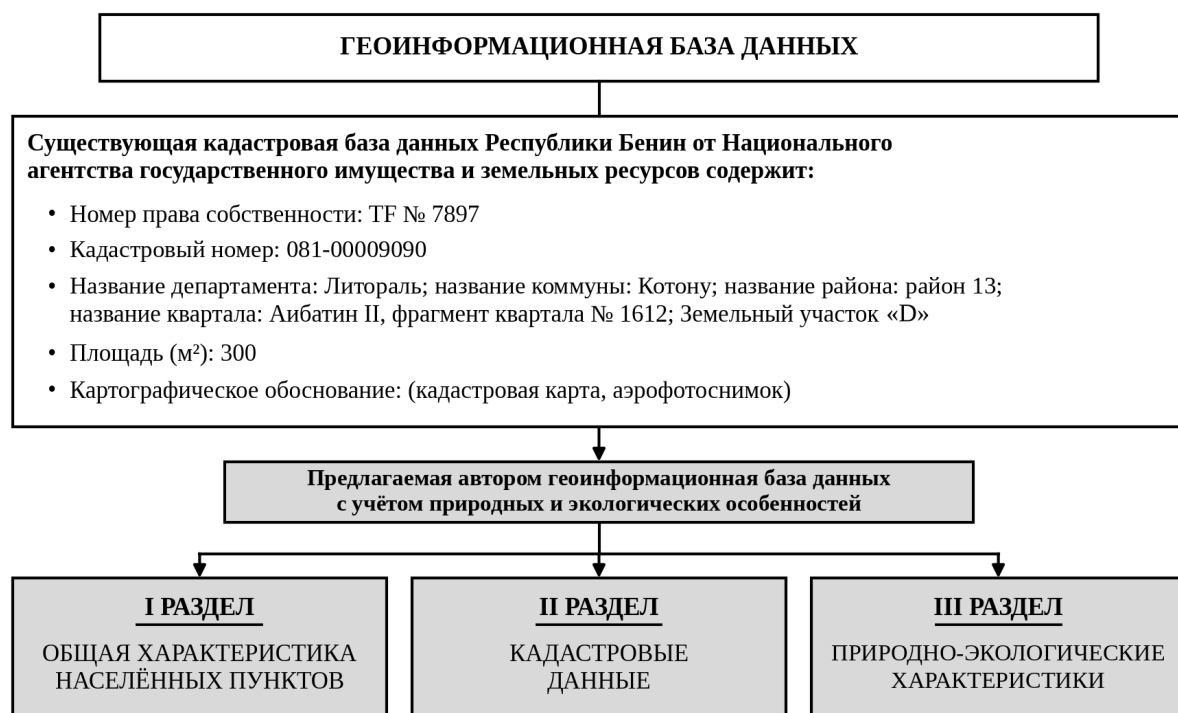


Рисунок 42 — Предлагаемая структура геоинформационной базы данных населённых пунктов Республики Бенин

Название и вид населённого пункта	Местоположение, площадь, численность населения, карта-схема нас. п.	Хозяйственно-экономическая сфера	Социальная и культурная сфера	Климат и рельеф	Гидрография, почвенные и геологические условия	Флора и фауна, наличие ООПТ	Сельское хозяйство, животноводство	Форма расселения и характер застройки	Промышленные зоны, виды транспорта, разведка, добыча и переработка полезных ископаемых	Транспортные узлы	Образовательные и научные центры	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Котону, крупный город по численности населения	Западная Африка, южное побережье Бенина, 7900 га, 679 012 чел. (2013) 	Администрация Кабинет Президента, Министерство, Мэрия	Рестораны, кафе, памятники, стадионы, торговые центры, рынки, больницы, аптеки, зоны отдыха	Тропический климат. Ср. темп.: 27,20 °С. Ср. значение выпадения осадков за год: 1303 мм. Относительно плоский рельеф.	Озеро Нокуэ, гидроморфные песчаные (аллювиальные) почвы	Прибрежные зоны оз. Нокуэ и лагуны Котону — водоохранные зоны шириной 200 м; мангровые заросли	Сельскохозяйственная зона — незначительные площади в границах города	Блочные дома	Завод, фабрика, склад, железнодорожный, автомобильный, речной, морской и воздушный транспорт, наличие добычи полезных ископаемых	Порт Котону, аэропорт Котону	Дошкольные, общеобразовательные и высшие учебные заведения, лаборатория	

Рисунок 43 — Предлагаемая структура базы данных населённых пунктов Республики Бенин. I РАЗДЕЛ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ

N°	Номер	Департамент, Коммуна, Район, Квартал, фрагмент квартала, земельный участок, вид объекта недвижимости	Владелец	Пользователь	Площадь, м²	Геодезическое обеспечение	Картографическое обоснование (кадастровая карта, космический снимок)	Категория земель	Кадастровая стоимость	Ограничения и обременения земельного участка	Дополнительные сведения
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	<u>N° Titre Foncier:</u> 7897 <u>Numéro Unique Parcelaire:</u> (NUP): 081-00009090	Littoral, Cotonou, 13ème arrondissement, AIBATIN II, Ilot 1612, Parcelle "D"	Noms et prénoms	Noms et prénoms	Площадь земельного участка: 300 Площадь объекта недвижимости: 222	Projection: UTM 31N Système géodésique: WGS 84 Coordonnées: X, Y Échelle: 1:500 – 1:5000	<u>Фрагмент кадастровой карты:</u> 	Les terres habitées (les agglomérations)	150 млн FCFA	Utiliser des parcelles sans titre de propriété et sans documents appropriés	
	<u>Номер права собственности на землю:</u> 7897 <u>Кадастровый номер:</u> 081-00009090	Литораль, Котону, Район 13, Аибатин II, Фрагмент квартала № 1612, Земельный участок «D» с блочным одноэтажным домом	Ф.И.О	Ф.И.О		Проекция: UTM 31N Геодезическая система: WGS 84 Координаты: X, Y Масштаб: 1:500 – 1:5000	<u>Фрагмент аэрофотоснимка:</u> 	Земли населённых пунктов	20 млн руб. по курсу валют	Использование земельных участков без права владения и надлежащих документов	

Значения приведены как условный пример заполнения формы: кадастровая стоимость в Республике Бенин не устанавливается — земли облагаются налогом по административной оценке.

Рисунок 44 — Предлагаемая структура базы данных населённых пунктов Республики Бенин. II РАЗДЕЛ.
КАДАСТРОВЫЕ ДАННЫЕ (чёрным цветом выделены существующие, коричневым — предлагаемые положения)

Название и вид населённого пункта	Природные (естественные) особенности		Антропогенные особенности					
	Наводнения		Загрязнения в результате добычи полезных ископаемых (затопление карьеров после разработки, загрязнение водных источников)	Загрязняющие выбросы в атмосферу (выбросы пыли и газов)	Загрязнение недр, почв (образование и развитие эрозии, уменьшение растительности, загрязнение почв химическими веществами)	Размещение отходов производства и потребления (объём хранения и захоронения отходов, образование объектов размещения отходов — полигонов)	Деградация растительности (рубка немногочисленных лесов, ухудшение условий жизни растений при изменении гидрологии водоёмов)	Организация ООПТ (лесовозобновление, охрана отдельных видов животных и растений, мониторинг экологического состояния)
	Затопления В целом на юге страны выпадает в среднем от 1000 до 1300 мм осадков в год, а на севере 800—900 мм за один сезон дождей (июнь — сентябрь)	Береговая абразия (Средняя скорость береговой абразии, м/год)						
	1	2	3	4	5	6	7	8
Котону (крупный город) — существующее состояние учёта	Природно-экологические характеристики в действующей кадастровой базе данных ANDF не предусмотрены [67]							

Рисунок 45 — Предлагаемая структура базы данных населённых пунктов Республики Бенин. III РАЗДЕЛ. ПРИРОДНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (существующее состояние учёта в г. Котону; результаты исследования — в таблице 23)

Показатели раздела III, не предусмотренные действующей базой данных ANDF (рисунок 45), заполнены по результатам исследования в таблице 23. Они подтверждают, что предложенная структура может быть заполнена по результатам дешифрирования космических изображений и геоинформационного анализа, а также по опубликованным данным. Показатели раздела III получены по объектам исследования: затопления и береговая абразия — г. Котону; загрязнения, связанные с добычей полезных ископаемых, — коммуна Каримама; деградация растительности — озеро Нокуэ и г. Бохикон; организация ООПТ — территория страны в целом.

Таблица 23 — Результаты исследования по III разделу базы данных населённых пунктов Республики Бенин

Показатель	Результат
Затопления	Осадки 1303 мм/год (г. Котону). Площадь зон затопления, га: 2002 — 3 007,17; 2010 — 3 660,48; 2017 — 2 723,67; 2024 — 2 575,89
Береговая абразия	Расчётная скорость 16 м/год (восточный участок побережья г. Котону, по опубликованным данным [141])
Загрязнения в результате добычи полезных ископаемых	Коммуна Каримама, район Лумбу-Лумбу: ресурсы железной руды месторождений Лумбу-Лумбу (226 млн т) и Мадекали (240 млн т), содержание железа 46—52 %; промышленная зона 68,00 га; санитарно-защитная зона шириной не менее 150 м; риск загрязнения вод сульфатами железа и марганца при переходе к промышленной добыче
Загрязняющие выбросы в атмосферу	Пылевые источники карьеров; санитарно-защитная зона шириной не менее 150 м вокруг контура промышленной зоны; выявлена застройка в пределах предлагаемой санитарно-защитной зоны
Загрязнение недр и почв	Снятие гумусового горизонта, техногенные отвалы, водная эрозия
Размещение отходов производства и потребления	Выделена зона специального назначения (объекты размещения отходов потребления) в модели функционального зонирования
Деградация растительности	Уничтожение мангровых зарослей оз. Нокуэ при добыче песка; г. Бохикон, участки леса: 1992 — 3 064,86 га; 2024 — 2 351,61 га
Организация ООПТ	ООПТ всех категорий (национальные парки, охотничьи угодья, классифицированные леса) занимают, по различным оценкам, от 19 до 30 % территории страны; на два национальных парка приходится около 7,3 %. Национальный парк Пенджари 275 000 га и охотничьи угодья Пенджари (частично в границах коммуны Тангьета площадью 564 750 га, а также коммун Матери и Керу); парк W du Bénin 563 280 га (коммуна

Показатель	Результат
	Каримама 604 100 га). Буферные зоны: водные объекты 50—200 м (лагуна Котону 200 м, оз. Нокуэ 200 м, р. Куффо 100 м), берег океана 100 м, ООПТ национального значения 500 м, вокруг карьеров не менее 150 м

3.4. Разработка структуры геоэкологического паспорта водного объекта

Значимым элементом совершенствования кадастрового учёта является создание геоэкологических паспортов водных объектов, которые обеспечивают систематизацию информации о природных характеристиках и антропогенных воздействиях.

Полная форма геоэкологического паспорта водного объекта, предназначенная для заполнения при ведении кадастрового учёта, приведена в приложении В.

Таблица 24 — Геоэкологический паспорт водных объектов населённых пунктов Республики Бенин (пример: водные объекты г. Котону)

Показатель	Значение
Тип населённого пункта	Крупный город (Котону)
Название и вид водного объекта	Озеро Нокуэ, лагуна Котону и участок Атлантического океана — поверхностные водные объекты
Гидрологический режим	Сезонный. Два дождевых сезона: апрель—июль и сентябрь—октябрь; годовое количество осадков 1303 мм. В дождевые сезоны уровень воды в озере Нокуэ и лагуне Котону повышается, вызывая затопление низменных северных кварталов г. Котону (средние отметки около 0,7 м). Расчётная скорость береговой абразии на восточном участке побережья г. Котону — 16 м/год (по опубликованным данным [141])
Основные виды антропогенного воздействия	Портовая деятельность, добыча песка, неформальная застройка в прибрежной полосе, сезонное затопление
Площадь зон затопления по годам наблюдения, га	2002 — 3 007,17; 2010 — 3 660,48; 2017 — 2 723,67; 2024 — 2 575,89
Площадь заболоченных территорий по годам наблюдения, га	2002 — 6 032,25; 2010 — 4 444,29; 2017 — 3 567,06; 2024 — 3 831,48
Категория риска затопления прилегающих земель	Подлежит определению при ведении паспорта по маскам всех дат ряда (раздел 2.2.1)
Территории, попадающие в зону затопления, в	Преимущественно селитебная зона — жилая застройка в зонах затопления, выявленная при кадастровом зонировании кварталов

Показатель	Значение
разрезе функциональных зон	(раздел 2.2.1, таблица 7); распределение площадей по остальным функциональным зонам подлежит определению при ведении паспорта
Границы буферных зон: ширина, м; площадь, га	Лагуна Котону — 200 м, 169,00 га; озеро Нокуэ — 200 м; берег Атлантического океана — 100 м (площади двух последних полос подлежат определению при ведении паспорта; раздел 2.3, таблица 8)
Виды разрешённого использования прилегающих земель и установленные ограничения	В границах буферных зон запрещено возведение объектов капитального строительства; допускаются рекультивация нарушенных земель, восстановление мангровых зарослей и водной растительности, рекреационное использование без капитальной застройки, размещение линейных объектов инженерной защиты. За пределами буферных зон виды разрешённого использования устанавливаются градостроительным регламентом соответствующей функциональной зоны (раздел 3.7)
Источники данных	Разновременные космические изображения Landsat 2002, 2010, 2017 и 2024 гг. (таблица 17); кадастровые материалы ANDF и мэрии г. Котону (2019—2022 гг.); рекогносцировочное обследование территории (2019—2020 гг.); контур озера Нокуэ по отчёту Министерства жизненной среды и транспорта, ответственного за устойчивое развитие, Республики Бенин (2022 г.); опубликованные данные о наводнениях 1985—2020 гг. (таблица 12) и о береговой абразии [14; 91; 125; 141]; Земельный и имущественный кодекс Республики Бенин [39]
Цель ведения паспорта	Зонирование населённых пунктов
Примечание / аналитический комментарий	Геоэкологическая оценка показывает высокий уровень антропогенной нагрузки на прибрежные территории и необходимость системного мониторинга состояния водных объектов

Геоэкологический паспорт водного объекта систематизирует сведения о гидрологическом режиме, хронологии наводнений, состоянии береговой линии и границах буферных зон [1; 24; 105; 142] и служит основой для мониторинга состояния водных объектов, планирования мероприятий по их охране и восстановлению и управления прилегающими территориями.

Та же структура применена к двум объектам, рассмотренным по отдельности и различающимся типом, гидрологическим режимом, характером антропогенного воздействия и географическим положением, — лагуне Котону и реке Куффо (таблица 25). Второй объект выбран намеренно за пределами г. Котону: река Куффо относится к бассейну Атлантического океана и протекает в юго-западной части страны, тогда как лагуна Котону расположена в черте крупнейшего города и связана с озером Нокуэ. Такой выбор позволяет проверить

структуру паспорта на объектах разных типов и разных природных условий, а не только на водных объектах одного населённого пункта.

Таблица 25 — Геоэкологические паспорта разнотипных водных объектов (лагуна Котону и река Куффо)

Показатель	Лагуна Котону	Река Куффо
Тип населённого пункта	Крупный город (Котону)	Населённые пункты юго-западной части страны (участок реки за пределами г. Котону)
Название и вид водного объекта	Лагуна Котону — поверхностный водный объект (канал, соединяющий озеро Нокуэ с Атлантическим океаном, сооружён в 1885 г.)	Река Куффо — поверхностный водный объект
Гидрологический режим	Переменный солевой режим; связь с океаном через узкий пролив; повышение уровня в дождевые сезоны	Сезонный сток; ежегодные разливы, формирующие пойменные территории
Основные виды антропогенного воздействия	Портовая деятельность, добыча песка, неформальная застройка в прибрежной полосе, сезонное затопление	Усиление эрозионных процессов, сезонные разливы, хозяйственное освоение пойменных территорий
Площадь зон затопления по годам наблюдения, га	Учитывается в составе зон затопления исследуемого фрагмента г. Котону (таблица 18)	В рамках настоящего исследования не определялась; подлежит определению при ведении паспорта
Площадь заболоченных территорий по годам наблюдения, га	Учитывается в составе заболоченных территорий исследуемого фрагмента г. Котону (таблица 18)	Не определялась; подлежит определению по данным ДЗЗ
Категория риска затопления прилегающих земель	Подлежит определению при ведении паспорта по маскам всех дат ряда (раздел 2.2.1)	Подлежит определению при ведении паспорта (раздел 2.2.1)
Территории, попадающие в зону затопления, в разрезе функциональных зон	Селитебная, производственная, ландшафтно-рекреационная и охранный зоны (приложение А)	Селитебная и сельскохозяйственная зоны (приложение А)
Границы буферных зон: ширина, м; площадь, га	200 м (двустороннее построение буфера); 169,00 га	100 м (двустороннее построение буфера); 78,00 га
Виды разрешённого использования прилегающих земель и установленные ограничения	В границах буферной зоны запрещено возведение объектов капитального строительства; допускаются рекультивация нарушенных земель, восстановление мангровых зарослей, рекреационное использование без капитальной	В границах буферной зоны запрещено возведение объектов капитального строительства; допускаются рекультивация нарушенных земель и сельскохозяйственное использование без капитальной застройки

Показатель	Лагуна Котону	Река Куффо
	застройки	
Источники данных	Кадастровые материалы ANDF (2019—2022 гг.); космические изображения Landsat 2002, 2010, 2017 и 2024 гг. (таблица 17)	Космические изображения Landsat (раздел 2.5); ГИС-анализ
Цель ведения паспорта	Зонирование населённых пунктов	Зонирование населённых пунктов
Примечание / аналитический комментарий	Объект расположен в черте крупнейшего города страны	Объект расположен за пределами г. Котону

Сопоставление паспортов (таблицы 24 и 25) иллюстрирует применение дифференцированной шкалы раздела 2.3 к водным объектам разных категорий: 100 м для реки Куффо и 200 м для озера Нокуэ и лагуны Котону, расположенных в черте крупнейшего города страны. Заполнение паспорта для водных объектов двух различных типов и местоположений показывает, что состав разделов формы сохраняется, изменяются только значения показателей, а отдельные показатели — площади зон затопления и заболоченных территорий для реки Куффо — остаются незаполненными и подлежат определению при ведении паспорта.

3.5. Анализ причин и последствий затопления территорий населённых пунктов и меры по предупреждению наводнений

Существуют естественные и антропогенные причины затопления территорий. Природными причинами являются осадки различной интенсивности и свойства почв: при продолжительных обильных дождях после насыщения почвы вода перестаёт впитываться и распространяется по поверхности. Такой процесс более заметен в городских районах, где здания и дороги вызывают уплотнение почвы, повышая риск наводнений [14; 102].

Территория г. Котону предрасположена к наводнениям вследствие сочетания климатических, почвенных и геоморфологических факторов. По результатам дешифрирования космических изображений (таблица 18) заболоченные территории занимают в границах исследуемого фрагмента 3 831,48 га из 32 720,13 га, то есть 11,71 %, а если исключить акватории —

24,41 % суши. Побережье сложено гидроморфными песчаными почвами с ограниченной фильтрационной способностью; сток дождевых вод затруднён малыми уклонами поверхности (средняя отметка около 0,7 м над уровнем моря); в период сильных дождей почва перенасыщается водой, которая скапливается на поверхности [68; 115]; во время наводнения озеро Нокуэ выходит из берегов.

Под совокупным воздействием климатических и гидрогеологических факторов наводнения регулярно повторяются, однако их последствия усилились в последние десятилетия вследствие антропогенных причин: поймы, прежде использовавшиеся только для земледелия по мере спада паводковых вод, стихийно заселены; в больших городах население селится в низинах, болотах и руслах водотоков, служащих естественными путями стока, вследствие чего эти районы затапливаются в каждый сезон дождей; отсутствие системы наблюдения и предупреждения затоплений, планирования и зонирования населённых пунктов, неконтролируемое расширение границ застройки на земли мелководья и территории, примыкающие к водотокам, а также ограниченные ресурсы органов кризисного управления (гидрологическая и метеорологическая службы, гражданская защита) усугубляют последствия наводнений [13; 126].

Состав отрицательных последствий наводнений для инфраструктуры населённых пунктов и для социально-экономического положения населения рассмотрен в разделе 3.8. Со временем изменение климата, характеризующееся ростом количества осадков, приводит к усилению этих воздействий, которые наиболее тяжело сказываются на самых бедных слоях населения [14; 74; 84; 87].

Таким образом, наводнения в Котону обусловлены сочетанием природных и антропогенных факторов [98; 106]; состав и количественная оценка ущерба от затоплений приведены в разделе 3.8. Пример застройки в зоне, подверженной затоплению, приведён на рисунке 46.

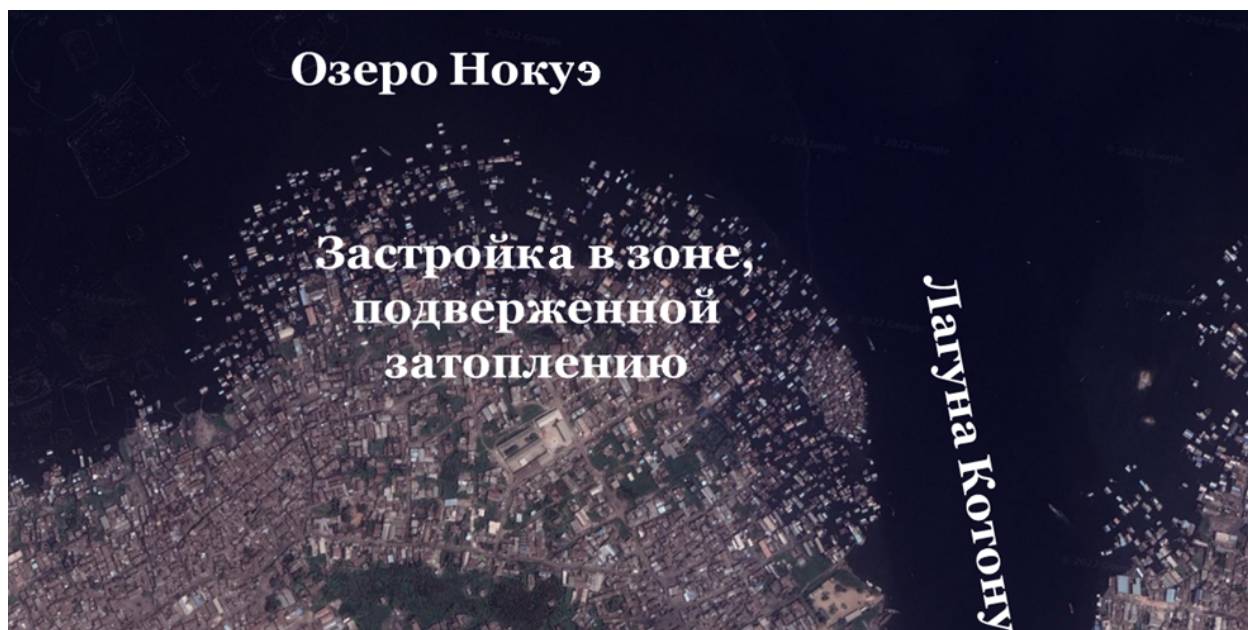


Рисунок 46 — Космический снимок участка г. Котону с зоной, подверженной затоплению (Google Earth, 2023 г.; надписи нанесены автором)

Застройка городских территорий, ведущаяся без учёта природных ограничений, нарушает гидрологический режим: сокращается площадь естественной фильтрации, перекрываются пути поверхностного стока, что увеличивает частоту и площадь затоплений. Зонирование, выполненное с учётом природных и экологических особенностей, является предупредительным инструментом снижения этого риска — оно позволяет заблаговременно исключить из состава зон капитальной застройки участки, подверженные затоплению, и дополняется гидромелиоративными мероприятиями [133].

Для г. Котону, где древесная растительность была уничтожена при строительстве жилья, необходимы восстановление зелёных зон, применение конструкций зданий, не препятствующих поверхностному стоку, и создание дренажных сетей, поскольку недостаточность дренажа является основной причиной наводнений в городах [76; 136]; на уровне страны меры по предупреждению наводнений и адаптации хозяйства к изменению климата могут быть реализованы после создания системы мониторинга наводнений и затоплений земель с картографической составляющей [87; 105].

3.6. Апробация методики зонирования на примере городов Котону и Бохикон и оценка достоверности выделенных границ

Для апробации разработанной методики зонирования населённых пунктов Республики Бенин были проведены экспериментальные исследования с использованием ГИС-анализа и методов дистанционного зондирования. В качестве пилотной территории был выбран город Котону — крупнейший город страны с высокой плотностью населения и выраженными природными рисками (затопления, береговая абразия) [91; 136].

Апробация включала три этапа.

Сбор и подготовка данных: разновременные космические снимки Landsat (таблица 17); кадастровая информация из базы данных ANDF; данные о гидрологическом режиме озера Нокуэ по опубликованным источникам [142].

Применение методики зонирования: анализ функционального использования земель на основе метода масок и метода максимального правдоподобия; выделение зон затопления и заболачивания, построение буферных зон; формирование набора тематических слоёв в ГИС с учётом природных рисков.

Результаты апробации: методика позволила установить контуры зон затопления, которые в действующих кадастровых материалах не отражены; результаты дешифрирования отнесены к площади фрагмента, охваченного классификацией космических изображений (32 720,13 га, таблица 18); её следует отличать от площади коммуны Котону в административных границах (7 900 га); заполнен геоэкологический паспорт водных объектов исследуемой территории по форме, приведённой в приложении В (таблица 24), а также водного объекта иного типа за пределами города (таблица 25).

Составлен авторский оригинал карты-схемы структуры застройки на исследуемой территории с учётом природных и экологических особенностей (рисунок 47).

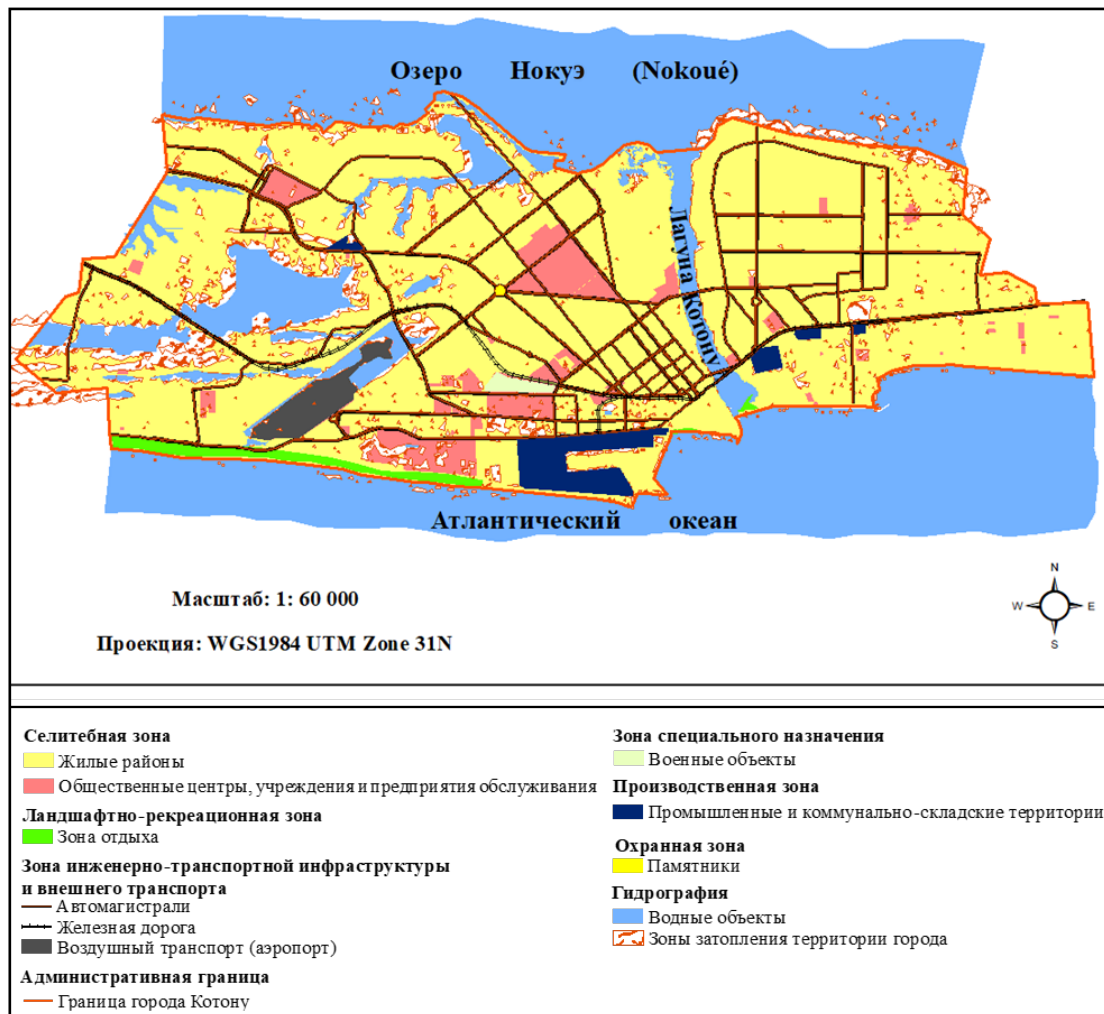


Рисунок 47 — Авторский оригинал карты-схемы структуры застройки г. Котону с учётом природных и экологических особенностей

Результаты зонирования сопоставлены со слоем застроенных территорий, выделенным по космическим изображениям:

1. В результате наложения слоя буферных зон — водоохранных зон водных объектов шириной 200 м, принятых в разделе 2.3 (прибрежные зоны озера Нокуэ и лагуны Котону к особо охраняемым природным территориям национального значения не отнесены, поэтому для них принята ширина водоохранной зоны соответствующего водного объекта по шкале раздела 2.3 — 200 м; охранная зона шириной 500 м устанавливается только вокруг ООПТ национального значения), — на слой застроенных территорий, выделенный по снимку Landsat-8 OLI января 2024 г. (таблица 17) методом максимального правдоподобия, выявлено 23 случая застройки в границах буферных зон;

случаем застройки считается непрерывный контур застроенной территории, выделенный методом максимального правдоподобия и пересекающий границу буферной зоны на площади не менее одного пикселя изображения Landsat, то есть 0,09 га (раздел 2.5.3). Указанное число характеризует количество случаев пересечения границы и не является оценкой площади застройки в границах буферных зон: последняя требует данных более высокого пространственного разрешения (раздел 2.5.3). Прибрежная защитная полоса берега океана (таблица 8) в наложение не включалась, поскольку её положение подлежит актуализации по береговой линии последней даты (раздел 3.8).

Число случаев застройки определяется по формуле

$$N_z = |\{ k : C_k \cap B \neq \emptyset \}|, \quad (9)$$

где C_k — множество пикселей k -го непрерывного (8-связного) контура класса «застроенная территория»; $B = B_H \cup B_L$ — множество пикселей, центры которых расположены вне водных объектов на расстоянии не более $w = 200$ м от береговой линии озера Нокуэ (B_H) или лагуны Котону (B_L). Условие $C_k \cap B \neq \emptyset$ означает, что в границах буферных зон находится хотя бы один пиксель контура (0,09 га); контур, пересекающий обе буферные зоны, учитывается один раз.

Достоверность выделенных границ оценена по матрицам ошибок (раздел 2.5.3) и контролем баланса площадей классов в границах фрагмента (таблица 18); геодезическое закрепление границ территориальных зон межевыми знаками предусмотрено методикой (таблица 20, этап 4.4) и выполняется при внедрении.

2. Разработанная методика обеспечила выделение зон затопления и заболачивания с точностью 80,94 % против 62,99 % при использовании метода минимального расстояния (таблицы 13 и 14), что соответствует повышению достоверности выделения этих зон на 17,95 процентного пункта, или на 28,50 % относительно результата, полученного методом минимального расстояния, и даёт более надёжную основу для установления границ территориальных зон и ограничений на застройку.

Применимость методики к населённым пунктам иной категории проверена на территории г. Бохикон — среднего города по принятой классификации,

расположенного во внутренней части страны, на исследуемом фрагменте которого зоны затопления и участки береговой абразии по результатам дешифрирования не выделены (таблица 16). Для него выполнены этапы сбора данных, тематической обработки изображений и выявления природных ограничений: за период 1992—2024 гг. установлены сокращение лесных участков с 3 064,86 до 2 351,61 га и рост застроенной территории с 6 700,41 до 8 172,63 га (таблица 16, раздел 2.6). Ведущим природно-экологическим ограничением здесь выступает не затопление, а деградация растительности, вследствие чего при зонировании на первый план выходят ландшафтно-рекреационная и сельскохозяйственная зоны, а охранный зона водных объектов не выделяется. Это показывает применимость этапов 2 и 3 методики к населённому пункту иной категории, тогда как состав выявляемых ограничений определяется его природными условиями, а состав функциональных зон — категорией населённого пункта (приложение А) и этими ограничениями.

Ограничения метода: смешение спектральных откликов застроенных территорий и открытых грунтов на изображениях среднего разрешения; невозможность различения функционального назначения застройки по изображениям Landsat, вследствие чего границы функциональных зон внутри застроенной территории устанавливаются по кадастровым материалам (раздел 1.5).

Ограничения полученных оценок:

1. Все использованные космические изображения получены в сухой сезон (декабрь—февраль), тогда как дождевые сезоны приходятся на апрель—июль и сентябрь—октябрь. Приведённые площади зон затопления и заболачивания характеризуют состояние территории на дату съёмки и представляют собой нижнюю оценку по отношению к годовому максимуму затопления; уточнение границ этих зон требует привлечения цифровой модели рельефа и данных гидрологических наблюдений.

2. Расчётная скорость отступления береговой линии 16 м/год принята по опубликованным данным для восточного участка побережья г. Котону,

расположенного к востоку от молов порта, ниже по направлению вдольберегового переноса наносов (раздел 2.2.1), и не распространяется на весь берег исследуемого фрагмента; этим объясняется отсутствие соответствующего прироста площади водных объектов в таблице 18.

3.7. Предложения по составу территориальных зон и содержанию градостроительного регламента

В настоящей работе термин «функциональная зона» применяется при разработке модели зонирования (глава 1), «территориальная зона» — при установлении градостроительного регламента (настоящий раздел); состав зон в обоих случаях единый (приложение А). Связь природных и экологических факторов с выявляемыми ограничениями, территориальными зонами и содержанием градостроительного регламента приведена на рисунке 48.

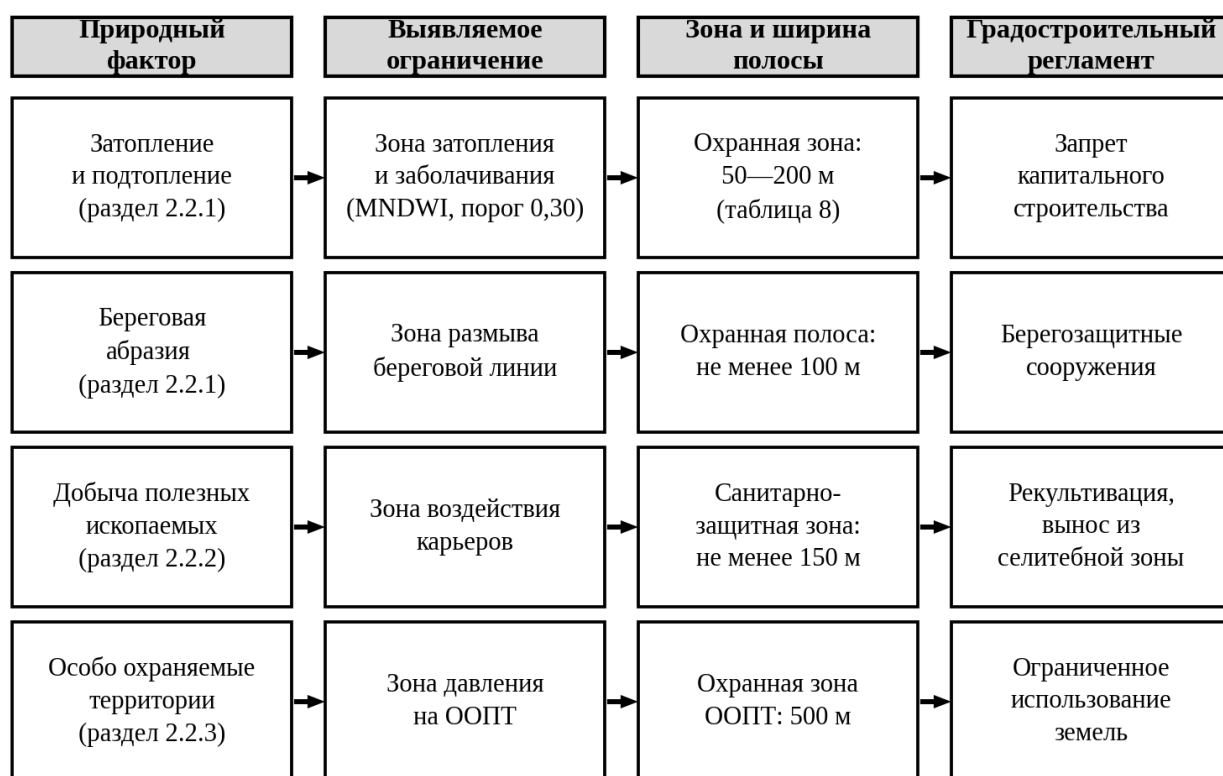


Рисунок 48 — Связь природных и экологических факторов, выявляемых ограничений, территориальных зон и градостроительных регламентов

Действующее законодательство Республики Бенин — Земельный и имущественный кодекс [39] с изменениями [36] и рамочный закон № 2016-06 о

территориальном планировании [48] — закрепляет за коммунами полномочия по разработке генеральных схем обустройства коммун (SDAC). Закон № 2024-27 [38] предусматривает PDU с градостроительным регламентом (*règlement d'urbanisme*), однако не устанавливает перечня основных видов территориальных зон общего применения; для коммун с особым статусом срок утверждения PDU — до пяти лет (ст. 168). Поэтому приведённые ниже рекомендации сформулированы по аналогии с российской практикой градостроительного зонирования (статьи 30—36 Градостроительного кодекса РФ [8], статья 85 Земельного кодекса РФ [26]) и адаптированы к составу восьми функциональных зон, обоснованному в разделе 1.5 и приведённому в приложении А, и к перечню видов разрешённого использования земель (таблица 6), а также к природно-экологическим ограничениям, выявленным в главе 2. Ссылки на российские нормы приводятся как источник аналогии и не означают их прямого действия на территории Республики Бенин. В настоящем разделе определяется состав градостроительного регламента и перечень устанавливаемых ограничений (приложение А, таблица А.1); конкретные числовые значения предельных параметров разрешённого строительства относятся к компетенции национальных градостроительных нормативов и в работе не устанавливаются.

Состав территориальных зон, их наполнение объектами и устанавливаемые для каждой зоны ограничения приведены в приложении А (таблица А.1); перечень видов разрешённого использования земельных участков, соотнесённых с этими зонами, — в таблице 6 и разделе 2.2.1.

Описание градостроительного регламента, устанавливаемого для каждой территориальной зоны, включает: виды разрешённого использования земельных участков и иных объектов недвижимости; предельные (минимальные и (или) максимальные) параметры разрешённого строительства; ограничения использования территории в соответствии с требованиями в области охраны культурного наследия, санитарно-эпидемиологическим и экологическим законодательством, иными требованиями, установленными законами и другими нормативными правовыми актами [8; 34; 101]. Для территорий, подверженных

затоплению, ограничения дифференцируются по категориям риска I—III (раздел 2.2.1).

На карте градостроительного зонирования фиксируются границы территориальных зон коммуны (в российской практике их состав установлен статьёй 35 Градостроительного кодекса РФ [8]), и для каждой из них устанавливается градостроительный регламент. Градостроительным регламентом определяется правовой режим земельных участков, равно как и всего, что находится над и под поверхностью земельных участков и используется в процессе их застройки и последующей эксплуатации объектов капитального строительства (по аналогии с частью 1 статьи 36 Градостроительного кодекса РФ [8]).

3.8. Эколого-экономическая оценка предлагаемых решений

Кадастровая стоимость по результатам государственной кадастровой оценки в стране не устанавливается; налогообложение незастроенных земель основано на административной оценке фискального назначения (статья 158 Общего налогового кодекса Республики Бенин [85]). Ниже приведена оценка порядка величин, выполненная по опубликованным данным о фактическом ущербе от наводнений и о стоимости инженерных мероприятий по защите территории.

Сопоставление с существующей практикой зонирования. Закон № 2024-27 [38] относит земли, подверженные риску затопления, к незастраиваемым (ст. 44), а типовой регламент руководства по разработке SDAC [103] запрещает застройку понижений и заболоченных земель (ст. 49); вместе с тем законом № 2018-10 [49] и Земельным и имущественным кодексом [39] установлены фиксированные охранные полосы (25, 100 и 200 м), без дифференциации их ширины и режимов использования земель по степени риска затопления (разделы 2.3, 3.7). В границах исследуемого фрагмента г. Котону площадью 32 720,13 га это означает, что 2 575,89 га зон затопления и 3 831,48 га заболоченных территорий, выявленных по результатам дешифрирования (таблица 18), не обеспечены установленными

границами, необходимыми для однозначного пространственного отнесения конкретных земельных участков к территориям с соответствующими ограничениями использования. Применение предлагаемой методики переводит эти земли в охранную зону и в зону с ограничениями землепользования, что охватывает 6 407,37 га, или 19,58 % площади фрагмента и 40,81 % его суши (площадь фрагмента за вычетом водных объектов 2024 г. — 15 698,79 га). Кроме того, наложение слоя буферных зон на слой застроенных территорий выявило 23 случая застройки в границах буферных зон (раздел 3.6), которые при действующем порядке не могли быть обнаружены, поскольку сами границы этих зон не установлены.

Оценка предотвращаемого ущерба. По данным отчёта об оценке потребностей после катастрофы, подготовленного Правительством Республики Бенин совместно со Всемирным банком и Организацией Объединённых Наций, суммарный ущерб от наводнений 2010 г. составил 78,3 млрд франков КФА (Африканского финансового сообщества) прямых разрушений и 48,8 млрд франков КФА косвенных потерь, то есть 127,1 млрд франков КФА (около 260 млн долларов США) при 680 000 пострадавших [109]. Плотность населения департамента Литораль, полностью занятого городом Котону, равна 8 595,1 чел./км² по переписи 2013 г. (таблица 1). Оценка выполнена для условного сценария полной застройки зоны затопления со средней для города плотностью населения. Удельный ущерб на одного пострадавшего y и потенциальный ущерб Y в границах зоны затопления вычислены по формулам (10) и (11):

$$y = (D_{np} + D_{косв}) / N, \quad (10)$$

$$Y = S \cdot \rho \cdot y, \quad (11)$$

где D_{np} и $D_{косв}$ — прямой и косвенный ущерб от наводнения 2010 г., франков КФА; N — число пострадавших; S — площадь зоны затопления, км²; ρ — плотность населения, чел./км².

При $D_{np} = 78,3$ млрд, $D_{косв} = 48,8$ млрд франков КФА и $N = 680\,000$ удельный ущерб составляет $y \approx 186,9$ тыс. франков КФА; при $S = 25,7589$ км² (2 575,89 га) и $\rho = 8\,595,1$ чел./км² в границах зоны затопления проживало бы около 221 400

человек, а ущерб U от события, аналогичного наводнению 2010 г., составил бы около 41,38 млрд франков КФА; именно этот потенциальный ущерб предотвращается запретом капитального строительства в зоне затопления. Площадь 2 575,89 га относится к 2024 г. и является наименьшей в ряду 2002—2024 гг. (таблица 18); при расчёте по наибольшему значению ряда — 3 660,48 га (2010 г.) — оценка составила бы около 58,81 млрд франков КФА. Полученные величины характеризуют порядок ущерба при полной застройке зоны; фактически предотвращаемый ущерб пропорционален доле незастроенной части зоны, сохраняемой от застройки.

Сопоставление с затратами на инженерную защиту. Программа ливневого водоотведения г. Котону предусматривает освоение 264 млрд франков КФА на 34 из 50 водосборных бассейнов города [57]. Прямое сопоставление этой суммы с расчётным ущербом некорректно: программа охватывает город целиком, тогда как ущерб в 41,38 млрд франков КФА рассчитан для зоны затопления исследуемого фрагмента площадью 2 575,89 га. Сопоставимы лишь порядки величин: по данным таблицы 12 наводнения, сопоставимые по масштабу с наводнением 2010 г., отмечены дважды за период наблюдений (1985 и 2010 гг.), что соответствует интервалу около 25 лет между ними; при сроке службы сооружений 25—30 лет на период их эксплуатации приходится одно—два таких события, то есть предотвращаемый за срок службы сооружений ущерб оценивается в 41,4—82,8 млрд франков КФА (при 41,38 млрд на одно событие). Зонирование, устанавливающее запрет капитального строительства в границах зон затопления и буферных зон, не требует капитальных вложений и сводится к затратам на кадастровые работы и разработку градостроительного регламента; при этом оно предотвращает формирование самого объекта ущерба — застройки в границах затапливаемых территорий. Предупредительное зонирование и инженерная защита не заменяют, а дополняют друг друга: первое применимо к незастроенным территориям, второе — к уже освоенным.

Оценка потерь от береговой абразии. При расчётной скорости отступления береговой линии 16 м/год, принятой по опубликованным данным для восточного

участка побережья г. Котону (раздел 2.2.1), потеря земель на этом участке составила бы 1,6 га в год на каждый километр берега. Для прибрежных территорий, отнесённых по предлагаемой методике к охранной зоне, это определяет периодичность актуализации границ: при пространственном разрешении 30 м смещение береговой линии становится достоверно обнаруживаемым примерно через два года, что и обосновывает корректировку границ прибрежных охранных зон не реже одного раза в два года; ежегодная съёмка сохраняется как средство контроля экстремальных событий.

Экологическая составляющая оценки выражается в сохранении от застройки 6 407,37 га земель с природными ограничениями — зон затопления и заболоченных территорий, выполняющих функции естественной аккумуляции и фильтрации поверхностного стока (раздел 3.5), — а также в создании условий для восстановления мангровых зарослей в границах буферных зон (раздел 2.2.1).

Приведённые расчёты имеют оценочный характер и опираются на средние по стране показатели ущерба и на среднюю плотность населения города; они не заменяют кадастровой оценки земель, которая в Республике Бенин не введена [85].

3.9. Выводы по главе 3

1. Разработана методика зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей (таблица 20), объединяющая шесть этапов — от формирования теоретико-методологической основы до информационного обеспечения и апробации; её отличительная черта состоит в том, что единый пространственный слой природных ограничений, выделенный по разновременным космическим изображениям, используется одновременно в пяти задачах: градостроительном регулировании, кадастровом учёте, установлении буферных зон, мониторинге застройки и оценке предотвращаемого ущерба (таблица 21, рисунок 39).

2. Разработан алгоритм совершенствования системы зонирования (рисунок 40, таблица 22), включающий пятнадцать действий в пяти этапах и отличающийся от действующего порядка тем, что природные ограничения определяются до выбора модели зонирования, участники каждого этапа закреплены явно, а процесс замкнут периодической актуализацией — для прибрежных охранных зон не реже одного раза в два года.

3. Разработана структура геоинформационной базы данных населённых пунктов из трёх разделов — общая характеристика, кадастровые данные, природно-экологические характеристики, — связанных по коду коммуны и кадастровому номеру; раздел природно-экологических характеристик обеспечивает установление факта расположения земельного участка в границах зоны затопления или буферной зоны, что не предусмотрено составом сведений кадастра, описанным ANDF. Заполняемость раздела показана по результатам исследования (таблица 23); структура реализована в виде прототипа (рисунок Б.1), а её интеграция в базу данных ANDF относится к внедрению результатов.

4. Разработана структура геоэкологического паспорта водного объекта (приложение В), заполненная для водных объектов г. Котону и для реки Куффо (таблицы 24, 25); сопоставление паспортов показало, что состав разделов формы сохраняется для объектов разных типов и местоположений.

5. По литературным данным с учётом результатов дешифрирования (освоение застройкой заболоченных земель) показано, что наводнения в г. Котону обусловлены сочетанием природных факторов (низменный рельеф с отметками около 0,7 м, гидроморфные песчаные почвы, подъём уровня озера Нокуэ) и антропогенных (застройка пойм и заболоченных земель, отсутствие дренажа), вследствие чего зонирование, исключаяющее затапливаемые участки из зон капитальной застройки, является предупредительным инструментом, дополняющим инженерную защиту.

6. Апробация методики на территории г. Котону дала авторский оригинал карты-схемы структуры застройки (рисунок 47) и выявила 23 случая застройки в границах буферных зон, не обнаруживаемых при действующем порядке; проверка

на г. Бохикон показала применимость этапов 2 и 3 методики (таблица 20) к среднему городу, а состав выявляемых ограничений определяется природными условиями. Достоверность выделения зон затопления и заболачивания оценена по матрицам ошибок (80,94 % для принятого метода максимального правдоподобия); площади зон затопления, полученные по изображениям сухого сезона, являются нижней оценкой годового максимума.

7. Предложены состав восьми территориальных зон и устанавливаемые для каждой из них ограничения как основа градостроительного регламента (приложение А, раздел 3.7) с дифференциацией по категориям риска затопления; конкретные числовые значения предельных параметров отнесены к компетенции национальных градостроительных нормативов.

8. Эколого-экономическая оценка показала, что применение методики переводит 6 407,37 га (19,58 % площади исследуемого фрагмента и 40,81 % его суши) в охранную зону и зону с ограничениями землепользования; потенциальный ущерб, предотвращаемый запретом застройки зоны затопления, оценивается в 41,38—58,81 млрд франков КФА на одно событие при ориентировочной повторяемости около 25 лет, при том что внедрение зонирования не требует капитальных вложений и дополняет инженерную защиту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования получены следующие основные результаты, имеющие теоретическое и практическое значение для зонирования и мониторинга развития земель:

1. Установлено, что природные и экологические ограничения землепользования в населённых пунктах Республики Бенин образуют три группы: сезонное затопление, подтопление и береговая абразия; нарушение земель при разведке и добыче полезных ископаемых; ограничения, связанные с землями ООПТ; по аналогии с рассмотренными зарубежными системами контур зоны природного ограничения принят единым для градостроительного регулирования и кадастра. Разработана классификация населённых пунктов Республики Бенин по численности населения: крупные (свыше 250 тыс. до 1 млн чел.), средние (свыше 100 до 250 тыс. чел.), малые (свыше 50 до 100 тыс. чел.) города и посёлки (50 тыс. чел. и менее); её применение ко всем 77 коммунах страны позволило выделить 5 крупных городов, 42 средних города, 27 малых городов и 3 посёлка. Разработана также классификация земель населённых пунктов по функциональному назначению и природно-экологическим ограничениям, обеспечивающая дифференцированный учёт состава функциональных зон и природных ограничений при зонировании территорий.

2. По результатам анализа современных систем спутникового зондирования обоснован выбор многозональных изображений Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI с пространственным разрешением 30 м как открытого ряда, обеспечивающего сопоставимые по сезону съёмки и спектральным каналам наблюдения за 1992—2024 гг.; определены требования к мониторингу: периодичность съёмки 1—3 года, для сезонного контроля паводка — радиолокационные данные, для детального градостроительного проектирования — изображения с разрешением 1—5 м (разделы 2.5.1, 2.6).

3. Обосновано и апробировано использование автоматизированной обработки космических снимков для выявления зон затопления и заболачивания как основных природных ограничений использования территории; выделение выполнено при едином для всех дат ряда пороговом значении индекса MNDWI, равном 0,30.

4. Обосновано применение геоинформационного метода масок при выделении зон затопления и заболоченных территорий по модифицированному водному индексу; выполнен сравнительный анализ методов классификации космических изображений; для мониторинга населённых пунктов Республики Бенин обоснован метод максимального правдоподобия, обеспечивший общую точность 93,30 % и коэффициент каппа Коэна 0,90; его преимущество наиболее выражено для класса «зона затопления и заболоченная территория» — точность производителя 80,94 % по сравнению с 62,99 % (таблицы 13 и 14, раздел 2.5.3). На этой основе разработан алгоритм применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий при зонировании населённых пунктов Республики Бенин (рисунки 25, 34), обеспечивающий последовательное выявление зон затопления и заболачивания и учёт береговой абразии.

5. Разработана комплексная методика зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей, объединяющая данные многозонального дистанционного зондирования, геодезические материалы, геоинформационный анализ и оценку природных рисков и позволяющая выявлять динамику застройки, водных объектов, зон затопления и заболачивания, а также обосновывать решения по функциональному зонированию. В состав методики включён порядок установления и утверждения границ населённых пунктов из семи этапов, отличающийся обязательным учётом природных ограничений, формализованным основанием для отклонения проекта границы и периодической верификацией границ (раздел 1.7). Геодезическое обеспечение методики основано на комбинировании спутникового метода для опорных межевых точек (средняя квадратическая погрешность не более 0,05 м) и наземного — для сгущения сети и контроля (не более 0,10 м); поскольку

законодательство Республики Бенин не содержит числовых допусков на точность положения характерных точек границ, в качестве ориентира принят приказ Росреестра № П/0393 ($Mt \leq 0,10$ м) (разделы 1.7.2, 2.4). Элементы методики восполняют выявленные пробелы нормативно-правового обеспечения (таблица 4): отсутствие перечня основных видов территориальных зон общего применения, дифференциации ширины охранных полос и режимов использования земель по степени риска затопления, а также раздела природно-экологических характеристик в кадастровой базе данных ANDF. Методикой предусмотрены относительная шкала риска затопления по числу дат ряда (категории I—III) и дифференцированная шкала ширины буферных зон 50—500 м, кратная нормативной полосе 25 м и построенная по аналогии с Водным кодексом РФ. Мониторинг по разновременным изображениям показал в г. Котону за 2002—2024 гг. рост застроенной территории на 2 861,01 га (44,49 %) при сокращении заболоченных территорий на 2 200,77 га (36,48 %), в г. Бохикон за 1992—2024 гг. — рост застройки с 6 700,41 до 8 172,63 га (ориентировочно). Комплексный характер методики подтверждён использованием её результатов в пяти задачах: градостроительного регулирования (раздел 3.7), кадастрового учёта (раздел 3.3), установления буферных зон (раздел 2.3), мониторинга застройки (раздел 2.6) и оценки предотвращаемого ущерба (раздел 3.8); соответствие задач и получаемых результатов приведено в таблице 21.

6. Разработана структура геоинформационной базы данных населённых пунктов Республики Бенин, включающая кадастровые, природные и экологические характеристики территорий и предусматривающая автоматизированное обновление раздела природно-экологических характеристик по результатам дешифрирования, что обеспечивает создание актуализируемого информационного ресурса для задач кадастра и зонирования; структура реализована в виде прототипа базы данных (рисунок Б.1).

7. Разработана структура геоэкологического паспорта водного объекта (приложение В), заполненная для водных объектов г. Котону и реки Куффо (таблицы 24, 25) и сохраняющая состав разделов для объектов разных типов и

местоположений. Разработан алгоритм совершенствования системы зонирования (рисунок 40, таблица 22) из пятнадцати действий в пяти этапах, в котором природные ограничения определяются до выбора модели зонирования, участники каждого этапа закреплены явно, а процесс замкнут периодической актуализацией — для прибрежных охранных зон не реже одного раза в два года. Предложены состав восьми территориальных зон и устанавливаемые для каждой из них ограничения с дифференциацией по категориям риска затопления как основа градостроительного регламента (приложение А).

Цель исследования — разработка методики зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей — достигнута; положения, выносимые на защиту, обоснованы результатами глав 1—3.

Практическая проверка разработанного научно-методического обеспечения на территории г. Котону дала следующие количественные результаты. Наложение слоя буферных зон на слой застроенных территорий, выделенный по изображению 2024 г., выявило 23 случая застройки в границах буферных зон, которые при действующем порядке не могли быть обнаружены, поскольку сами границы этих зон не установлены. Применение методики переводит 6 407,37 га, или 19,58 % площади исследуемого фрагмента и 40,81 % его суши, в охрannую зону и в зону с ограничениями землепользования. Оценка потенциального ущерба, предотвращаемого запретом застройки зоны затопления, по удельным показателям наводнения 2010 г. составляет около 41,38 млрд франков КФА на одно событие (58,81 млрд при расчёте по наибольшей площади зоны затопления ряда 2002—2024 гг.) при ориентировочной повторяемости около 25 лет, при том что внедрение зонирования не требует капитальных вложений.

Оценка полноты решения поставленных задач. Все семь задач, сформулированных во введении, решены (таблица 26). Достигнутые результаты подтверждены количественными оценками точности для г. Котону (раздел 2.5.3) и апробированы на территории г. Котону с проверкой переносимости методики на г. Бохикон (раздел 3.6). Границы зон затопления и заболачивания получены по

изображениям сухого сезона и представляют собой нижнюю оценку годового максимума (раздел 3.6), а оценки точности классификации получены по эталонным полигонам визуального дешифрирования (раздел 2.5.3); полевая верификация границ предусмотрена методикой на этапе внедрения (таблица 20, этап 4.4), что определяет направление дальнейших работ.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с распространением апробации методики, проверенной на крупном (г. Котону) и среднем (г. Бохикон) городах, на малые города и посёлки Республики Бенин; с привлечением радиолокационных данных, обеспечивающих наблюдение в сезон дождей, когда оптическая съёмка ограничена облачностью; с привлечением цифровых моделей рельефа для уточнения границ зон затопления; с использованием продуктов поверхностной отражательной способности Landsat Level-2 для повышения сопоставимости разновременных индексных изображений; с полевой верификацией эталонных полигонов и геодезическим закреплением границ территориальных зон при внедрении методики; а также с интеграцией геоэкологических паспортов водных объектов в геоинформационный ресурс Национального агентства государственного имущества и земельных ресурсов Республики Бенин. Предусмотрена также поддержка разработанного ряда наблюдений: очередная актуализация выполняется по изображению следующего сухого сезона при сохранении принятых сезона съёмки и порогового значения индекса, что обеспечивает сопоставимость новых оценок с приведёнными в настоящей работе.

Таблица 26 — Соответствие задач исследования разделам диссертации и полученным результатам

Задача исследования	Раздел работы и полученный результат	Иллюстративный материал	Положение, выносимое на защиту
1. Классификация населённых пунктов и земель населённых пунктов	Раздел 1.5. Разработана классификация населённых пунктов по численности населения, применённая ко всем 77 коммунах страны (5 крупных, 42 средних, 27 малых городов и 3 посёлка), и классификация земель населённых пунктов по функциональному назначению и природно-экологическим ограничениям — восемь функциональных зон	Рисунок 6; таблица 6; приложение А	Положение 1
2. Анализ систем спутникового зондирования	Разделы 2.5, 2.5.1, 2.6. Проанализированы космические системы Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI; обоснован выбор спектральных каналов и дат съёмки для условий Республики Бенин	Таблицы 9—11, 15, 17; рисунки 25, 26	Обеспечивает положение 2
3. Обоснование автоматизированной обработки космических снимков	Разделы 2.5.2, 2.2.1. Обосновано применение геоинформационного метода масок по индексам MNDWI и NDBI; выделены зоны затопления и заболачивания и иные природные ограничения использования территории	Рисунки 27—30; таблица 18	Положение 2
4. Сравнительный анализ методов классификации и алгоритм применения ДЗЗ и ГИС-технологий	Разделы 2.5.2, 2.5.3. Рабочим принят метод максимального правдоподобия: общая точность 93,30 % при коэффициенте каппа Коэна 0,90 против 89,90 % и 0,84; разработан алгоритм применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий при зонировании	Таблицы 13, 14; рисунки 25, 31—33	Положение 2
5. Методика зонирования и её апробация	Разделы 1.7, 3.1, 3.6. Разработана комплексная методика зонирования населённых пунктов с учётом природных и экологических особенностей; апробация выполнена на территории городов Котону и Бохикон	Таблицы 20, 21; рисунки 8—10, 39, 47	Положения 1, 3

Задача исследования	Раздел работы и полученный результат	Иллюстративный материал	Положение, выносимое на защиту
6. Структура геоинформационной базы данных	Раздел 3.3. Разработана структура геоинформационной базы данных населённых пунктов из трёх разделов: общая характеристика, кадастровые данные, природно-экологические характеристики	Рисунки 41—45; таблица 23; приложение Б	Положения 2, 3
7. Геоэкологический паспорт водного объекта и алгоритм совершенствования системы зонирования	Разделы 3.4, 3.2. Разработаны структура геоэкологического паспорта водного объекта и алгоритм совершенствования системы зонирования населённых пунктов с учётом их природных и экологических особенностей	Таблицы 22, 24, 25; рисунок 40; приложение В	Положение 3

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВМО	Всемирная метеорологическая организация
ГИС	геоинформационная система; геоинформационные системы
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
ИК	инфракрасный диапазон электромагнитного спектра
КФА	франк Африканского финансового сообщества (Communauté financière africaine), денежная единица Республики Бенин
МСОП	Международный союз охраны природы (International Union for Conservation of Nature, IUCN)
ОВОС	оценка воздействия на окружающую среду
ООПТ	особо охраняемые природные территории
ПЗЗ	правила землепользования и застройки
ПРООН	Программа развития Организации Объединённых Наций
ЦМР	цифровая модель рельефа
ANDF	Agence Nationale du Domaine et du Foncier; Национальное агентство государственного имущества и земельных ресурсов Республики Бенин
ENVI	Environment for Visualizing Images; программное обеспечение для обработки и анализа данных дистанционного зондирования
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus; сканирующий радиометр спутника Landsat-7
FAR	Floor Area Ratio; коэффициент использования территории
GNSS	Global Navigation Satellite System; глобальная навигационная спутниковая система
GPS	Global Positioning System; система глобального позиционирования
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in the European Community; инфраструктура пространственной информации в Европейском сообществе
INStaD	Institut National de la Statistique et de la Démographie; Национальный институт статистики и демографии Республики Бенин

MNDWI Modified Normalized Difference Water Index; модифицированный нормализованный разностный водный индекс

NDBI Normalized Difference Built-up Index; нормализованный разностный индекс застроенности

NDWI Normalized Difference Water Index; нормализованный разностный водный индекс

NIR Near Infrared; ближний инфракрасный диапазон

NPPF National Planning Policy Framework; Национальная концепция политики планирования (Англия)

OLI Operational Land Imager; оптико-электронный сканер видимого и инфракрасного диапазонов спутника Landsat-8

PAPC Programme d'Assainissement Pluvial de Cotonou; программа ливневого водоотведения г. Котону

PDU Plan directeur d'urbanisme; генеральный план городского развития (Республика Бенин)

PLU Plan Local d'Urbanisme; местный градостроительный план

POS Plans d'Occupation des Sols; планы землепользования (Франция, до введения PLU)

RGB Réseau Géodésique du Bénin; государственная геодезическая сеть Республики Бенин

RGPH4 Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation; четвёртая всеобщая перепись населения и жилищного фонда Республики Бенин (2013 г.)

RGPH5 Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation; пятая всеобщая перепись населения и жилищного фонда Республики Бенин

ROI Region of Interest; область интереса (эталонный полигон, используемый при обучении классификатора)

RTK Real-Time Kinematic; кинематический режим спутниковых измерений в реальном времени

SCoT Schémas de Cohérence Territoriale; схемы территориальной согласованности (Франция)

SDAC Schéma directeur d'aménagement communal; генеральная схема обустройства коммуны (Республика Бенин)

SDAU Schéma directeur d'aménagement urbain; схема городского обустройства (Республика Бенин)

SLC Scan Line Corrector; корректор линий сканирования сканера ETM+ спутника Landsat-7

SWIR Short-Wave Infrared; коротковолновый инфракрасный диапазон

TIRS Thermal Infrared Sensor; тепловой инфракрасный сканер спутника Landsat-8

TM Thematic Mapper; сканирующий радиометр спутника Landsat-5

USGS United States Geological Survey; Геологическая служба США

UTM Universal Transverse Mercator; универсальная поперечная проекция Меркатора

WGS World Geodetic System; всемирная геодезическая система координат

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимкулов, С. Паспорт рек Казахстана / С. Алимкулов, А. Мырзахметов // Гидрометеорология и экология. — 2024. — Т. 112, № 1. — С. 161—168. — DOI 10.54668/2789-6323-2024-112-1-161-168.
2. Банколе, Б. У. Э. Научно-методические основы и методы создания автоматизированной информационной системы государственного земельного кадастра в Республике Бенин с учётом экологических особенностей страны : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.26 / Банколе Боларинва Улисс Эме. — М. : МИИГАиК, 2018. — 150 с.
3. Беленко, В. В. Концепция и технология мониторинга земель застраиваемых территорий по материалам космической съёмки : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.26 / В. В. Беленко. — М. : МИИГАиК, 2019. — 209 с.
4. Борисова, Н. И. ЖКХ как ключевой элемент жизнедеятельности населения и экономического развития малого города / Н. И. Борисова, А. В. Борисов // Вопросы современной экономики и менеджмента : свежий взгляд и новые решения : сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. — Екатеринбург, 2015. — С. 17—20.
5. Братков, В. В. Геоэкология : учебное пособие / В. В. Братков, Н. И. Овдиенко. — М. : Высшая школа, 2006. — 271 с.
6. Варламов, А. А. Зонирование территорий в зарубежных странах / А. А. Варламов, Д. В. Антропов, Ю. С. Сеница // Московский экономический журнал. — 2018. — № 4. — С. 117—128. — DOI 10.24411/2413-046X-2018-14061.
7. Водный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2006. — № 23. — Ст. 2381.
8. Градостроительный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2005. — № 1 (ч. 1). — Ст. 16.

9. Гура, Д. А. Градостроительное зонирование в задаче информационного обеспечения кадастровых работ на землях населенных пунктов / Д. А. Гура // Вестник СГУГиТ. — 2024. — Т. 29, № 5. — С. 137—147. — DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-5-137-147.
10. Гущин, А. Н. Закономерности формирования планировочной структуры территориальных зон в крупнейших городах / А. Н. Гущин, Н. В. Переверзева, С. И. Санок // Урбанистика. — 2018. — № 3. — С. 27—37.
11. Дегбегнон, К. М. Анализ экологических проблем особо охраняемых природных территорий, расположенных на землях населённых пунктов Республики Бенин / К. М. Дегбегнон, Т. В. Илюшина // Современные проблемы земельно-имущественных отношений, урбанизации территории и формирования комфортной городской среды : сборник статей Международной научно-практической конференции, 15—16 апреля 2021 г. : в 2 т. — Тюмень : ТИУ, 2021. — Т. 1. — С. 150—156.
12. Дегбегнон, К. М. Геодезическое обеспечение межевания и зонирования земель населённых пунктов Республики Бенин / К. М. Дегбегнон // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. — 2021. — Т. 65, № 3. — С. 323—333.
13. Дегбегнон, К. М. Исследование проблем зонирования в населённых пунктах Республики Бенин : выпускная квалификационная работа бакалавра / К. М. Дегбегнон. — М. : МИИГАиК, 2017. — 98 с.
14. Дегбегнон, К. М. Исследование проблем зонирования в населённых пунктах Республики Бенин с учётом природных климатических условий : выпускная квалификационная работа магистра / К. М. Дегбегнон. — М. : МИИГАиК, 2019.
15. Дегбегнон, К. М. Мониторинг застройки населённых пунктов Республики Бенин с использованием данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий / К. М. Дегбегнон // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. — М. : МИИГАиК, 2020. — Вып. 11. — С. 56—59.

16. Дегбегнон, К. М. Основные положения структуры зонирования территории населённых пунктов Республики Бенин / К. М. Дегбегнон // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. — 2020. — Т. 64, № 5. — С. 566—575. — DOI 10.30533/0536-101X-2020-64-5-566-575.
17. Дегбегнон, К. М. Особенности дистанционного зондирования процессов подтопления населённых пунктов Республики Бенин / К. М. Дегбегнон // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. — М. : МИИГАиК, 2019. — Вып. 10, ч. 2. — С. 56—62.
18. Дегбегнон, К. М. Особенности зонирования земель населённых пунктов Республики Бенин с учётом процессов затопления, подтопления и береговой абразии территорий / К. М. Дегбегнон, Т. В. Илюшина, О. П. А. Дегбенъон // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. — 2019. — Т. 63, № 1. — С. 90—98.
19. Дегбегнон, К. М. Особенности расположения промышленных зон по добыче полезных ископаемых на землях населённых пунктов Республики Бенин / К. М. Дегбегнон // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXIV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвящённого 75-летию Победы в Великой Отечественной войне : в 2 т. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2020. — Т. 1. — С. 512—513.
20. Дегбегнон, К. М. Порядок утверждения границ населённых пунктов в Республике Бенин / К. М. Дегбегнон // Пространственные данные: наука и технологии : сборник статей по итогам научных конференций. — М., 2021. — № 12. — С. 5—13. — DOI 10.30533/scidata-2021-12-5-13.
21. Дегбегнон, К. М. Разработка метода мониторинга населённых пунктов Республики Бенин для зонирования с учётом природных и экологических особенностей / К. М. Дегбегнон, Т. В. Илюшина // Мониторинг. Наука и технологии. — 2022. — № 3 (53). — С. 34—41. — DOI 10.25714/MNT.2022.53.003.

22. Дегбегнон, К. М. Разработка технических положений методики зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей / К. М. Дегбегнон // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. — 2024. — Т. 68, № 6. — С. 123—133.
23. Дубровский, А. В. Актуальные вопросы нормативно-правового и технологического обеспечения кадастровых работ по установлению границ зон затопления и подтопления для защиты объектов недвижимости от чрезвычайных ситуаций / А. В. Дубровский, Е. А. Скоринская, А. Р. Батуев [и др.] // Вестник СГУГиТ. — 2021. — Т. 26, № 5. — С. 156—168. — DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-5-156-168.
24. Жерелина, И. В. Опыт и проблемы применения на практике сведений, включённых в государственный водный реестр / И. В. Жерелина, В. А. Жоров, И. С. Постнова, Н. В. Поломошнова, О. В. Брютова // Водное хозяйство России : проблемы, технологии, управление. — 2024. — № 5. — С. 5—20. — DOI 10.35567/19994508-2024-5-5-20.
25. Жиленев, М. Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке / М. Ю. Жиленев // Геоматика. — 2009. — № 3. — С. 56—64.
26. Земельный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2001. — № 44. — Ст. 4147.
27. Илюшина, Т. В. Правовое обеспечение землеустройства и кадастров : учебник для студентов высших учебных заведений / Т. В. Илюшина, О. В. Миклашевская, А. П. Сизов. — М. : Академия, 2019. — 288 с.
28. Категоризация охраняемых территорий Республики Бенин в соответствии с номенклатурой Международного союза охраны природы (МСОП) [Электронный ресурс] / Программа развития ООН. — 2015. — URL: <https://www.undp.org/fr/benin/publications/rapport-final-sur-la-categorisation-des->

aires-protegees-de-la-republique-du-benin-suivant-la-nomenclature-de-lunion-mondiale-pour (дата обращения: 26.09.2026).

29. Комплексная система геопространственной информации ООН (КСГИ-ООН). Часть 1: Стратегическая основа [Электронный ресурс]. — 2-е изд. — Организация Объединённых Наций, Всемирный банк, 2023. — URL: https://ggim.un.org/UN-IGIF/documents/UN-IGIF%20Part%201_Russian.pdf (дата обращения: 24.08.2026).

30. Кошкарев, А. В. Геоинформатика / А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов ; под ред. Д. В. Лисицкого. — М. : Картгеоцентр — Геодезиздат, 1993. — 213 с.

31. Ляхова, Н. И. Развитие геоинформационных систем в инфраструктуре пространственных данных России / Н. И. Ляхова // Региональная экономика и управление : электронный научный журнал. — 2022. — № 4 (72). — Ст. 7233. — DOI 10.24412/1999-2645-2022-472-33.

32. Майоров, А. А. Развитие инфраструктуры пространственных данных / А. А. Майоров // Науки о Земле. — 2013. — № 2—3. — С. 63—68.

33. Малинников, В. А. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами : учебное пособие / В. А. Малинников, А. Ф. Стеценко, А. Е. Алтынов, С. М. Попов. — М. : Изд-во МИИГАиК, 2009. — 142 с. — ISBN 978-5-91188-015-6.

34. Методические рекомендации по разработке схем зонирования территории городов : МДС 30-1.99 [Электронный ресурс]. — М. : Госстрой России, 1999. — URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=99469> (дата обращения: 12.04.2020).

35. Николаев, В. А. Ландшафтоведение : семинарские и практические занятия / В. А. Николаев. — 2-е изд. — М. : Географический факультет МГУ, 2006. — 208 с.

36. О внесении изменений и дополнений в закон № 2013-01 от 14 августа 2013 г. «О земельных отношениях в Республике Бенин» : закон Республики Бенин № 2017-15 от 10 августа 2017 г. — Котону, 2017.

37. О горном кодексе и налогообложении горнодобывающей промышленности в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 2006-17 от 17 октября 2006 г. — Котону, 2006.
38. О градостроительстве в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 2024-27 от 28 июня 2024 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://sgg.gouv.bj/doc/loi-2024-27/> (дата обращения: 04.10.2026).
39. О земельных отношениях в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 2013-01 от 14 августа 2013 г. (Code foncier et domanial). — Котону, 2013. — 84 с.
40. О категоризации особо охраняемых природных территорий Республики Бенин в соответствии с номенклатурой Международного союза охраны природы (МСОП) : декрет Республики Бенин № 2017-331 от 6 июля 2017 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://sgg.gouv.bj/doc/decret-2017-331/> (дата обращения: 31.08.2026).
41. О методах сохранения, развития и устойчивого управления животным миром и его местами обитания в Республике Бенин : декрет Республики Бенин № 2011-394 от 28 мая 2011 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://sgg.gouv.bj/doc/decret-2011-394/> (дата обращения: 26.09.2026).
42. О национальном градостроительном регламенте : декрет Республики Бенин № 2024-1034 от 24 июля 2024 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://sgg.gouv.bj/doc/decret-2024-1034/> (дата обращения: 04.10.2026).
43. О порядке выдачи разрешений на строительство в Республике Бенин : декрет Республики Бенин № 2014-205 от 13 марта 2014 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/Ben176532.pdf> (дата обращения: 26.09.2026).
44. О режиме лесов в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 93-009 от 2 июля 1993 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://sgg.gouv.bj/doc/loi-93-009/> (дата обращения: 25.09.2026).
45. О режиме фауны в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 2002-16 от 18 октября 2004 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ben166784.pdf> (дата обращения: 30.09.2026).

46. Об определении минимальных требований к операциям по разбивке территории и консолидации земель в населённых пунктах Республики Бенин : межведомственный приказ № 38/MUHA/MDGLAAT/MERPMEDER/MCTIC/DC/SGM/DGDU/DGFCC/DUAL/DF/SA от 12 мая 2015 г. — Котону, 2015.
47. Об организации территориального управления в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 97-028 от 15 января 1999 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://uclgafrica-alga.org/wp-content/uploads/2019/05/Loi-n-97028-du-15-janvier-1999.pdf> (дата обращения: 10.06.2020).
48. Об основах территориального планирования в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 2016-06 от 26 мая 2016 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://anat.bj/SNAT/pages/docs/Loi-cadre.pdf> (дата обращения: 27.05.2020).
49. Об охране, обустройстве и освоении прибрежной зоны в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 2018-10 от 2 июля 2018 г. [Электронный ресурс]. — URL: https://documentation-anbenin.org/files/original/297/L._2018-10.pdf (дата обращения: 04.10.2026).
50. Об управлении водными ресурсами в Республике Бенин : закон Республики Бенин № 2010-44 от 24 ноября 2010 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://sgg.gouv.bj/doc/loi-2010-44/> (дата обращения: 25.09.2026).
51. Об утверждении Генеральной схемы обустройства прибрежной зоны : декрет Республики Бенин № 2024-1244 от 16 октября 2024 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ben236347.pdf> (дата обращения: 04.10.2026).
52. Об утверждении градостроительного регламента прибрежной и курортной зоны Республики Бенин : декрет Республики Бенин № 2024-1051 от 24 июля 2024 г. [Электронный ресурс]. — URL: <https://sgg.gouv.bj/doc/decret-2024-1051/> (дата обращения: 04.10.2026).
53. Об утверждении классификатора видов разрешённого использования земельных участков : приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 10 ноября 2020 г. № П/0412 [Электронный ресурс]. —

URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371246/ (дата обращения: 28.09.2026).

54. Об утверждении требований к точности и методам определения координат характерных точек границ земельного участка, требований к точности и методам определения координат характерных точек контура здания, сооружения или объекта незавершённого строительства на земельном участке, а также требований к определению площади здания, сооружения, помещения, машино-места : приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 23 октября 2020 г. № П/0393 [Электронный ресурс]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_368160/ (дата обращения: 31.08.2026).

55. Обработка данных дистанционного зондирования Земли : практические аспекты / В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов, С. М. Зраенко, А. В. Сосновский, В. А. Тренихин. — Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2013. — 168 с. — ISBN 978-5-7996-0867-5.

56. Ознамец, В. В. Системный анализ геодезического обеспечения / В. В. Ознамец // ИТНОУ : Информационные технологии в науке, образовании и управлении. — 2019. — № 1. — С. 53—55.

57. Программа ливневого водоотведения города Котону (Programme d'Assainissement Pluvial de Cotonou, PAPC) : официальное сообщение о ходе работ [Электронный ресурс] / Правительство Республики Бенин. — Котону, 2022. — URL: <https://www.gouv.bj/article/1841/> (дата обращения: 30.08.2026).

58. Сизов, А. П. Мониторинг и охрана городских территорий / А. П. Сизов. — М. : Академия, 2016. — 224 с.

59. Сизов, А. П. Научные основы, цели, функции, содержание и организация мониторинга земель / А. П. Сизов. — М. : Русайнс, 2019. — 172 с.

60. Сизов, А. П. Оценка экологического состояния земельных участков на особо охраняемых природных территориях города / А. П. Сизов, Н. Н. Ключев // География и природные ресурсы. — 2004. — № 1. — С. 36—44.

61. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений : актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89* / Минстрой России. — М., 2016.
62. Цветков, В. Я. Геоинформационные системы и технологии / В. Я. Цветков. — М. : Финансы и статистика, 1998. — 288 с.
63. Шихов, А. Н. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова. — Пермь : Изд-во Пермского государственного национального исследовательского университета, 2020. — 191 с. — ISBN 978-5-7944-3476-7.
64. Ямилова, А. К. Информационная модель установления границ зон с особыми условиями использования территорий / А. К. Ямилова, М. А. Губанищева, Е. И. Аврунев, В. В. Ознамец // Вестник СГУГиТ. — 2026. — Т. 31, № 4. — С. 170—179. — DOI 10.33764/2411-1759-2026-31-4-170-179.
65. Aboudou Yacoubou Mama, A. R. Dynamique de l'occupation des terres autour de la Réserve de biosphère de la Pendjari au nord-ouest du Bénin / A. R. Aboudou Yacoubou Mama, Y. Adam, S. Bio Dakou [et al.] // International Journal of Advanced Research. — 2020. — Vol. 8, № 4. — P. 870—878. — DOI 10.21474/IJAR01/10851.
66. African Parks. Pendjari National Park [Электронный ресурс] / African Parks Network. — URL: <https://www.africanparks.org/the-parks/pendjari> (дата обращения: 30.09.2026).
67. Agence Nationale du Domaine et du Foncier (ANDF). Cadastre [Электронный ресурс]. — URL: <https://andf.bj/cadastre/> (дата обращения: 04.10.2026).
68. Alamou, E. Application du principe de moindre action à la modélisation pluie-débit : thèse de doctorat / E. Alamou. — Abomey-Calavi : CIPMA — chaire UNESCO, Université d'Abomey-Calavi, 2011. — 231 p.
69. Alonso, W. Location and land use : toward a general theory of land rent / W. Alonso. — Cambridge (Mass.) : Harvard University Press, 1964. — 204 p.
70. Bah, R. A. L'immatriculation collective, le Registre Foncier Urbain et le Plan Foncier Rural : expériences béninoises et la généralisation du cadastre [Электронный

ресурс] / R. A. Bah. — Accra : FIG, 2006. — 17 p. — URL: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/accra/papers/ts12/ts12_02_bah.pdf (дата обращения: 10.06.2020).

71. Barry, J. J. The mineral industry of Benin [Электронный ресурс] / J. J. Barry // 2015 Minerals Yearbook. Vol. III. Area reports: international. — Reston (VA) : U.S. Geological Survey, 2018. — P. 3.1—3.2. — URL: <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/country/2015/myb3-2015-bn.pdf> (дата обращения: 27.09.2026).

72. Basse Vallée de l'Ouémé, Lagune de Porto-Novo, Lac Nokoué : Ramsar Site no. 1018 [Электронный ресурс] / Ramsar Sites Information Service. — Gland : Secretariat of the Convention on Wetlands, 2019. — URL: <https://rsis.ramsar.org/ris/1018> (дата обращения: 30.09.2026).

73. Batty, M. The new science of cities / M. Batty. — Cambridge (Mass.) : MIT Press, 2013. — 496 p. — ISBN 978-0-262-01952-1.

74. Benin emergency humanitarian action plan 2010 / United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. — New York : UN OCHA, 2010. — 41 p.

75. Bénin : Minergy sollicitée pour un projet de fer à Loumbou-Loumbou et Madjekali [Электронный ресурс] // Agence Ecofin. — 2013. — 6 ноября. — URL: <https://www.agenceecofin.com/fer/0611-14872-benin-minergy-sollicitee-pour-un-projet-de-fer-a-loumbou-loumbou-et-madjekali> (дата обращения: 01.09.2026).

76. Benin — Stormwater Management and Urban Resilience Project (P167359) : project appraisal document [Электронный ресурс]. — Washington, DC : World Bank Group, 2019. — URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/575721558922502806/pdf/Benin-Stormwater-Management-and-Urban-Resilience-Project.pdf> (дата обращения: 30.08.2026).

77. Bhatta, B. Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data / B. Bhatta. — Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010. — 172 p. — (Advances in Geographic Information Science). — ISBN 978-3-642-05298-9.

78. Blanchette, M. L. Pit lakes are a global legacy of mining : an integrated approach to achieving sustainable ecosystems and value for communities / M. L. Blanchette, M. A. Lund // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. — 2016. — Vol. 23. — P. 28—34. — DOI 10.1016/j.cosust.2016.11.012.
79. Boukari, M. Africa groundwater atlas : hydrogeology of Benin [Электронный ресурс] / M. Boukari, H. Totin, K. Upton, B. É. Ó Dochartaigh, I. Bellwood-Howard ; British Geological Survey. — Nottingham : BGS, 2018. — URL: https://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology_of_Benin (дата обращения: 27.09.2026).
80. Braun, A. Mapping urban structure types based on remote sensing data — a universal and adaptable framework for spatial analyses of cities / A. Braun, G. Warth, F. Bachofer, M. Schultz, V. Hochschild // *Land*. — 2023. — Vol. 12, № 10. — Art. 1885. — DOI 10.3390/land12101885.
81. Brüsweiler, S. Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). La voie du développement durable / S. Brüsweiler. — Berne : InfoResources, 2003. — 16 p. — (InfoResources Focus ; № 1).
82. Cadastre national du Bénin [Электронный ресурс]. — URL: <https://cadastre.bj/> (дата обращения: 12.03.2021).
83. Campbell, J. B. Introduction to remote sensing / J. B. Campbell, R. H. Wynne, V. A. Thomas. — 6th ed. — New York ; London : Guilford Press, 2022. — 634 p. — ISBN 978-1-4625-4940-5.
84. Climate change and food security : a framework document / FAO. — Rome : FAO, 2008.
85. Code général des impôts de la République du Bénin : édition 2024 [Общий налоговый кодекс Республики Бенин : редакция 2024 г.] [Электронный ресурс] / Direction générale des impôts. — Cotonou, 2024. — URL: <https://impots.bj/> (дата обращения: 01.09.2026).
86. Comby, J. La réforme du droit foncier au Bénin : éléments de constat [Электронный ресурс] / J. Comby. — Cotonou : SERHAU-SEM, 1998. — 26 p. —

URL: <http://www.comby-foncier.com/Beninreforme.pdf> (дата обращения: 10.06.2020).

87. Contribution du Groupe de travail II au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Résumé à l'intention des décideurs / GIEC. — Cambridge : Cambridge University Press, 2007. — 22 p.

88. Croitoru, L. The Cost of Coastal Zone Degradation in West Africa: Benin, Côte d'Ivoire, Senegal and Togo [Электронный ресурс] / L. Croitoru, J. J. Miranda, M. Sarraf. — Washington, DC : World Bank Group, 2019. — 68 p. — URL: <https://documents.worldbank.org/curated/en/822421552504665834/> (дата обращения: 24.08.2026).

89. Dale, P. Land administration / P. Dale, J. McLaughlin. — Oxford ; New York : Oxford University Press, 1999. — 169 p. — (Spatial Information Systems).

90. Danvidé, T. B. Gouvernance des politiques de planification urbaine et gestion des inondations à Cotonou (Bénin) : thèse de doctorat / T. B. Danvidé. — Saint-Denis : Université Paris 8 ; Abomey-Calavi : Université d'Abomey-Calavi, 2015.

91. de Longueville, F. Perceptions of and responses to coastal erosion risks : the case of Cotonou in Benin / F. de Longueville, Y.-C. Hountondji, L. Assogba, S. Henry, P. Ozer // International Journal of Disaster Risk Reduction. — 2020. — Vol. 51. — Art. 101882. — DOI 10.1016/j.ijdr.2020.101882.

92. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE) // Official Journal of the European Union. — 2007. — L 108 (25 April). — P. 1—14.

93. Document de stratégie opérationnelle de mise en œuvre de la Déclaration de Politique Nationale d'Aménagement du Territoire du Bénin [Электронный ресурс]. — URL: <https://anat.bj/SNAT/pages/docs/DSO-DEPONAT.pdf> (дата обращения: 05.03.2021).

94. Ekeu-wei, I. T. Applications of open-access remotely sensed data for flood modelling and mapping in developing regions / I. T. Ekeu-wei, G. A. Blackburn // Hydrology. — 2018. — Vol. 5, № 3. — Art. 39. — DOI 10.3390/hydrology5030039.

95. Évaluation des besoins de renforcement des capacités — Bénin : préparation de projets de gestion intégrée des inondations pour le Bénin, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Mali, le Togo et le bassin de la Volta en Afrique de l'Ouest [Электронный ресурс]. — 2016. — URL: <https://www.gwp.org/contentassets/072ea8d4aeaa463496c44bebd24b5cc9/benin-rapport-evaluation-besoin-gi-crues-bassin-volta-final.pdf> (дата обращения: 01.05.2022).
96. Forman, R. T. T. Urban ecology : science of cities / R. T. T. Forman. — Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2014. — 462 p. — ISBN 978-1-107-00700-0.
97. Gao, B.-C. NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B.-C. Gao // Remote Sensing of Environment. — 1996. — Vol. 58, № 3. — P. 257—266. — DOI 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
98. Gbaguidi, T. B. Système d'information et représentations cartographiques pour la gestion des inondations à Cotonou : mémoire de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement / T. B. Gbaguidi. — Ouagadougou : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2011.
99. Gill, S. E. Adapting cities for climate change : the role of the green infrastructure / S. E. Gill, J. F. Handley, A. R. Ennos, S. Pauleit // Built Environment. — 2007. — Vol. 33, № 1. — P. 115—133.
100. Global Environment Outlook — GEO-6 : healthy planet, healthy people / United Nations Environment Programme. — Nairobi : UNEP, 2019. — 742 p. — ISBN 978-1-108-70766-4.
101. Gnélé, J. E. Dynamiques de planification urbaine et perspectives de développement durable à Cotonou (République du Bénin) : thèse de doctorat [Электронный ресурс] / J. E. Gnélé. — Abomey-Calavi : Université d'Abomey-Calavi, 2010. — 334 p. — URL: <https://urbacot.hypotheses.org/files/2018/05/Gnele-COTONOU-BENIN.compressed.pdf> (дата обращения: 26.09.2026).
102. Gregory, J. H. Effect of urban soil compaction on infiltration rate / J. H. Gregory, M. D. Dukes, P. H. Jones, G. L. Miller // Journal of Soil and Water

Conservation. — 2006. — Vol. 61, № 3. — P. 117—124. — DOI 10.1080/00224561.2006.12435870.

103. Guide d'élaboration du Schéma Directeur d'Aménagement de la Commune [Электронный ресурс]. — URL: http://web.archive.org/web/20250923122810/http://anat.bj/sites/default/files/2019-12/Guide%20Elaboration%20du%20SDAC_%20R%20B%C3%A9nin.pdf (дата обращения: 04.10.2026).

104. Guide pratique pour le schéma directeur d'aménagement communal et intercommunal [Электронный ресурс]. — URL: http://web.archive.org/web/20191126141819/http://conafil.org:80/attachments/article/10/1_11Guide_SDAC.pdf (дата обращения: 04.10.2026).

105. Houessinon, D. R. B. Cartographie du risque d'inondation dans l'agglomération urbaine du Grand Nokoué au Bénin : SIG et approche multicritère [Электронный ресурс] / D. R. B. Houessinon, E. A. M. Tchibozo, E. W. Vissin, A. Ognondoun // Revue Ivoirienne de Science et Technologie. — 2022. — № 39. — P. 216—233. — URL: https://revist.net/REVIST_39/12-ST-844.pdf (дата обращения: 24.08.2026).

106. Hounton, C. C. Cartographie des risques d'inondations dans la commune d'Abomey-Calavi / C. C. Hounton, I. E. Biao, I. Ouorou Barre Fousseni, J. B. Vodounou, P. B. I. Akponikpe // Global Scientific Journal. — 2022. — Vol. 10, № 3. — P. 52—60. — ISSN 2320-9186.

107. Huete, A. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS / A. Huete, C. Justice, H. Liu // Remote Sensing of Environment. — 1994. — Vol. 49, № 3. — P. 224—234.

108. Igué, J. O. L'Afrique de l'Ouest entre espace, pouvoir et société : une géographie de l'incertitude / J. O. Igué. — Paris : Karthala, 2006. — 555 p. — (Hommes et sociétés). — ISBN 2-84586-799-9.

109. Inondations au Bénin : rapport d'évaluation des besoins post-catastrophe [Электронный ресурс] / Gouvernement de la République du Bénin, Banque mondiale, Système des Nations Unies. — 2011. — URL:

<https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/pda-2011-benin-fr.pdf> (дата обращения: 26.09.2026).

110. Jensen, J. R. Remote sensing of the environment : an Earth resource perspective / J. R. Jensen. — 2nd ed. — Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2007. — 592 p. — ISBN 978-0-13-188950-7.

111. Kaufmann, J. Cadastre 2014 : a vision for a future cadastral system / J. Kaufmann, D. Steudler ; FIG Commission 7, Working Group 7.1. — International Federation of Surveyors, 1998. — 38 p.

112. La cartographie pour une meilleure gestion des risques d'inondation au Bénin [Электронный ресурс] / Programme des Nations Unies pour le développement. — 2021. — URL: <https://www.undp.org/fr/benin/actualites/la-cartographie-pour-une-meilleure-gestion-des-risques-dinondation-au-benin> (дата обращения: 24.08.2026).

113. Land take and land degradation in functional urban areas / European Environment Agency. — Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2022. — 72 p. — (EEA Report ; № 17/2021). — ISBN 978-92-9480-465-5.

114. Lavigne Delville, Ph. Histoire du peuplement, formalisation des droits fonciers coutumiers et inégalités spatiales (Département des Collines, Centre Bénin) [Электронный ресурс] / Ph. Lavigne Delville, A.-C. Moalic. — Montpellier : Les Cahiers du Pôle Foncier, 2020. — № 21. — 28 p. — URL: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-04/010081552.pdf (дата обращения: 24.08.2026).

115. Lawin, A. E. Analyse de la variabilité du régime pluviométrique dans la région agricole d'Ina au Bénin / A. E. Lawin, A. Afouda, T. Lebel // European Journal of Scientific Research. — 2011. — Vol. 50, № 3. — P. 425—439. — ISSN 1450-216X.

116. Le Meur, P.-Y. L'information foncière, bien commun et ressource stratégique : le cas du Bénin / P.-Y. Le Meur. — London : IIED, 2008. — 28 p. — (Drylands Issue Paper ; № 147). — ISBN 978-1-84369-690-2.

117. Lehner, A. A generic classification scheme for urban structure types / A. Lehner, T. Blaschke // Remote Sensing. — 2019. — Vol. 11, № 2. — Art. 173. — DOI 10.3390/rs11020173.

118. Li, Z. Digital terrain modeling : principles and methodology / Z. Li, Q. Zhu, C. Gold. — Boca Raton : CRC Press, 2005. — 323 p. — ISBN 978-0-415-32462-5.
119. Mather, P. M. Computer processing of remotely-sensed images : an introduction / P. M. Mather, M. Koch. — 4th ed. — Chichester : Wiley-Blackwell, 2011. — 434 p. — ISBN 978-0-470-74238-9.
120. Mobilisation des ressources financières locales : documentation des registres fonciers urbains des communes du Bénin / ONU-Habitat, GLTN. — 2012. — 132 p. — (Rapport ; 3/2012).
121. National planning policy framework [Электронный ресурс] / Ministry of Housing, Communities and Local Government. — London, 2024. — 82 p. — URL: <https://www.gov.uk/government/publications/national-planning-policy-framework--2> (дата обращения: 25.09.2026).
122. N'Bessa, B. D. Porto-Novo et Cotonou (Bénin) : origine et évolution d'un doublet urbain : thèse de doctorat / B. D. N'Bessa. — Bordeaux : Université Bordeaux 3, 1997.
123. Nechyba, T. J. Urban sprawl / T. J. Nechyba, R. P. Walsh // Journal of Economic Perspectives. — 2004. — Vol. 18, № 4. — P. 177—200.
124. Need for a multipurpose cadastre / National Research Council. — Washington, D.C. : National Academy Press, 1980. — 127 p. — DOI 10.17226/10989.
125. Ozer, P. Évolution récente du trait de côte dans le golfe du Bénin. Exemples du Togo et du Bénin [Электронный ресурс] / P. Ozer, Y.-C. Hountondji, F. de Longueville // Geo-Eco-Trop. — 2017. — Vol. 41, № 3. — P. 529—541. — URL: https://geoecotrop.be/uploads/publications/pub_413_16.pdf (дата обращения: 24.08.2026).
126. Pagouni, C. Transitional and post-mining land uses : a global review of regulatory frameworks, decision-making criteria, and methods / C. Pagouni, F. Pavloudakis, I. Kapageridis, A. Yiannakou // Land. — 2024. — Vol. 13, № 7. — Art. 1051. — DOI 10.3390/land13071051.

127. Procedures and standards for a multipurpose cadastre / National Research Council.
— Washington, D.C. : National Academy Press, 1983. — 174 p. — DOI 10.17226/11803.
128. Programme d'Action National de Lutte contre la Désertification / Ministère de l'environnement, de l'habitat et de l'urbanisme. — Cotonou, [б. г.]. — 77 p.
129. Projections démographiques de 2014 à 2063 et perspectives de la demande sociale de 2014 à 2030 au Bénin : version révisée [Электронный ресурс] / Institut National de la Statistique et de la Démographie (INStaD). — Cotonou, 2022. — URL: <https://instad.bj/images/docs/Actualit%C3%A9s/Projection%20r%C3%A9vis%C3%A9e.pdf> (дата обращения: 30.09.2026).
130. Rahman, Md. M. Assessing the status of National Spatial Data Infrastructure (NSDI) of Bangladesh / Md. M. Rahman, G. Szabó // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2023. — Vol. 12, № 6. — Art. 236. — DOI 10.3390/ijgi12060236.
131. Remote sensing for sustainability / ed. by Q. Weng. — Boca Raton : CRC Press, 2017. — 384 p. — (Remote Sensing Applications Series). — ISBN 978-1-4987-0071-9.
132. Talen, E. City rules : how regulations affect urban form / E. Talen. — Washington : Island Press, 2012. — 236 p. — ISBN 978-1-59726-692-5.
133. The role of land-use planning in flood management [Электронный ресурс] / World Meteorological Organization, Global Water Partnership. — 2016. — 60 p. — (Integrated Flood Management Tools Series ; issue 7). — URL: https://www.floodmanagement.info/publications/tools/APFM_Tool_07.pdf (дата обращения: 26.09.2026).
134. Van der Molen, P. The dynamic aspect of land administration : an often-forgotten component in system design / P. Van der Molen // Computers, Environment and Urban Systems. — 2002. — Vol. 26, № 5. — P. 361—381.
135. Volkoff, B. Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : feuille de Porto-Novo [Электронный ресурс] / B. Volkoff, P. Willaime ; ORSTOM. — Paris : ORSTOM, 1976. — 39 p. — (Notice

- explicative ; № 66 (1)). — URL: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/notexp/08431.pdf (дата обращения: 27.09.2026).
136. Wallez, L. Inondations dans les villes d'Afrique de l'Ouest : diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le Grand Cotonou : essai de maîtrise en environnement / L. Wallez. — Sherbrooke : Université de Sherbrooke, 2010. — 78 p.
137. Williamson, I. Land administration for sustainable development / I. Williamson, S. Enemark, J. Wallace, A. Rajabifard. — Redlands : ESRI Press Academic, 2010. — 487 p. — ISBN 978-1-58948-041-4.
138. WMO climatological standard normals, 1991—2020 : Region I, Benin, station Cotonou (WMO 65344) [Электронный ресурс] / World Meteorological Organization ; NOAA National Centers for Environmental Information. — Asheville (NC) : NCEI, 2024. — (Accession 0253808). — URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/wmo-climate-normals> (дата обращения: 27.09.2026).
139. World Cities Report 2016 : urbanization and development — emerging futures / UN-Habitat. — Nairobi : UN-Habitat, 2016. — 247 p. — ISBN 978-92-1-132708-3.
140. Xu, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery / H. Xu // International Journal of Remote Sensing. — 2006. — Vol. 27, № 14. — P. 3025—3033. — DOI 10.1080/01431160600589179.
141. Yang, C.-S. Shoreline changes and erosion protection effects in Cotonou of Benin in the Gulf of Guinea / C.-S. Yang, D.-W. Shin, M.-J. Kim [et al.] // Korean Journal of Remote Sensing. — 2021. — Vol. 37, № 4. — P. 803—813. — DOI 10.7780/kjrs.2021.37.4.10.
142. Yonouwinhi, T. J.-B. Modelling of Water Level Fluctuations and Sediment Fluxes in Nokoué Lake (Southern Benin) / T. J.-B. Yonouwinhi, J. Thiébot, S. S. Guillou, G. A. F. A. d'Almeida, F. K. Abagale // Water. — 2025. — Vol. 17, № 15. — Art. 2209. — DOI 10.3390/w17152209.
143. Zha, Y. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery / Y. Zha, J. Gao, S. Ni // International Journal of Remote Sensing. — 2003. — Vol. 24, № 3. — P. 583—594. — DOI 10.1080/01431160304987.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Рисунок 1 — Карта-схема Республики Бенин с указанием городов, выбранных для апробации методики: Котону (крупный город, департамент Литораль) и Бохикон (средний город, департамент Зу) (картографическая основа — Esri National Geographic World Map).....	16
Таблица 1 — Административное деление Республики Бенин.....	17
Рисунок 2 — Республика Бенин: а) административно-территориальное деление с указанием объектов исследования; б) плотность населения по департаментам (по данным переписи RGPН4, 2013 г.)	18
Таблица 2 — Климатическая характеристика южной (прибрежной) части Республики Бенин (г. Котону).....	20
Таблица 3 — Термины и определения, используемые в исследовании.....	22
Таблица 4 — Нормативно-правовое обеспечение зонирования населённых пунктов Республики Бенин: предмет регулирования, выявленные пробелы и предлагаемые способы их восполнения	27
Таблица 5 — Виды разрешённого использования земельного участка и их описания (по Классификатору видов разрешённого использования земельных участков Российской Федерации, принятому автором за основу для формирования перечня видов разрешённого использования земель населённых пунктов Республики Бенин)	40
Рисунок 3 — Основные положения схемы зонирования территорий населённых пунктов [16].....	44
Рисунок 4 — Карта-схема города Котону (картографическая основа — OpenStreetMap) [16].....	44
Рисунок 5 — Административно-территориальное деление города Котону: 13 округов (arrondissements), озеро Нокуэ и побережье Атлантического океана	45
Рисунок 6 — Модель функционального зонирования населённых пунктов Республики Бенин.....	46

Рисунок 7 — Пример границы округа г. Котону на космическом изображении (Esri World Imagery; граница нанесена автором).....	47
Рисунок 8 — Формирование и согласование генерального плана в связи с зонированием и установлением границ населённых пунктов: состав схем и обосновывающих материалов (чёрным цветом выделены существующие положения, коричневым — предлагаемые)	51
Рисунок 9 — Определение порядка подготовки документации по планировке территории в соответствии с зонированием и установлением границ населённых пунктов	52
Рисунок 10 — Определение порядка подготовки проекта генерального плана и схемы зонирования коммуны с границами территорий населённых пунктов (чёрным цветом выделены существующие положения, коричневым — предлагаемые).....	53
Рисунок 11 — Пример кадастрового плана земельного участка (топографическая съёмка и чертёж в AutoCAD выполнены автором)	57
Рисунок 12 — Схема коммуны Керу с жилыми районами и зонами ООПТ — охотничьи угодья Атакора.....	58
Рисунок 13 — Примеры территориального зонирования фрагмента г. Котону с учётом природных и экологических особенностей.....	64
Рисунок 14 — Фрагмент работы по зонированию кварталов г. Котону в программе AutoCAD Map 3D [18].....	70
Рисунок 15 — Карта-схема зонирования кварталов г. Котону с зоной затопления (номера кварталов — по таблице 7; условные цвета видов разрешённого использования земель — по таблице 6)	70
Таблица 6 — Виды разрешённого использования земель.....	73
Таблица 7 — Площадь кварталов города Котону	74
Рисунок 16 — Фрагмент схемы коммуны Каримама с жилыми районами и горнодобывающим районом Лумбу-Лумбу.....	78

Рисунок 17 — Схема коммуны Тангъета с населёнными пунктами и зонами ООПТ — Национальным парком Пенджари (Pendjari) и охотничьими угодьями Пенджари.....	88
Таблица 8 — Обоснование дифференцированной шкалы ширины буферных зон водных объектов, объектов добычи полезных ископаемых и особо охраняемых природных территорий	94
Рисунок 18 — Технология создания проекта буферных зон	98
Рисунок 19 — Буферные зоны земель, находящихся в водоохранных зонах и прибрежных полосах вдоль берега океана, рек, озёр и других водных объектов (схема; ширина полос — по таблице 8)	99
Рисунок 20 — Буферные зоны земель промышленности, разведки и добычи полезных ископаемых	100
Рисунок 21 — Буферные зоны земель ООПТ.....	101
Рисунок 22 — Схема расположения пунктов государственной геодезической сети I класса Республики Бенин (RGB — Réseau Géodésique du Bénin) [12].....	104
Рисунок 23 — План земельных участков в квартале г. Котону (кадастровый план ANDF, исходный масштаб 1:1 500)	105
Рисунок 24 — Схема администрирования картографо-геодезической и кадастровой систем в Республике Бенин	106
Таблица 9 — Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-5 TM	110
Таблица 10 — Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-7 ETM+.....	111
Таблица 11 — Характеристики спектральных диапазонов (каналов) Landsat-8	112
Таблица 12 — Крупные наводнения в населённых пунктах Республики Бенин (1985—2020 гг.)	113

Рисунок 25 — Алгоритм применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий при зонировании населённых пунктов: анализ, сравнение и выбор метода классификации космических изображений	115
Рисунок 26 — Синтезированное изображение Landsat-8 OLI (г. Котону, сухой сезон): а) синтез 5:6:4; б) синтез 7:6:4	116
Рисунок 27 — Индексные изображения Landsat-8 OLI (г. Котону, сухой сезон) в цветной палитре: а) MNDWI; б) NDBI	119
Рисунок 28 — Сформированная геопривязанная маска застроенной территории	120
Рисунок 29 — Сформированная геопривязанная маска водных объектов	120
Рисунок 30 — Сформированная геопривязанная маска зоны затопления	121
Рисунок 31 — Результат дешифрирования космических изображений с использованием метода минимального расстояния	124
Таблица 13 — Матрица ошибок результатов дешифрирования космических изображений с использованием метода минимального расстояния	124
Рисунок 32 — Результат дешифрирования космических изображений с использованием метода максимального правдоподобия	125
Рисунок 33 — Точность выделения классов земного покрова методом минимального расстояния и методом максимального правдоподобия	125
Таблица 14 — Матрица ошибок результатов дешифрирования космических изображений с использованием метода максимального правдоподобия	126
Рисунок 34 — Технологическая схема мониторинга изменений процесса застройки территорий по многозональным космическим изображениям с учётом природных и экологических особенностей	131
Таблица 15 — Характеристики космических снимков Landsat, использованных для анализа территории г. Бохикон	132
Рисунок 35 — Динамика изменений классов земного покрова г. Бохикон (средний город по классификации населённых пунктов) за период 1992—2024 гг.	133
Таблица 16 — Изменение площади исследуемой территории г. Бохикон	133

Рисунок 36 — Диаграмма изменения площади земель (сухой сезон) г. Бохикон (1992—2024).....	134
Таблица 17 — Характеристики космических снимков Landsat, использованных для анализа территории г. Котону	135
Рисунок 37 — Динамика изменений зон г. Котону за период 2002—2024 гг. с учётом природных и экологических особенностей.....	136
Таблица 18 — Изменение площади зон г. Котону за период 2002—2024 гг.	136
Рисунок 38 — Диаграмма изменения площади земель г. Котону (2002—2024) с учётом природных и экологических особенностей.....	137
Таблица 19 — Связь параметров из ДЗЗ с задачами функционального зонирования	140
Таблица 20 — Методика зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом природных и экологических особенностей.....	145
Таблица 21 — Использование результатов зонирования населённых пунктов Республики Бенин.....	148
Рисунок 39 — Использование единого пространственного слоя, полученного по результатам дешифрирования разновременных космических изображений	149
Рисунок 40 — Алгоритм совершенствования системы зонирования населённых пунктов Республики Бенин с учётом их природных и экологических особенностей	152
Таблица 22 — Содержание этапов алгоритма совершенствования системы зонирования населённых пунктов Республики Бенин.....	153
Рисунок 41 — Существующая кадастровая база данных Республики Бенин при Национальном агентстве государственного имущества и земельных ресурсов (ANDF) [82]	154
Рисунок 42 — Предлагаемая структура геоинформационной базы данных населённых пунктов Республики Бенин.....	156
Рисунок 43 — Предлагаемая структура базы данных населённых пунктов Республики Бенин. I РАЗДЕЛ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ	157

Рисунок 44 — Предлагаемая структура базы данных населённых пунктов Республики Бенин. II РАЗДЕЛ. КАДАСТРОВЫЕ ДАННЫЕ (чёрным цветом выделены существующие, коричневым — предлагаемые положения)	158
Рисунок 45 — Предлагаемая структура базы данных населённых пунктов Республики Бенин. III РАЗДЕЛ. ПРИРОДНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (существующее состояние учёта в г. Котону; результаты исследования — в таблице 23)	159
Таблица 23 — Результаты исследования по III разделу базы данных населённых пунктов Республики Бенин.....	160
Таблица 24 — Геоэкологический паспорт водных объектов населённых пунктов Республики Бенин (пример: водные объекты г. Котону)	161
Таблица 25 — Геоэкологические паспорта разнотипных водных объектов (лагуна Котону и река Куффо).....	163
Рисунок 46 — Космический снимок участка г. Котону с зоной, подверженной затоплению (Google Earth, 2023 г.; надписи нанесены автором).....	166
Рисунок 47 — Авторский оригинал карты-схемы структуры застройки г. Котону с учётом природных и экологических особенностей.....	168
Рисунок 48 — Связь природных и экологических факторов, выявляемых ограничений, территориальных зон и градостроительных регламентов	171
Таблица 26 — Соответствие задач исследования разделам диссертации и полученным результатам	184

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Классификация земель населённых пунктов Республики Бенин по функциональному назначению и природно-экологическим ограничениям

Классификация включает восемь функциональных зон. Состав зон принят по аналогии с частью 1 статьи 35 Градостроительного кодекса Российской Федерации [8] и дополнен охранной зоной, объединяющей все виды защитных полос, что обусловлено природными и экологическими ограничениями территории Республики Бенин (раздел 3.1).

Таблица А.1 — Функциональные зоны земель населённых пунктов Республики Бенин, их состав и устанавливаемые ограничения

№	Функциональная зона	Состав объектов и видов использования	Устанавливаемые ограничения	Ширина буферных зон, м
1	Селитебная	Жилая застройка: районы регулярной (плановой) планировки и стихийно застроенные территории (неформальные поселения)	Запрет размещения объектов, требующих установления санитарно-защитной зоны (раздел 2.3); запрет капитального строительства в границах буферных зон водных объектов	—
2	Общественно-деловая	Объекты образования, здравоохранения, культуры и социального обслуживания, торговые и административные учреждения, религиозные объекты	Обеспечение транспортной доступности; запрет размещения объектов, являющихся источниками воздействия на среду обитания	—
3	Производственная	Промышленные предприятия, складские комплексы, терминалы порта	Запрет размещения в границах зон общественного и жилого назначения	не менее 150 — для объектов, требующих установления санитарно-защитной зоны (раздел 2.3)
4	Инженерной и транспортной инфраструктуры	Магистральные улицы, железнодорожные линии, автомобильные дороги международного значения, объекты портовой и инженерной инфраструктуры	Соблюдение полос отвода; запрет застройки в границах инженерных коридоров	—
5	Сельскохозяйственная	Сельскохозяйственные угодья	Сохранение вида	—

№	Функциональная зона	Состав объектов и видов использования	Устанавливаемые ограничения	Ширина буферных зон, м
		в границах города и территории временного хранения сельскохозяйственной продукции	использования до момента его изменения в установленном порядке	
6	Ландшафтно-рекреационная	Парки, береговые полосы, пляжи, акватории озера Нокуэ и лагуны Котону, зелёные насаждения	Запрет капитального строительства; сохранение мангровых зарослей	—
7	Охранная	Водоохранные зоны и прибрежные защитные полосы, охранные зоны ООПТ, санитарно-защитные зоны, зоны регулируемой застройки и архитектурных памятников	Запрет капитального строительства; режим ограниченного использования земель, дифференцированный по категории риска затопления (раздел 2.2.1)	водные объекты 50—200; берег океана 100; ООПТ национального значения 500; карьеры не менее 150 (раздел 2.3)
8	Специального назначения	Территории добычи песка и других местных строительных материалов, объекты размещения отходов потребления, кладбища, военные объекты	Обязательное установление санитарно-защитной зоны; запрет размещения в границах селитебной и общественно-деловой зон	не менее 150

Категория населённого пункта (раздел 1.5) определяет минимальный состав функциональных зон схемы зонирования: для крупных и средних городов обязательны селитебная, общественно-деловая, производственная зоны, зона инженерной и транспортной инфраструктуры, ландшафтно-рекреационная зона и зона специального назначения; для малых городов и посёлков — селитебная, общественно-деловая и сельскохозяйственная зоны, остальные выделяются при наличии соответствующих объектов. Охранная зона выделяется в населённых пунктах всех категорий при наличии объектов, для которых устанавливаются буферные зоны, санитарно-защитные зоны или зоны регулируемой застройки (раздел 2.3), а её состав определяется природными условиями населённого пункта и наличием этих объектов.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Структура геоинформационной базы данных населённых пунктов Республики Бенин

База данных состоит из трёх разделов. Раздел I содержит общую характеристику населённого пункта, раздел II — кадастровые данные, раздел III — природно-экологические характеристики территории, заполняемые по результатам дешифрирования космических изображений и геоинформационного анализа.

Таблица Б.1 — Состав показателей геоинформационной базы данных населённых пунктов, источники их заполнения и периодичность обновления

Показатель	Тип данных	Источник данных	Периодичность
I. Общая характеристика населённого пункта			
Название и вид населённого пункта; местоположение, площадь, численность населения, карта-схема	текст., числ., простр.	ANDF, перепись RGPН4 (2013 г.), картографические материалы	1 раз в 5 лет
Социальная, культурная и хозяйственно-экономическая сфера	текст.	коммуна	1 раз в 5 лет
Климат и рельеф; гидрография, почвенные и геологические условия	текст., числ.	климатическая норма ВМО за 1991—2020 гг. [138], фондовые материалы	1 раз в 10 лет
Флора и фауна, наличие ООПТ; сельское хозяйство и животноводство	текст., простр.	декрет № 2017-331 [40], ДЗЗ, коммуна	1 раз в 5 лет
Форма расселения и характер застройки; промышленные зоны, виды транспорта, разведка и добыча полезных ископаемых	текст., простр.	дешифрирование изображений	2—3 года
II. Кадастровые данные			
Номер права собственности; кадастровый номер объекта недвижимости; департамент, коммуна, район, квартал, фрагмент квартала, земельный участок; владелец; пользователь	текст.	ANDF	по факту регистрации
Площадь земельного участка и объекта недвижимости, м ² ; геодезическое обеспечение (система координат, проекция, масштаб)	числ., текст.	межевой план, измерения GNSS (раздел 2.4)	по факту межевания

Показатель	Тип данных	Источник данных	Периодичность
Картографическое обоснование: кадастровая карта, космический снимок, аэрофотоснимок	растр.	кадастровые планы ANDF (1:1 500), архив USGS (Landsat Level-1, 30 м)	2—3 года
III. Природно-экологические характеристики			
Площадь зон затопления и заболоченных территорий по годам наблюдения, га	числ., простр.	маска MNDWI и контролируемая классификация (раздел 2.5)	1 раз в 2 года
Категория риска затопления (I—III) по числу дат ряда, на которых участок выделен как затопленный (раздел 2.2.1)	простр.	наложение масок зон затопления разных дат (раздел 2.5)	1 раз в 2 года
Средняя скорость береговой абразии, м/год	числ.	опубликованные данные [91; 125; 141] (раздел 2.2.1)	ежегодно
Загрязнения в результате добычи полезных ископаемых; загрязняющие выбросы в атмосферу; загрязнение недр и почв; размещение отходов производства и потребления	текст., простр.	дешифрирование, полевые обследования (раздел 2.2.2)	1 раз в 2 года
Деградация растительности; организация ООПТ и их охранных зон	текст., простр.	разновременные изображения (раздел 2.6), декрет № 2017-331 [40], построение буферных зон (раздел 2.3)	2—3 года

Все показатели обязательны для заполнения, за исключением показателя «Социальная, культурная и хозяйственно-экономическая сфера», заполняемого при наличии сведений; показатель «Средняя скорость береговой абразии» обязателен для прибрежных населённых пунктов, а показатели загрязнений — при наличии объектов добычи полезных ископаемых. Тип данных: текст. — текстовый, числ. — числовой, простр. — пространственный объект, растр. — растровое изображение.

Таблица Б.2 — Пространственные слои базы данных и их характеристики

Слой	Тип пространственного объекта	Ключ связи с атрибутивной частью	Источник данных
Границы населённых пунктов	полигональный	код коммуны	раздел 1.7, материалы ANDF
Земельные участки	полигональный	кадастровый номер	ANDF, межевые планы (раздел 2.4)
Функциональные зоны	полигональный	код зоны (приложение А)	дешифрирование и геодезический контроль

Слой	Тип пространственного объекта	Ключ связи с атрибутивной частью	Источник данных
Зоны затопления и заболоченные территории	полигональный	код зоны	маска MNDWI, классификация (раздел 2.5)
Буферные зоны	полигональный	код водного объекта или ООПТ	построение буфера (раздел 2.3)
Береговая линия	линейный	—	разновременные изображения (раздел 2.2.1)
Межевые знаки	точечный	кадастровый номер	измерения GNSS (раздел 2.4)
Водные объекты (паспорт)	полигональный	название водного объекта	приложение В, таблицы 24, 25

▼ Раздел I. Общая характеристика населённого пункта

Код коммуны BJ.LI.CO

Коммуна Котону

Департамент Литораль

Площадь, га 7900

Численность населения, чел. 679012

Год учёта численности 2013

▼ Раздел II. Земельные участки коммуны

Кадастровый номер (NUP)	Номер права собственности (TF)	Квартал	Фрагмент квартала	Земельный участок	Площадь земельного участка, м²	Площадь объекта недвижимости, м²
1 081-00009090	TF № 7897	Амбатин II	№ 1612	«d»	300	222

▼ Раздел III. Зоны затопления и заболоченные территории по годам (исследуемый фрагмент, 32 720,13 га)

Год наблюдения	Дата съёмки (месяц, год)	Спутник (сенсор)	Площадь зон затопления, га	Площадь заболоченных территорий, га
1	2002 февраль 2002 г.	Landsat-7 (ETM+)	3 007,17	6 032,25
2	2010 декабрь 2010 г.	Landsat-7 (ETM+)	3 660,48	4 444,29
3	2017 январь 2017 г.	Landsat-8 (OLI)	2 723,67	3 567,06
4	2024 январь 2024 г.	Landsat-8 (OLI)	2 575,89	3 831,48

▼ Раздел III. Береговая абразия

Участок побережья	Средняя скорость береговой абразии, м/год	Источник данных
1 Восточный участок побережья г. Котону (к востоку от молов порта)	16	Опубликованные данные [91; 125; 141]

▼ Раздел III. Охранные полосы

Объект охраны	Вид охранной полосы	Принятая ширина, м	Площадь полосы, построенной средствами ГИС, га
1 Лагуна Котону	Водоохранная зона	200	169,00
2 Озеро Нокуа (в черте г. Котону)	Водоохранная зона	200	—
3 Берег Атлантического океана (участок абразии восточнее порта г. Котону)	Прибрежная защитная полоса	100	—

Рисунок Б.1 — Прототип геоинформационной базы данных населённых пунктов Республики Бенин: карточка коммуны Котону, объединяющая сведения разделов I—III (отображение в QGIS)

Примечание — Код коммуны в прототипе принят по международной кодировке административных единиц HASC (BJ.LI.CO — коммуна Котону); при внедрении заменяется кодом, установленным ANDF.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Форма геоэкологического паспорта водного объекта

Паспорт ведётся на отдельный водный объект или на группу водных объектов, расположенных в границах населённого пункта или примыкающих к ним, и подлежит актуализации не реже одного раза в два года по результатам дешифрирования разновременных космических изображений.

Таблица В.1 — Форма геоэкологического паспорта водного объекта: состав показателей, единицы измерения и источники данных

№	Показатель формы	Содержание, единица измерения	Источник данных
1	Тип населённого пункта	Крупный, средний, малый город, посёлок (раздел 1.5)	классификация населённых пунктов
2	Название и вид водного объекта	Поверхностный, подземный	топографическая основа
3	Гидрологический режим	Сезонность; количество осадков, мм/год; характер связи с другими водными объектами; средняя скорость береговой абразии, м/год	метеонаблюдения, разновременные изображения
4	Основные виды антропогенного воздействия	Перечень видов воздействия на водный объект и прилегающие земли	разделы 2.2.1—2.2.3
5	Площадь зон затопления по годам наблюдения	га	маска MNDWI (раздел 2.5.2)
6	Площадь заболоченных территорий по годам наблюдения	га	контролируемая классификация (раздел 2.5.3)
7	Категория риска затопления прилегающих земель	I—III по разделу 2.2.1	наложение масок зон затопления разных дат
8	Территории, попадающие в зону затопления, в разрезе функциональных зон	Перечень зон по приложению А	наложение слоёв в ГИС
9	Границы буферных зон	Ширина, м; площадь, га	дифференцированная шкала (раздел 2.3)
10	Виды разрешённого использования прилегающих земель и установленные ограничения	Перечень видов по таблице 6	приложение А, раздел 3.7
11	Источники данных	Перечень с указанием года (для материалов ДЗЗ — год съёмки)	—

№	Показатель формы	Содержание, единица измерения	Источник данных
12	Цель ведения паспорта	Зонирование населённых пунктов	—
13	Примечание / аналитический комментарий	Аналитический комментарий	—

Примеры заполнения формы приведены в таблицах 24 и 25.