«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ»
(МИИГАиК)

На правах рукописи

Ассех Куаме Фабрис

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА СИНТЕЗИРОВАННЫХ И ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЕЛЬ РЕСПУБЛИКИ КОТ-Д'ИВУАР)

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технический наук, доцент
Беленко Виктор Владимирович

Москва —2026

Оглавление

Введение…….....4
Термины и определения……..5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОНИТОРИНГА СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ 13
1.1 Анализ нормативно-правовых актов в области землепользования (Кот-Д'Ивуар, Россия) 13
1.2 Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли для задач мониторинга состава земель..... 19
1.3 Анализ современных методов тематической обработки космических изображений для обнаружения изменений состава земель 27
1.4 Картографическое обеспечение тематической обработки космических изображений для задач мониторинга земель 35
1.5 Выводы по разделу 50
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА СИНТЕЗИРОВАННЫХ И ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.... 52
2.1 Общие положения методики 52
2.2 Определение требования к используемым данным многозональной космической съёмки..... 54
2.2.1 Требования к виду и содержанию исходных космических изображений 54
2.3 Методики автоматизированного дешифрирования изменений состава земель на основе комплекса синтезированных и индексных изображений 72
2.3.1 Методы обработки космических снимков для выявления изменений в составе земель 84
2.4 Оценка качества результатов дешифрования и анализа данных дистанционного зондирования 91
2.5 Оформление результатов дешифрирования и анализа данных ДЗЗ из космоса 94
2.6 Выводы по разделу 95
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА СИНТЕЗИРОВАННЫХ И ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ 97

3.1 Описание и анализ тестовой территории 97
3.1.1 Физико-географическое положение 97
3.1.2 Физико-географическое описание 100
3.2 Подбор космических снимков для проведения научных исследований 101
3.2.1 Исходные данные 101
3.3 Описание экспериментальных исследований 103
3.4 Анализ результатов автоматизированного дешифрирования землепользования 110
3.4.1 Анализ результатов классификации многозональных изображений 110
3.5 Оценка динамики землепользования 114
3.5.1 Анализ землепользования в Абиджане за 2000, 2017 и 2022 гг. 114
3.5.2 Оценка динамики землепользования Абиджана 116
3.6 Результаты дешифрирования многозональных изображений с использованием спектральных индексов 117
3.6.1 Изменения площади застроенных территорий 117
3.6.2 Изменения площади густого леса 121
3.6.3 Изменения площади вторичного леса 125
3.6.4 Изменения площади посадок леса 129
3.6.5 Изменения площади поверхностных водотоков и водоёмов 133
3.6.6 Изменения площади открытых грунтов 138
3.7 Выводы по разделу 143
Заключение 149

Термины и определения

Категории земель	- группы земель, выделяемые в соответствии с нормативно-правовыми актами, но основе их правового режима, целевого назначения и особенностей регулирования использования и охраны земель
Классы изображений земной поверхности	- совокупности пикселей многозональных космических изображений, объединённых на основе сходства их спектральных характеристик и результатов тематической классификации, соответствующие определённым типам землепользования на исследуемой территории.
Состав земель	- совокупности типов землепользования, выделенных в пределах исследуемой территории на определённый момент времени, характеризуемая их наличием, площадями и пространственным размещением.
Структура землепользования	- количественное соотношение площадей различных типов землепользования в пределах исследуемой территории, выражаемое в абсолютных и относительных показателях и характеризующее особенности их пространственного распределения.
Типы землепользования	- выделяемые в пределах исследуемой территории виды использования и состояния земной поверхности, определяемые по природным и антропогенным характеристикам объектов на основе тематического дешифрирования космических изображений и дополнительных сведений о территории.

Введение

Актуальность темы. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса (далее — ДЗЗ из космоса) обладают спектрально-отражательными свойствами объектов земной поверхности, а также пространственными свойствами, позволяющими эффективно использовать сведения о распределении формы и морфологической структуре объектов на поверхности Земли, а также выявлять изменения в структуре землепользования земель различных категорий. Выявляя изменения спектрально-пространственной структуры соответствующих объектов по разновременным данным дистанционного зондирования Земли из космоса (далее — ДЗЗ из космоса), можно обнаружить тип изменений, определить их интенсивность и проанализировать масштабы их влияния на окружающую природную среду. По сравнению с традиционными методами мониторинга земель, дистанционный мониторинг имеет очевидные преимущества с точки зрения скорости, пространства, экономичности и широко используется во многих областях управления земельными ресурсами. Особенно актуально использование современных методов дистанционного мониторинга для обнаружения изменений состава земель в целях их рационального использования.

Проблема рационального использования земель во многих странах мира стоит очень остро. Особенно данная проблема актуальна для Республики Кот-д'Ивуар, в которой наблюдается отсутствие информационного обеспечения управления земельными ресурсами с использованием данных ДЗЗ из космоса для самого широкого круга задач: градостроительства, дорожного строительства, сельского, водного, муниципального хозяйств и др. Особенно остро стоит проблема экономически эффективного и экологически обоснованного использования земель различных категорий. Поэтому возникает необходимость разработки метода выявления изменений состава земель на основе данных многозональной космической съёмки для точного мониторинга состава земель, что также позволит принимать управленческие решения, эффективные и

экологически безопасные в части рационального использования земель различных категорий.

Степень разработанности решаемой научной проблемы изучалась на основе опубликованных научных работ отечественных и зарубежных ученых в области изучения землепользования по космическим снимкам. Научные исследования основаны на работах отечественных ученых: Аввакумова А.О., Арбузов С.А., Беленко В.В., Голосов В.Н., Ефимов К.В., Залялиев Р.Р., Ионова Ю.К., Киняшова А.Д., Малинников В. А., Прищепов А.В., Прищепов А.В., Сизов А.П., Трошко К. А., Хлебникова, Е.П. Научные исследования опираются на работы зарубежных ученых: G. Soro, K. K. Eugène, M. K. Combo, C. B. Tiesse, A. S. Koffi, M.C.M. Solefack, O. Chabrerie, E. G. Morona, B.A. Nkongmeneck, O.N. L.Leumbec, G. Decocq, S. Binsangou, S.A. Ifo, F. Koubouana, L. Louvouandou, S. Nzingoula, L. Mansisse, S. E. B.Bouiadjra, W.E.Zerey, K. Benabdeli, H.T.O. Ali, S. Niculescu, V. Sellin, C. Bougault, D. Sylla, M.D. Diallo, T. Mbaye, A. Diallo, J.L. Peiry, A. Guisse, I. Biga, A. Amani, I. Soumana, M. Bachir, A. Mahamane, Z. Koumoi, A. Alassane, M. Djangbedja, T. Boukpessi, A.E. Kouya, S. Zakari, I.T. Imorou, O.A. B. Thomas, M. Djaouga, O. Arouna.

Главной целью диссертационного исследования является разработка методики автоматизированного дешифрирования изменений состава земель на основе комплекса синтезированных и индексных изображений с учётом природно-экологических особенностей тропического влажного региона для задач изучения пространственно-временной динамики землепользования (на примере агломерации города Абиджан).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

– обобщить отечественный и зарубежный опыт использования космических снимков для мониторинга землепользования и выявить существующие проблемы;

– разработать методику автоматизированного дешифрирования изменений состава земель на основе комплекса синтезированных и индексных изображений;

– разработать методику, основанную на сочетании спектральных индексов (NDVI, NDBI, NDSI, SAVI, NDWI) с заранее заданными пороговыми значениями для каждого класса изображений земной поверхности, с целью улучшения различения и картографирования различных типов землепользования;

– выполнить экспериментальные исследования на тестовой территории с целью анализа пространственно-временной динамики землепользования;

– проанализировать полученные результаты и выработать научные и практические рекомендации по совершенствованию методов устойчивого управления земельными ресурсами.

Объектом исследования являются методы автоматизированной обработки космических изображений для обнаружения изменений состава земель.

Предметом исследования является структура земель городской агломерации города Абиджан.

Методология и методы исследования

Для проведения данного исследования были использованы спутниковые снимки Landsat 7, 8 и 9 с пространственным разрешением 30 метров, полученные в 2000, 2017 и 2022 годах. Использован метод цветного синтезирования для облегчения визуальной интерпретации, что послужило основой для определения границ обучающих зон при проведении контролируемой классификации. Метод контролируемой классификации с использованием алгоритма правдоподобия в программе QGIS позволил выполнить автоматизированное дешифрирование космических изображений, выделить тематические классы изображений земной поверхности, соответствующие типам землепользования и отобразить их на карте. Спектральные индексы с чётко определёнными пороговыми значениями позволили улучшить распознавание тематических классов на основе их

спектральных характеристик и индивидуально выявлять их пространственно-временные изменения. Сравнительный анализ различных составленных карт позволил выявить переходы между различными типам землепользования, в то время как математико-статистический метод послужил для количественной оценки наблюдаемых изменений на основе площадей различных категорий земель.

Научная новизна результатов исследования заключается в том, что:

– разработанная методика обнаружения состава земель по материалам космической съёмки с использованием автоматизированного дешифрирования комплекса синтезированных многозональных комических изображений, позволяет с высокой степенью достоверности (97,17%) выявлять состав земель и их изменения по сравнению с аналогичными работами других авторов;

– впервые научно-обоснованное сочетание синтезированных многозональных и индексных изображений, позволяет на основе классификаций снимков земной поверхности выявлять типы землепользования в условиях влажного тропического региона для целей рационального использования земельных ресурсов;

– впервые выполнена оценка изменения структуры землепользования городской агломерации города Абиджан за период 2000 - 2022 гг., позволяющая отследить изменения в структуре состава земель и с учётом природно-экологических особенностей тропического региона обоснованно разрабатывать градостроительную документацию, что также способствует совершенствованию процесса территориального планирования, мониторингу урбанизации и деградации экосистем, а также поддержке принятия решений в области устойчивого управления земельными ресурсами и охраны окружающей среды.

Востребованность результатов диссертационного исследования обосновывается тем, что полученные научные результаты развивают методы автоматизированной обработки комплекса синтезированных многозональных и индексных космических изображений для обнаружения изменений состава

земель с целью их рационального использования, могут быть использованы в качестве основы для мониторинга и управления земельными ресурсами в географических районах Кот-д'Ивуара, позволяют оценивать воздействие антропогенной деятельности и способствуют реализации стратегий, направленных на устойчивое управление природными ресурсами, в частности в секторах сельского хозяйства, лесоводства и управления водными ресурсами.

Целесообразность диссертационного исследования обосновывается отсутствием единой технологии, методов и методик применения данных ДЗЗ из космоса для решения задач в части обнаружения изменений состава земель, их границ, установления по космическим снимкам функциональных зон территорий земель Республики Кот-д'Ивуар.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в развитии методов автоматизированной обработки комплекса синтезированных многозональных и индексных космических изображений для обнаружения изменений состава земель с целью их рационального использования, экологического мониторинга, отслеживания процессов урбанизации, оценки процессов обезлесения и восстановления природных территорий, а также для предоставления информации органам, ответственным за управление территориальным развитием и реализацию политики устойчивого использования природных ресурсов.

Практическая значимость. Результаты научного исследования могут быть использованы в качестве основы для мониторинга и управления земельными ресурсами в городской агломерации Абиджан, а также для проведения аналогичных исследований в других географических районах Кот-д'Ивуара, что способствует пониманию развития городского землепользования и принятия обоснованных решений для устойчивого городского хозяйства. Карты-схемы землепользования, составленные в рамках данного исследования, представляют собой практический инструмент для мониторинга экологической и территориальной динамики. Они позволяют оценивать воздействие антропогенной деятельности и способствуют реализации стратегий,

направленных на устойчивое управление природными ресурсами, в частности в секторах сельского хозяйства, лесоводства и управления водными ресурсами.

Основные положения и результаты, представляемые на защиту:

– разработанная методика обнаружения состава и изменений земель по материалам космической съёмки с использованием автоматизированного дешифрирования комплекса синтезированных многозональных и индексных изображений позволяет с учётом природно-экологических особенностей тропического влажного региона с высокой степенью достоверности (97,17%) выявлять структуру земель и их многолетние изменения.

– научно-обоснованное сочетание синтезированных многозональных и индексных изображений позволяет на основе классификаций снимков земной поверхности выявлять типы землепользования в условиях влажного тропического региона для целей рационального использования земельных ресурсов;

– составленные карты-схемы землепользования городской агломерации города Абиджан за период 2000-2022 гг., позволяют выполнять количественную оценку изменений в структуре земель с учётом природно-экологических особенностей тропического влажного региона для задач информационного обеспечения территориального планирования, эффективного контроля за урбанизацией, обезлесения с целью обеспечения восстановления лесов экологическими учреждениями, а также обеспечения государственной политики устойчивого развития земель Республики Кот-д'Ивуар.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных и практических результатов проведённых исследований подтверждается их теоретическим обоснованием и экспериментальными изысканиями на тестовой территории, включающих сравнение с наилучшими результатами, полученными отечественными и зарубежными учёными.

Основные результаты диссертации докладывались на четырёх международных научно-практических конференциях:

– Разработка методики обнаружения изменений состава земель по данным многозональной космической съемки (на примере территории Кот-Д'Ивуара)», сборник 78-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК, 2023;

– Разработка методики обнаружения изменений состава земель по данным многозональной космической съемки (на примере территории Кот-Д'Ивуара), международная научная конференция «Пространственные данные: наука и технологии», МИИГАиК, 2023;

– Разработка методики обнаружения изменений состава земель по данным многозональной космической съёмки (на примере территории Кот-д'Ивуара) международная научная конференция «Пространственные данные: наука и технологии», МИИГАиК, 2025;

– Автоматизированное дешифрирование изменений состава земель на основе комплекса синтезированных и индексных изображений (на примере города Абиджан, Кот-д'Ивуар) «Пространственные данные: наука и технологии», МИИГАиК, 2026.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 3 научные работы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России.

Личный вклад автора

Лично автором получены следующие научные результаты:

1. Разработана методика обнаружения состава и изменений земель по материалам космической съёмки с использованием автоматизированного дешифрирования комплекса синтезированных многозональных и индексных изображений.

2. Научно-обоснованно сочетание синтезированных многозональных и индексных изображений, позволяющее на основе классификаций снимков земной поверхности выявлять типы землепользования в условиях влажного

тропического региона для целей рационального использования земельных ресурсов;

3. Впервые составлены карты-схемы землепользования городской агломерации города Абиджан за период 2000-2022 гг. для количественной оценки изменений в структуре земель с учётом природно-экологических особенностей тропического влажного региона.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка принятых сокращений и списка использованной литературы. Общий объём диссертации составляет 177 страницы и содержит 151 страниц основного текста, 72 рисунка и 21 таблицу. Список использованной литературы включает 111 наименований, в том числе 89 наименований на английском языке.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОНИТОРИНГА СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ

1.1 Анализ нормативно-правовых актов в области землепользования (Кот-Д'Ивуар, Россия)

Кот-Д'Ивуар. В стране действуют следующие ключевые нормативно-правовые акты, содержащие различные правовые аспекты в отношении различных категорий земель:

– Закон № 2019-868 от 14 ноября 2019 г. «О землепользовании в сельской местности Кот-д'Ивуар», принят Национальным собранием и Сенатом. Нормативно-правовой акт регулирует состав сельских земель. Земли данной категории состоят из всех категорий земель, независимо от того, застроены они или нет, и независимо от характера застройки. В статье 4 отмечается, что земли, не находящиеся в собственности, принадлежат государству и управляются в соответствии с положениями статьи 21. В этом законе указано, что отсутствие права собственности отмечается постановлением, принятым Советом министров. Однако в этом законе есть препятствие, поскольку вся земля в сельском земельном владении не зарегистрирована. Так что необходимо провести исследование, чтобы зарегистрировать всю сельскую землю, чтобы внести её в государственную базу данных [1].

– Постановление № 2019-977 от 27 ноября 2019 г. «О процедурах классификации лесов и агролесов Кот-д'Ивуар». В соответствии со статьей 1 любой участок национального лесного фонда может быть либо государственным, либо отнесённым к частному лесному владению. Недостатком данного документа является отсутствие регламентации картографического обеспечения в части отображения объектов гидрографии, границы селений, землепользования [2].

– Постановление № 2019-266 от 27 марта 2019 г. Национального собрания и Сената «О применении закона № 98-750 от 23 декабря 1998 г. № 98-750 в области сельских земель». Данный нормативно-правовой акт регулирует порядок проведения официальных запросов для выяснения прав на обычных

сельских землях (ходатайство о расследовании, ход расследования); создание, публикацию и управление земельным сертификатом; регистрацию собственности на традиционные земли в сельской местности и регистрацию информации о сельских землях. Данный указ необходим, потому что он позволяет государству получить больше информации о сельских землях. Однако отметим, что этот закон не устанавливает разграничения сельских земель, а также в нём отсутствует регламентация картографического обеспечения сельских земель [3].

– Постановление № 2019-265 от 27 марта 2019 г. Национального собрания и Сената закрепляет порядок прав временных инвесторов на землю в сельской местности. Инвесторы обязаны закрепить свои права на землю на временной основе с последующим хозяйственным освоением земель. Постановление предусматривает временные уступки с учётом прав третьих сторон и в случаях прямых временных уступок. Этот указ необходим, поскольку он позволяет государству контролировать земельные владения, так как в случае несоблюдения установленных договоров государство конфискует сельские земельные владения владельца [4].

– Постановление № 2019-263 от 27 марта 2019 г. «Об определении порядка разграничения территорий села». Статья 5 определяет порядок разграничения земель в сельской местности. Он предусматривает, в частности, инициативу по разграничению территорий сёл, проведение обследования разграничения территорий сёл (в том числе урегулирование споров), публикацию результатов обследования, утверждение и проверку результатов обследования, составление окончательной карты села, определение границ села и визуальное распознавание границ территории села. Данный указ очень важен, потому что он позволяет распределять землю, что позволяет избежать определённых конфликтов между коренным населением. Кроме этого, он регламентирует отображение на картах земель сельских территорий. С другой

стороны, нормативно-правовой акт не полностью закрепляет нормы по разграничению земель при ведении хозяйственной деятельности [5].

– Постановление № 2019-979 от 27 ноября 2019 г. принято Президентом Республики и Советом министров, направлено на определение условий развития агролесов, эксплуатации сельскохозяйственных плантаций и сбыта сельскохозяйственной продукции. Однако в статье 3 закона оговариваются способы управления временными агролесами с учётом внедрения лесных саженцев на сельскохозяйственных плантациях, абсолютный запрет на строительство там социальной инфраструктуры и благоустройства, за исключением тех, которые связаны с эксплуатацией концессий [6].

– Постановление № 2019-978 от 27 ноября 2019 г., касающиеся концессии на управление частным лесным участком государства Кот-д'Ивуар, принято Президентом Республики. Министр территориального управления и децентрализации, министр сельского хозяйства и нравственного развития, министр экономики и финансов и министр окружающей среды и устойчивого развития, стремится определить условия концессии на управление частной лесной территорией государства и территориальные общности [7].

– Закон № 98-750, касающийся землевладения в сельской местности (и различные имплементационные тексты) - Кот-д'Ивуар, также предусматривал децентрализацию, чтобы наделить полномочиями комитеты по управлению сельскими землями. На местах ИПФ послужил поводом для коренных общин оспорить земельные права, переданные мигрантам в прошлом. Однако в Законе о земле 1998 года не были учтены некоторые ключевые положения Плана развития сельских территорий в отношении того, как обычные права на землю рассматривались в глазах государственного права [8].

– Закон 98-750 от 23 декабря 1998 года о сельских землях с поправками, внесёнными Законом 2004-412 - Кот-д'Ивуар, был принят ивуарийским парламентом. Он определяет территорию сельской земли как находящуюся одновременно вне общественного достояния, вне городских

периметров, вне официально установленных зон отложенного развития и вне классифицированной лесной области. Он состоит на постоянной основе: земля в государственной собственности, земля в собственности органов государственной власти и физических лиц, земля без собственника. Статья 4 этого закона устанавливает условия для юридического признания прав, осуществляемых в отношении земель в этой области. Фактически он указывает, что «право собственности на землю в сельском земельном имуществе устанавливается на основании регистрации этой земли в Земельной книге, открытой для этой цели Администрацией, а также в отношении земель, находящихся в обычном владении. Земельным сертификатом. Владелец земельного сертификата должен запросить регистрацию соответствующей земли в течение трёх лет с даты приобретения земельного сертификата. Статья 6 Закона о земле 1998 года нарушает полное признание обычных прав. Ведь там написано, что «земли, на которых нет хозяина, принадлежат государству» [9].

Россия. Основными нормативно-правовыми актами в части землепользования в стране являются следующие:

– Федеральный закон РФ "О землеустройстве" от 18.06.2001 г. № 78-ФЗ. Настоящий Федеральный закон устанавливает правовые основы проведения землеустройства в целях обеспечения рационального использования земель и их охраны, создания благоприятной окружающей среды и улучшения ландшафтов. Объектами землеустройства являются территории субъектов Российской Федерации, территории муниципальных образований, а также части таких территорий. Проведение землеустройства включает следующие этапы: изучение состояния земель; геодезические и картографические работы; почвенные, геоботанические обследования; оценку качества земель; инвентаризацию земель; планирование и организация рационального использования земель и их охраны; описание местоположения границ объектов землеустройства; установление на местности границ объектов землеустройства; внутрихозяйственное землеустройство [10]. Благодаря этому закону

правительство Российской Федерации может планировать использование земель, а также собирать информацию для составления прогноза о состоянии земель. Для этого необходимо разработать метод сбора информации о состоянии земель. Отметим, что законодательство Кот-Д'Ивуара в части землеустройства менее развито, чем законодательство России, что обосновано низким уровнем научно-методического обеспечения мониторинга земель различных категорий и отсутствием соответствующих нормативно-правовых актов.

– Постановление Правительства РФ от 20 августа 2009 г. № 688 «Об утверждении Правил установления на местности границ объектов землеустройства». Постановление определяет порядок установления на местности границ объектов землеустройства на основании сведений государственного кадастра недвижимости о соответствующих объектах землеустройства. Если провести сравнение с законодательством Республики Кот-Д'Ивуар, то наблюдается отсутствие требований к точности определения координат устанавливаемых межевых знаков, что зачастую приводит к некорректному определению границ объектов землеустройства [11].

– Постановление Правительства РФ от 30 июля 2009 г.№ 621 «Об утверждении формы карты (плана) объекта землеустройства и требований к её составлению». Данный нормативно-правой акт устанавливает форму карты (плана) объекта землеустройства и требования к её составлению, что позволяет получать сведения о местонахождении, размерах и границах объектов землеустройства. Следует отметить, что законодательство Республики Кот-Д'Ивуар не уделяет внимания этому аспекту [12].

– Положение о государственной экспертизе землеустроительной документации (утв. Постановлением Правительства РФ от 4 апреля 2002 г. № 214). Настоящее Положение определяет порядок проведения государственной экспертизы землеустроительной документации, которая осуществляется по решению органов государственной власти, органов местного самоуправления или по инициативе заинтересованных лиц. В Республике Кот-Д'Ивуар

вопросами экспертизы землеустроительной документации частично занимаются местные органы власти, однако данная процедура не всегда выполняется в полной мере, что связано с отсутствием специального уполномоченного органа и низким уровнем квалификации специалистов [13].

– Положение о Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии (утв. Постановлением Правительства РФ от 1 июня 2009 г. № 457) [14]. Настоящее Положение устанавливает полномочия Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии в части государственной регистрации прав на недвижимое имущество, ведения Единого государственного реестра недвижимости, государственного кадастрового учета недвижимого имущества, ведение государственного фонда данных, полученных в результате проведения землеустройства, кадастровое деление территории Российской Федерации на кадастровые округа, кадастровые районы и кадастровые кварталы и др. Нормативно-правового акта, регламентирующего ведения единого государственного реестра недвижимости, в Республике Кот-Д’Ивуар не выявлено.

Таким образом, единого органа, наделенного широким набором полномочий в части землеустройства, государственной регистрации, кадастра и картографии, в Республике Кот-Д’Ивуар не существует. Эта неорганизованность часто порождает несколько видов конфликтов, таких как незаконный захват земли, незаконная продажа земли коренным населением, незаконное заселение иностранцами земли в сельской местности. Следует также отметить, что отсутствие нормативно-правовой базы вызывает проблемы экологического характера. При неконтролируемой хозяйственной деятельности происходит разрушение растительного покрова, что приводит к сокращению лесных угодий и к огромным потерям земель. Чтобы регулировать сферу управления земельными ресурсами, государству необходимо внедрить меры по рационализации земель, интегрировав метод сбора информации о состоянии земель на основе данных ДЗЗ из космоса.

1.2 Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли для задач мониторинга состава земель

Современные системы аэрокосмического мониторинга обеспечивают систематические наблюдения за состоянием окружающей среды и создают основу для выработки управленческих решений в различных областях деятельности, в том числе по вопросам рационального природопользования. Система мониторинга любого уровня включает в себя четыре уровня, сгруппированных в два сегмента – наземный и орбитальный (и/или воздушный) [15].

В первом уровне функционируют бортовые системы движения космического аппарата (КА). Во второй – входит собственно система наблюдений – совокупность целевой аппаратуры дистанционного зондирования. К третьему эшелону относят системы, обеспечивающие необходимые параметры орбиты и ориентацию КА, а также средства передачи данных ДЗЗ на Землю. Все эти элементы входят в орбитальный сегмент космической системы ДЗ [16].

Наземный сегмент космической системы мониторинга природной среды включает в себя два уровня – наземный командно-измерительный пункт с комплексом управления и центром эксплуатации всей системы в целом. К последнему уровню относят ведомственные и региональные сети приема, первичной обработки и распространения данных мониторинга. В целом систему аэрокосмического мониторинга природной среды целесообразно представлять в виде двух подсистем: контактной (наземного обеспечения мониторинга); дистанционной (орбитальной или воздушной) [17].

Дистанционные наблюдения выполняются с помощью средств аэрокосмического базирования. В последние годы широко применяются методы сбора и регистрации информации с использованием искусственных спутников Земли (ИСЗ) аппаратурой зондирования подстилающей поверхности, работающей в видимом, инфракрасном (ИК) и радиоволновом (СВЧ) диапазонах электромагнитного излучения малого, среднего, высокого и сверхвысокого разрешения [18].

В современных аэрокосмических системах мониторинга окружающей среды используются приборы и системы дистанционных наблюдений, работающие в диапазоне длин волн электромагнитного излучения от 0,2 мкм (ультрафиолетовое излучение) до 3 м (ультракоротких радиоволн). Участок оптических длин волн (0,2 нм – 1 мкм) включает ультрафиолетовый интервал (0,29 – 0,400 мкм), видимый (0,400 – 0,750 мкм) и инфракрасный (0,750 – 1,00 мкм) поддиапазоны. В свою очередь диапазон инфракрасного излучения обычно еще подразделяют на ближний 0,8 – 1,3 мкм, средний 1,3 – 3, 5 мкм и дальний (тепловой) 3,5 – 100 мкм (рисунок 1) [19].

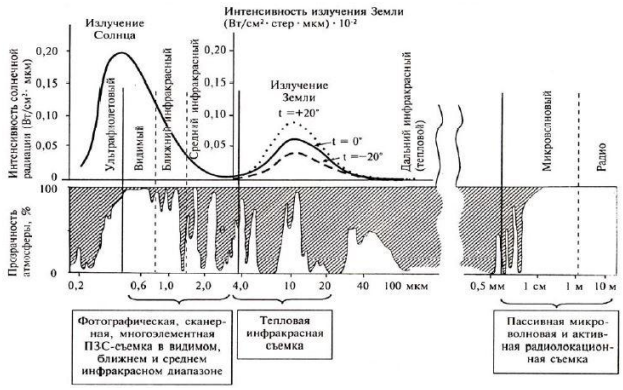


Рисунок –1 Характер излучение земной поверхности, окна прозрачности и диапазоны съемки [19]

За последнее десятилетие оптические изображения дистанционного зондирования с высоким и очень высоким пространственным разрешением дали новый импульс для мониторинга и картирования Земли с помощью очень тонкой и точной информации [20].

Спутники наблюдения Земли оказались весьма подходящим инструментом для изучения землепользования во всех временных и космических масштабах. В течение почти сорока лет многочисленные спутниковые датчики на орбите вокруг Земли предлагали широкий выбор пространственных, спектральных и временных разрешений для описания и картографирования растительного покрова как в точном земледелии, так и в более мелких масштабах, планетарном масштабе [21].

Спутниковые снимки высокого и среднего пространственного разрешения (Sentinel, Landsat, SPOT, Ikonos, Quickbird) используются во многих приложениях, связанных с изучением наземного землепользования. Анализ изображений высокого разрешения позволяет выявить изменения природного или антропогенного происхождения, произошедшие на территории [22]. Спутниковые снимки с высоким пространственным разрешением стали незаменимыми во многих областях, таких как охрана окружающей среды, рациональное использование природных ресурсов, планирование землепользования. В основном при пространственном разрешении, равном или менее 30 метров, и синих, зеленых, красных и инфракрасных спектральных диапазонах можно различать различные классы, определять состояние поверхности и классифицировать их в соответствии с занятием и использованием земли [23].

Спутники дистанционного зондирования Земли оснащены различными видами съёмочной аппаратуры и наблюдают за земной поверхностью. В зависимости от съёмочной системы, установленной на космическом спутнике дистанционного зондирования Земли, выделяются два типа получения геопространственных данных: оптико-электронная съёмка и радарная съёмка [24].

Оптико-электронные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют получать пространственную информацию о земной поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн. Они способны распознавать пассивное отраженное излучение земной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В таких системах излучение попадает на соответствующие датчики, генерирующие, электрические сигналы в зависимости от интенсивности излучения.

Радарная космическая съёмка ведётся в радиодиапазоне длин электромагнитных волн и может проводиться в ночное время и в зимний период независимо от облачности. Данные с радиолокационных спутников ДЗЗ нашли

широкое применение в мониторинге смещений и деформаций земной поверхности и сооружений за счёт вычисления разностей фаз радарных снимков, сделанных в разное время. Радарные спутники ДЗЗ предоставляют информацию не только об объектах на поверхности, но и о подземных коммуникациях, трубопроводах и т. п [25].

В настоящее время данные спутникового дистанционного зондирования с высоким и средним пространственным разрешением преимущественно используются для обнаружения изменений состава земель. Рассмотрим некоторые из них.

Мониторинг землепользования

ALOS-3 полностью прошел фазу разработки и проектирования. Специалисты агентства JAXA отказались от совмещения на одной платформе оптической и радарной систем, что реализовано на действующем спутнике ALOS. Поэтому на смену КА ALOS придут сразу два космических аппарата — один оптико-электронный (ALOS-3), второй — радарный (ALOS-2). ALOS-3 будет способен выполнять съемку в панхроматическом, мультиспектральном и гиперспектральном режимах [26].

Ingenio (SEOSat; Satélite Español de Observación de la Tierra) является одним из компонентов испанской национальной программы наблюдения Земли из космоса PNOTS (Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite) (см. также радарный спутник Paz) [27].

Решаемые задачи: обновление топографической подосновы для разработки проектов схем территориального планирования муниципальных районов и субъектов федерации.

FORMOSAT-2 предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности в панхроматическом и мультиспектральном режимах. Спутник ведет съёмку двумя камерами. Его отличает манёвренность, возможность ежедневной съёмки, а также более раннее прохождение над любой точкой Земли (9 ч 30 мин. утра по местному времени, тогда как у большинства спутников – 10 ч 30 мин.), что увеличивает вероятность безоблачной съемки [28].

SPOT-5 был оснащён высокоточным стереоскопическим детектором, позволявшим получать стереопары для построения глобальной модели рельефа SPOT-DEM, а также двумя камерами высокого разрешения, позволявшим получать панхроматические изображения с разрешением 5 м (в режиме SuperMode — до 2,5 м) и мультиспектральные — с разрешением 10 м. Кроме того, на SPOT-5 была установлена камера VEGETATION 2, позволявшая получать практически ежедневно снимки всей поверхности Земли с разрешением 1 км[29].

THEOS (Thailand Earth Observation System) — первый таиландский спутник дистанционного зондирования Земли, предназначен для космической съёмки земной поверхности в интересах государственных структур Таиланда [30].

Решаемые задачи: мониторинг экологического состояния территорий.

RESOURCESAT-1 (IRS-P6) конструктивно был выполнен на базе платформы КА IRS-1C/1D. Дополнительно на его борту был установлен усовершенствованный сканер LISS-4, позволявший получать цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением 5,8 м как в панхроматическом, так и в мультиспектральном режимах с повышенным радиометрическим качеством

RESOURCESAT-2 предназначен для решения задач предотвращения стихийных бедствий, управления водными и земельными ресурсами. 7 декабря 2016 г. был запущен спутник RESOURCESAT-2A идентичный по своим характеристикам с КА RESOURCESAT-2[31].

Nigeriasat-2 (Нигерия) является частью Международной группировки спутников DMC и принадлежит к третьему поколению спутников этой группировки. Снабжен камерами для съемки земной поверхности в панхроматическом и мультиспектральном режимах [32].

Решаемые задачи: сельскохозяйственный мониторинг.

SSOT Чилийский мини-спутник высокого разрешения SSOT (Sistema Satelital para Observaciyn de la Tierra; другое название — FASat-Charlie) был

спроектирован и создан компанией EADS Astrium Satellites (ныне — Airbus Defence and Space). Космический аппарат предназначен для получения высококачественных данных как для оборонной, так и для гражданской сферы [33].

Решаемые задачи: обновление топографической подосновы для разработки проектов генеральных планов перспективного развития городов, схем территориального планирования муниципальных районов.

WorldView-1 оснащён телескопом с апертурой 60 см для съёмки только в панхроматическом режиме. Спутник может снимать по различным схемам: кадровая съёмка, маршрутная съёмка (вдоль береговых линий, дорог и других линейных объектов), площадная съёмка (зоны размером 60x60 км), а также стереосъёмка. В июне 2016 г. был завершен переход спутника с утренней орбиты на дневную. WorldView-1 теперь проходит над каждым районом Земли приблизительно в 13:30 по местному времени [34].

Cartosat-2C, 2D, 2E аналогичны спутникам Cartosat-2, 2A и 2B. Они оборудованы панхроматической (с разрешением 0,65 м) и мультиспектральной (с разрешением 2 м) камерами. Параметры спутников обеспечивают их применение для картографии, геологии, сельского хозяйства, управления городским хозяйством и т. д [35].

GeoEye-1 отличает сверхвысокое пространственное разрешение в панхроматическом режиме, высокая точность привязки снимков, а также очень высокая производительность съёмки. Спутник обладает высокой маневренностью, что позволяет получать большой объем данных за один пролет. Точность съёмки в плане — 3,5 м (CE90), в то время как стереосъёмка достигает точности 2,8 м (LE90) по высоте без применения опорных точек [36].

KOMPSAT-2 (Korean Multi-Purpose Satellite) предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 1 м в панхроматическом режиме и 4 м в мультиспектральном режиме. Отличительной особенностью спутника является возможность

продолжительного времени непрерывной съемки — до 120 тыс. кв. км (533 сцены) на одном витке [37].

Основные характеристики космических аппаратов с оптико-электронными системами и радиолокационные спутники дистанционного зондирования земной поверхности (см. приложении А)**.**

LANDSAT - наиболее продолжительная программа исследования Земли из космоса и является одной из наиболее успешных на мировом рынке данных ДЗЗ. Автоматические спутники серии Landsat (первоначальное название ERTS - Earth Resources Technology Satellite) предназначены для изучения природных ресурсов Земли и решения проблем землеведения в широком понимании этого слова. Цель запуска - собрать пригодный для компьютерной обработки материал для решения вопросов сельского и лесного хозяйства, геологического картирования, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, пространственного планирования территорий [38].

В данном исследовании использовались изображения, полученные с космического аппарата Landsat 8 и 9.

Landsat-8 (проект LDCM — Landsat Data Continuity Mission) продолжает выполнение программы Landsat, поставляя данные для использования в сельском хозяйстве и других отраслях экономики, а также в образовании, бизнесе, государственном управлении. На КА Landsat-8 установлены два сенсора: оптико-электронный (Operational Land Imager, OLI) и тепловой (Thermal InfraRed Sensor, TIRS) [38]. Основные характеристики Landsat представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Основные технические характеристики КА Landsat-8 [38]

Номера каналов	**Спектральный диапазон (мкм)**	**Ширина полосы обзора (км)**	**Период съемки**	**Радиометрическое разрешение (бит)**	**Пространственное разрешение (м)**
1	0.433 – 0.453	185	16	12	30
2	0.450 – 0.515				
3	0.630 – 0.680				
4	0.630 – 0.680				
5	1.560 – 1.660				

6	1.560 – 1.660				
7	2.100 – 2.300				
8	0.500 – 0.680				15
9	1.360 – 1.390				30

Landsat-9 продолжает миссию программы Landsat. Спутник будет поставлять данные для мониторинга и управления земельными ресурсами, для сельского хозяйства и других отраслей экономики, а также для образования, бизнеса, государственного управления. На КА Landsat-9 установлены два сенсора (аналогичные тем, что есть на КА Landsat-8, но более совершенные): оптико-электронный (Operational Land Imager, OLI-2) и тепловой (Thermal InfraRed Sensor, TIRS-2) [39].

Таблица 1.2 — Основные технические характеристики КА Landsat-9 [39]

Номера каналов	**Спектральный диапазон (мкм)**	**Ширина полосы обзора (км)**	**Период съёмки**	**Радиометрическое разрешение (бит)**	**Пространственное разрешение (м)**
1	0,433-0,453	185	16 дней	12	30
2	0,450-0,515				
3	0,525-0,600				
4	0,630-0,680				
5	0,845-0,885				
6	1,566-1,65				
7	2,107-2,294				
8	0,503-0,676				15
9	1,363-1,384				30
10	10,60-11,19				100
11	11,50-12,51				100

В подразделе были освещены различные типы современных космических аппаратов для зондирования Земли (Приложение А). Описаны виды сбора геопространственных данных, спектральные диапазоны, ширина диапазона, радиометрическое разрешение, параметры пространственных спутниковых изображений, их пространственное разрешение, характеристики и задачи различных спутников получения информации для решения земных задач. Для изучения динамики землепользования наиболее подходит спутник Landsat,

поскольку он обеспечивает изображения земной поверхности с разрешением от 100 до 15 метров с шириной полосы обзора около 185 км по всем каналам и решает такие задачи, как мониторинг окружающей среды. И в последние годы он использовался чаще всего, потому что это наиболее подходящий тип данных для анализа изменений в динамике землепользования. Из вышеизложенного можно сказать, что данные дистанционного зондирования Земли являются важным источником информации для любого научного исследования и могут быть использованы для мониторинга состояния земель и прогнозирования их состояния.

1.3 Анализ современных методов тематической обработки космических изображений для обнаружения изменений состава земель

В настоящем подразделе рассматриваются ключевые работы, направленные на использование методов цифровой тематической обработки космических изображений для изучения структуры землепользования и обнаружения изменений состава земель.

Работа G. Soro, E. K. Ahoussi [40] посвящена изучению пространственно-временной динамики землепользования на территории, граничащей с саванной и землями лесного фонда. В работе проведён анализ спутниковых данных (Landsat TM и ETM+), и для классификации состава земель авторами выбран метод контролируемой классификации, основанный на цветных композитах. В результате чего получены карты земной поверхности, отображающие состояние основных категорий земель, а именно, уменьшение площадей водных, орошаемых культур и саванн, а также увеличение площадей лесов, посевов. Результаты этого исследования показали, что на изучаемой территории отмечена сильная деградация природных экосистем. Недостатком предложенного метода, по нашему мнению, является выделение и отображение на картах лишь укрупнённых групп категорий земель. Например, в категории орошаемых культур нет чёткого разделения по культурам, что может быть очень важно для мониторинга сельского хозяйства и рационального использования земель.

Работа [41] посвящена изучению заселённости земель Окромоду в Кот-д'Ивуаре. Для проведения исследования авторы используют космические изображения Landsat TM и ETM+, а также географическую информационную систему. Метод, использованный в исследовании, опирается на цифровую классификацию изображений (максимального правдоподобия), которая представляет собой иерархическую классификацию по последовательным этапам. Данный метод позволил получить статистический подход к оценке землепользования и выделить динамику видов землепользования за разные периоды времени. Изучение наземного покрова позволило авторам провести разновременный анализ в сочетании с картографическими и социально-экономическими данными, выделить последовательные состояния растительного покрова и проанализировать его динамику за определённый интервал времени. По содержанию представленные авторами типы карт являются тематическими картами. При картографировании авторы объединили земли населённых пунктов и открытых почв в один класс, что на наш взгляд, усложняет процесс их разделения [41].

C.B. Tiesse, E.N. Wandan, H.D. N’da предложили охарактеризовать и нанести на карту растительный покров горного района Тонкпи [42]. Исследование проводилось на базе снимков Landsat за различные периоды времени и снимков Aster GDEM. Классификация, выполненная методом максимального правдоподобия по космическим снимкам Landsat, позволила составить карты растительности зоны Тонкпи. Далее эти карты были наложены на цифровую модель местности, полученную из Image d'ASTER, с целью оценки динамики леса на уровне высотных классов. Изучение заселённости земли выявило изменение природного пространства в результате антропогенной деятельности. Можно отметить, что данное исследование представляет ненадёжные результаты из-за некоторой путаницы в некоторых классах и отсутствия расчёта матрицы ошибок для 1990 и 2011 годов исследования.

A. S. Koffi, A. A. Fora, H. Elbelrhiti, в своей работе предлагают исследование состояния растительного покрова в районе Корого на севере Кот-

д'Ивуара по космическому снимку и стандартизированному индексу растительности и цветовому композиту (синтез 4:7:2) [43]. После различных видов тематической цифровой обработки авторы получили отображение состояния растительного покрова в виде трёх различных тематических карт, что даёт совершенно разные результаты в части оценки состояния растительного покрова. Это связано с тем, что результаты получены тремя различными способами, что и определяет различие в качественные и количественные оценки изменений земель лесного фонда.

M.C.M. Solefack, O. Chabrerie, E.G. Morona, B.A. Nkongmeneck, O.N.L. Leumbec и G. Decocq [44]. предлагают исследовать изменения в землепользовании на горе Оку (Камерун) за последние тридцать лет с использованием спутниковых изображений Landsat, метода контролируемой классификации и моделирования с использованием структурных уравнений. В результате контролируемой классификации были получены четыре карты земельного покрова, а моделирование структурными уравнениями позволило получить рисунок, показывающий взаимосвязь между местными и ландшафтными переменными и обезлесением. Анализ спутникового снимка, полученного по результатам исследований, позволил количественно оценить вырубку лесов. В работе результаты тематической обработки представлены в полутоновом изображении, что не позволяет чётко идентифицировать и интерпретировать классы, относящиеся к конкретной категории земель.

Проанализируем работы авторов S. Binsangou, S. A. Ifo, F. Koubouana, L. Louvouandou, S. Nzingoula, L. Mansisse, предложим Мониторинг путем дистанционного зондирования вырубки лесов в связи с ростом городов в городе Уэссо в период 2000-2016 гг. [45], Республика Конго. Используемые данные — это изображения Landsat, а использованная методология – контролируемая классификация. Для проведения этого исследования роста городов и обезлесения использовалась контролируемая классификация. Затем были получены три карты землепользования. В работе авторов представлен модельный вектор, ограничивающий исследуемую территорию, но мы обнаружили, что этот

модельный вектор не использовался для выделения исследуемой территории, поэтому карты землепользования включали другие территории.

S.E.B. Bouiadjra, W.E. Zerey, K. Benabdeli рекомендуют исследование изменений растительного покрова в горной экосистеме с помощью пространственного дистанционного зондирования: на примере гор Тессала (западный Алжир) [46]. Для изучения динамики растительного покрова города Тессала были выбраны два спутниковых снимка Landsat. Для проведения своего анализа авторы выбрали NDVI (Нормализованный индекс разницы растительности). Впоследствии авторы получили две карты NDVI изображений TM 1987 и ETM + 2007 и карту изменений в растительный покров гор Тессала в период с 1987 по 2007 год. В своей работе мы испытываем трудности с выявлением изменений, полученных на изображениях, из-за низкого качества изображений, поскольку авторы не производили атмосферную коррекцию.

H.T.O.Ali, S.Niculescu, V.Sellin, C.Bougault рекомендуют методологию мониторинга растительности в Pays de Brest с использованием новой серии радиолокационных спутниковых изображений Sentinel-1[47]. Для расчёта интерферометрической когерентности основных типов растительности разновременные серии радиолокационных изображений Sentinel-1 в формате SLC (Single Look Complex) (C-диапазон, VV и VH поляризация) между 2015 и 2016 годами. Во-вторых, авторы предлагают рассчитывать коэффициента обратного рассеяния радара из изображений Sentinel 1 в формате GRD (обнаружена дальность полёта). Применяемый подход основан на анализе взаимосвязей между состоянием различных растительных экосистем и откликом радара при попытке установить связи между откликами физической когерентности и коэффициентами обратного рассеяния с параметрами растительности (фенология, структура), а также уровень влажности почвы за счет атмосферных осадков. Интерферометрическая когерентность — это мера шума фазы интерферограммы, которая зависит от параметров датчика (разрешение, базовая линия), а также от временных изменений элементарных диффузоров. Изображения, полученные в результате расчетов

интерферометрической когерентности и коэффициента обратного рассеяния радара, представлены в цветных композициях (R, G, B) в многодневной композиции (2 даты сравнения). Отметим, что первое изображение, которое представляет согласованность между датами 19.07 и 31.07 2015 года, не позволяет установить чёткое сезонное изменение зоны, за исключением построенных зон, которые отображаются в цвете. Второе изображение (между датами 06.12.2015 и 18.12.2015) содержит больше областей согласованности, оно представляет зимний период, когда на поверхности участков может быть вода. На последнем изображении представлен весенний период (с 27.03.2016 по 08.04.2016), здесь мы отмечаем, что когерентных зон меньше, чем для зимнего периода. В конце нашего анализа мы можем сказать, что методы, используемые авторы не дают удовлетворительных результатов, потому что этот метод не может идентифицировать все присутствующие сущности по сезонам.

В.В. Беленко в своей работе рекомендует экспериментальные исследования типов и динамики застройки по космическим снимкам для картографирования застраиваемых территорий [48]. Для решения задач изучения структуры и изменений застройки использовались космические снимки КА Landsat–5, 7. Для проведения тематической обработки космического снимка с целью выделения различных типов застройки разработана дешифрирования и картографирования. По окончании обработки различных данных составляется авторский оригинал карты структуры застройки и авторский оригинал карты динамики изменений. После обработки по методике, использованной автором, мы видим, что изображение 2011 года не появляется, хотя автор указал его в качестве исходных данных, а также отмечает путаницу между застройка объектами социального и бытового назначения и Застройка объектами коммунального и складского назначения.

В.В. Беленко, Е.П. Данилина из Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) в своей работе предлагают методики исследование динамики водно-болотных экосистем на основе материалов дистанционного зондирования Земли на примере озера Селигер [49].

В качестве исходных данных авторы использовали снимки Landsat 1992, 2002, 2011 и 2018 годов. В своей работе, проанализировав несколько методов обработки, авторы выбрали метод классификации из-за его преимуществ. В качестве заключительного шага оценивалась точность выполненной классификации снимков двумя путями: визуально, чтобы выявить грубые ошибки; количественно, с помощью простой матрицы ошибок. впоследствии авторы получили карты местности (озеро Селигер) по состоянию на 02.07.1992 г.; 20.06.2002 г; 24.08.2011 г.; 11.08.2018 г. В своей методологии авторы использовали матрицу ошибок для точности классификации изображений, но мы не находим никаких результатов матрицы ошибок в литературе, поэтому мы не можем знать, есть ли во время классификации некоторая путаница в идентифицированных классах.

В. А. Малинников и В. Н. Нгуен из Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) в своей работе рекомендуют использование цепей Маркова для прогнозирования конверсии видов землепользования [50]. Использованные авторами данные снимки SPOT-5. использованная авторами методология – Марковская модель. Марковские цепи являются удобным инструментом для моделирования изменений в землепользовании, когда изменения и процессы в ландшафте носят стохастический характер. Классификация изображений позволила получить три карты классификации землепользования, и модель Маркова предоставила результаты прогнозов изменений в типах землепользования на период 2003-2027 гг.

Ч.Л. Хунг, Е.Б. Мельникова предлагают мониторинг динамики растительного покрова по данным мультизональных снимков Landsat 5 TM (1990–2011 гг.) и вегетационного индекса NDVI [51]. В научных исследованиях для оценки динамики качества растительного покрова используется тестовый участков, расположенный в районах Дам Ронг и Лам Ха провинции Лам Донг (Центральное нагорье Вьетнама). Нормализованный дифференциальный индекс растительности является надёжным инструментом анализа динамики качества

растительного покрова. Результаты построения индексного изображения NDVI позволили выделить изменения растительного покрова в исследуемом районе с высокой точностью. Следует отметить, что использование нормализованного вегетационного индекса NDVI в задачах обнаружения изменений состава земель различных категорий, распространено широко. Однако, не для всех категорий земель использование подобного индекса возможно для получения достоверных результатов тематической обработки. Например, для различных типов застройки, где растительность и компоненты природной среды отсутствуют, данный индекс не подходит. Для мониторинга земель, относящихся к застройке, наиболее подходящим является использование индекса застроенности NDBI (Normalized Difference Built-up Index, нормализованный разностный индекс застройки).

Е. А. Балдина, К. А. Трошко в своей работе предлагают картографировать пашню по разновремённым космическим снимкам Landsat [52]. В рамках научного исследования авторы использовали цветовой синтез RGB многосезонных изображений, и программное обеспечение Arcgis для построения карты сельскохозяйственного землепользования в дельте Волги в 2014 году. Внедрённые методы позволили обнаружить изменения в землепользовании.

А.О. Аввакумов предлагает проводить анализ динамики структуры землепользования по данным дистанционного зондирования из космоса с использованием ключевых участков. Тестовые ключевые участки расположены в Республике Татарстан [53]. Для исследования используются разновременные космические снимки (Landsat 5 и Landsat 8) и метод автоматизированного дешифрирования с использованием ГИС-технологий (метод цветных композитов), позволяющий выявлять изменения и определять типы землепользования территории. Применение указанного метода позволило обнаружить уменьшение площадей различных категорий земель. В работе проводится исследование семи ключевых тестовых участков, по результатам которого составляются две карты ключевых тестовых участков. На наш взгляд, целесообразнее составлять карты землепользования и динамики для каждого

ключевого участка, что позволит всесторонне получить более достоверные сведения о состоянии и динамики земель. Данный метод является эффективным в части выявления многолетних изменений в структуре землепользования. Однако, следует заметить, что предложенные автором комбинации каналов 5:4:3 и 6:5:4 не всегда позволяют выявить все категории земель. Для этого, на наш взгляд, требуется использование дополнительного синтеза, позволяющего выявлять более полные особенности структуры землепользования и её динамики.

Е.П. Хлебникова, СА. Арбузов предлагают создать специализированную геоинформационную систему для решения задач мониторинга особо охраняемых природных территорий [54]. Предлагаемый авторами метод заключается в комплексном использовании векторных и растровых геопространственных данных, включающих космические снимки, тематические и топографические карты, цифровую модель рельефа. Результатом комплексного использования геопространственных данных серия карт, отражающая состав и состояние исследуемых особо охраняемых природных территорий. Существенным преимуществом указанного подхода является комплексное использование геопространственных данных, что позволяет получать более достоверные и полные сведения об объекте исследования.

М.А. Иванов и А.В. Прищепов в своей работе рекомендует методику картографирования используемых и заброшенных пашней в районах европейской части России, расположенных в различных климатических, ландшафтных и геоморфологических условиях [55]. Для работы были выбраны изображения спутников Landsat 5 и 8 для двух временных срезов (середина 1980-х г. и современный период 2013-2015 г.). За основу была взята методика дешифрирования, используемая в проекте CORINE Land Cover 2000 (CLC2000), скорректированная с учётом региональных особенностей и целей. При картировании авторами использовался метод визуального дешифрирования и последующего ручного сканирования. По результатам проведённых исследований авторы получили векторные слои используемых пахотных угодий

за два рассматриваемых периода. Эти методы позволили оценить динамику пашни за тридцатилетний период. В результатах авторов мы замечаем такие ошибки, как плохо выделенные границы земельных участков, явно принадлежащие другим категории земель.

А.П. Сизов, в своей работе рассматривает новые подходы к картографированию результатов мониторинга земель сверхкрупного города [56]. Данные, используемые автором, являются снимки, полученные с помощью космических спутников «QUICK BIRD» и «IKONOS». Автор использовал методы камерального дешифрирования и сравнительного анализа материалов дистанционного зондирования разных периодов и получит карты различных видов картографических материалов, используемых при осуществлении мониторинга земель, на один и тот же участок территории. кроме того, автор получил карты скорости застройки и высвобождения земель г. Москвы (2008). При создании карты автор решил, среди прочих, два важных в методологическом отношении вопроса. Первый — выбор элементарного объекта картографирования и второй методологический вопрос — выбор шкалы для отображения скорости изменения свойств земель — связан с различным диапазоном изменения одного и того же картографируемого показателя (%/год) для разных диагностируемых макропроцессов.

1.4 Картографическое обеспечение тематической обработки космических изображений для задач мониторинга земель

В настоящее время картографическая информация имеет особое значение для целей мониторинга земель. Тематическая картография для мониторинга земель выполняется на основе использования материалов аэрокосмической съёмки и геоинформационных технологий. Картография — это совокупность исследований и научно-технических операций, связанных с созданием карт или планов на основе результатов непосредственных наблюдений или использования ранее существовавшей документации. Карта представляет собой плоское геометрическое изображение, упрощенное и условное, всей или части земной

поверхности в подходящем отношении сходства, называемом масштабом. Масштаб карты — это постоянное соотношение между длинами, измеренными на карте, и соответствующими длинами, измеренными на местности. Для разных уровней мониторинга земель картографический масштаб: для федерального мелкомасштабный, для регионального мелкомасштабный и средний масштаб, для местного крупномасштабный, а иногда и средний масштаб.

В этом подразделе проанализируем различные научные работы различных отечественных и зарубежных авторов, посвятивших свое исследование землепользованию. Эти различные работы будут приняты во внимание, поскольку они касаются проблем нашего научного исследования. Анализ будет в основном сосредоточены на картографии, а именно на содержании карт, цели картографирования, объекте картографирования и масштабе.

Рассмотрим работу авторов G. Soro, E. K. Ahoussi, E. K. Kouadio, T. D. Soro, S. Oulare, M. B. Saley, N.Soro, J. Biemi посвященную картографированию пространственно-временной динамики заселенности почвы в Регион Лак (Кот-д'Ивуар) по данным дистанционного зондирования [40]. На основании результатов научных исследований авторы предлагают метод контролируемой классификации, позволяющий узнать пространственно-временную динамику почвенно-земельного покрова за период от 16 лет. Проанализируем методику составления карт. По содержанию они аналогичны тематическим картам. Целью картографирования являются различные виды землепользования. По содержанию они аналогичны тематическим картам.

Когда мы анализируем работы авторов, их исследования сосредоточены на лесном покрове. Во-вторых, на картах, представленных в качестве недостатка, мы замечаем отсутствие изучения населенных пунктов, так как они отсутствуют на карте, а район исследования не разграничен. Наконец, карты, представленные авторами, направлены на оценку динамики землепользования и его влияния на сток.

Затем рассмотрим работу авторов K. K. Eugène, M. K. Combo. Его научное исследование посвящено оценке человеческого давления и пространственно-временных мутаций, которым подвергается классифицированный лес Окромоду, расположенный на юго-западе Кот-д'Ивуара, зона крупного производства какао-фермы [41]. Полученные в результате обработки результаты позволяют выделить динамику типов распределения на местности в разные даты. При анализе карт отметим, что эти карты составлены для оценки состояния землепользования в лесу Окромоду. Карты составлены с использованием пространственных изображений, и объекты, представленные на этих картах, представляют собой различные типы растительного покрова. Недостатком нашего взгляда на карты является то, что авторы объединили места обитания и голые почвы в один объект, поэтому мы не можем идентифицировать голые почвы и места обитания. Авторы не добавили в легенду элемент границы изучаемой территории.

Далее рассмотрим еще работу авторов C. B. Tiesse, E. N. Wandan, H. D. N’da, посвященных характеристике и картографированию растительного покрова горного района Тонкпи, а затем оценке его лесной динамики по спутниковым снимкам [42]. Авторы предлагают выявление и сопоставление различных классов занятий. Результаты классификации позволили выделить пять типов землепользования, а именно густые леса, деградированные леса, посевные и залежные земли, водные пути и низменности и голые земли, и жилища. А затем составить карту динамики землепользования в районе Тонкпи, которая позволяет выделить пространственное распределение различных тематических классов изображений земной поверхности за период 1990 по 2015 гг. Анализируя эти карты, мы замечаем, что те являются тематическими картами и составлены с использованием спутниковых изображений. Но заметим, что в легенде не читаются идентифицированные авторами сущности.

Работа авторов A. S. Koffi, A. A. Fora, H. Elbelrhiti, которые предлагают определять состояние растительного покрова в районе Корого методами дистанционного зондирования [43]. Для картографирования состояния почвы в

регионе авторы использовали космический снимок, метод NDVI, минерализованной поверхности (IC) и цветной композита. Результатом NDVI является изображение, показывающее возрастающий градиент активности растений от черного, обозначающего отсутствие покрова, к белому, что отражает очень высокую активность хлорофилла, а индекс минерализованной поверхности (IC) показывает изображение, на котором растительные и водные поверхности показаны черным цветом, а минерализованные поверхности закодированы светло-серым или белым цветом , а цветная композита показывает изображение, которое позволяет различать различные элементы изображения местности. При анализе карт мы замечаем, что карта NDVI представлена в оттенках серого. Авторы должны были использовать цветовую палитру своего программного обеспечения, чтобы лучше представить объекты на этой карте.

Далее рассмотрим работы авторов M.C.M.Solefack, O.Chabrerie, E. G.Morona, B.A.Nkongmeneck, O.N. L.Leumbec, G.Decocq предлагают охарактеризовать изменения растительного покрова на горе Оку (Камерун) за последние тридцать лет [44]. В своей книге авторы создают карты изменений землепользования за заданный период с пространственными изображениями. Целью картографирования является отображение различных типов землепользования для оценки динамики лесного покрова. С точки зрения продолжения, это динамические карты.

Когда мы анализируем работы авторов, в первую очередь их исследование сосредоточено на лесном покрове. Во-вторых, на картах, представленных как недостаток, мы с трудом различаем определенные классы, а район исследования не разграничен. В-третьих, карты, представленные авторами, предназначены для количественной оценки и характеристики обезлесения с целью выявления территорий, где реализация мер по охране и устойчивому управлению является приоритетной задачей.

Рассмотрим работы авторов S. Binsangou, S. A. Ifo, F. Koubouana, L. Louvouandou, S. Nzingoula, L. Mansisse [45]. Их работа посвящена картированию видов землепользования по космическим снимкам. Авторы используют метод

классификации с учителем и реклассификацию с учителем на основе знаний в данной области. Анализируя содержание карт, представленных авторами, они аналогичны тематическим картам. Основной целью картографирования является выявление различных типов естественного и антропогенного землепользования.

Основной целью представленных карт является мониторинг с помощью дистанционного зондирования вырубки лесов из-за роста городов в городе Вессо. Когда мы анализируем работу авторов и содержание карт, авторы исследуют рост обезлесения из-за роста городов. Но когда мы анализируем карты, мы замечаем, что карты [45] не являются явными, потому что они не показывают никакой деятельности человека, то есть зданий и сельскохозяйственной деятельности.

Рассмотрим работу авторов S. E. B.Bouiadjra, W.E.Zerey, K.Benabdeli, предлагающих охарактеризовать изменения растительного покрова на горах Тессала в Алжире за период в 20 лет [46]. В своей работе авторы составляют две карты: карту NDVI снимков TM 1987 (A) и ETM+ 2007 (B) и карту изменений растительного покрова гор Тессала в период с 1987 по 2007 г. Целью картографирования карт NDVI является отображение областей с наличием или отсутствием растительности. На карте изменений представлены модификации и преобразования растительного покрова, произошедшие за исследуемый период.

Когда мы анализируем работы авторов, в первую очередь их исследование сосредоточено на растительном покрове. Во-вторых, из карт, представленных авторами в целом как недостаток, мы не можем определить элементы, которые там появляются, потому что легенда не показывает объекты, присутствующие на картах. В-третьих, карты, представленные авторами, предназначены для оценки динамики растительного покрова.

Рассмотрим работы авторов H.T.O.Ali, S.Niculescu, V.Sellin, C.Bougault, посвятивших свою научную работу картографии растительности на Пэи-де-Брест по снимкам серии космических снимков [47]. Авторы предлагают метод обработки радиолокационной интерферометрии для расчета интерферометрической когерентности между спутниковыми изображениями S1

и расчета коэффициента обратного радиолокационного рассеяния для каждой даты, чтобы получить графики временных изменений между годами. На основании результатов научного исследования авторы составляют карту мульти поляризационной цветной композиции. Давайте проанализируем их. С точки зрения содержания, представленные карты являются тематическими картами. Задачей картографии на картах являются типы растительного покрова.

Основной целью представленных карт является проведение временного мониторинга растительности и определение типов занятости растительной почвы Пэи-де-Брест благодаря их очень высокому пространственному и временному разрешению. В качестве недостатка на представленных картах отсутствует легенда, показывающая различные объекты, присутствующие на картах, поэтому мы не можем их идентифицировать, а масштаб карты отсутствует

Рассмотрим работу ученого В. В. Беленко, посвятившего свои научные исследования картографированию типов зданий по космическим снимкам [48]. По результатам научных исследований автор предлагает метод минимального расстояния для классификации жилых и нежилых зданий и метод дешифрирования для составления карт. По содержанию представленные авторами типы карт являются тематическими картами.

Основной объект картографирования – современные типы зданий и динамика их изменений. На рисунке 2 показана исходная карта структуры здания, составленная автором, и на рисунке 3 показана исходная авторская карта динамики изменений.

Основная цель представленных автором карт - изучение структуры и динамики развития территорий, развитие которых планируется в будущем. В качестве недостатков, представленных на картах, автором отмечено, что сельский тип застройки и садово-огородный тип имеют одинаковые спектральные характеристики отражения, поэтому они были объединены в один тип застройки с постройками индивидуальных жилыми домов.

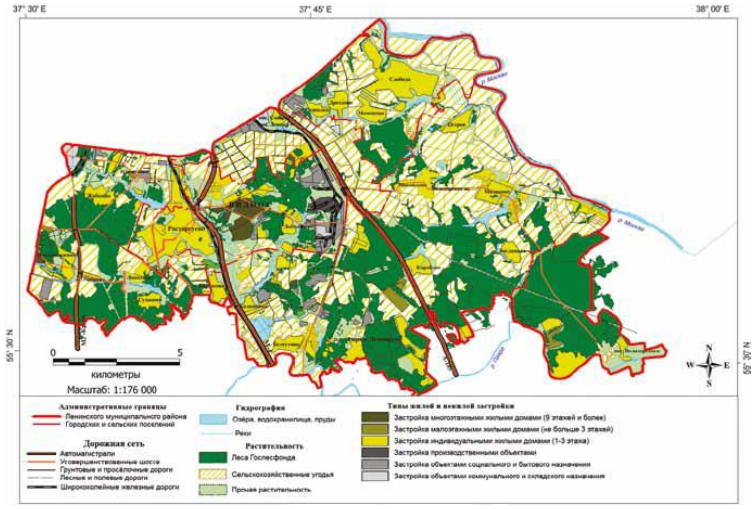


Рисунок – 2 Авторский оригинал карты структуры застройки [28]

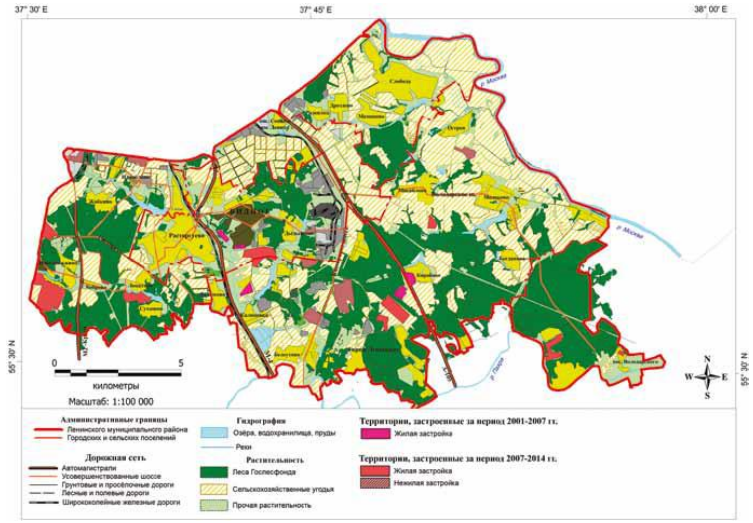


Рисунок – 3 Авторский оригинал карты динамики изменений [48]

В. В. Беленко, Е. П. Данилина посвящают свои исследования динамике водно-болотных экосистем на основе автоматизированной обработки временных рядов пространственных изображений. В своей работе авторы карт региона (озеро Селигер) [49].

Цель составления карт — показать пространственное распределение различных типов землепользования (рисунок 4). По содержанию представленные авторами типы карт являются тематическими картами. Масштаб исследований 1:300 000.

При анализе научной работы можно сказать, что авторы посвящают свое исследование пространственным образованиям региона (озеро Селигер). Как недостаток, замеченный на картах, в легенде мы не обозначаем границы области,

я думаю, что авторы должны были разграничить область исследования, чтобы сделать свое исследование более точным. Основное назначение представленных карт – оценка динамики экосистем водно-болотных угодий для решения задач рационального использования поверхностных водоёмов и прилегающих земель.

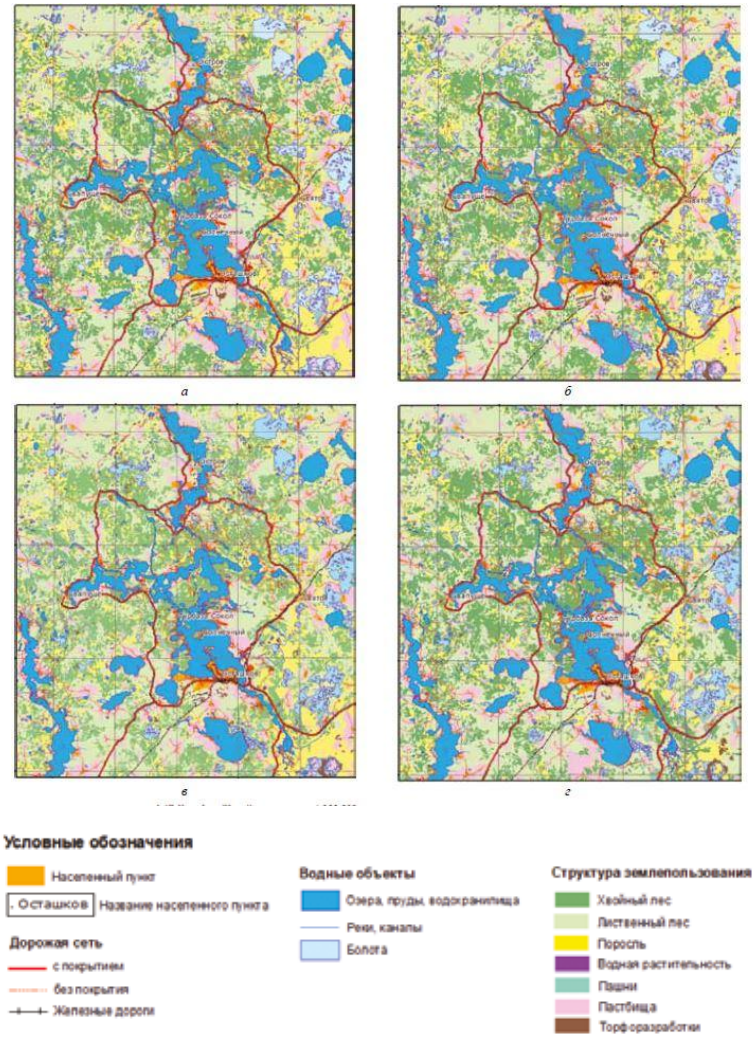


Рисунок – 4 Карты местности (озеро Селигер) по состоянию на: а — 02.07.1992 г.; б — 20.06.2002 г.; в — 24.08.2011 г.; — 11.08.2018 г. [49]

Рассмотрим научные работы Малинникова В.В., Нгуен Ван Нама, их научные труды посвящены картированию типов землепользования [50]. Авторы предлагают на основе научных исследований метод классификации и марковскую модель для описания и прогнозирования преобразования землепользования. По содержанию представленные авторами типы карт являются тематическими картами.

Основная цель картографирования состоит в выявлении различных типов землепользования. На Рисунке 5 (а и б) показаны карты тематической классификации изображений земной поверхности, а на Рисунке 5 (в) представлена прогнозная карта типов землепользования.

Основной целью представленных карт является анализ и прогнозирование изменений в землепользовании для устойчивого управления и развития.

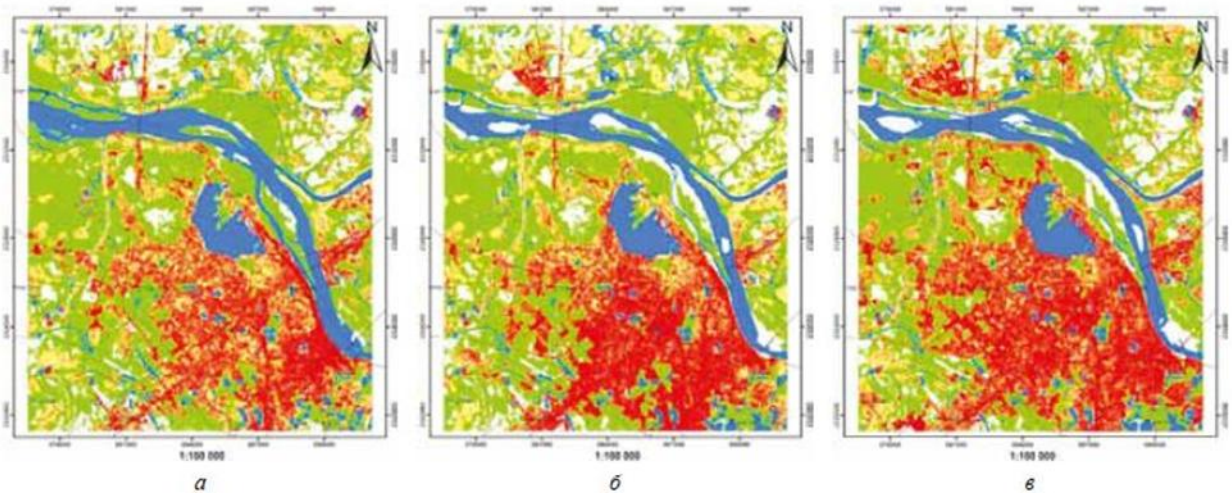


Рисунок – 5 Карты классификации видов землепользования в 2003 г. (а), 2007 г. (б) и 2011 г. (в) [50]

Далее рассмотрим работы авторов Ч.Л. Хунг, Е.Б. Мельникова посвящают свои научные работы картографии растительного покрова по космическим снимкам [51]. Для проведения картирования авторы использовали метод NDVI. В авторской книге представлены тематические карты растительности. А именно карту NDVI (рисунок 6) и карту растительного покрова (рисунок 7).

Целью картографирования карт NDVI является отображение областей с наличием или отсутствием растительности. Назначение карты растительного покрова — отображать динамику качества растительного покрова. При анализе научных работ авторов основной задачей картографирования является оценка динамики состояния растительного покрова, экономическая оценка лесных ресурсов. В качестве недостатка, представленного на карте NDVI, отсутствует

легенда, представляющая объекты, а карты представлены в оттенках серого, поэтому их трудно различить. На наш взгляд, авторам стоило использовать цветовую палитру для лучшей читаемости карт.

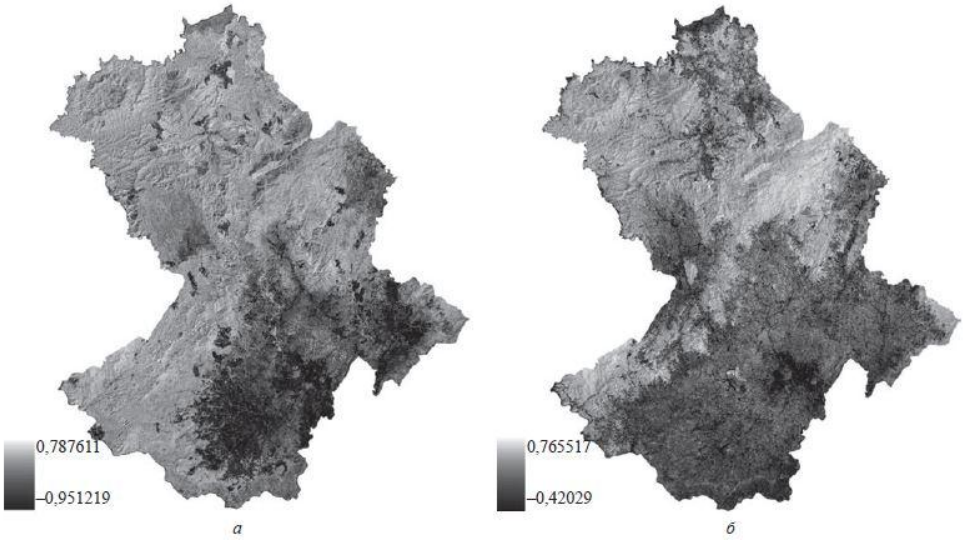


Рисунок – 6 Картограммы значений нормализированного разностного вегетационного индекса NDVI, полученные на основе снимков Landsat TM 30.12.1990 (а) и 07.02.2011 (б) [51]

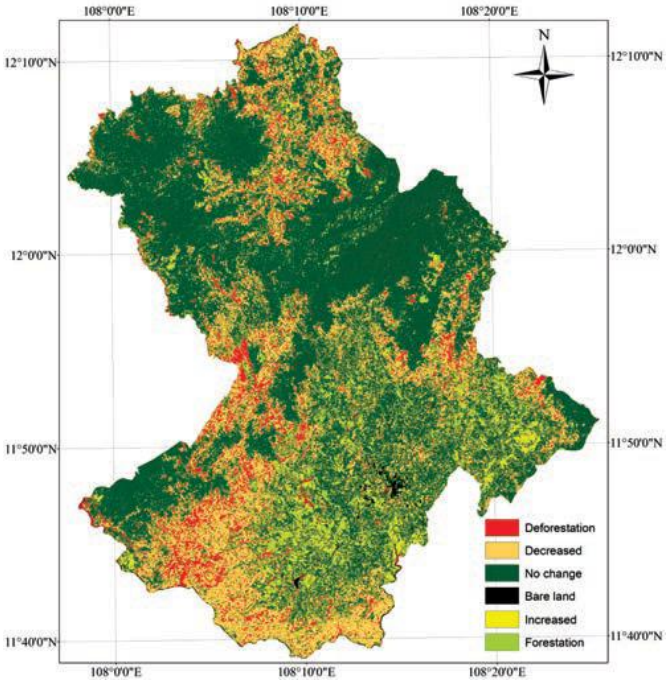


Рисунок – 7 Картограмма динамики качества растительного покрова в период 1990 – 2011 г. [51]

Рассмотрим работы авторов Е.А Балдина, К. А. Трошко, МГУ им. М.В. Ломоносова [52]. Их научная работа посвящена картографированию

сельскохозяйственных угодий по разновременным космическим снимкам. По результатам научных исследований авторами разработан метод расшифровки составления карт. Предлагаемые авторами карты по содержанию являются тематическими картами. Основное назначение карты землепользования сельскохозяйственного назначения состоит в том, чтобы отобразить различные типы пространственных объектов в дельте Волги и установить общую площадь сельскохозяйственных угодий (рисунок 8). Основная цель карт (рисунок 9) — показать изменения типов землепользования в разные периоды времени.

Анализируя работы авторов, можно сказать, что их исследование посвящено разным видам землепользования в дельте Волги. Во-вторых, целью представленных авторами карт является количественная оценка площади разновозрастных залежей и других видов сельскохозяйственных угодий. В-третьих, эти карты могут быть использованы для выработки рекомендаций по рекультивации залежных земель.

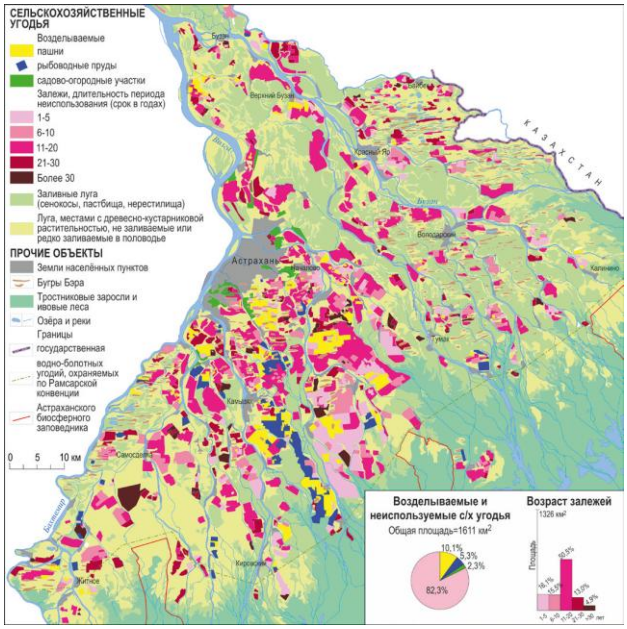


Рисунок – 8 Карта «Использование сельскохозяйственных земель в дельте Волги в 2014 году» (в уменьшенном масштабе) [52]

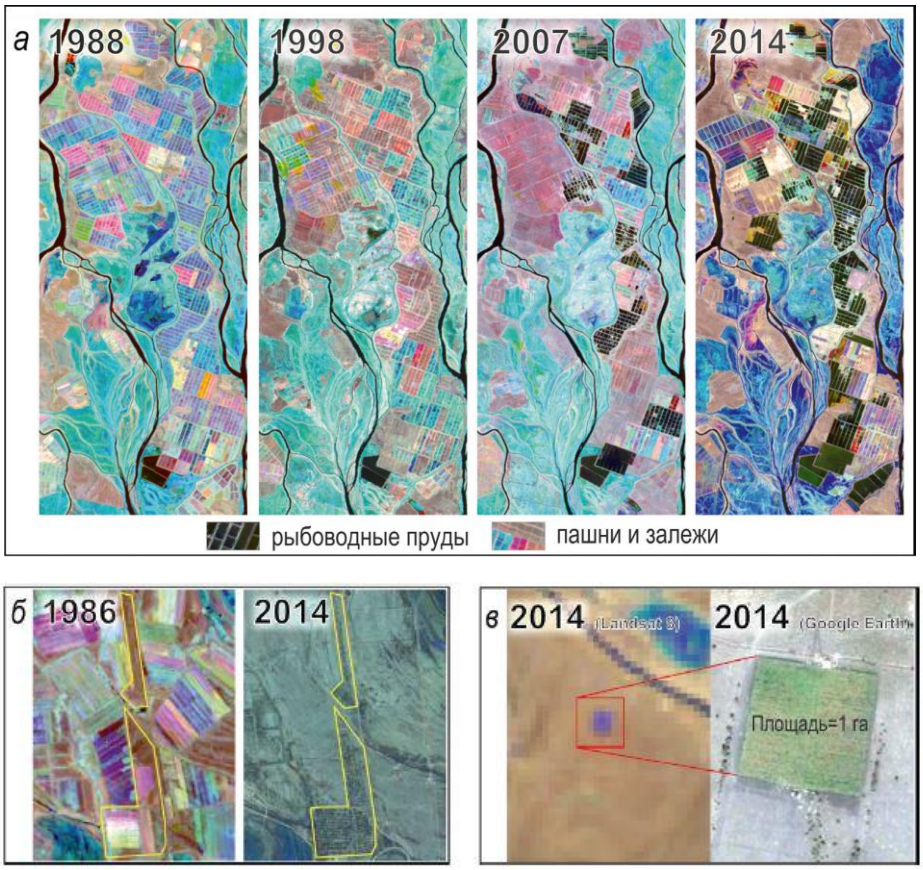


Рисунок – 9 Изменение видов использования сельскохозяйственных угодий на разновременных снимках: а – трансформирование рисовых чеков в рыбоводные пруды; б – трансформирование пахотных земель в садово-огородные участки; в – уменьшение размеров полей [52]

Рассмотрим работу А.О. Аввакумова, который посвящает свои научные исследования картографированию видов землепользования на основе пространственных изображений [53]. Для составления карт автор использовал метод дешифрирование. В качестве иллюстрации на рисунках 10 и 11 представлены результаты дешифрирования изображений для территории Ключевого участка № 3, расположенного в Закамье районе Республики Татарстан. Карты предназначены для отображения различных видов занятий и их областей. При анализе научной работы можно сказать, что автор посвящает свое исследование пространственным образованиям Закамья Республики Татарстан. Как недостаток в картографии автор не провел глубокого изучения, так как легенда и карты не представляют всех пространственных объектов

территории при анализе заселения земель, откуда отсутствие застроенных объектов и дорог. Карты, представленные авторами, призваны оценить динамику эрозии почвы для района интенсивного земледелия.

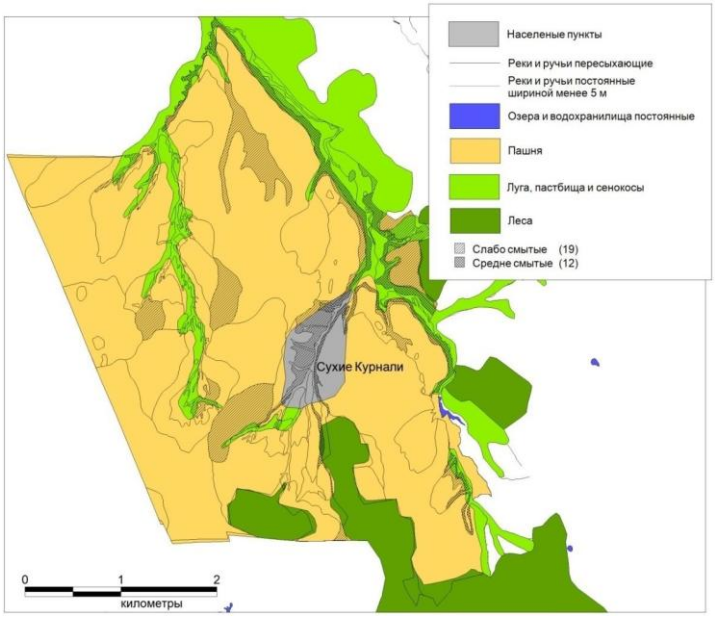


Рисунок – 10 Карта типов землепользования ключевого участка № 3 (1986 г.) [53]

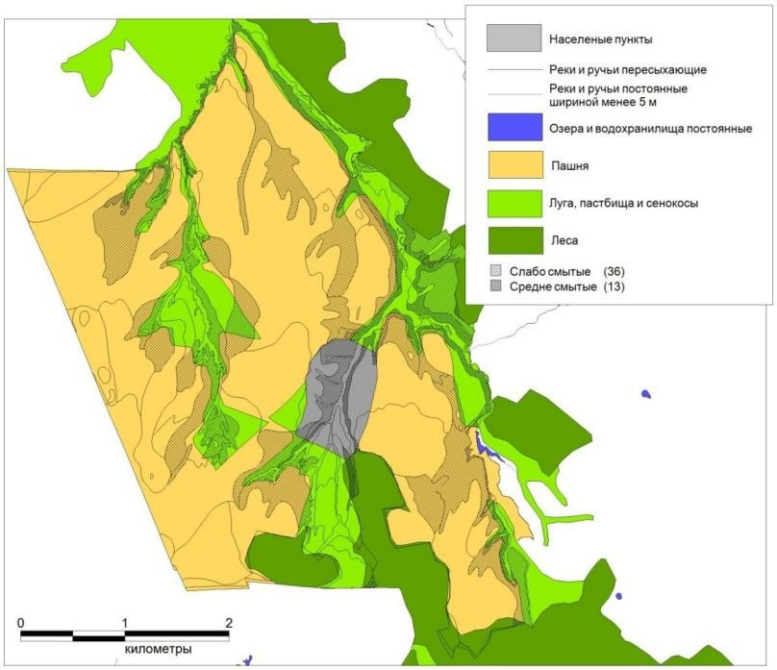
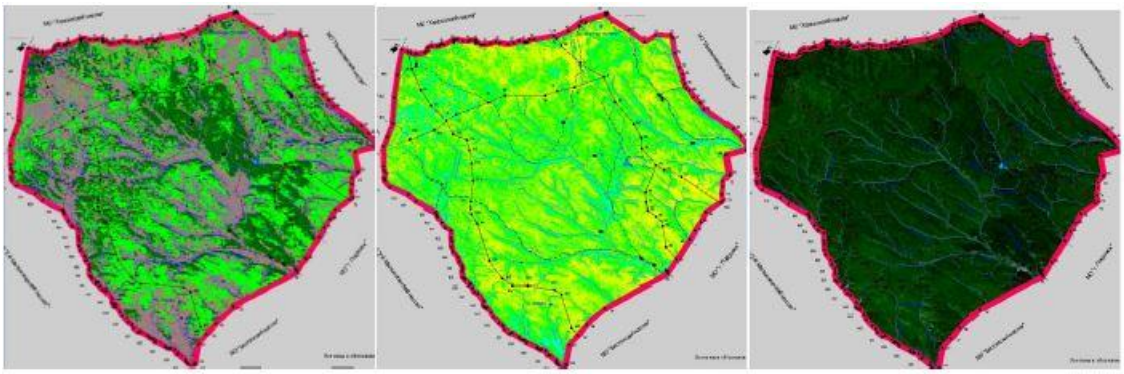


Рисунок – 11 Карта типов землепользования ключевого участка № 3 (2014 г.) [53]

Далее рассмотрим научную работу Е.П. Хлебниковой, С.А. Арбузова, посвятившую своё исследование картографированию особо охраняемых

природных территорий [54]. Авторы предлагают на основе научных исследований методы автоматизированного дешифрирования, расчет вегетационных индексов NDVI и процедуру повышения пространственного разрешения многозонального изображения с использованием панхроматического канала. На рисунок 12 показаны результирующие карты при различной обработке изображений, разработанной авторами. Основной целью картографирования является оценка и мониторинг состояния растительного покрова, выделение отдельных типов объектов, определение любого типа изменений на территории.

Основное назначение представленных карт – мониторинг особо охраняемых природных территорий. Недостатком карт является отсутствие в легенде элемента, показывающего пространственные объекты на картах, поэтому мы не можем идентифицировать объекты, присутствующие на картах.



а) *б)* *в)*

Рисунок – 12 Результаты обработки космических снимков: а) классификация; б) NDVI; в) пространственное улучшение [54]

Рассмотрим работу М.А. Иванова, А.В. Прищепова, В.Н. Голосова, которая посвящена картированию используемых и заброшенных пашней на основе космических снимков [55]. По результатам научных исследований авторы предлагают метод визуального дешифрирования для составления карт.

Основной целью картографирования является отображение различных типов пахотных земель. На рисунке 13 показана рассматриваемая карта. По содержанию ее можно рассматривать как тематическую карту.

При анализе научной работы авторов основной задачей картографирования была оценка динамики пашни за определённый период. В своей работе авторы изложили использование метода дешифрирования и анализ динамики изучаемой территории. Но когда мы анализируем карту, предложенную авторами, то на этой карте, во-первых, не представлены различные типы используемых и заброшенных земель, если мы обращаемся к легенде, потому что она не показывает никакой пространственной сущности. Во-вторых, карта и легенда не отражают изменений, произошедших за исследуемый период.

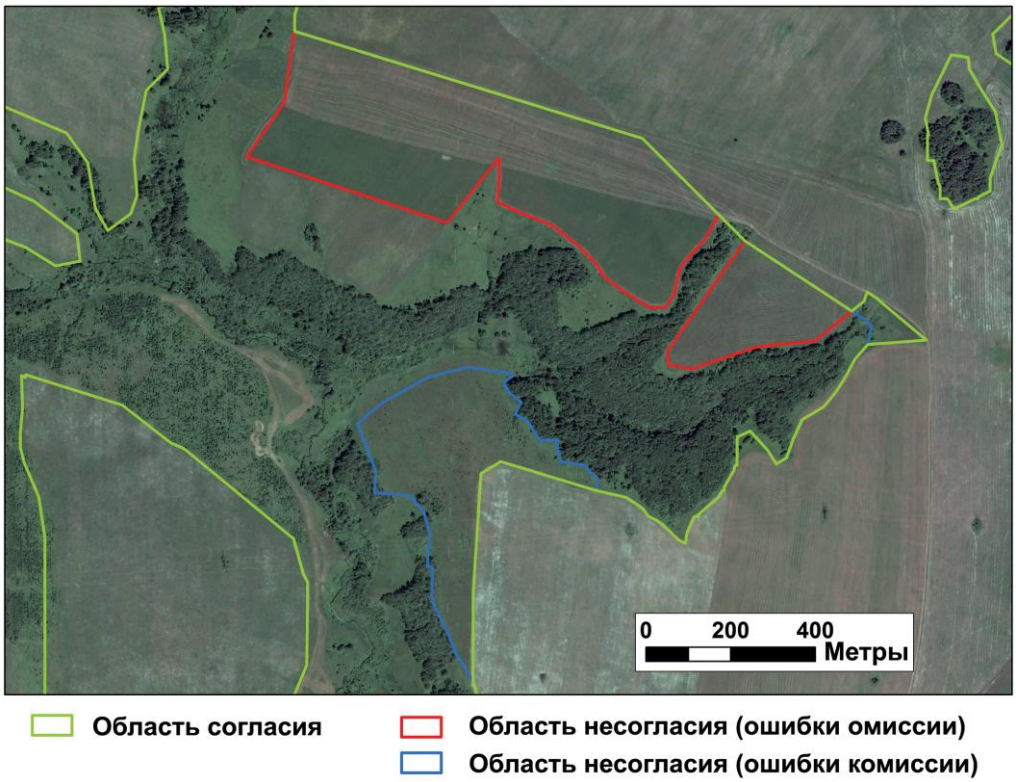


Рисунок – 13 Сравнение границ пахотных угодий, выделенных по снимкам Landsat и снимкам высокого разрешения [55]

А.П. Сизов посвящает свои научные исследования наземному картографированию сверхбольших городов на основе космических снимков [56]. Для составления карт автор использовал методы камеральной интерпретации и сравнительного анализа материалов дистанционного зондирования разных периодов. По содержанию предлагаемые автором карты являются тематическими картами. Основная цель картографирования — отображение

темпов освоения земель в городе Москве (рисунок 14). Когда мы анализируем научную работу автора, его научные изыскания сосредоточены на застроенных территориях, то основная задача предлагаемых автором карт – проследить территорию крупного города. Наконец, предложенные автором карты могут быть использованы при составлении среднесрочных и долгосрочных программ развития крупных, сверхкрупных и крупных городов и их структурных единиц.

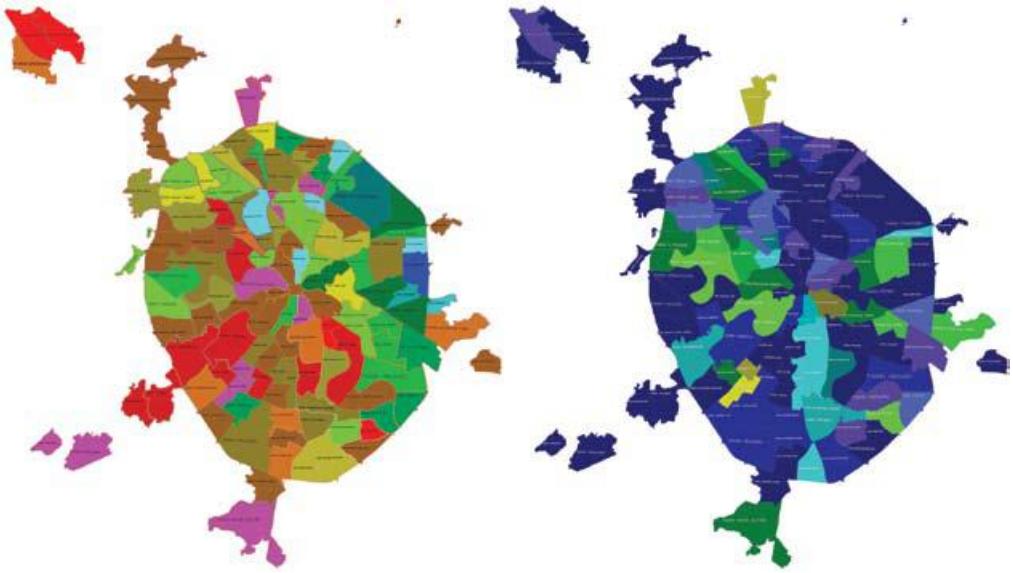


Рисунок – 14 Карты скорости застройки (а) и высвобождения (б) земель г. Москвы (2008). [56]

1.5 Выводы по разделу

При анализе нормативно-правовых актов в сфере землепользования Республики Кот-д'Ивуар можно отметить отсутствие полноценной нормативно-правовой базы, регулирующей земельные отношения для всех категорий земель. В первую очередь, не определен и не закреплен на законодательном уровне полный перечень категорий земель и правила для установления их границ. Отсутствует регламент определения функционального зонирования городских и сельских земель. Вследствие этого довольно часто возникают ошибки в принятии управленческих решений в части рационального использования различных категорий земель.

В большинстве проанализированных научных работ для изучения состава и изменения земель в основном используются данные ДЗЗ из космоса — Landsat, Sentinel и Spot. Применительно к практической деятельности Республики Кот-д'Ивуар установлено отсутствие единой технологии, методов и методик применения данных ДЗЗ из космоса для решения задач в части обнаружения изменений состава земель, их границ, установления по космическим снимкам функциональных зон территорий. Не определен перечень космических аппаратов, которые целесообразно применять для решения вышеозначенных задач, отсутствует научно-методическое обеспечение мониторинга земель по данным ДЗЗ из космоса.

Касательно картографического обеспечения тематической обработки космических снимков для задач мониторинга земель можно отметить, что в большинстве научных работ не используется технология отображения изменения каждой категории из состава земель, что, на взгляд авторов, лишает дополнительных сведений органы власти и заинтересованных лиц при принятии управленческих решений в части территориального планирования, градостроительства и землепользования.

Анализ текущей ситуации в Республике Кот-д'Ивуар в части нормативно-правового и информационного обеспечения землепользования, а также отсутствие научно-методического обеспечения мониторинга землепользования с применением космических снимков показал необходимость разработки методики мониторинга изменений состава различных категорий земель по данным многозональной космической съёмки с применением картографической базы данных, автоматизированным дешифрированием космических изображений.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА СИНТЕЗИРОВАННЫХ И ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

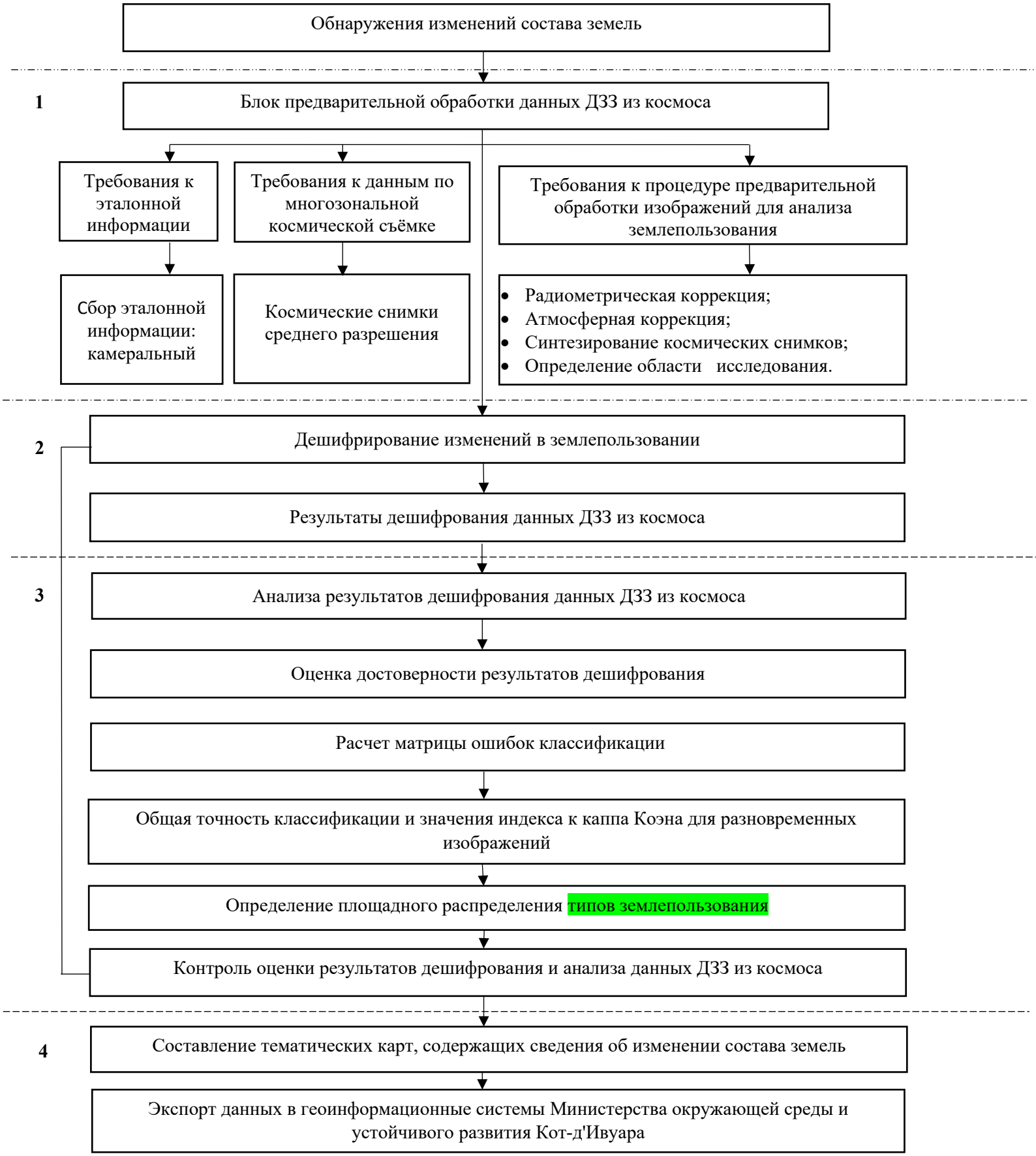
2.1 Общие положения методики

Мониторинг землепользования — это технология, которая отслеживает изменения на земной поверхности и землепользовании с помощью методов мониторинга и картографирования. Этот мониторинг может осуществляться в различных масштабах, от местного до глобального, с использованием различных технологий, таких как дистанционное зондирование, географические информационные системы (ГИС) и полевые исследования [57].

Мониторинг землепользования может предоставить важную информацию о тенденциях землепользования, росте городов, фрагментации природных сред обитания, преобразовании сельскохозяйственных земель, обезлесении и опустынивании. Эта информация необходима для понимания экологических и экономических изменений и для разработки политики управления земельными ресурсами и устойчивого развития [58].

Дистанционное зондирование является одной из наиболее часто используемых технологий для мониторинга землепользования. Это позволяет удаленно собирать данные с помощью датчиков, установленных на спутниках, самолетах и дронах. Эти данные можно использовать для картирования землепользования, выявления изменений и тенденций и оценки воздействия на окружающую среду [59].

Схема методики выявления изменений в составе земель состоит из 4 блоков, которые функционально связаны между собой: блок предварительной обработки данных дистанционного зондирования, блок дешифрирования и анализ данных ДЗЗ из космоса, блок оценки качества результатов дешифрования и анализа данных дистанционного зондирования, блок оформления результатов дешифрирования и анализа данных ДЗЗ из космоса (рисунок 15).



Рисунок– 15 Схема методики обнаружения изменений состава земель по данным многозональной космической съёмки

2.2 Определение требования к используемым данным многозональной космической съёмки

2.2.1 Требования к виду и содержанию исходных космических изображений

Требования к эталонной информации

Изучение пространственной динамики землепользования требует соответствующих инструментов анализа. Технологический прогресс сегодня предлагает множество источников данных, включая аэрофотоснимки и спутниковые изображения, которые все чаще используются для составления карт землепользования [60].

Однако доступ к таким источникам данных, например, к существующим в развивающихся странах аэрофотоснимкам, зачастую очень устарел, что делает проблематичным их использование для исследования, посвященного выявлению изменений в землепользовании. В нашем случае, учитывая трудности, возникшие с другими источниками данных, мы остановили свой выбор на спутниковых снимках.

Существуют различные типы спутниковых снимков, включая снимки высокого, среднего и сверх высокого разрешения. Многие спутниковые снимки сегодня доступны бесплатно в Интернете, но выбор снимка зависит от изучаемой темы и обусловлен пространственным масштабом, а также временными ограничениями.

Для того, чтобы исследовать различные типы землепользования на основе спутниковых снимков, необходимо определить дешифровочные характеристики этих изображений. В таблице 2.1 приведены различные типы землепользования, которые будут положены в основу нашего исследования.

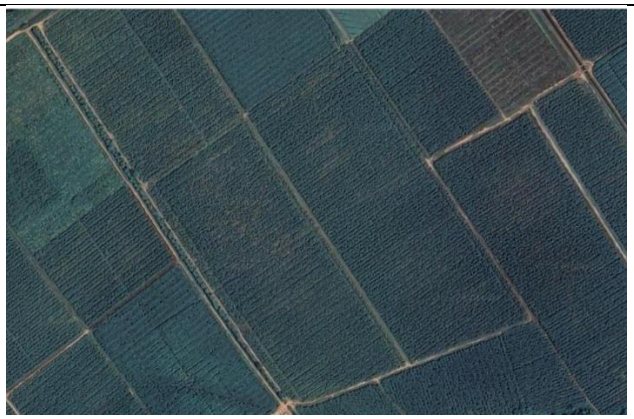
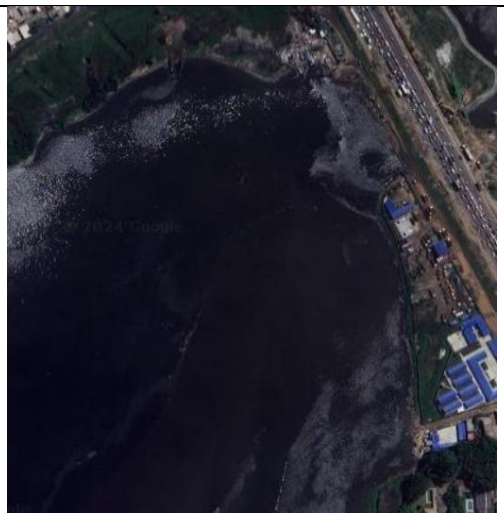
Таблица 2.1 – Дешифровочные признаков типов землепользования[1]

Типы землепользования	Изображение на космическом снимке в естественной цветопередаче	Описание дешифровочных признаков типа землепользования
Застроенные территории		Форма изображения указывает на городскую структуру, где мы видим жилые дома в виде замкнутых многоугольников или дороги, выделяющиеся между зданиями. Существует четкое разграничение между улицами и кварталами, с небольшими изгибами между жилыми домами. Цвет изображения участка - доминирующий красный, характеризующий крыши жилых домов. Они также белые. Дороги серые. Крыши и жилые блоки имеют однородную текстуру. Улицы имеют сетчатую структуру. Жилые районы часто разграничены дорогами.

[1] Типы землепользования приведены в соответствии с законодательством Кот-д'Ивуара:

- Закон № 2019-675 от 23 июля 2019 года «Лесной кодекс»;
- Закон № 2023-902 от 23 ноября 2023 года «Водный кодекс»;
- Закон № 96-766 от 3 октября 1996 года «Экологический кодекс;
- Закон № 98-750 от 23 декабря 1998 года «О сельском земельном фонде»;
- Закон № 2014-117 от 14 августа 2014 года «Об устойчивом развитии сельского хозяйства».

Густой лес		На снимке изображен лесной массив естественной формы, занимающий большую часть изображения. Для него характерна густая растительность с нечеткими краями. На изображении преобладает темно-зеленый цвет с густой растительностью. Немного голубого для застойной воды и серого для крыш домов и дорог. Текстура изображения однородная, значительная для густого леса и неравномерная для зданий и дорог. Этот тип поверхности часто расположен в лесистой местности.
Вторичный лес		Изображение имеет геометрическую форму и неровные границы. Преобладающий цвет – от светлого темно-зеленого. Темно-зеленый соответствует более густой растительности, светло-зеленый — более мелким растениям. Наличие также голых коричневых полов. Текстура неравномерная. Эта зона часто располагается рядом с

		густыми лесными массивами.
Лесопосадки		На снимке изображены геометрически прямоугольные сельскохозяйственные участки, характерные для интенсивного земледелия. Между плантациями есть прямые линии. Темно-зеленый цвет является доминирующим и соответствует густым посевам. Светло-зеленый - недавно засаженные участки, а бежевые линии - дорожки. Однородная текстура. Этот тип поверхности часто расположен в лесистой местности.
Поверхностные водотоки и водоёмы		Форма наиболее доминирующего изображения неправильная и соответствует водоему. Преобладающий цвет — синий, обозначающий большой водоем. Дома синего цвета, серая линейная дорога и зеленая растительность на берегу. Фактура изображения – гладкая поверхность для водной зоны, для неравномерной растительности и

		угловатая для построек. Чаще всего это образование располагается на краю прибрежных территорий.
Открытые грунты		Изображение в целом имеет неправильную форму, местами с участками растительности. Преобладающий цвет - светло-бельгийский, обозначающий голую почву, а светло-зеленый - растительность, вызванную деятельностью человека. Текстура изображения в целом гладкая в центре изображения и в некоторых местах также заметны шероховатые текстуры, а также линии, являющиеся следами. Этот тип землепользования часто располагается на территориях, возникших в результате деятельности человека.

Для изучения динамики землепользования лучше всего использовать снимки Landsat. Действительно, изображения Landsat TM и ETM+ уже давно используются для анализа динамики землепользования. Преимуществом этих изображений является хорошее пространственное разрешение и большой

временной охват. Изображения Landsat используются чаще всего, поскольку они бесплатны, а также потому, что они позволяют получить доступ к более старым данным. Landsat был выбран потому, что эти датчики предоставляют больше изображений для обнаружения изменений.

Требования к многозональной космической съёмке

Для проведения исследования по выявлению изменений в составе земель по пространственным изображениям необходимо определить требования к точности, необходимые для создания карты-схемы изменений в составе земель. Эта точность важна, поскольку от неё зависит качество и надёжность анализа, чтобы доказать, что обнаруженные изменения отражают реальные преобразования в ландшафте. Для этого нам необходимы спутниковые снимки среднего разрешения, такие как снимки спутников Landsat 8 и 9 с 9 спектральными полосами в видимом диапазоне, включая 8 мультиспектральных полос с разрешением 30 м и панхроматическую полосу 15 м. Эти снимки с разрешением 30 м означают, что каждый пиксель может покрыть площадь 900 м², что позволяет обнаружить большие площади и выявить значительные изменения в почвенном покрове. Такие снимки обычно используются в самых разных исследовательских проектах, поскольку позволяют решать вопросы землепользования. Для исследований, требующих большей точности, рекомендуются снимки с разрешением 10 м [61].

Необходимо учитывать способность выявлять изменчивость состава земель в течение длительного периода.

Способность обнаруживать изменчивость состава земель в течение длительного периода является элементом, который следует учитывать. В целом изменения растительного покрова, наблюдаемые на исследуемой территории за год, незначительны. Поэтому обнаружить изменения за год с помощью пространственных изображений с разрешением от 15 до 30 м будет невозможно. Чтобы повысить вероятность обнаружения изменений в землепользовании,

важно отбирать изображения с большим временным интервалом, за период от 5 до 10 лет [62].

Другой проблемой является возможность выявления каждого элемента состава земель на космических снимках. Оптические спутники оснащены мультиспектральными датчиками, которые позволяют более детально изучить каждый элемент в составе землепользования, особенно в части длин волн и инфракрасных каналов. Синий, зелёный и красный каналы могут использоваться для идентификации растительности, обнаженной почвы и водоёмов. Канал ближнего инфракрасного диапазона (NIR) также может быть использован для идентификации растительного покрова и разграничения суши и воды. Панхроматический канал (PAN) с разрешением 15 м может использоваться для классификации и разграничения границ объектов с высокой степенью точности, в частности, сооружений, дорог и городских территорий [63]. Система получения оптических изображений позволяет получать информацию, которая особенно близка к реальности на местности. Однако в тропических влажных регионах возможности оптических снимков ограничены из-за облаков, которые закрывают и маскируют исследуемую территорию. Это ограничение иногда ставит под угрозу использование этого типа данных в случае мониторинга землепользования, где часто присутствуют облака и маскируют изменения на земной поверхности по спутниковым данным [64]. Однако в последние годы методы и инструменты для обработки облаков на оптических изображениях значительно усовершенствовались.

Учитывая трудности, возникшие при работе с радарными изображениями, в нашем исследовании мы предлагаем использовать в качестве источников оптические изображения, поскольку они бесплатны, и эти датчики дают больше изображений, доступных для обнаружения изменений.

Радарная съёмка является одним из перспективных видов данных для выявления изменений в составе почвы, поскольку преимущество этих волн заключается в том, что на них не влияют свойства облачности, а сбор данных может осуществляться как днем, так и ночью и даже при любых погодных

условиях [65]. Однако данные радаров иногда трудно интерпретировать визуально, а их обработка может быть очень громоздкой и дорогостоящей с точки зрения трудовых ресурсов и оборудования. Спутниковые радары имеют пространственное разрешение, подходящее для изучения лесов, но их возможности ограничены несколькими факторами: измерение структуры леса затруднено на холмистой местности, а в густых лесах сигнал имеет тенденцию к насыщению [66]. Кроме того, над лесами и зданиями, расположенными напротив угла падения волны, возникает область тени. Она соответствует в основном тем участкам, где радарный датчик не принимает обратную волну. Основные характеристики Landsat представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Характеристики космического аппарата Landsat

Название аппарата	Дата запуска	Характеристики спутников
Landsat 4-5	16 июля 1982 г. 1 марта 1984 г.	7 спектральных диапазонов: 6 мультиспектральных с разрешением 30 м и 1 панхроматический с разрешением 15 м. 1 тепловая спектральных диапазона с разрешением 120 м.
Landsat-7	15 апреля 1999 г.	8 спектральных диапазонов: 6 мультиспектральных с разрешением 30 м и 1 панхроматический с разрешением 15 м. 1 тепловая спектральных диапазона с разрешением 60 м.
Landsat-8	11 февраля 2013 г.	11 спектральных диапазонов: 9 видимых спектральных диапазонов, включая 8 мультиспектральных с разрешением 30 м и 1 панхроматический с разрешением 15 м. 2 тепловых спектральных диапазона с разрешением 60 м.
Landsat-9	27 сентября 2021 г.	11 спектральных диапазонов: 9 видимых спектральных диапазонов, включая 8 мультиспектральных с разрешением 30 м и 1 панхроматический с разрешением 15 м. 2 тепловых спектральных диапазона с разрешением 100 м.

Требования к процедуре предварительной обработки изображений для анализа землепользования

При получении оптического спутникового снимка датчик изображения измеряет количество энергии, отражённой от поверхности Земли, с помощью радиометра. К сожалению, информация, получаемая радиометром, не является точным и однородным измерением. На полученный сигнал влияют ошибки, артефакты и искажения, вызванные процессом получения изображения [67].

Предварительная обработка данных включает в себя все операции, необходимые перед основным анализом. Эти операции выполняются для того, чтобы сделать партию данных из района исследования читаемой и накладываемой друг на друга.

Радиометрическая коррекция

При обнаружении изменений необходима радиометрическая коррекция, поскольку она помогает устранить атмосферные эффекты (поглощение и

рассеяние) и солнечные угловые эффекты, которые изменяют на снимке специфические спектральные свойства типа растительного покрова. Это актуально в случае обнаружения изменений в предварительной классификации [68].

Радиометрическая коррекция выполняется для калибровки значений пикселей и (или) исправления ошибок в значениях. Этот процесс улучшает интерпретируемость и качество данных дистанционного зондирования Земли. Радиометрическая калибровка и коррекция особенно важны при сравнении нескольких наборов данных за определенный период времени [69].

Энергия, которую регистрируют датчики на самолётах или спутниках, может отличаться от фактической энергии, излучаемой или отражаемой от поверхности на земле. Это связано с азимутом и высотой солнца и атмосферными условиями, которые могут влиять на энергию, наблюдаемую датчиком. Поэтому для получения реальных или истинных значений освещённости или отражательной способности земли необходимо учитывать радиометрические погрешности [70].

Излучение, регистрируемое или измеряемое спутниковыми датчиками, включает в себя отраженное излучение от поверхности Земли, а также излучение, рассеянное частицами в атмосфере. Почти вся энергия, регистрируемая датчиками, в той или иной степени подвержена влиянию атмосферы. Атмосфера влияет на излучение двумя противоположными способами. Во-первых, она может рассеивать свет, добавляя к излучению или сиянию, которое регистрируется датчиком. Это явление известно под названием «путь излучения». Во-вторых, она может уменьшить энергию, освещающую поверхность, что называется падающим излучением или облучением. Облучение меняется в зависимости от времени года из-за сезонных различий в высоте солнца и расстояния между Землей и Солнцем. Атмосферные эффекты также зависят от длины волны. Например, рэлеевское рассеяние более выражено на коротких длинах волн [71].

Значение, регистрируемое для данного пикселя, включает в себя не только отраженное или испущенное излучение от поверхности, но и излучение, рассеянное и испущенное атмосферой. В большинстве случаев нас интересуют только фактические значения поверхности. Чтобы получить эти значения, необходимо применить процессы радиометрической калибровки и коррекции.

Датчик регистрирует интенсивность электромагнитного излучения для каждого пикселя в виде цифрового числа (DN). Для многих датчиков эти цифровые числа могут быть преобразованы в более значимые единицы реального мира, такие как светимость, отражательная способность или яркостная температура. Для выполнения этого процесса калибровки необходима информация о конкретном датчике. В случае с данными Landsat файл метаданных содержит необходимую информацию. Большинство программных пакетов для обработки изображений имеют инструменты радиометрической калибровки. В ENVI данные Landsat могут быть преобразованы непосредственно в отражательную способность, без необходимости предварительного расчета излучения [72].

Преобразование DN в светимость и отражательную способность

Необработанные цифровые числа (DN)на снимках Landsat могут быть преобразованы в так называемую светимость или отражательную способность в верхней части атмосферы (TOA). Уравнения изменяют масштаб данных на основе информации, полученной с помощью датчика, и устраняют влияние различий в геометрии освещения (разный угол наклона солнца, расстояние между Землей и Солнцем). Большинство программных пакетов для дистанционного зондирования Земли имеют инструменты для калибровки данных.

Пересчёт на температуру яркости на спутнике

Подобно значениям отражения, данные многих тепловых датчиков могут быть преобразованы в так называемую температуру яркости. Температура яркости — это температура, которая получается при измерении излучения поверхности. Температура яркости обычно выражается в Кельвинах (K). Для

теплового инфракрасного датчика (TIRS) Landsat 8 температура яркости на спутнике может быть рассчитана с помощью тепловой константы, которая содержится в файле метаданных [73].

Атмосферная коррекция

Атмосферная коррекция — это процесс устранения влияния атмосферы для получения значений отражательной способности поверхности. Атмосферная коррекция может значительно улучшить интерпретацию и использование изображения. В идеале этот процесс требует знания атмосферных условий и свойств аэрозолей на момент получения изображения [74].

Модели атмосферной коррекции

Атмосферные модели могут использоваться для учета эффектов рассеяния и поглощения в атмосфере. Для точного применения атмосферной коррекции требуется ряд параметров, включая такие свойства, как количество водяного пара, распределение аэрозолей. Иногда эти данные можно собрать с помощью полевых приборов, измеряющих атмосферные газы и аэрозоли, но это часто дорого и занимает много времени. Для оценки количества и распределения атмосферных аэрозолей можно использовать и другие спутниковые данные. Многие программные пакеты включают специальные модули атмосферной коррекции, которые используют модели переноса атмосферного излучения для получения оценки истинного отражения поверхности [75].

Метод вычитания темных объектов

Этот метод используется при отсутствии данных об атмосферных условиях и свойствах аэрозолей на момент получения снимка. Основное предположение этого метода заключается в том, что в пределах изображения некоторые пиксели находятся в полной тени, и их излучение, полученное на спутнике, полностью обусловлено рассеянием в атмосфере (path radiance). Затем из значения каждого пикселя изображения вычитается значение излучения пути. Точность этих методов, как правило, ниже, чем у поправок, основанных на физике, но они полезны, когда нет возможности провести атмосферные измерения [76].

Недавно Геологическая служба США разработала программное обеспечение для применения процедур калибровки и атмосферной коррекции к продуктам данных Landsat 1. Эти данные известны как данные более высокого уровня отражения поверхности или данные 2 и доступны для данных Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) и Landsat 8 Operational Land Imager (OLI). Эти продукты данных были радиометрически откалиброваны и атмосферно скорректированы с помощью специализированных алгоритмов. Они предназначены для мониторинга и оценки изменений в земле с течением времени [77].

Синтезирование космических снимков

Визуальный анализ спутниковых изображений учитывает вариации уровней серого, локальный вид и организацию между различными текстурными элементами. Этот анализ может быть основан на индивидуальном изучении различных каналов или на цветовой композиции.

Цветовые композиции могут использоваться для создания цветных изображений с учетом спектральных характеристик объектов. Они часто используются для выделения различных типов поверхности на многоспектральных изображениях или для выделения определенных явлений окружающей среды [78].

В цифровой обработке изображений цвет используется в основном для различения различных объектов на изображениях, что облегчает их интерпретацию. Если нужно выделить несколько объектов на изображении, можно использовать ограниченное количество цветов. Но чаще всего, особенно при работе с цветными композициями, мы используем очень большое количество цветов. Когда вы создаете цветовую композицию, сочетая два или три спектральных диапазона, цель состоит в том, чтобы извлечь из изображения максимальное количество информации и облегчить его анализ и интерпретацию [79].

В зависимости от области применения могут потребоваться различные цветовые композиции. Другими словами, композиции, которые мы называем истинными цветами, если хотим сделать изображения реалистичными. Это то, что мы наблюдали бы, если бы наши глаза находились на месте спутникового датчика. Ложные цветовые композиции, которые не представляют реальных цветов, но предназначены для выделения определенных объектов на изображении, например, ложные цветные инфракрасные изображения, широко используемые для изучения растительности.

Во всех случаях цветовые композиции порождают очень большое количество цветов. Для корректной работы с цветами необходимо иметь стандартные средства указания или выбора цвета из всех доступных.

Создание цветовой композиции предполагает присвоение трех спектральных полос со спутникового датчика каждому из трех основных цветов (красному, зеленому и синему). Путем аддитивного синтеза можно воссоздать все цвета [80].

Принцип цветовых композиций заключается в присвоении трёх основных цветов (красного, зеленого, синего) трем изображениям, полученным над одним и тем же регионом, в одно и то же время, но с разными длинами волн. В зависимости от присвоения основных цветов трем спектральным полосам мы получаем либо так называемую естественную цветовую композицию, или истинные цвета, либо ложную цветовую композицию.

В истинно цветном изображении спектральным полосам, полученным в синем, зелёном и красном диапазонах волн, присваиваются три соответствующих основных цвета. Красный цвет присваивается красной полосе, зеленый - зеленой полосе, а синий - синей полосе. На рисунке 16 показана композиция истинного цвета, основанная на синей, зелёной и красной полосах спектра сенсора Landsat 9. На этом изображении растительность представлена темно-зеленым цветом, возделываемые территории - более светло-зеленым, а здания - белым. Гидрография, в свою очередь, представлена в оттенках от темно-синего до голубовато-синего в зависимости от глубины и мутности.



Рисунок 16 – Изображение Landsat 9 (комбинация каналов: 4:3:2)

Если спектральные полосы в изображении не соответствуют трём основным цветам, полученное изображение называется ложным цветным изображением. В результате цвет объекта на изображении не имеет никакого сходства с реальным цветом. На рисунке 17 представлено изображение из композиции ложных цветов. Красный цвет связан с ближним инфракрасным диапазоном, зеленый - с красным, а синий - с зелёным. Эта комбинация, известная как ложный цвет в инфракрасном диапазоне, широко используется в дистанционном зондировании Земли, поскольку она идеально подходит для изучения растительности. Растительность доминирует благодаря ярко-красным оттенкам, вызванным отражением хлорофилла [81]. Хлорофилл сильно поглощает видимый свет, а клеточная структура листьев сильно отражает ближний инфракрасный свет. Голая почва в таком сочетании выглядит в сельскохозяйственных районах в оттенках желтого или светло-коричневого, в зависимости от вида культур, а такие структуры, как здания, дороги и инфраструктура, выглядят очень светлыми, с оттенками от светло-зелёного до серого, поскольку они отражают свет иначе, чем растительность. Вода, которая поглощает почти все длины волн, выглядит очень тёмной, почти черной.

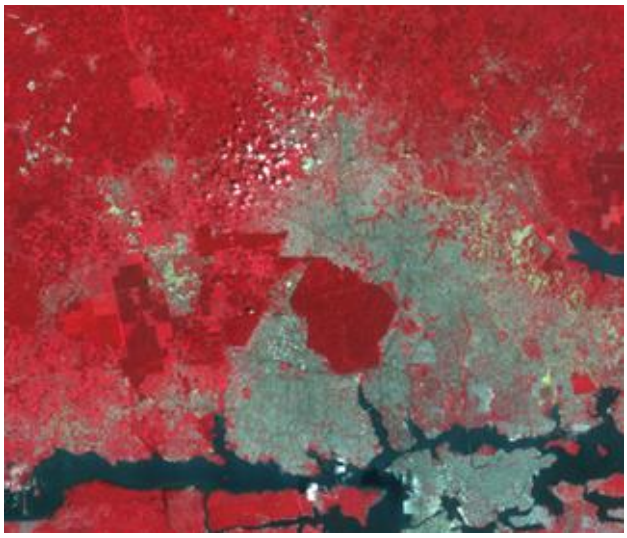


Рисунок 17 – Изображение Landsat 9 (комбинация каналов: 5:4:3)

Когда на спутниковом сенсоре доступно более трёх спектральных полос, как, например, на спутнике Landsat, который получает одновременно семь изображений в семи различных диапазонах длин волн, ничто не мешает создать цветовой состав, отличный от стандартных комбинаций, таких как истинный цвет или ложный цветной инфракрасный. Например, еще одна ложная цветовая композиция, которая позволит нам идентифицировать городские районы, присвоив коротковолновой инфракрасной полосе (SWIR2) красный цвет, средней инфракрасной полосе - зеленый, а синей – Красный [82]. На рисунке 18 показана ложная цветовая композиция из коротковолнового инфракрасного диапазона в красный, среднего инфракрасного в зелёный и синего в красный. В этой композиционной полосе здания сильно отражаются в коротковолновом инфракрасном (SWIR) спектре, что позволяет отличить застроенные территории от других элементов почвенного покрова, таких как растительность и голая земля. На этом изображении видно, что здания выглядят более светлыми и имеют серый цвет по сравнению с другими типами застройки.



Рисунок 18 – Изображение Landsat 9 (комбинация каналов: 7:6:4)

Цветовая композиция коротковолнового инфракрасного, ближнего инфракрасного и красного диапазонов специфична для изучения обработанных поверхностей, растительности и участков с человеческой деятельностью [83]. На рисунке 19 участки с растительностью показаны зеленым цветом, так как ближний инфракрасный свет отражается от участков с большим количеством растительности. Участки с паром окрашены в светло-фиолетовый цвет, поскольку они имеют низкий уровень отражения в инфракрасном, коротковолновом, ближнем инфракрасном и красном диапазонах. Вода, напротив, поглощает почти все длины волн и выглядит очень темной, почти черной.

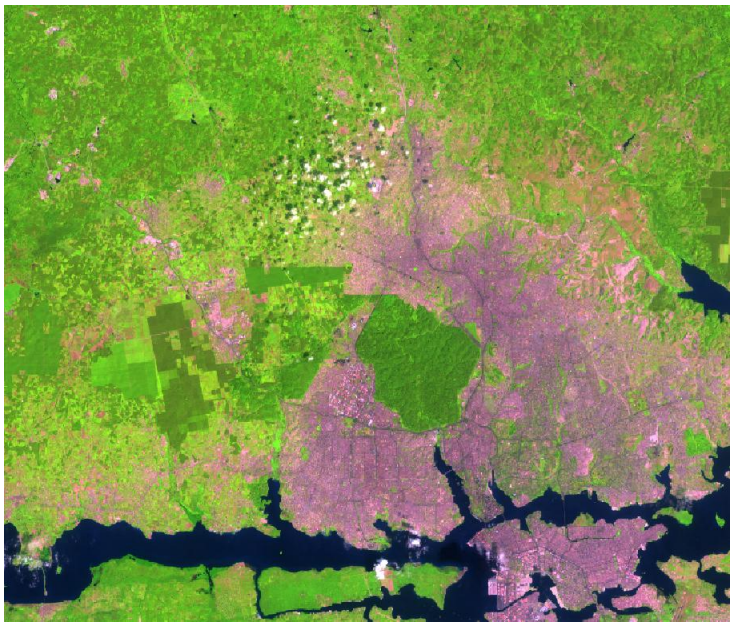


Рисунок 19 – Изображение Landsat 9 (комбинация каналов: 6:5:4)

На рисунке 20 показано изображение, полученное в результате ложной цветовой композиции. Коротковолновый инфракрасный цвет ассоциируется с красным, красный - с зелёным, а синий - с голубым. Эта комбинация очень подходит для изучения голой почвы [84].

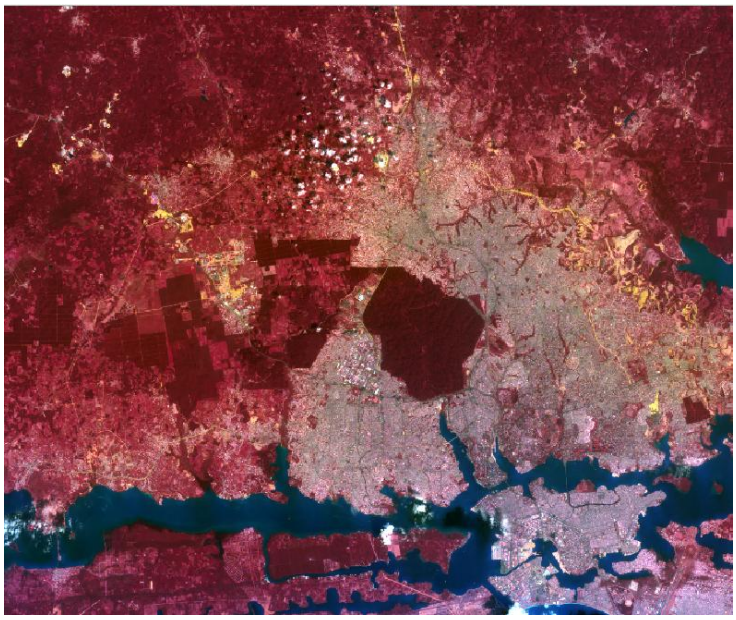


Рисунок 20 – Изображение Landsat 9 (комбинация каналов: 6:4:2)

Открытый грунт с преобладанием ярко-жёлтого цвета обладает высокой отражательной способностью в коротковолновом инфракрасном спектре. Такой высокий коэффициент отражения обусловлен наличием минералов в голой

почве, особенно сухой. Растительность кажется красной, потому что она имеет низкий коэффициент отражения в коротковолновом инфракрасном диапазоне. Вода поглощает все длины волн электромагнитного спектра, что придает ей темно-синий цвет. Здания, напротив, имеют серый цвет, поскольку некоторые материалы, используемые в них, имеют низкий коэффициент отражения в коротковолновом инфракрасном диапазоне.

2.3 Методики автоматизированного дешифрирования изменений состава земель на основе комплекса синтезированных и индексных изображений

Для того чтобы выявить изменения в землепользовании, необходимо изучать почвенно-растительный покров в разные временные периоды. В целом, использование дистанционного зондирования Земли из космоса в исследованиях землепользования довольно часто повторяется. Его эффективность представляется неоспоримой для изучения пространственно-временной динамики природных или антропогенных явлений, а повышение точности изображений, получаемых датчиками, только улучшает результаты. Таким образом, почвенно-растительный покров можно не только наблюдать, но и, прежде всего, извлекать благодаря различным методам обработки.

Контролируемые классификации

Исследования динамики землепользования с использованием спутниковых изображений используют в основном методы контролируемой классификации на основе пикселя: это метод, который исходит из того, что человек знает местность, на которой мы работаем, научный подход остается одинаковым для каждого из методов классификации, кроме выбора алгоритмов классификации, использует алгоритм максимального правдоподобия (Maximum Likelihoud) для получения классификации, представляющей занятие земли [85].

Контролируемые классификации — это методы, которые позволяют быстро получить результат и, как правило, достаточно эффективны для понимания изменений на земной поверхности. Они особенно используются в

контексте изображений, пространственное разрешение которых не очень велико. Метод состоит из выбора различных обучающих выборок, которые мы будем считать репрезентативными для классов изображений земной поверхности, которым мы хотим их присвоить, а затем применения алгоритма классификатора, который в соответствии с определенными статистическими правилами отнесет каждый пиксель изображения к определенному классу изображений земной поверхности. В нашем исследовании был выбран алгоритм максимального правдоподобия для классификации снимков Landsat 4, Landsat 7, Landsat 8 и Landsat 9.

Метод максимального правдоподобия является одним из наиболее универсальных методов классификации с обучением. Он позволяет разделить классы, имеющие разные типы функций плотности распределения признаков, и минимизировать ошибки классификации.

Основой метода является предположение о том, что появление объекта, относящегося к i-ому классу, на снимке является случайным событием ωi. Множество всех случайных событий, представляющих объекты на снимке, обозначается как Ω (ωi, …, ωi) [86]. Априорную вероятность появления объекта класса i обозначим как P(ωi), а функцию условной плотности распределения вероятностей вектора признаков X, если объект относится к классу ωi, как P(X/ωi).

Пусть на снимке имеются два объекта, A и B. До измерения признака X в некоторой точке вероятность того, что в этой точке находится объект A, равна априорной вероятности P(A), которая определяется как доля площади объекта A от площади всего снимка. После измерения признаков X эта вероятность изменяется, и апостериорная вероятность P(A/X) определяется по формуле Байеса (1):

$$P\left(\frac{A}{X}\right)=\frac{P(A)\cdot P\left(\frac{X}{A}\right)}{P\left(\frac{X}{A}\right)\cdot P(A)+P\left(\frac{X}{B}\right)P(B)} \qquad (1)$$

Правило принятия решения: решение будет в пользу объекта А в той области пространства признаков, где P(X/B) ·P(B)> P(X/A) ·P(B). Все точки с измеренными признаками X, для которых это неравенство выполнено, будут отнесены к объекту А.

Принимая решение в пользу какого-либо класса, мы рискуем совершить ошибку. Введенная заранее функция потерь позволяет установить цену каждого действия по принятию решения. На практике априорные вероятности и потери известны редко, поэтому предполагаются равными, так что решающее правило перейдет в условие P(X/A)/P(X/B)>1, или P(X/A)> P(X/B), то есть классификация относит каждое измерение к тому объекту, для которого правдоподобие получения этого измерения максимально.

Информацию о статистических характеристиках дешифровочных признаков получают путем анализа яркости эталонных объектов изображения при обучении классификатора. На основе этого анализа получают функции плотности распределения статистической вероятности P(X/ωi).

Если на изображении остались объекты, априорная информация о которых отсутствует, они либо не классифицируются, либо могут быть отнесены в один общий класс - прочие объекты.

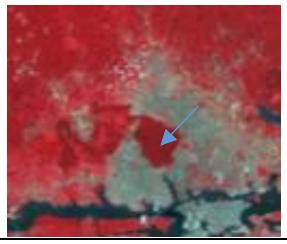
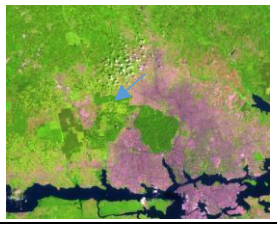
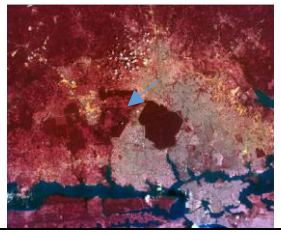
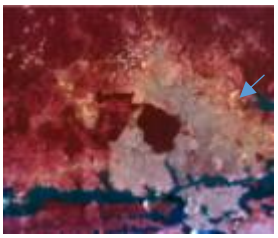
Метод максимального правдоподобия является одним из наиболее точных, если распределение значений яркости пикселей класса является близким к нормальному. При значительной дисперсии пикселей в эталонной выборке ее ковариационная матрица будет содержать высокие значения коэффициентов, что приводит к завышенному числу пикселей, отнесенных к ней.

Методы контролируемой классификации требуют заранее подготовленных обучающих данных, называемых сигнатурами классов. Эти сигнатуры классов состоят из наборов n-мерных векторов, представляющих конкретный класс. Они разрабатываются на основе эталонных областей, разграниченных на изображении. Чтобы построить эти сигнатуры классов, для каждого класса было выбрано несколько эталонных областей, которые затем были объединены в единую сигнатуру, представляющую рассматриваемый

класс. При подготовке обучающих данных было использовано несколько методик для создания репрезентативных и надежных выборок присвоенных классов, что обеспечило высокую точность классификации. К таким методикам относятся RGB-синтез различных зональных изображений, сравнение состояния объектов в разное время года по разносезонным снимкам, а также вспомогательный анализ изображений высокого разрешения.

В программном обеспечении QGIS можно более объективно выбирать эталонные области с помощью синтеза изображений RGB. Этот метод предполагает выделение двухзональных изображений, которые будут соответственно служить красной, зеленой и синей составляющими палитры RGB. Комбинация этих зональных изображений дает цветное изображение, которое позволяет лучше идентифицировать объекты на изображении. Используя различные комбинации зональных изображений в трех компонентах палитры, можно выбирать изображения, на которых определенные объекты будут легче обнаруживаться и интерпретироваться. Например, этот метод можно использовать для выбора наиболее подходящего изображения для изучения землепользования. Таким образом, следующие комбинации: 7-6-4, 5-4-3, 6-5-4, 6-4-2 и 4-3-2 (таблица 2.3) оказались наиболее подходящими для изучения состава Земли. Эти комбинации позволяют более четко выделить различные характеристики земной поверхности, соответствующие исследуемым типам землепользования, на основе спектральных характеристик объектов в различных каналах датчика.

Таблица 2.3 — Классы изображений земной поверхности, соответствующие типам землепользования

Класс изображения земной поверхности	Комбинация и изображение каналов	Спектральный диапазон	Роль комбинации
Застроенные территории	7:6:4 	Коротковолновый инфракрасный (SWIR)	Чёткое разделение антропогенных объектов (здания, дороги) и природных ландшафтов благодаря высокой отражательной способности искусственных материалов в SWIR-диапазоне.
Густой лес	5:4:3 	Ближний инфракрасный (NIR) и красный	Выделение плотной растительности: NIR канал чувствителен к хлорофиллу, красный — к структуре листвы.
Вторичный лес	6:5:4 	Средний инфракрасный (MIR)	Различение молодой и зрелой растительности за счёт разной поглощающей способности в MIR.
Лесопосадки	6:4:2 	Красный и зелёный	Повышение контрастности между лесопосадками и естественными лесами посредством анализа текстуры и цвета изображений.
Поверхностные водотоки и водоёмы	4:3:2 	Видимый диапазон	Оптимальное распознавание водных объектов благодаря поглощению света водой в видимом спектре.
Открытые грунты	6:4:2 	Красный и зелёный	Красный и зелёный диапазоны подчёркивают высокую отражательную способность открытых грунтов, в отличие от растительности, поглощающей красный свет.

Кроме того, для дифференциации различных типов единиц землепользования были рассчитаны соответствующие спектральные индексы. Ниже перечислены основные индексы, использованные в нашем исследовании:

Расчет индекса растительности NDVI

Спектральные индексы растительности представляют собой арифметические комбинации значений пикселей в двух или более спектральных диапазонах. Основные арифметические операции, которые могут быть выполнены, — это сложение, вычитание, умножение и деление этих значений [87].

Электромагнитное излучение в красном спектре (620 - 750 нм) в основном поглощается растительностью, а излучение в ближнем инфракрасном спектре (750 - 1100 нм) в большей степени отражается. В ближнем инфракрасном диапазоне области с густой зеленой растительностью будут ярче (светло-серые тона) и темнее (темно-серые тона) в красном диапазоне (который относится к видимому диапазону).

Значение NDVI рассчитывается независимо для каждого пикселя спутникового снимка. Индекс NDVI рассчитывается по формуле:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{R}}{\mathrm{NIR}+\mathrm{R}} \qquad (2)$$

Где NIR - значение пикселя в ближнем инфракрасном диапазоне (полоса 5 для Landsat 8 или полоса 4 для Landsat 4 и 7), а R - значение того же пикселя в красном спектральном диапазоне (полоса 4 для Landsat 8 и 9, полоса 3 для Landsat 4 и 7).

Значения, полученные в результате расчета NDVI, варьируются от -1 до +1. Отрицательные значения указывают на участки с камнями или голой почвой, поверхности, покрытые водой, снегом, льдом или облаками. Положительные значения, близкие к 0, обозначают поверхности без здоровой растительности (высокий спектральный отклик в красном диапазоне и низкий в ближнем инфракрасном диапазоне), а значения, близкие к 1, указывают на наличие

здоровой растительности (высокий спектральный отклик в ближнем инфракрасном диапазоне и низкий в красном диапазоне). На рисунке 21 приведён пример индексного изображения NDVI.

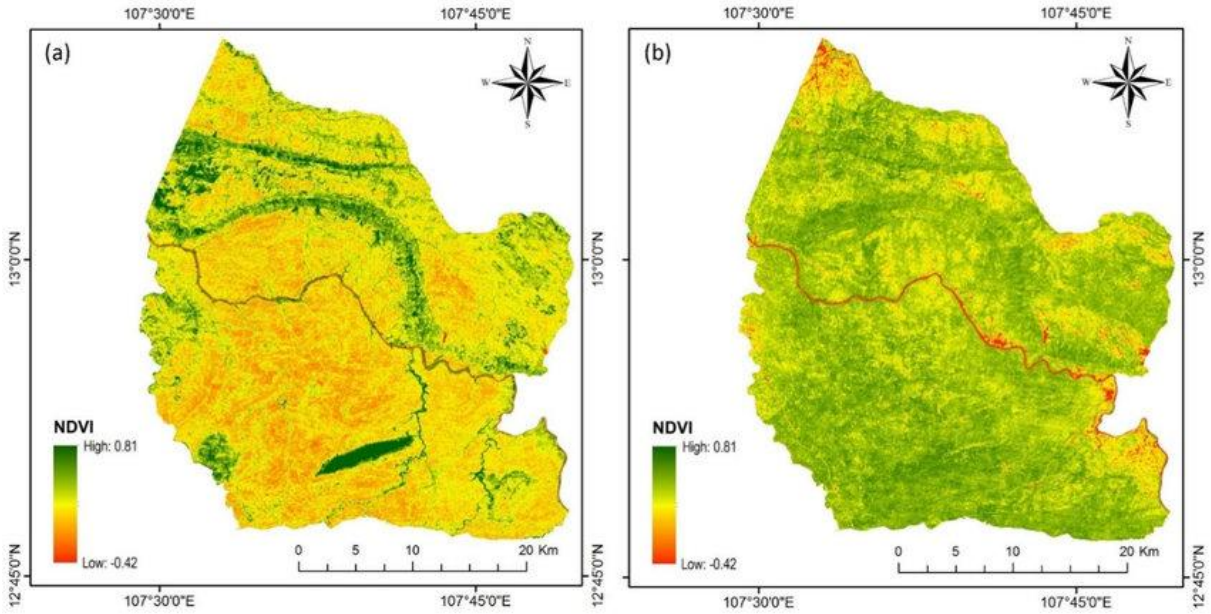


Рисунок 21 – Изображения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), полученные на основе композитных снимков Landsat 8 без облаков: (a) изображение NDVI в сухой сезон и (b) изображение NDVI в сезон дождей [88]

Этот индекс, рассчитываемый в ближнем инфракрасном и красном диапазонах, позволил нам в наших исследованиях идентифицировать, обнаружить и четко отделить растительные участки (например, леса) от нерастительных (например, воды и голые земли), чтобы составить карту и оценить влияние изменений в лесном покрове, вызванных деятельностью человека.

Нормализованная разность водных индексов (NDWI)

Стандартизированный индекс дифференциации воды используется для разграничения территорий, покрытых водой [89]. В основном он используется для обнаружения и мониторинга небольших изменений в содержании воды в водных бассейнах. Используя преимущества NIR (ближнего инфракрасного) и

зеленого (видимого зеленого), нормализованный индекс дифференциации воды (NDWI) улучшает обнаружение водных бассейнов на спутниковых изображениях. Значения NDWI для водных бассейнов превышают 0,5. NDWI для растительности имеет гораздо более низкие значения, что позволяет легче отличить растительность от водоемов. Индекс NDWI для построенных объектов принимает положительные значения в диапазоне от 0 до 0,2. Недостатком этого индекса является то, что он чувствителен к построенным сооружениям, что может привести к переоценке водных бассейнов. Он рассчитывается по следующей формуле:

$$\mathrm{NDWI} = \frac{\mathrm{G}-\mathrm{NIR}}{\mathrm{G}+\mathrm{NIR}} \qquad (3)$$

где G - значение пикселя в зеленом цвете, полоса 2 для Landsat 4,5,7 и полоса 3 для Landsat 8 и 9. NIR - значение пикселя в ближнем инфракрасном диапазоне, полоса 4 для Landsat 4,5,7 и полоса 5 для Landsat 8 и 9.

Чтобы отличить водные поверхности от растительных, мы использовали NDWI, то есть лагуны, озера и реки. Этот индекс использовался для уточнения интерпретации, а также для составления карты водоемов и обнаружения изменений в окружающей среде. На рисунке 22 приведён пример изображения NDWI.

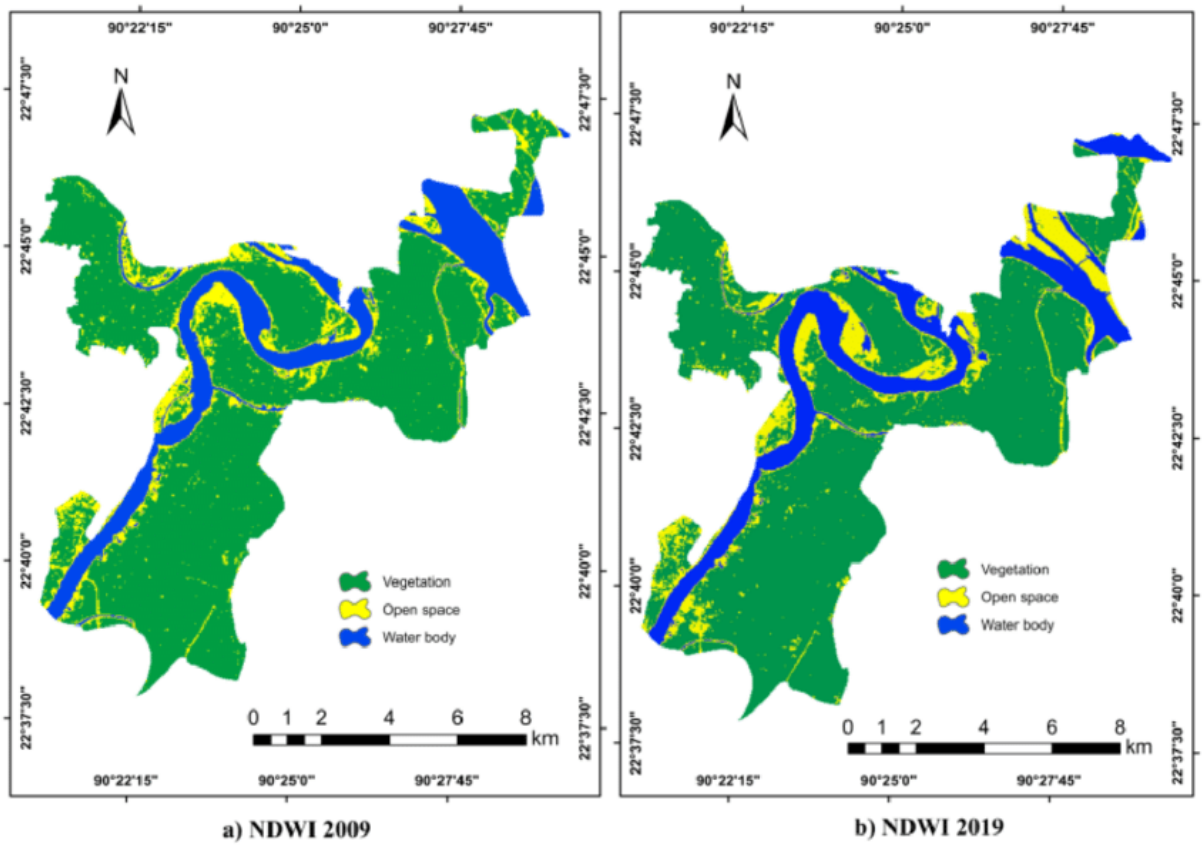


Рисунок 22 – Карты-схемы нормализованного дифференциального водного индекса (NDWI) (а) NDWI в 2009 году (б) NDWI в 2019 году [90]

Нормализованная разность индекса застройки

NDBI, использующий уникальные спектральные характеристики застроенных территорий и других типов почвенно-растительного покрова, широко применяется для выделения застроенных территорий на снимках дистанционного зондирования Земли [91]. NDBI используется для автоматизации процесса картографирования застроенных территорий. NDBI рассчитывается с использованием ближнего инфракрасного (NIR) и коротковолнового инфракрасного (SWIR) диапазонов следующим образом:

$$\mathrm{NDBI} = \frac{\mathrm{SWIR}-\mathrm{NIR}}{\mathrm{SWIR}+\mathrm{NIR}} \qquad (4)$$

Где SWIR представляет собой значение пикселя в коротковолновом инфракрасном диапазоне, полоса 5 для Landsat 4,5,7 и полоса 6 для Landsat 8 и 9. NIR - значение пикселя в ближнем инфракрасном диапазоне, полоса 4 для Landsat 4, 5, 7 и полоса 5 для Landsat 8 и 9.

Значения NDBI варьируются от -1 до 1, при этом высокие значения NDBI указывают на застроенные районы, а низкие - на другие районы. Значения NDBI варьируются от -1 до +1, при этом более высокие значения NDBI указывают на застроенные районы, а низкие - на незастроенные.

На рисунке 23 приведён пример изображения NDBI.

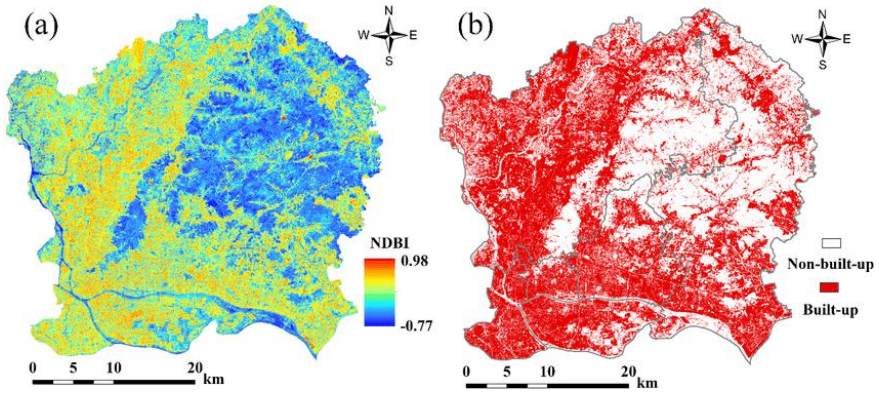


Рисунок 23 – (a) Нормализованный индекс разности застройки (NDBI; более теплые цвета указывают на более высокий индекс); и (b) не застроенные земли (белый) и застройка (красный) [92]

В нашем исследовании мы выбрали индекс NDBI, чтобы разграничить и выделить все, что застроено, то есть жилые районы, здания и дорожную инфраструктуру, и отделить их от голой земли.

Нормализованный разностный почвенный индекс

Стандартизированный индекс дифференциации почв используется для разграничения участков голой почвы. В основном он используется для идентификации и анализа обнаженной почвы на спутниковых снимках. Ближнее инфракрасное и коротковолновое инфракрасное излучение улучшает обнаружение голой почвы, позволяя отличить ее от других объектов на спутниковых снимках. Значения NDSI больше 0,2 для голой почвы и близки к 0 или имеют отрицательные значения для водных пространств и растительности [93]. Он рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{NDSI} = \frac{\text{SWIR}-\text{NIR}}{\text{SWIR}+\text{NIR}} \qquad (5)$$

Где SWIR представляет полосу 5 для Landsat 4, 5, 7 и полосу 6 для Landsat 8 и 9. NIR представляет полосу 4 для Landsat 4,5,7 и полосу 5 для Landsat 8 и 9.

На рисунке 24 приведен пример изображения NDSI.

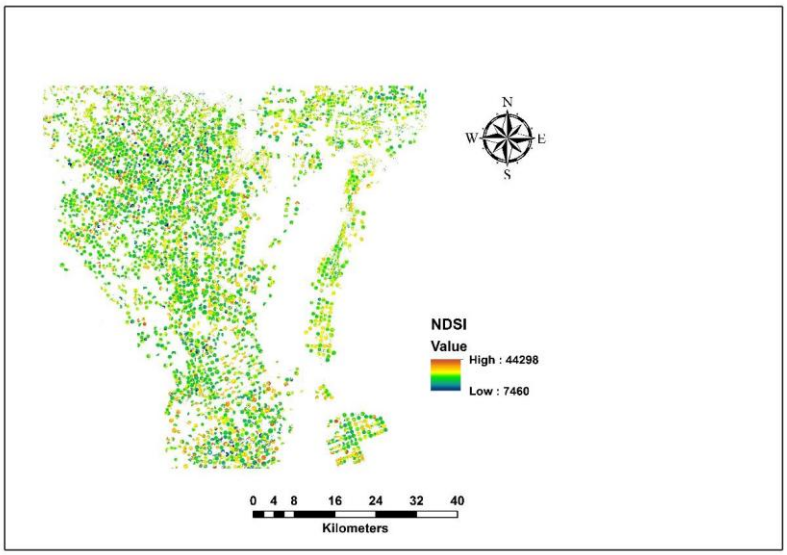


Рисунок 24 – Нормализованный разностный индекс солености (NDSI) [94]

В нашем исследовании NDSI использовался для того, чтобы отличить голые участки, включая песчаные карьеры, развивающиеся промышленные зоны, расчищенные сельскохозяйственные территории, эродированные почвы от других видов почвенного покрова на исследуемой территории, в частности, застроенных территорий и водно-болотных угодий, которые имеют схожий спектральный коэффициент отражения и которые не идентифицируются с помощью нормализованного индекса разности почв.

SAVI (индекс растительности с поправкой на почву)

Индекс растительности с поправкой на почву (SAVI) — это индекс растительности, который пытается минимизировать влияние яркости почвы с помощью поправочного коэффициента яркости почвы [95]. Он часто используется в сельскохозяйственных районах с низким растительным покровом. Он рассчитывается по следующей формуле:

$$\mathrm{SAVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{RED}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{RED} + \mathrm{L}} \times (1 + \mathrm{L}) \qquad (7)$$

NIR = значения пикселей из ближнего инфракрасного диапазона

Красный = значения пикселей в ближнем красном диапазоне.

L = количество зеленого растительного покрова.

NIR и красный относятся к диапазонам, связанным с этими длинами волн. Значение L варьируется в зависимости от количества зеленого растительного покрова. Как правило, на участках без зеленого растительного покрова L=1, на участках с умеренным зеленым растительным покровом L=0,5, а на участках с очень высоким растительным покровом L=0 (что эквивалентно методу NDVI). Этот индекс выдает значения от -1,0 до 1,0. На рисунке 25 приведен пример изображения SAVI.

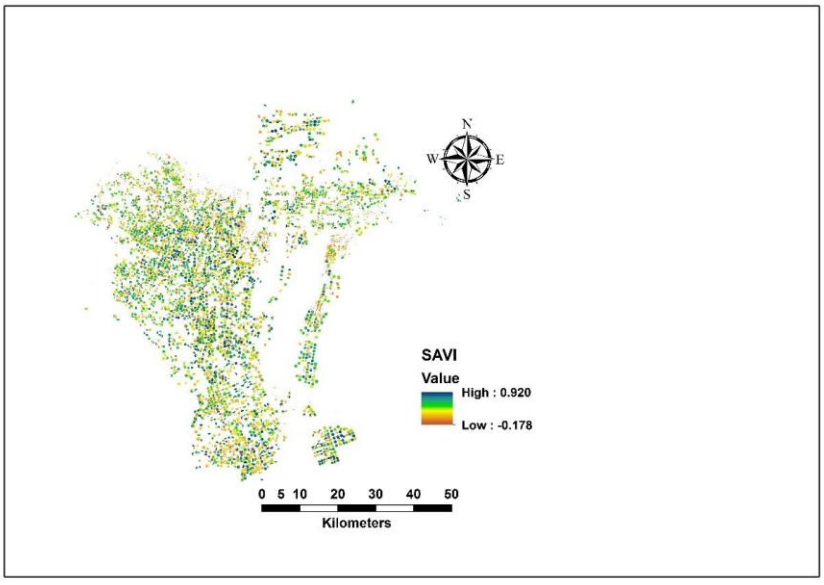


Рисунок 25 – Индекс растительности с поправкой на почву (SAVI) [96]

Этот индекс был использован в нашем исследовании для выделения сельскохозяйственных территорий, подверженных антропогенной деятельности, таких как плантации какао, каучука и бананов, которые быстро расширяются в нашем районе исследования.

2.3.1 Методы обработки космических снимков для выявления изменений в составе земель

Методика, используемая в данном исследовании, направлена на определение изменений в составе земель и основана на методах обработки спутниковых снимков Landsat. В качестве методов используются классификация под наблюдением и анализ спектральных индексов. Методика основана на следующих этапах:

Данные, используемые для обнаружения изменений

Первичные данные для этого исследования были получены из спутниковых снимков высокого разрешения. Использовались снимки Landsat 8 и 9.

Landsat : предоставляет панхроматические снимки с разрешением 15 метров и мультиспектральные снимки с разрешением 30 метров.

Эти изображения позволяют отслеживать изменения в землепользовании и выявлять динамику изменений субъектов землепользования.

Для достижения целей данного исследования использовалось следующее программное обеспечение: QGIS и Excel. программное обеспечение QGIS использовалась для предварительной обработки, обработки спутниковых изображений и создания карт, а для анализа тенденций — программное обеспечение Excel.

Улучшение контраста изображения

После получения спутниковых данных (снимков Landsat) начинаются этапы предварительной обработки. Эта предварительная обработка в основном включает радиометрическую и атмосферную коррекцию с помощью программного обеспечения QGIS на основе файла метаданных съемки. Загруженные изображения уже выпрямлены и приведены в систему WGS84.

Атмосферная коррекция позволяет рассчитать истинную отражательную способность земли путем оценки ослабляющего эффекта атмосферы. Данную поправку трудно моделировать, учитывая неоднородность атмосферы. Однако, используя алгоритм DOS (Dark Object subtraction) для вычитания темных

объектов программного обеспечения QGIS и черпая вдохновение из метаданных, загруженных вместе с изображениями, нам удалось несколько исправить этот эффект.

Синтез изображений

Выбор комбинации каналов предполагает объединение информации, содержащейся в трех каналах, и отображение ее в трех основных цветах (красном, зеленом и синем). Цель этой операции - получить визуальное изображение, которое четко различает различные типы объектов. Каналы 4-3-2, 5-4-3, 7-6-3, 6-5-4 и 6-4-2 были выбраны в качестве используемых каналов, поскольку они представляют собой наилучший набор каналов для классификации изображения по типу землепользования. Эти различные цветовые комбинации были выполнены с помощью программы QGis. После этого была создана мозаика из различных сцен для каждого года.

Для извлечения тематической информации, содержащейся на скорректированных спутниковых снимках, была применена классификация. Использовался метод контролируемой классификации и алгоритм максимального правдоподобия. Также применялся анализ спектральных индексов.

Определение области исследования

Вместо того чтобы обрабатывать все загруженное изображение, важно ограничить интересующую нас область (район Абиджана), чтобы облегчить обработку и минимизировать время выполнения шагов. Для получения области исследования, была создана маска в QGIS с помощью алгоритма (clip raster by mask layer).

Определение эталонных участков

Этот шаг необходим для классификации с обучением. Хорошие обучающие данные подразумевают хорошую классификацию. Поэтому важно тщательно подходить к выбору зон и определению классов изображений земной поверхности.

Для каждого желаемого класса изображения земной поверхности необходимо выделить учебные области, которые считаются эталонными данными для данного класса изображения земной поверхности.

Выбор классов изображений земной поверхности обусловлен целым рядом факторов и соображений, которые мы хотели бы осветить. Поскольку нас интересует выявление изменений в землепользовании в Абиджанском регионе, мы логично приняли во внимание определение классов изображений земной поверхности. Работа должна интуитивно включать карты землепользования, которые будут использоваться для обнаружения изменений. Поэтому мы просмотрели все изображения, чтобы определить классы, которые видны на снимке и полезны для данной работы. Затем мы разделяем каждый класс характеристик почвенно-растительного покрова в соответствии с их спектральной сигнатурой. Окончательное количество сохраняемых классов также зависит от спектральной разделимости классов.

Спектральная разделимость классов изображений земной поверхности.

Чтобы убедиться в том, что классы эффективны, репрезентативны и разделимы, существуют средства оценки и контроля качества, а именно спектральная разделимость и оценка спектральных диаграмм каждого класса.

Оценка спектральных диаграмм

Вычисление спектральных сигнатур (или спектральных диаграмм) различных определенных классов дает нам общее представление о делимости всех классов.

Контролируемая Классификация

Контролируемая классификация, также известная как направленная классификация, является краеугольным камнем обработки изображений, которая отразит качество нашей работы и предоставит нам тематическую информацию о данной работе. Следует отметить, что начиная с этого этапа мы будем говорить уже не о радиометрической ценности пикселей, а о понятии классов или даже тем. В данной работе в качестве алгоритма классификации под наблюдением использовался метод максимального правдоподобия. Всего было выделено 6

классов изображений земной поверхности: застроенные территории, густые леса, вторичные леса, лесопосадки, поверхностные водотоки и водоёмы, и открытые грунты.

Подтверждение полученной классификации

На этом этапе точность классификации оценивается на основе внешних данных (обучающих данных, которые не участвовали в классификации). Эти данные используются для оценки матрицы ошибок и расчета коэффициента Каппа - двух показателей хорошей классификации. Общая точность классификации и статистический коэффициент Каппа Коэна, рассчитанные по формулам 8 и 9 соответственно:

$$p = \frac{\sum N_{ij}}{S} \qquad (8)$$

где, Nij - доля, верно, классифицированных пикселей, равная отношению суммы диагональных значений (верно, классифицированных пикселей в каждом классе); S - общее количество пикселей в опорной выборке.

$$\hat{K} = \frac{N\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r} x_{i+} \times x_{+i}}{N^2 - \sum_{I=1}^{r} x_{i+} \times x_{+i}} \qquad (9)$$

где, 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, включенных в матрицу.

Векторизация и картографическое представление

Векторизация состояла в преобразовании классифицированных изображений из растрового режима в векторный режим (полигоны) для облегчения управления ими в программном обеспечении для анализа ГИС QGIS.

Картографическое представление состояло из построения карт территории анализируемой территории за исследуемый период.

Анализ динамики землепользования

Для оценки изменений в Абиджане были определены зоны, соответствующие типам землепользования. Изменения были проанализированы за исследуемый период с основной целью определить, как площади различных типов землепользования изменились с течением времени. Для измерения этих изменений использовались два показателя: площадь изменения (S_Δ) и среднегодовая скорость пространственного расширения (V) [97]. Изменение площади было рассчитано с использованием специальной математической формулы, которая позволяет определить изменение площади каждого типа землепользования между двумя исследуемыми датам. Площадь изменения по формуле (10):

$$S_\Delta = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100 \qquad (10)$$

где S_Δ – площадь изменения;

S_1 – площадь соответствующего типа землепользования на дату t_1;

S_2 – площадь соответствующего типа землепользования на дату t_2.

После чего, был проведен углубленный анализ, для детальной оценки изменений, произошедшие внутри каждого типа землепользования. Этот анализ проводился по скорости изменения (V) или среднегодовому пространственному выражению. Среднегодовая скорость пространственного расширения определяется по формуле (11):

$$V = \left[\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{1/t} - 1\right] \times 100 \qquad (11)$$

где V – скорость изменения площади (%);

S_1 – площадь соответствующего типа землепользования на дату t_1;

S_2 – площадь соответствующего типа землепользования на дату t_2;

t – количество лет между двумя исследуемыми датами.

Когда значения скорости изменения положительные, они указывают на увеличение площади, а когда они отрицательные — на сокращение площади. Значения, близкие к нулю, указывают на то, что площадь соответствующего типа землепользования остаётся стабильной.

Вычисление спектральных индексов

Для уточнения интерпретации спутниковых снимков и картирования динамики землепользования мы рассчитали спектральные индексы [98] по космическим снимкам Landsat, что позволило нам отслеживать динамику различных классов изображений земной поверхности, выбранных для нашего исследования. Каждый индекс предназначен для представления определённых типов землепользования. Среди индексов мы использовали спектральные индексы, такие как NDVI, NDWI, NDBI, NDSI и SAVI, которые помогают извлекать важную информацию о земельном покрове и широко используются для картографирования землепользования. NDVI и SAVI особенно подходят для оценки растительности, в то время как NDWI выделяет водные поверхности, а NDBI различает урбанизированные территории. Кроме того, индекс NDSI используется для отделения голых земель от застроенных территорий. Различные индексы перечислены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Индексы использованные в настоящем исследовании

Название индекса	Идентификатор индекса	Используемые полосы	Формула	Функция
Нормализованный разностный индекс растительности (NDVI)	NDVI	NIR, красный	(NIR - красный) / (NIR + красный)	Оценка состояния растительности
Нормализованный индекс разности воды (NDWI)	NDWI	Зеленый - NIR	(Зеленый - NIR)) / (Зеленый + NIR))	Идентификация водных поверхностей
Нормализованная разность индекса застройки (NDBI)	NDBI	SWIR, NIR	SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)	Автоматическое картографирование городских территорий
Нормализованный разностный	NDSI	SWIR, NIR	SWIR - NIR) /	Оценка открытые грунты

почвенный индекс (NDSI)			(SWIR + NIR)	
индекс растительности с поправкой на почву (SAVI)	SAVI	NIR, красный	((NIR - Rouge) / (NIR + Rouge + 0.5)) * 1.5	Оценка сельскохозяйственных территорий

Мы применили метод расчёта спектрального индекса с помощью инструментального пакета «Raster Calculator», реализованного в программе QGIS. Эти методы были использованы для получения изображений, подчеркивающих каждую особенность почвенно-растительного покрова на территории нашего исследования. Метод перекрестных ссылок между индексными и классификационными изображениями стал полезным дополнением к интерпретации спутниковых снимков.

Данные для обучения были получены путем визуального анализа изображений, сделанных в разные сезоны. В случае нашего исследования снимки, сделанные летом, были выбраны для изучения состава суши. Эти изображения были сделаны в период с декабря по январь, так как это самое солнечное время в Кот-д'Ивуаре. Этот период был выбран потому, что он предлагает наиболее благоприятные условия для получения четких и четких изображений. Таким образом, контролируемая классификация позволила выделить шесть классов изображений земной поверхности: застроенные территории, густые леса, вторичные леса, лесопосадки, поверхностные водотоки и водоёмы, и открытые грунты. Что касается спектральных индексов, то они позволили нам провести более глубокое исследование каждого класса, обнаружив и идентифицировав каждый тип землепользования на исследуемой территории отдельно.

При создании обучающей выборки для разных классов были заданы группы пикселей, которые могут быть четко отнесены к данному классу на основании набора их характеристик (спектральных, динамических и текстурных), а также их конфигурации и расположения, к соответствующему

эталонному классу. Эта процедура была выполнена с учетом всех соответствующих аспектов, чтобы гарантировать, что каждый пиксель правильно связан с соответствующим классом.

Таким образом, для изучения изменений в землепользовании метод классификации под наблюдением может быть разумным выбором для получения точных результатов. Классификация с учителем считается эффективной, поскольку она лучше использует спектральные данные для разделения различных классов, что позволяет повысить точность результатов. Спектральные индексы также являются подходящими методами для изучения изменений в землепользовании.

2.4 Оценка качества результатов дешифрования и анализа данных дистанционного зондирования

При создании обучающих выборок для точного представления идентифицируемых классов изображений земной поверхности важно проводить оценку качества [99]. Эта оценка помогает определить, являются ли обучающие выборки репрезентативными и надежными для различных классов. Обеспечение правильного представления каждого класса в обучающей выборке необходимо для обеспечения точной и надежной классификации.

Для того чтобы выделяемые классы достоверно определились при проведении контролируемой классификации, были проведены: оценка точности, оценка полноты и оценка достоверности.

Оценка точности

Точность результатов, полученных при классификации, оценивается путем сравнения тематического представления со справочными данными, такими как тематические карты или полевые измерения. Это сравнение стало возможным благодаря географическим координатам каждого пикселя результирующего изображения. Затем категория каждого пикселя сравнивается с соответствующей фактической категорией из эталонных данных. Результаты этого сравнения заносятся в матрицу ошибок, которая содержит правильно

классифицированные точки (по диагонали) и неправильно классифицированные точки. Этот шаг важен для оценки точности классификации [100]. Точность рассчитывается по формуле 8.

Для получения достоверных оценок точности классификации необходимо выбрать достаточное количество баллов для каждого класса, полученного при классификации. В идеале каждую точку результирующего тематического представления следует сравнивать с эталонными данными для каждого класса. Это позволяет точнее оценить точность классификации [100].

Общая точность классификации получается путем сложения количества правильно распознанных точек (диагональных элементов) и деления этой суммы на общее количество баллов, участвующих в оценке. Для каждого отдельного класса вычисляются два значения: отношение между правильно распознанными пикселями и суммой строк (общее количество баллов в данном классе) или суммой столбцов (общее количество баллов в эталонных данных). Пользовательская ошибка — это значение, указывающее вероятность того, что точка, отмеченная как класс 2 в результате классификации, действительно существует. Это значение важно для оценки качества классификации [101].

Оценка полноты

Оценка полноты — это метод статистического анализа, который измеряет точность и надежность системы распознавания объектов. Он состоит в сравнении количества объектов, распознаваемых системой, с количеством реальных объектов, присутствующих в поле [102]. Оценка полноты рассчитывается по формуле 9.

При использовании систем распознавания объектов, таких как системы компьютерного зрения, важно убедиться, что эти системы способны распознавать все соответствующие объекты. Оценка полноты измеряет способность системы распознавать все объекты данного класса [103].

Чтобы оценить полноту, мы можем действовать следующим образом: мы выбираем набор изображений или данных из поля и просим человека-эксперта подсчитать количество объектов, присутствующих на этих изображениях. Затем

система распознавания объектов используется для обнаружения тех же объектов, и количество обнаруженных объектов сравнивается с количеством реальных объектов.

Соотношение между количеством распознанных объектов и количеством реальных объектов в поле дает меру полноты системы. Чем выше это соотношение, тем лучше система способна распознавать все соответствующие объекты. Если коэффициент низкий, это означает, что системе не хватает чувствительности, и она может пропустить важные объекты [104].

Важно отметить, что оценка полноты не измеряет точность системы, то есть ее способность правильно идентифицировать распознаваемые ею объекты. Это требует отдельной оценки точности, которую можно выполнить путем сравнения обнаруженных системой объектов с аннотациями человека-эксперта.

Оценка достоверности

Оценка достоверности карт классификации землепользования, полученных по данным дистанционного зондирования Земли, является серьезной проблемой в исследованиях дистанционного зондирования [105]. Оценка достоверности результатов классификации предполагает оценку точности соответствия классов, полученных по данным ДЗЗ, реальным классам в полевых условиях [105].

Используемый нами метод оценки надежности включает матрицу ошибок классификации, общую точность классификации и значения κ каппа-индекса Коэна для разновременных изображений, а также распределение поверхностей суши. В отличие от традиционного метода, который использует эталонный образец, этот метод оценивает точность классификации, используя информацию из матрицы ошибок, которая количественно определяет количество правильно и неправильно классифицированных пикселей для каждого класса. Общая точность классификации рассчитывается путем сложения диагональных элементов матрицы ошибок и деления результата на общее количество оцениваемых пикселей. Каппа-индекс Коэна также рассчитывается из матрицы ошибок и позволяет оценить соответствие между предсказанными классами и

реальными классами. Распределение площадей земли можно использовать для проверки того, дала ли классификация правдоподобные результаты, путем сравнения площадей различных классов с экспертными знаниями об изучаемом регионе. Наконец, спектральные индексы позволили лучше различать различные объекты растительного покрова и повысить общую точность контролируемой классификации, что позволило выявить ошибки в классификации и достоверно интерпретировать результаты.

2.5 Оформление результатов дешифрирования и анализа данных ДЗЗ из космоса

Данный блок включает составление тематических карт, содержащих обнаружения изменение состава земель и экспорт данных в информационные системы Министерство окружающей среды и устойчивого развития Кот-д'Ивуара.

Тематические карты-схемы обнаружения изменений в землепользовании составляются в соответствии с классификацией спутниковых изображений. Они показывают различные классы состава земли в районе исследования и предоставляют информацию о динамике землепользования. Затем эти карты экспортируются в информационные системы Министерства окружающей среды и устойчивого развития, поскольку министерство выразило озабоченность по поводу мониторинга и управления землепользованием. Поэтому создание тематических карт необходимо для решения этой проблемы.

Полученные данные будут использоваться для информирования лиц, принимающих решения, и планировщиков о текущих тенденциях землепользования. На основе этой информации можно разработать политику и планы для устойчивого управления землепользованием с учетом долгосрочных потребностей людей и окружающей среды.

Таким образом, экспорт данных тематических карт в информационные системы Министерства окружающей среды и устойчивого развития является важным шагом для облегчения принятия обоснованных решений в области

управления земельными ресурсами. Благодаря этим данным можно будет разработать планы и политику, которые удовлетворят потребности страны, гарантируя при этом защиту окружающей среды и устойчивость природных ресурсов.

2.6 Выводы по разделу

В разделе приводится обоснование необходимости разработки методика выявления изменений в составе земель по данным многозональной пространственной съемки. Деятельность правительства Кот-д'Ивуара слабо направлена на рационализацию землепользования территории из-за отсутствия информационного обеспечения землеустройства с использованием данных дистанционного зондирования Земли из космоса для решения широкого круга задач: градостроительства, дорожного строительства, сельского хозяйства, водоснабжения, коммунального хозяйства. Поэтому научная задача, поставленная в диссертации, заключается в разработке методики выявления изменений состава земель по данным многозональной спутниковой съемки для точного мониторинга состава земель, что также позволит принимать эффективные и экологически безопасные управленческие решения по рациональному использованию земель с учётом различных типов землепользования.

В разделе представлены и обоснованы основные положения процесса выявления изменений в составе земель на основе данных многозональной спутниковой съемки. Также рассматривается технологическая схема мониторинга состава земель с использованием спутниковых снимков. Технология мониторинга состоит из 4 основных блоков: блок предварительной обработки данных дистанционного зондирования, блок дешифрирования и анализ данных ДЗЗ из космоса, блок оценка качества результатов дешифрования и анализа данных дистанционного зондирования, блок оформление результатов дешифрирования и анализа данных ДЗЗ из космоса. Для каждого блока приведена схема организации событий и их состав.

Технология мониторинга представляет собой набор взаимосвязанных блоков, направленных на изучение структуры и динамики состава земель исследуемой территории. В основе технологии мониторинга земель лежит методология, основанная на комплексе методов, включающих контролируемую классификацию по методу максимального правдоподобия и анализ спектральных индексов для выявления изменений в землепользовании.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА СИНТЕЗИРОВАННЫХ И ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1 Описание и анализ тестовой территории

3.1.1 Физико-географическое положение

Кот-д’Ивуар — государство в Западной Африке, член Африканского союза. Занимая площадь 322 462 км^2, он граничит на севере с Мали и Буркина-Фасо, на западе с Либерией и Гвинеей, на востоке с Ганой и на юге с Атлантическим океаном. Население оценивается в 22 671 331 человек в 2014 году. Политической и административной столицей Кот-д'Ивуара является Ямусукро (Абиджан остается экономической столицей), официальный язык – французский.

Расположенный между 4° и 10° северной широты, Кот-д'Ивуар находится примерно в 400 км от экватора на своих южных границах и примерно в 1400 км от тропика Рака на своих северных границах. Климат в целом жаркий и влажный, поэтому представляет собой переходный период между экваториальным и тропическим. Экваториальный вдоль побережья, он является полузасушливым на крайнем севере. Температура колеблется в среднем около 28°C. Существуют две основные климатические зоны: экваториальный климат и тропический климат саванны, который сам по себе является более или менее сухим. Короткий сухой сезон длится в августе и сентябре. Сезон дождей длится с мая по июль, а короткий сезон - с октября по ноябрь.

Тропический влажный саванновый климат охватывает северную часть южной лесной зоны и южную часть саваннового региона. Температуры колеблются от 14°C до 33°C, влажность воздуха составляет от 60% до 70%, а годовое количество осадков в Буаке составляет 1 200 мм^3. В этом климатическом регионе также четыре сезона: два сухих сезона - с ноября по март и с июля по август, и два сезона дождей - с июня по октябрь и с марта по май.

Климат сухой саванны в основном относится к региону Саванна. Дневные и годовые температурные амплитуды относительно высоки, около 20°C, а уровень влажности, более низкий, чем на юге страны, колеблется от 40% до 50%. Для этого района характерно периодическое присутствие прохладного сухого ветра - гарматтана - в период с декабря по февраль. Существует два сезона: один сухой, с ноября по июнь, с небольшими дождями в апреле, и второй дождливый, охватывающий период с июля по октябрь. Среднее количество осадков, зарегистрированное в Корхого, составляет 1 203 мм^3.

Территория Кот-д'Ивуара представляет собой четырехугольник с 520 км береговой линии на Атлантическом океане в западной части Гвинейского залива. Страна характеризуется низким рельефом. Большая часть суши состоит из плато и равнин. В западной части страны, гористой местности, есть несколько рельефов, превышающих тысячу метров (гора Нимба достигает 1 752 м). За исключением этого региона, высота над уровнем моря обычно варьируется от 100 до 500 м; большинство плоскогорий имеют высоту от 200 до 350 м. Доминирующей особенностью этих плато является железистый броневой камень, видимый на поверхности в виде плит цвета ржавчины, но иногда покрытый песком, гравием или более мелкими продуктами[106]. Карта Кот-д’Ивуара представлена на рисунке 27.

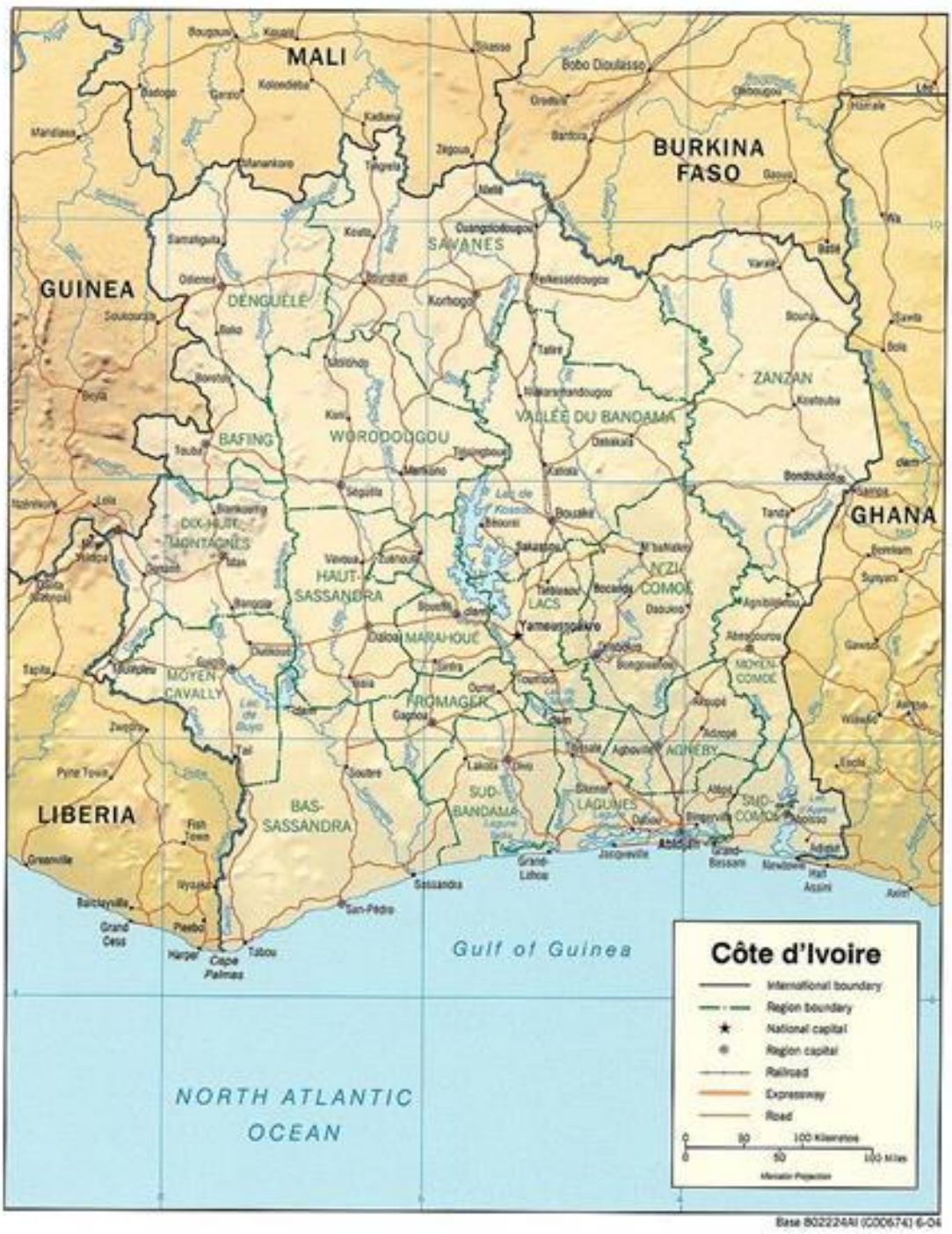


Рисунок 27 – Карта Кот-д’Ивуар [107]

Кот-д'Ивуар, страна в западной Африке, имеет разнообразные физико-географические характеристики на всей своей территории. Эти различные физико-географические особенности лежат в основе различных ландшафтных формирований и динамики землепользования. Все эти характеристики делают нашу область исследований важным объектом исследований.

3.1.2 Физико-географическое описание

В качестве объекта исследования выбрана городская агломерация города Абиджан на территории Кот-д’Ивуара. Расположение район приведено на рисунке 28.

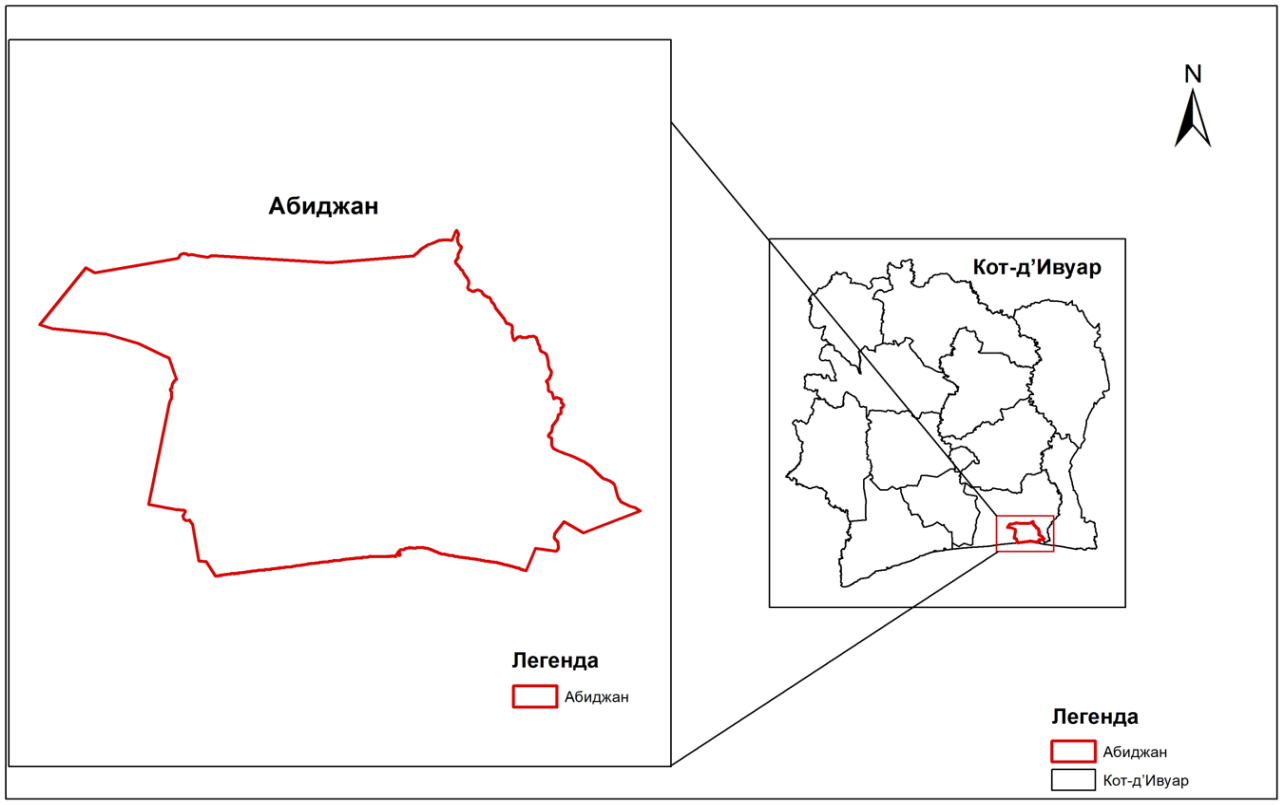


Рисунок 28 – Расположение район исследования выделено красными линиями

Абиджан – экономическая столица Кот-д'Ивуара, с населением 4,7 миллиона человек по информации на 2014 год, что составляет 20 процентов от общей численности населения страны, является одним из самых густонаселенных городов франкоязычной Африки. Он расположен на Юге Кот-д'Ивуара, на краю Гвинейского залива и пересекается лагуной Эбрие. Абиджан занимает область около 12 км с севера на юг и около 10 км с востока на запад. Район Абиджан имеет площадь 2119 км^2. В городе жаркий и влажный субэкваториальный климат, который включает в себя длинный сезон дождей (май-июнь-июль) и короткий сезон дождей (сентябрь-ноябрь) [108]. Почвы почти полностью ферралитовые, с высокой или умеренной степенью ненасыщенности.

3.2 Подбор космических снимков для проведения научных исследований

Для проведения такого исследования важно использовать надёжные количественные и качественные данные. Спутниковые снимки предлагают синоптический обзор больших географических территорий через регулярные промежутки времени, что делает их подходящими для данного исследования [109].

Используя спутниковые снимки, можно получить количественные данные, такие как спектральные индексы. Эти данные полезны для картирования почвенного покрова, мониторинга сельскохозяйственной деятельности, отслеживания изменений в естественной среде обитания и проведения статистических анализов, таких как корреляции, регрессии и дисперсионные анализы [110].

Спутниковые изображения также предоставляют качественные данные, такие как текстура, форма и цвет объектов на поверхности Земли, что помогает определить характеристики земной поверхности, такие как типы сельскохозяйственных культур, городские районы и природные территории. Эти данные также полезны для мониторинга изменений характеристик земной поверхности, таких как фрагментация естественной среды обитания, рост городских территорий и деградация земель. Таким образом, спутниковые изображения являются важным инструментом для понимания и картографирования динамических явлений, таких как на земной поверхности. Предоставленные количественные и качественные данные позволяют проводить точный и подробный анализ изменений на земной поверхности с течением времени [111].

3.2.1 Исходные данные

Выбор периодов исследования (2000, 2017 и 2022 годы) обусловлен необходимостью проанализировать пространственно-временную динамику землепользования городской агломерации города Абиджана. В качестве исходного периода был выбран 2000 год, 2017 год — промежуточный период, а

2022 год — конечный период, что позволяет оценить изменения за 22-летний период.

Первоначально планировалось использовать четыре временных среза. Однако для дополнительного периода между 2000 и 2017 годам не удалось подобрать спутниковые снимки Landsat, удовлетворяющие требованиям исследования, из-за проблем с качеством изображений, в частности из-за облачности, недостатка данных и пропусков данных. Поэтому для сравнительного анализа были выбраны три указанных года.

При отборе спутниковых снимков также учитывались природные и климатические особенности этого тропического влажного региона. Предпочтение отдавалось снимкам, полученным в период продолжительный сухой сезон (с декабря по февраль) поскольку в это период вероятность значительной облачности, как правило, ниже, чем в сезон дождей. такой выбор направлен на снижение влияния облаков, теней и сезонных изменений спектральных характеристик объектов земной поверхности, что позволяет повысить сопоставимость снимков, полученных в разные сроки. Также была выполнена мозаика спутниковых снимков для обеспечения полного охвата исследуемой территории. Данные и даты получения снимков для анализа изменений приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные снимки для анализа изменений

Территория	Спутник	Дата съемки	Пролет, сцена
Городская агломерация города Абиджан	LANDSAT 7	2000-02-02	195/56
	LANDSAT 7	2000-02-09	195/56
	LANDSAT 8	2017-12-25	195/56
	LANDSAT 8	2017-01-14	195/56
	LANDSAT 9	2022-12-31	195/56
	LANDSAT 9	2022-12-31	196/56

3.3 Описание экспериментальных исследований

Для экспериментов было использовано шесть изображений. Из них было использовано два изображения города Абиджан 2000 года, два изображения 2017 года и два изображения 2022 года.

Обработка данных Landsat:

Шаг 1: улучшение контраста изображений с помощью программного обеспечения QGis.

Для проведения исследования с использованием пространственных изображений необходимо повысить контрастность снимков изучаемой территории. Для этого в случае нашего исследования мы применяем атмосферную коррекцию к снимку Landsat. Точнее, мы применим эту атмосферную коррекцию к снимку Landsat города Абиджан. В строке папки с лентами Landsat мы указываем на каталог, содержащий ленты Landsat. Эта директория должна быть точно такой же, как и загруженная, с теми же файлами и той же структурой. В строке Select MTL file мы указываем на текстовый файл мета-данных, расположенный в каталоге images. Этот файл метаданных пригодится для атмосферной коррекции. Далее, чтобы выполнить атмосферную коррекцию, мы используем алгоритм DOS1 (Dark Object Subtraction), отметив пункт Apply DOS1 atmospheric correction (рисунок 29).

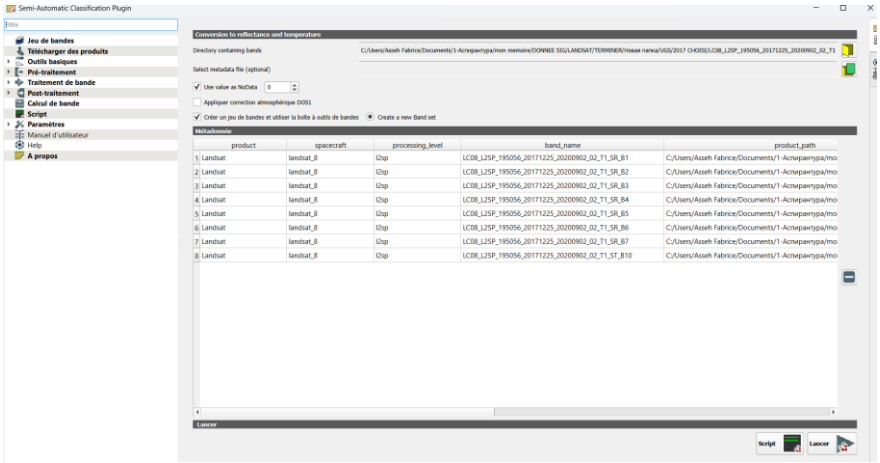


Рисунок 29 – Настройка атмосферной коррекции

Шаг 2: корректировка цветовой комбинации каналов. Эта операция была выполнена в программном обеспечении QGIS. Это позволило нам различать объекты, присутствующие на изображениях.

Мы проиллюстрируем работу этого алгоритма на упрощенном примере. В нашем исследовании мы хотим классифицировать изображение Landsat. Это изображение состоит из семи спектральных полос. Наша цель - разделить его на шесть классов изображений земной поверхности. Мы начинаем с создания ложной цветовой композиции, которая поможет нам оцифровать учебную область - полигон, представляющий каждый класс (рисунок 30).

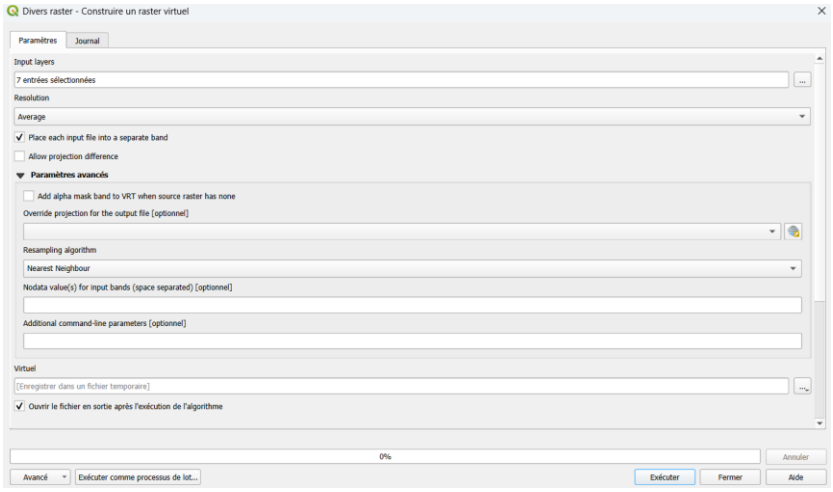


Рисунок 30 – Настройки цветовой композиции в QGIS

Шаг 3: уточнение области исследования в программном обеспечении QGIS, на основе базовых изображений и векторной модели с границами различных городов.

Помимо обрезки растра по отпечатку, иногда полезно обрезать растр по полигону векторного слоя. Эта операция также известна как обрезка. Поскольку наше исследование охватывает определенную территорию, важно обрезать растры в соответствии с контурами исследуемой территории. Это уменьшает вес данных и позволяет нам работать только с теми данными, которые точно содержатся в пределах исследуемой территории.

В поле Select a set of strips (Выбрать набор полос) мы выбираем набор полос, которые будут нарезаны. В поле Выходной префикс укажите префикс,

который будет присвоен создаваемым обрезанным растрам. Затем установите флажок Use a clipping vector (Использовать вектор обрезки) и выберите вектор, который будет использоваться (рисунок 31).

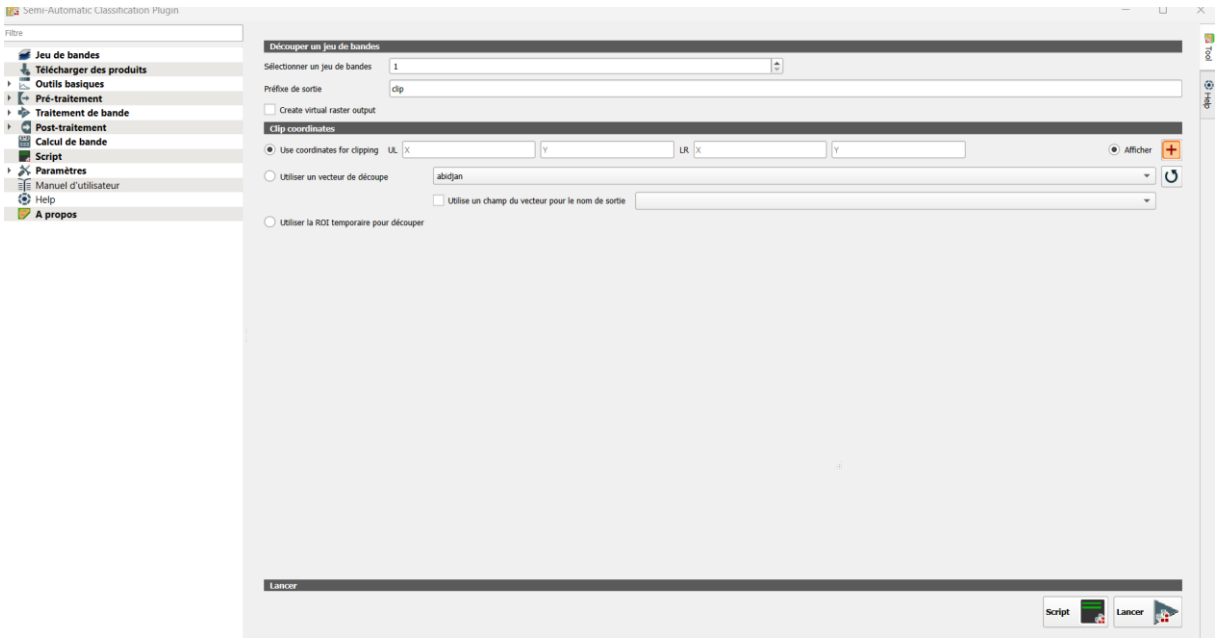


Рисунок 31 –Обрезка растра с помощью SCP (Semi-Automatic Classification Plugin)

Шаг 4: создание легенд и спектральных подписей данных.

Поскольку в данном исследовании используется метод контролируемой классификации многозонных спутниковых снимков, на данном этапе необходимо определить тематические классы изображения земной поверхности, соответствующие выявленным типам землепользования. Выбор классов осуществляется с учётом целей исследования, природных характеристик территории и результатов визуального дешифрирования космических изображений. Обучающие данные организуются на двух уровнх: группы тематических классов и отдельные тематические классы изображений земной поверхности. Например, группа «растительность» может включать такие тематические классы, как лиственный лес, хвойный лес и луг. Аналогичным

образом группа «застроенные территории» может объединять классы плотной застройки, разреженной застройки и дороги. Таким образом, группы используются для объединения тематически связанных классов, а отдельные классы позволяют более точно различать объекты земной поверхности в зависимости от их спектральных характеристик. Каждой группе тематических классов и каждому отдельному классу присваивается название и целочисленный идентификатор, необходимые для организации обучающих данных и проведения контролируемой классификации.

В данном исследовании было выделено шесть тематических классов изображений земной поверхности, соответствующих шести типам землепользования городской агломерации Абиджана. Их названия, идентификаторы и пояснения приведены в таблице 3.2.

Таблице 3.2 —Типы землепользования городской агломерации Абиджана и их пояснения

ID (идентификация) тематического класса	Типов землепользования	Пояснение
1	застроенные территории	участки земной поверхности, занятые жилыми, административными, общественными, торговыми и промышленными зданиями и сооружениями, а также объектам транспортной инфраструктурой.
2	густой лес	тип растительного покрова, включающий густые вечнозеленые тропические леса и густые полулиственные тропические леса.
3	вторичный лес	естественно, восстановившиеся лесные участки, образовавшиеся после хозяйственной деятельности человека или деградации первичного леса.
4	Посадкаи леса	искусственно созданные насаждения хозяйственных древесных культур (тик, каучуконосы, масличная пальма), выращиваемые для экономических и природоохранных целей.
5	поверхностные водотоки и водоёмы	участки земной поверхности, занятые открытой поверхностью или естественного происхождения, включая реки, ручьи, озёра, пруды, лагуны, водохранилища и каналы.

6	открытые грунты	территории без растительного покрова, включающие оголённые почвы, строительные площадки, карьеры и другие незастроенные территории.

Таким образом, для классификации многозонных космических снимков было определено шесть тематических классов изображений земной поверхности, соответствующих шести типам землепользования на исследуемой территории.

Как и при любой другой классификации под наблюдением, нам необходимо определить обучающие полигоны, соответствующие тематическим классам изображений земной поверхности. Для каждого тематического класса мы оцифруем несколько репрезентативных полигонов. В процессе контролируемой классификации эти полигоны часто обозначаются аббревиатурой ROI (Region of Interest).

При создании спектральных сигнатур необходимо правильно определить каждую новую группу тематических классов, указать соответствующие идентификаторы групп и отдельных тематических классов изображений земной поверхности, а также правильно определить их названия. На рисунке 32 представлены наборы обучающих изображений для каждой из выделенных тематических класса изображений земной поверхности.

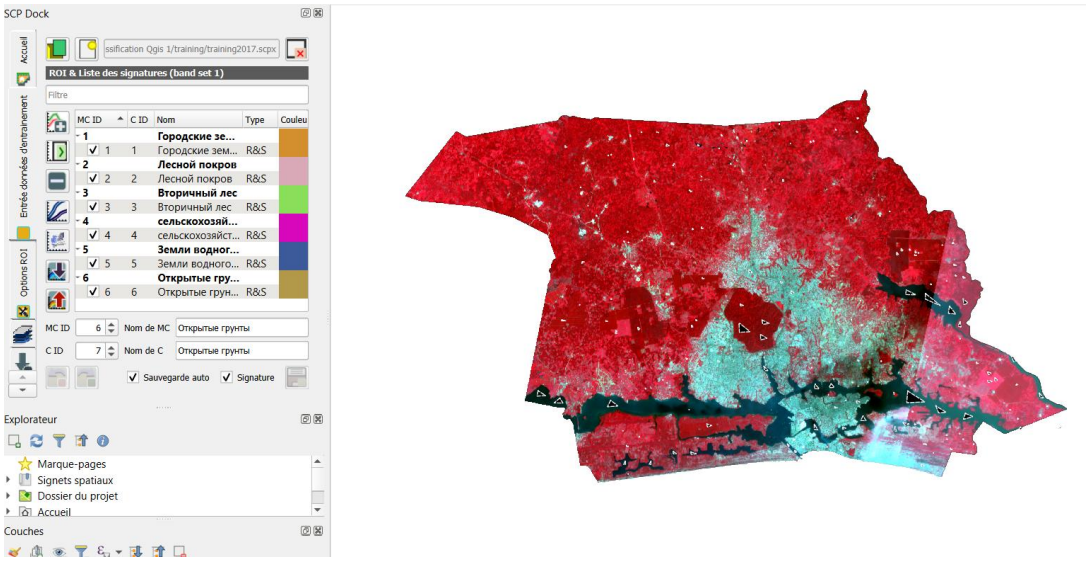


Рисунок 32 – Финальная обработка (ROI)

Шаг 5: классификация классов изображений земной поверхности с помощью алгоритма максимального правдоподобия.

После того как мы удовлетворены нашими обучающими полигонами, мы можем приступить к процессу классификации. Мы хотим выполнить классификацию только по типам землепользования. Мы выбираем алгоритм классификации, максимальное правдоподобие, и проводим нашу контролируемую классификацию на рисунке 33.

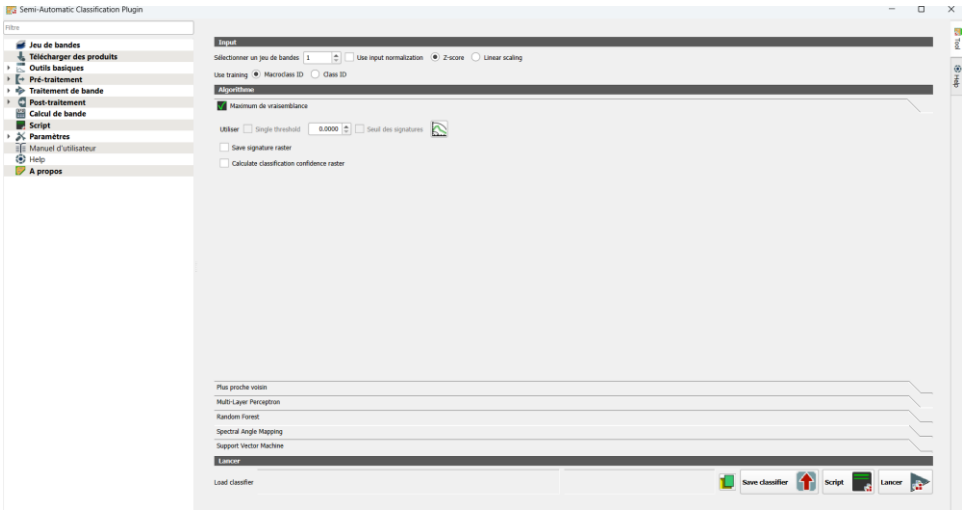


Рисунок 33 – Настройка классификации с помощью алгоритма максимального правдоподобия

Шаг 6: формирование растрового файла с результатами классификации (застроенные территории, густой лес, вторичный лес, лесопосадки, поверхностные водотоки и водоёмы, открытые грунты).

После проведения классификации с использованием мета-классов все полученные данные сводятся в растровый файл, чтобы их можно было более эффективно просматривать и анализировать (рисунок 34).

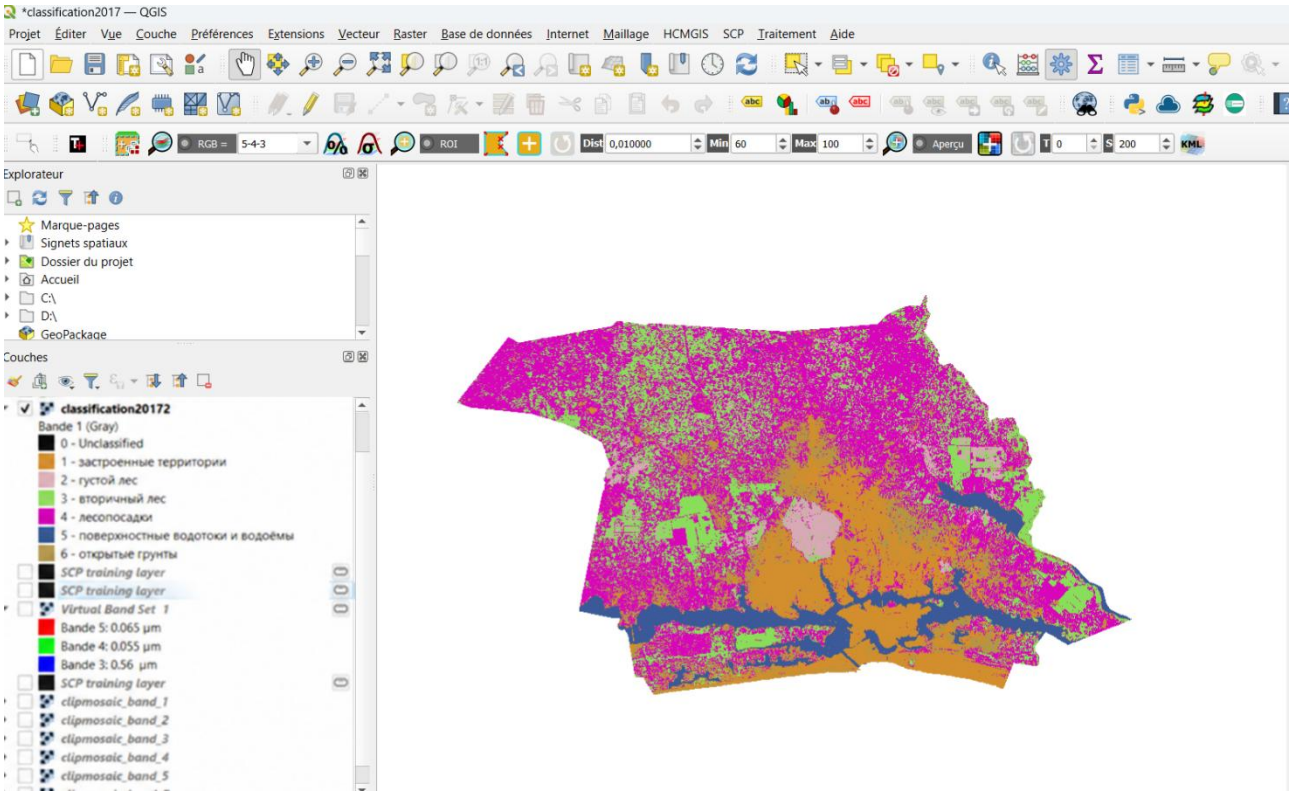


Рисунок 34 – Обзор классификации в растровом формате

Шаг 7: векторизация растра и экспорт данных для построения различных карт покрова территории.

Теперь, когда наш классифицированный растр готов, мы преобразуем пиксели в векторные полигоны. Эта манипуляция используется, в частности, для преобразования растра землепользования в векторный слой, по которому можно будет рассчитать площадь поверхности. Манипуляция может быть выполнена с помощью различных инструментов. В нашем случае мы используем алгоритм SCP в QGis для преобразования растра в вектор.

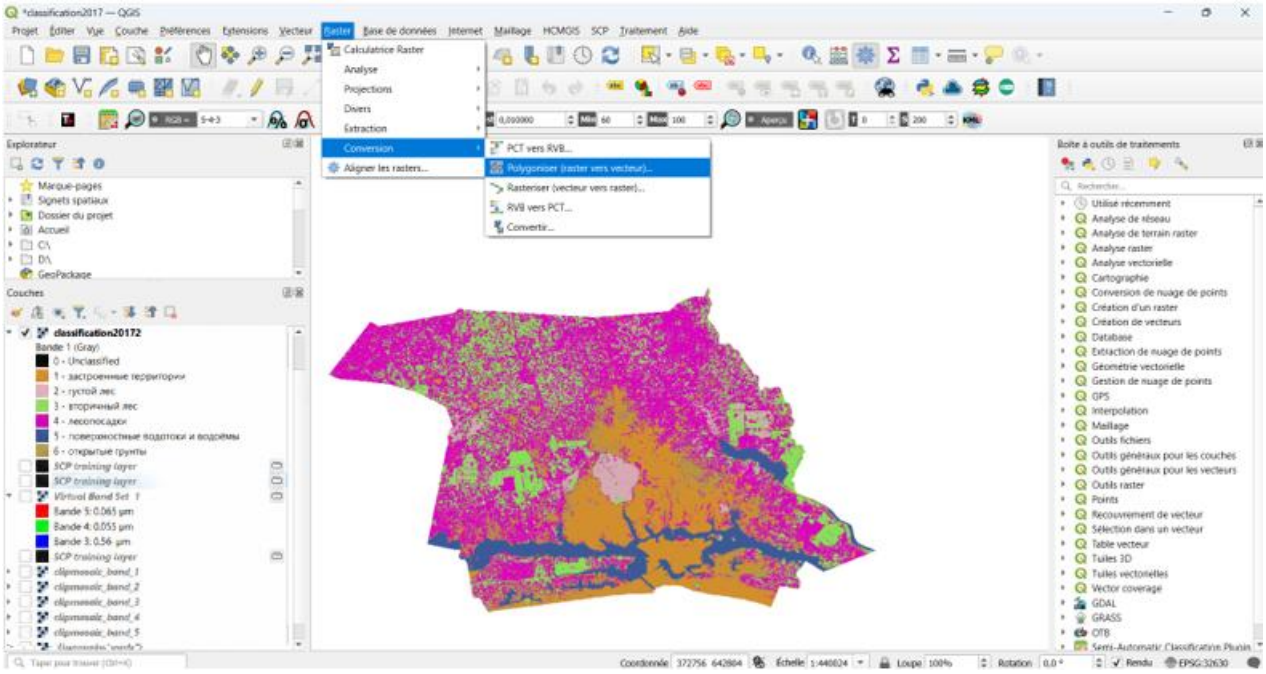


Рисунок 35 – Преобразование растра в вектор в QGIS

3.4 Анализ результатов автоматизированного дешифрирования землепользования

3.4.1 Анализ результатов классификации многозональных изображений

Классификация изображений Landsat, сделанная на основе композиции каналов 7-6-4, 5-4-3, 6-5-4, 6-4-2 и 4-3-2, позволила определить и детектировать шесть основных типов землепользования – застроенные территории, густые леса, вторичные леса, лесопосадки, поверхностные водотоки и водоёмы, и открытые грунты.

Результаты классификации были оценены с помощью матриц ошибок, представленных на рисунках 39, 40 и 41 путем расчета общей точности классификации и коэффициента каппа. На этих рисунках значения, указанные на диагонали, соответствуют проценту правильно классифицированных пикселей для каждого типа землепользования, в то время как значения, расположенные вне диагонали, представляют ошибки классификации, то есть пиксели, отнесенные к неверному классу изображения земной поверхности.

Результаты классификации землепользования представлены на рисунках 36, 37 и 38 матрица ошибок представлена на рисунках 39, 40 и 41.

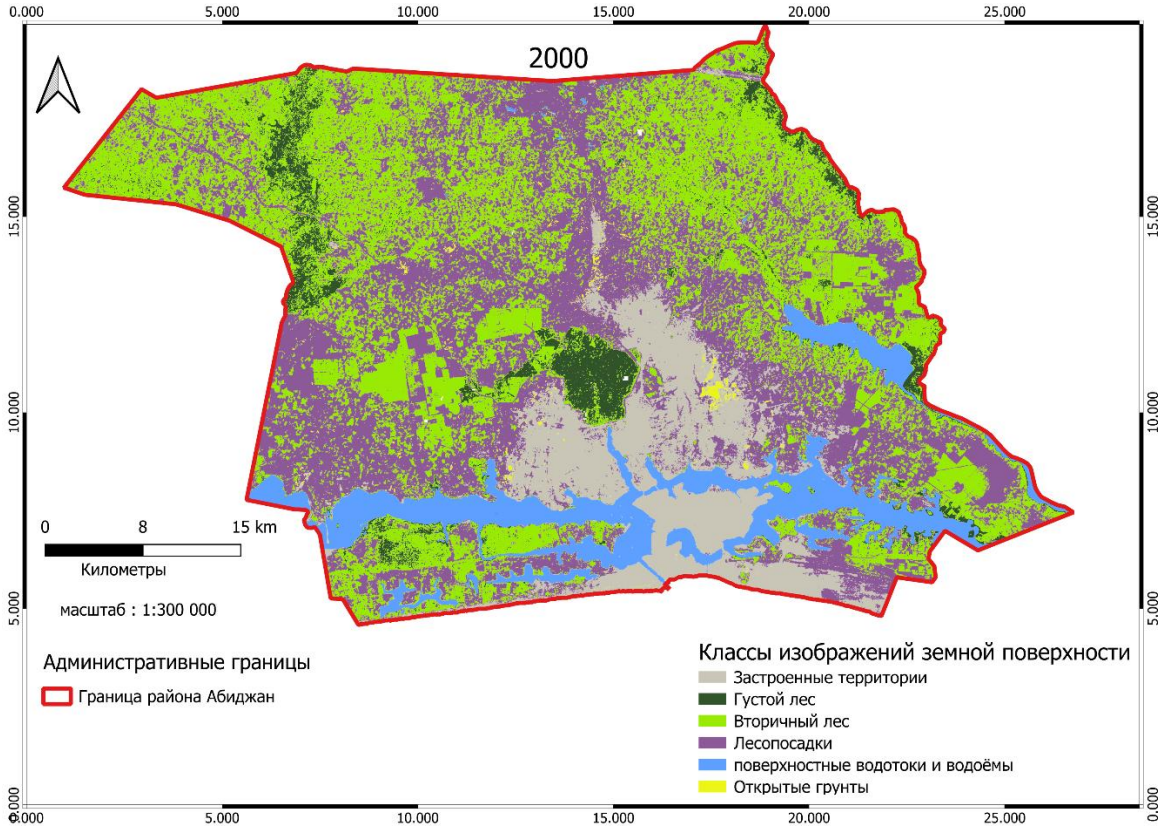


Рисунок 36 – Карта-схема землепользования г. Абиджан за 2000 год

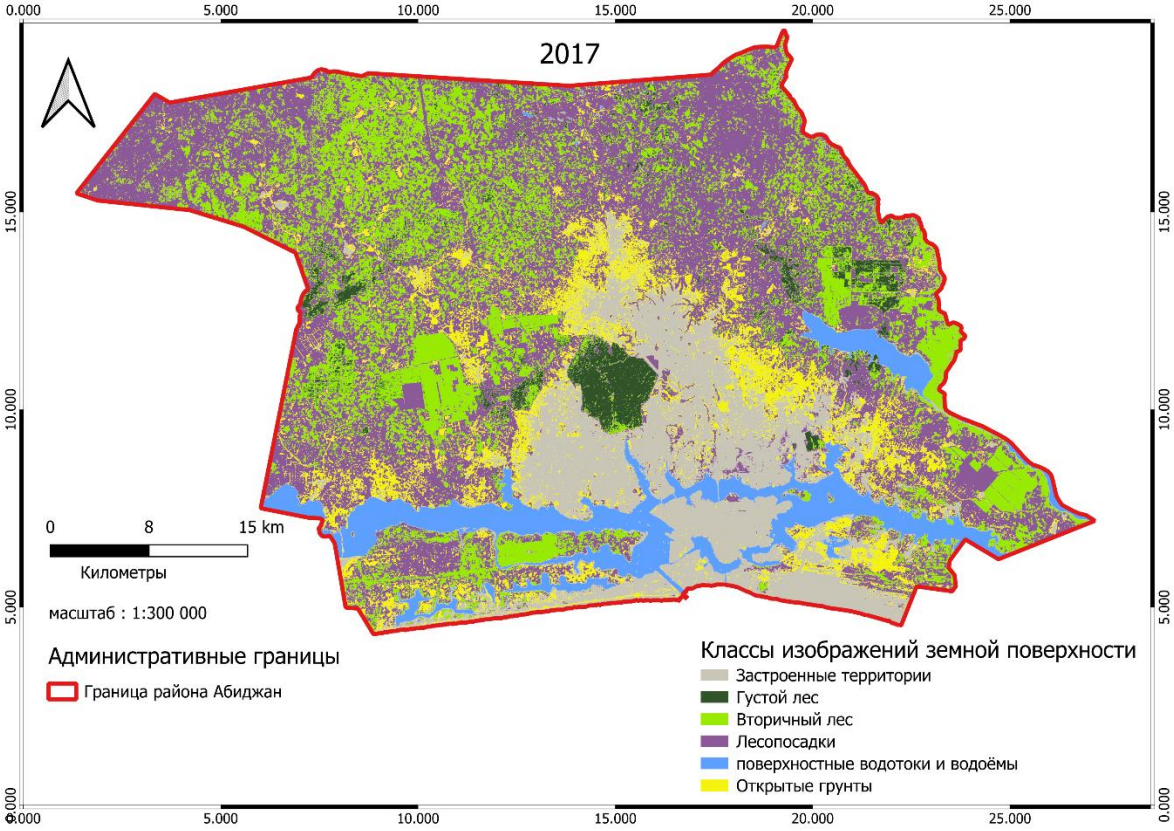


Рисунок 37 – Карта-схема землепользования г. Абиджан за 2017 год

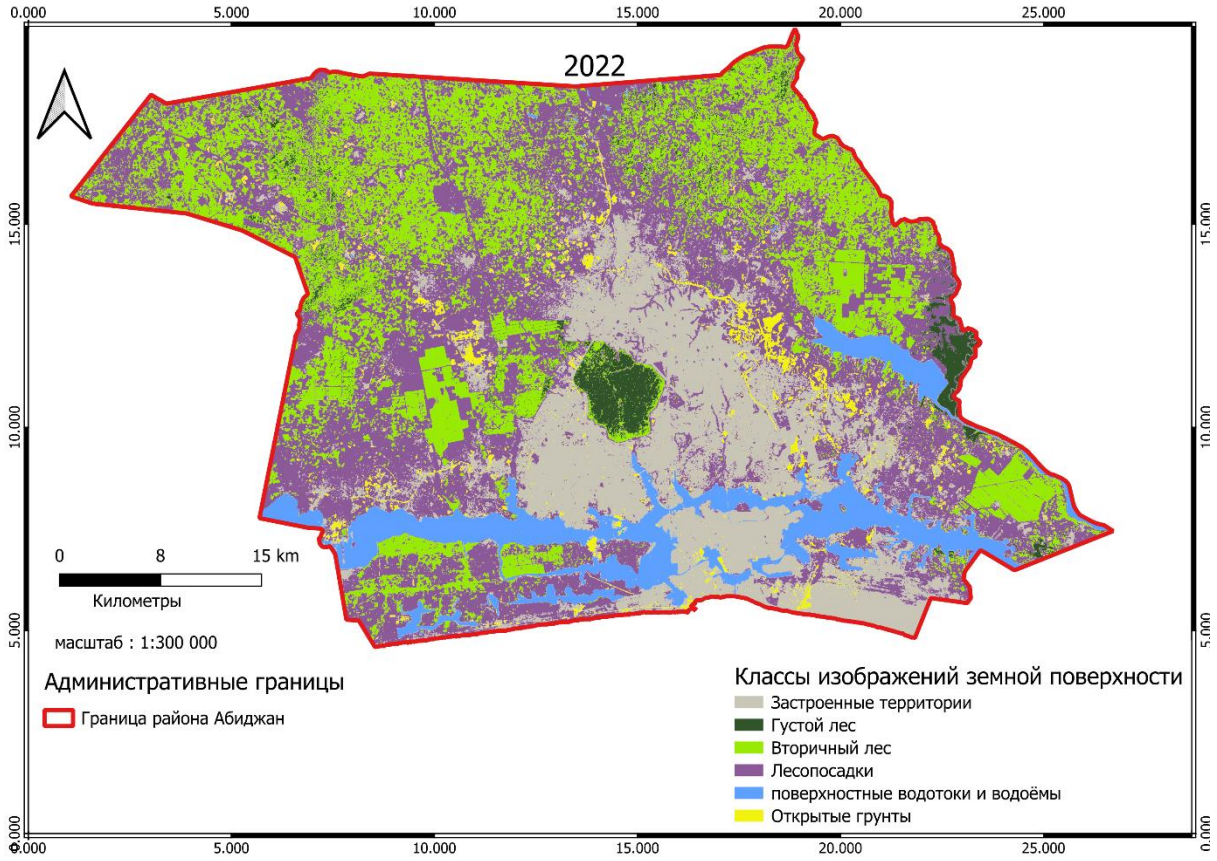


Рисунок 38 – Карта-схема землепользования г. Абиджан за 2022 год

ERROR MATRIX [pixel count]

	> Reference						
V_Classified	1	2	3	4	5	6	Total
1	770	0	0	0	2	0	772
2	0	1292	81	2	31	0	1406
3	0	79	978	11	21	0	1089
4	1	0	4	373	1	0	379
5	0	0	0	0	8172	0	8172
6	11	0	0	2	0	55	68
Total	782	1371	1063	388	8227	55	11886

AREA BASED ERROR MATRIX

	> Reference							
V_Classified	1	2	3	4	5	6	Area	Wi
1	0.1165	0	0	0	0.0003	0	245919600	0.1168
2	0	0.0521	0.0033	0.0001	0.0013	0	119496600	0.0567
3	0	0.0273	0.3383	0.0038	0.0073	0	793375200	0.3767
4	0.0009	0	0.0038	0.3503	0.0009	0	749650500	0.3560
5	0	0	0	0	0.0878	0	184821300	0.0878
6	0.0010	0	0	0.0002	0	0.0049	12710700	0.0060
Total	0.1184	0.0795	0.3454	0.3544	0.0975	0.0049	2105973900	0
Estimated area	249316614.89	167361993.92	727303862.02	746340398.02	205370317.90	10280713.24	2105973900	
SE	0.0010	0.0030	0.0039	0.0026	0.0019	0.0003		
SE area	2107610.44	6299329.96	8308753.19	5388106.76	3908368.57	610627.24		
95% CI area	4130916.46	12346686.73	16285156.25	10560689.24	7660402.39	1196829.39		
PA [%]	98.3819	65.6109	97.9656	98.8534	89.9942	100.0000		
UA [%]	99.7409	91.8919	89.8072	98.4169	100.0000	80.8824		
Kappa hat	0.9971	0.9119	0.8443	0.9755	1.0000	0.8079		

Overall accuracy [%] = 94.9909
Kappa hat classification = 0.9301

Area unit = metre^2
SE = standard error
CI = confidence interval
PA = producer's accuracy
UA = user's accuracy

Рисунок 39 – Матрицы ошибок классификации изображения города Абиджан в 2000 году

ERROR MATRIX [pixel count]

	> Reference						
V_Classified	1	2	3	4	5	6	Total
1	421	0	0	3	46	0	470
2	0	1277	93	0	0	0	1370
3	0	32	931	25	0	0	988
4	0	0	16	322	0	4	342
5	0	0	0	0	6194	0	6194
6	2	0	0	2	0	98	102
Total	423	1309	1040	352	6240	102	9466

AREA BASED ERROR MATRIX

	> Reference							
V_Classified	1	2	3	4	5	6	Area	Wi
1	0.1411	0	0	0.0010	0.0154	0	331905600	0.1576
2	0	0.0347	0.0025	0	0	0	78361200	0.0372
3	0	0.0067	0.1949	0.0052	0	0	435793500	0.2069
4	0	0	0.0197	0.3968	0	0.0049	887799600	0.4215
5	0	0	0	0	0.0785	0	165298500	0.0785
6	0.0019	0	0	0.0019	0	0.0946	207349200	0.0984
Total	0.1431	0.0414	0.2172	0.4050	0.0939	0.0995	2106507600	0
Estimated area	301368346.33	87156559.30	457505461.45	853092875.17	197782877.87	209601479.88	2106507600	
SE	0.0026	0.0012	0.0051	0.0057	0.0022	0.0031		
SE area	5487992.90	2512788.13	10668700.15	11903084.63	4553990.76	6538841.91		
95% CI area	10756466.09	4925064.74	20910652.30	23330045.88	8925821.88	12816130.14		
PA [%]	98.6509	83.8053	89.7588	97.9825	83.5757	95.0460		
UA [%]	89.5745	93.2117	94.2308	94.1520	100.0000	96.0784		
Kappa hat	0.8783	0.9292	0.9263	0.9017	1.0000	0.9565		

Overall accuracy [%] = 94.0606
Kappa hat classification = 0.9201

Area unit = metre^2
SE = standard error
CI = confidence interval
PA = producer's accuracy
UA = user's accuracy

Рисунок 40 – Матрицы ошибок классификации изображения города Абиджан в 2017 году

ERROR MATRIX [pixel count]

	> Reference						
V_Classified	1	2	3	4	5	6	Total
1	1696	0	0	10	2	2	1710
2	0	1211	25	0	0	0	1236
3	0	34	1454	3	0	0	1491
4	12	0	18	724	1	0	755
5	0	0	0	0	3517	0	3517
6	16	0	0	8	0	171	195
Total	1724	1245	1497	745	3520	173	8904

AREA BASED ERROR MATRIX

	> Reference							
V_Classified	1	2	3	4	5	6	Area	Wi
1	0.2048	0	0	0.0012	0.0002	0.0002	435065400	0.2065
2	0	0.0298	0.0006	0	0	0	64016100	0.0304
3	0	0.0056	0.2414	0.0005	0	0	521379900	0.2475
4	0.0065	0	0.0098	0.3943	0.0005	0	866091600	0.4112
5	0	0	0	0	0.0804	0	169371000	0.0804
6	0.0020	0	0	0.0010	0	0.0211	50583600	0.0240
Total	0.2133	0.0354	0.2518	0.3970	0.0812	0.0213	2106507600	0
Estimated area	449419604.59	74610556.05	530384931.28	836198743.89	171026989.61	44866774.57	2106507600	
SE	0.0020	0.0010	0.0025	0.0030	0.0006	0.0006		
SE area	4177746.20	2032530.47	5256759.88	6379652.77	1202214.84	1246147		
95% CI area	8188382.56	3983759.72	10303249.36	12504119.43	2356341.08	2442448.12		
PA [%]	96.0135	84.0649	95.8627	99.3221	99.0317	98.8659		
UA [%]	99.1813	97.9773	97.5184	95.8940	100.0000	87.6923		
Kappa hat	0.9896	0.9790	0.9668	0.9319	1.0000	0.8742		

Overall accuracy [%] = 97.1715
Kappa hat classification = 0.9608

Area unit = metre^2
SE = standard error
CI = confidence interval
PA = producer's accuracy
UA = user's accuracy

Рисунок 41 – Матрицы ошибок классификации изображения города Абиджан в 2022 году

Анализ матриц ошибок результатов классификации для изображений 2000, 2017 и 2022 годов показывает, что результаты классификации 2000 и 2017 годов были менее удовлетворительны, чем результаты, полученные в 2022 году. Так, значения индексов пикселей, правильно отнесенных к различным классам изображений земной поверхности в 2000 и 2017 годах, показывают общую

точность 94,99% и статистический коэффициент Каппа-Коэна 0,93 для 2000 года, а для 2017 года общая точность составляет 94,06%, а статистический коэффициент Каппа-Коэна 0,92, что ниже, чем результаты, полученные в 2022 году.

Качество изображений, использованных в 2000 и 2017 годах, вероятно, является причиной таких низких результатов, поскольку это были мозаичные изображения, что могло привести к путанице в некоторых классах и ошибкам классификации. Изображение 2022 года, напротив, было лучшего качества, что позволило получить весьма удовлетворительные результаты классификации. Фактически, значения индекса для пикселей, правильно отнесенных к классам, указывают на общую точность 97,17% и статистический коэффициент Каппа-Коэна 0,96.

Важно отметить, что общая точность — это общее количество пикселей, правильно отнесенных ко всем классам признаков. Таким образом, чем выше общая точность, тем точнее и надежнее результаты классификации.

3.5 Оценка динамики землепользования

3.5.1 Анализ землепользования в Абиджане за 2000, 2017 и 2022 гг.

Анализ изменений за весь период исследования проводился путем сопоставления площадных данных с результатами классификации. Матрица обнаружения изменений была создана путем сравнения классификаций между тремя датами. Этот метод позволял получить общее представление об изменениях, происходивших на изучаемой территории. Сравнивая площади между тремя датами, можно было обнаружить значительные изменения, которые произошли с течением времени. Этот анализ помог определить различия на земной поверхности, в частности изменения, связанные с землепользованием, ростом городов и обезлесением. Распределение площадей типов землепользования на исследуемой территории в 2000, 2017 и 2022 годах представлено в таблице 3.4 и на рисунке 42.

Таблица 3.4 – Распределение площадей типов землепользования в 2000-2022 гг.

типы землепользования	Площадь 2000		Площадь 2017		Площадь 2022	
	км^2	Процент (%)	км^2	Процент (%)	км^2	Процент (%)
Застроенные территории	246,04	11,68	332,07	15,76	435,28	21,62
Густой лес	119,55	5,67	77,82	3,72	64,05	3,18
Вторичный лес	793,72	37,67	435,98	20,69	521,60	25,89
Лесопосадки	749,99	35,60	888,18	42,15	866,47	43,02
Поверхностные водотоки и водоёмы	184,91	8,78	165,38	7,85	169,45	3,78
Открытые грунты	120,72	5,73	207,45	9,84	50,61	2,51
Итого	2 107,45	100	2 107,45	100	2 107,45	100

На основе данных из приведённой выше таблицы, была построена диаграмма динамики площадей различных типов землепользования 2000, 2017 и 2022 годов.

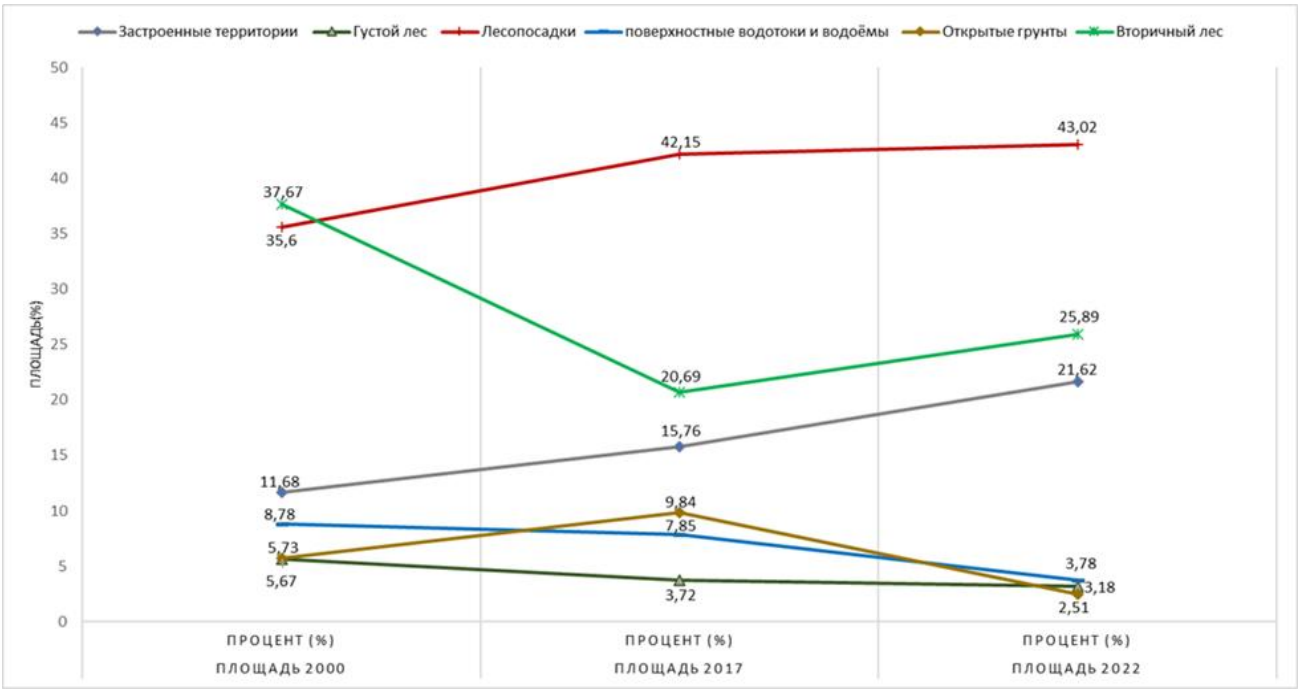


Рисунок 42 – Диаграмма динамики площадей различных типов землепользования 2000, 2017 и 2022 гг.

Анализ диаграммы показывает две тенденции. С одной стороны, значительно уменьшилась площадь вторичных лесов (с 37,67% до 25,89%), поверхностных водотоков и водоёмов (с 8,78% до 3,78%), незначительно снизился густой лес (с 5,67% до 3,18%) и открытые грунты (с 5,73% до 2,51%). С другой стороны, увеличилось количество застроенных территорий (с 11,68% до 21,62%) и лесопосадки (с 35,60% до 43,02%).

Значительное уменьшение площади вторичных лесов, поверхностных водотоков и водоёмов и незначительное снижение густого леса и открытых грунтов, наблюдаемое на диаграмме, может свидетельствовать об ухудшении состояния окружающей среды и усилении урбанизации исследуемой территории. Действительно, увеличение площади застроенных территорий и лесопосадки указывает на расширение городской инфраструктуры и экономической деятельности.

3.5.2 Оценка динамики землепользования Абиджана

Оценка динамики землепользования с 2000 по 2022 год представлена в таблице 3.5. Она суммирует различные типы землепользования и уровни изменения, которые являются следующими: Площадь изменения ($S_Δ$) и среднегодовая скорость пространственного расширения (V).

Таблица 3.5 – Оценка динамики землепользования с 2000 по 2022 гг.

Типы землепользования	Площадь изменения ($S_Δ$) (%)	Среднегодовая скорость пространственного расширения (V) (%)/год
Застроенные территории	+76,91	+2,41
Густой лес	-46,43	-2,64
Вторичный лес	-34,27	-1,90
Лесопосадки	+15,53	+0,63
Поверхностные водотоки и водоёмы	-8,36	-0,39
Открытые грунты	-58,08	-4,14

Анализ таблицы показывает, что площадь четырёх из шести выделенных типов землепользования сократилась. К этим типам землепользования относятся густой лес, вторичный лес, поверхностные водотоки и водоёмы, и открытые

грунты, в которых за этот период зафиксировано снижение: густой лес на 2,64%, вторичный лес - 1,90%, поверхностные водотоки и водоёмы - 0,39% и 4,14% - открытые грунты соответственно. Кроме того, значительно увеличились площади двух других типов землепользования, а именно застроенные территории (2,41%) и лесопосадки (0,63%).

Действительно, это увеличение площади застроенных территорий наносит ущерб лесам и открытым грунтам.

3.6 Результаты дешифрирования многозональных изображений с использованием спектральных индексов

3.6.1 Изменения площади застроенных территориях

Для оценки расширения городов и более детального анализа изменений в застроенных городских территориях мы применили метод, основанный на спектральных индексах. Этот метод основан на комбинации двух спектральных индексов, NDBI и NDVI, которые были реализованы в интерфейсе растрового калькулятора QGIS рисунок 43.

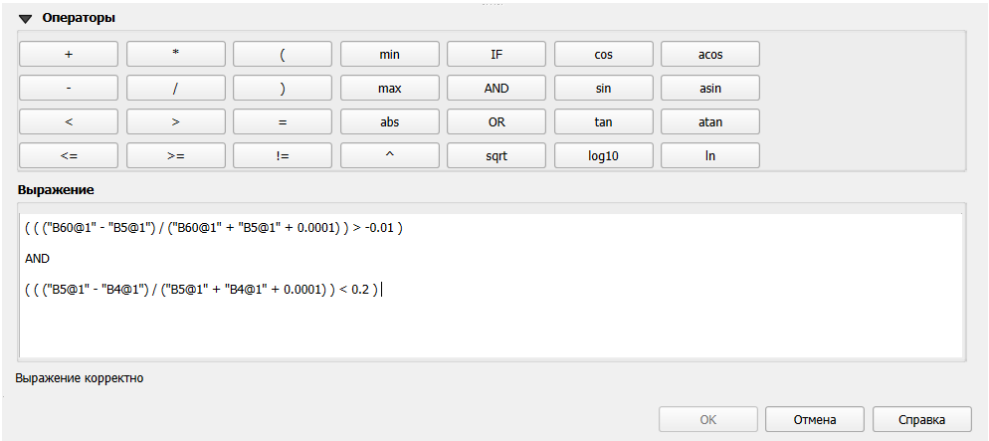


Рисунок 43– Интерфейс растрового калькулятора NDBI – NDVI в QGIS

При расчете спектральных индексов в программах обработки изображений, таких как QGIS, при определенных условиях, таких как наличие теневых зон, глубокой воды или радиометрического шума, часто оказывается, что сумма двух полос (NIR + RED = 0), поэтому для решения этой проблемы в знаменатель добавляется положительная константа 0,0001. Эта константа

позволяет избежать деления на ноль, что не оказывает существенного влияния на конечный результат, а также гарантирует стабильность численного расчета по всем пикселям изображения.

Критерий (>-0,01) отбирает только значения спектрального индекса NDBI, относительно близкие к 0, которые относятся не к растительности, а к городским территориям. Критерий (<0,2) исключает все растительные территории.

После применения формулы в QGIS мы получаем изображения, разделенные на две отдельные категории: застроенные территории отсутствие застроенных территорий. Как видно из рисунков 44, 45, 46 и 47 и на которых показана динамика застроенных территорий в 2000, 2017, 2022 годах, а также таблица 3.6 наличие и отсутствие застроенных территорий и таблица 3.7 изменение площади застроенных территорий.

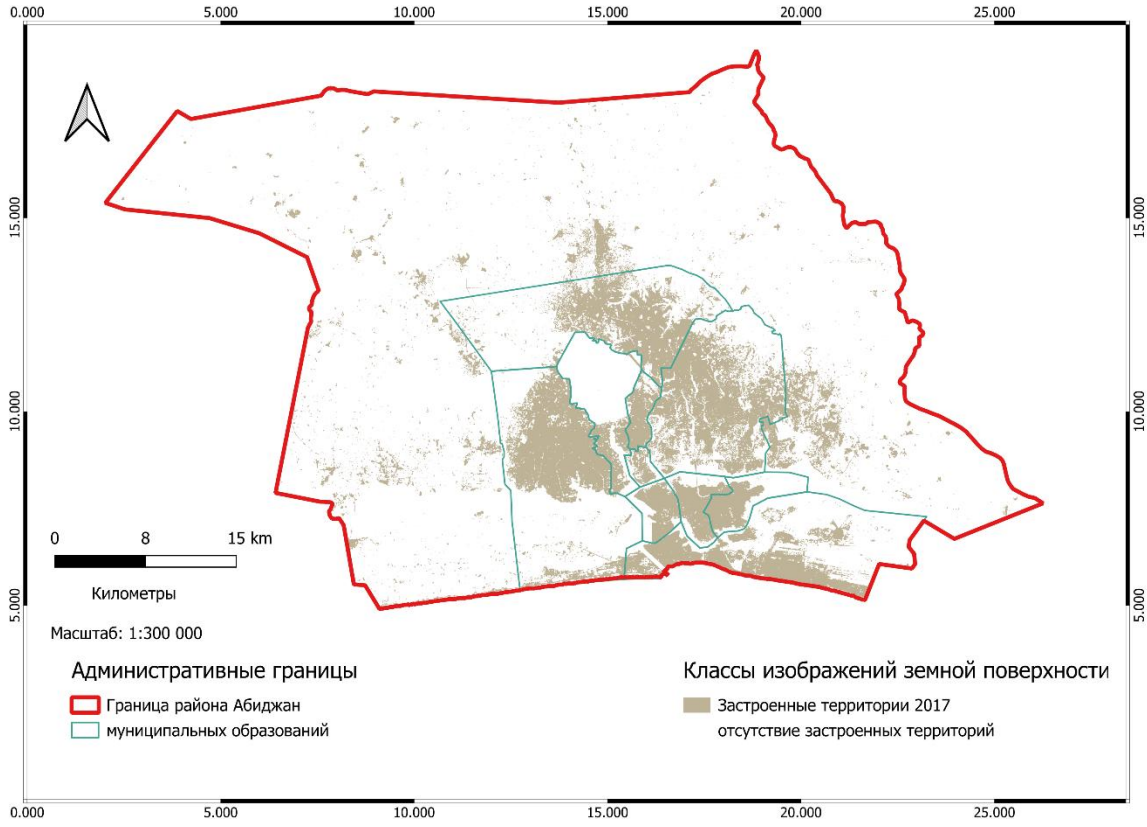


Рисунок 44 –Пространственное распределение застроенных территорий, 2000 г.

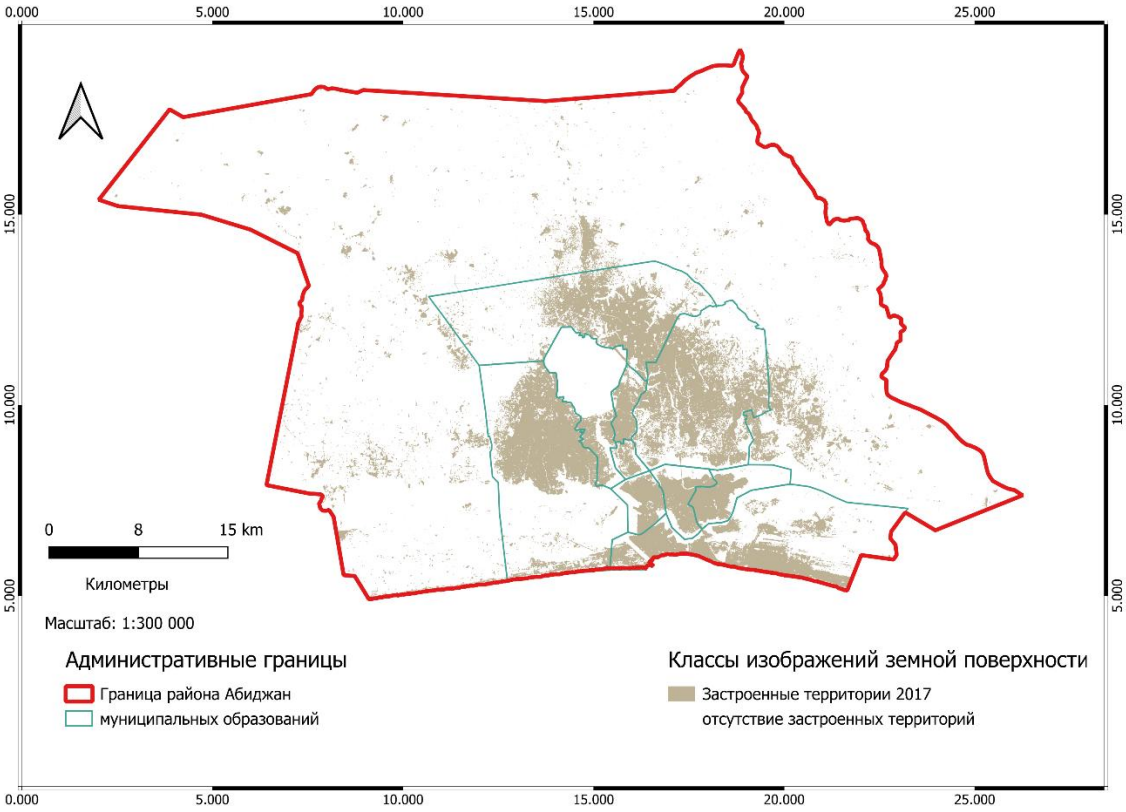


Рисунок 45 –Пространственное распределение застроенных территорий, 2017 г.

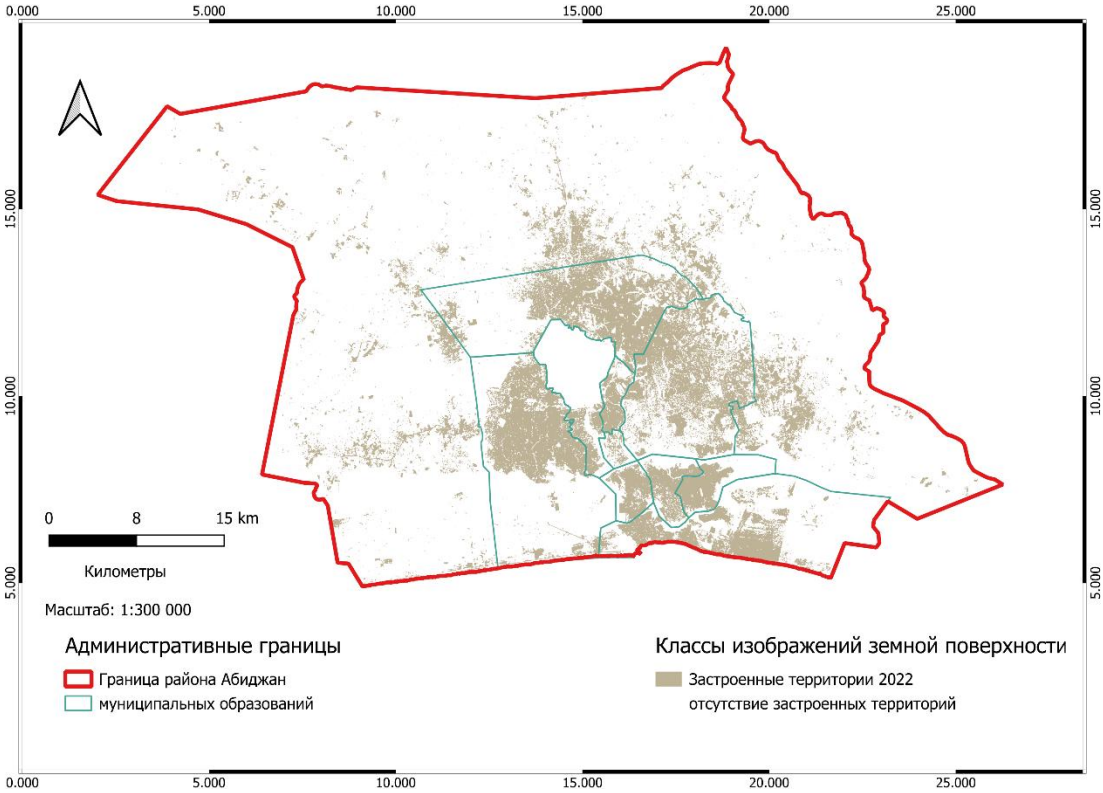


Рисунок 46 –Пространственное распределение застроенных территорий, 2022 г.

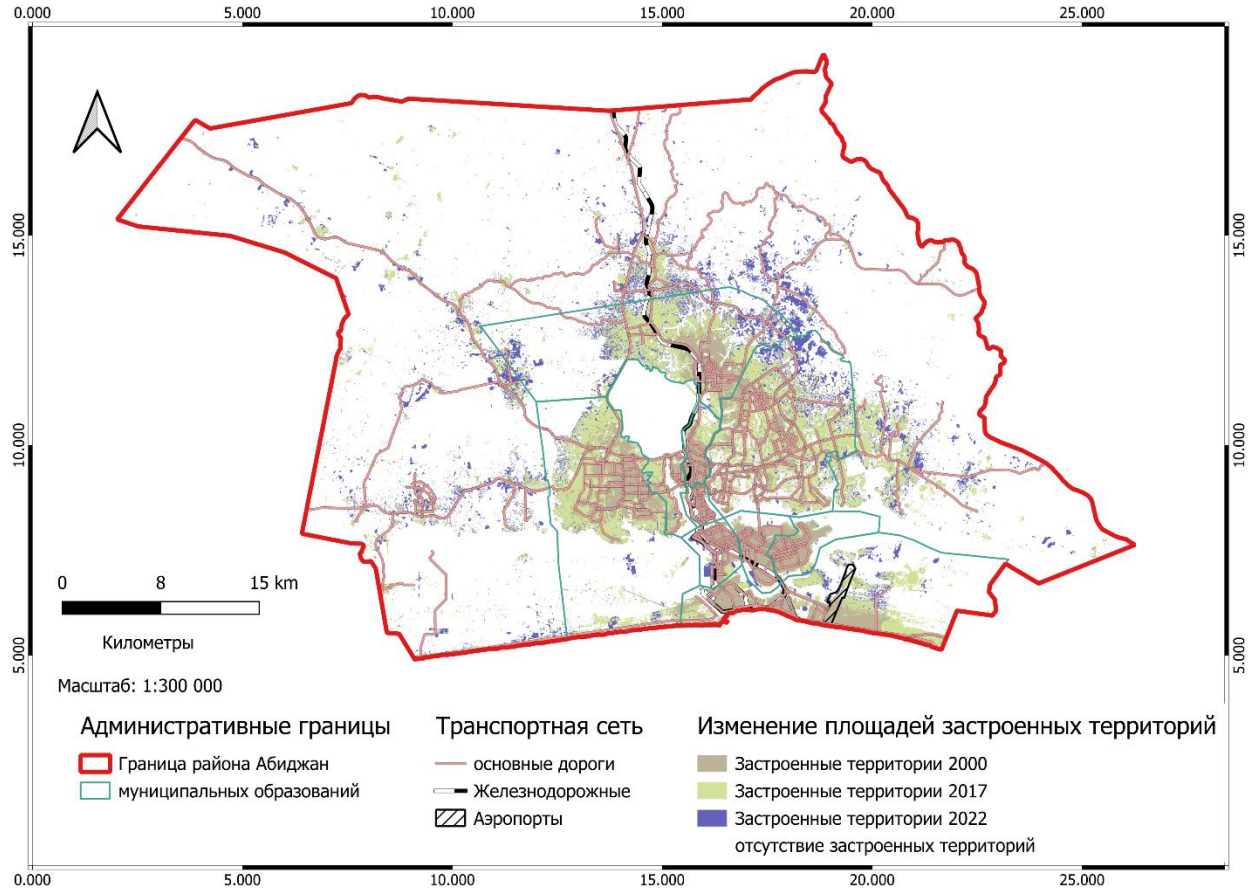


Рисунок 47 – Распространение застроенных территорий в 2000, 2017 и 2022 гг.

Таблица 3.6 – Наличие и отсутствие застроенных территорий

Год	Застроенные территории ($км^2$)	Отсутствие застроенных территорий ($км^2$)	Общая площадь ($км^2$)
2000	100,71	2006,75	2107,45
2017	332,06	1775,39	2107,45
2022	342,94	1764,54	2107,45

Таблица 3.7 – Изменение площади застроенных территорий

Период	Площадь застроенных территорий, приобретенных ($км^2$)	Изменение площади (%)
с 2000 по 2017 год	+368,15	+ 365,78
с 2017 по 2022 год	+112,52	+24
с 2000 по 2022 год	+480,71	+477,36

Анализ результатов, полученных с помощью комбинации NDBI и NDVI, позволил нам определить застроенные территории за разные периоды, а именно

за 2000, 2017 и 2022 годы. Результаты показывают, что застроенные территории меняются.

Площадь застроенных территорий в 2000 году составляла 100,71 км^2, или около 4,99% от площади нашего исследования. В 2017 году площадь застройки достигла 468,86 км^2, увеличившись за 17 лет на 368,15 км^2, что соответствует темпам роста 21,66 км^2 в год. Такой высокий показатель застроенных территорий обусловлен периодом ускоренной урбанизации, связанной с активным демографическим ростом, оттоком сельского населения и неконтролируемой урбанизацией.

Площадь застроенных территорий в период с 2017 по 2022 год увеличится до 581,42 км^2, что на 112,56 км^2 больше, чем за 5 лет.

Анализ изменения площади исследуемого района показывает постоянное уменьшение количества отсутствие застроенных территорий: в 2000 году площадь составляла 2006,75 км^2, к 2017 году она увеличится до 1638,59 км^2, а затем до 1526,03 км^2.

3.6.2 Изменения площади густого леса

В рамках нашего исследования для выявления изменений в густых лесах города Абиджана по снимкам Landsat была применена спектральная маска, полученная на основе NDVI и рассчитанная в растровом калькуляторе QGIS рисунок 36.

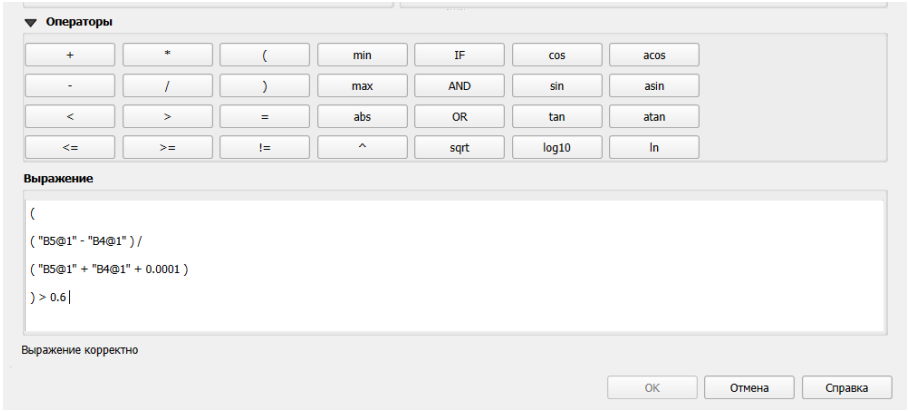


Рисунок 48– Интерфейс растрового калькулятора NDVI в QGIS

Чтобы избежать деления на ноль в зонах отражения, использовалась константа 0,0001. В нашем исследовании пороговое значение NDVI> 0,6

использовалось для разделения густых лесов и других классов землепользования. В научной литературе значения выше 0,6 чаще всего соответствуют здоровым густым лесам. Этот подход, примененный к снимкам Landsat, позволил нам получить бинарные изображения, которые затем были преобразованы в векторы, отличающие густые леса от отсутствия густых лесов, как мы можем видеть на рисунках 49, 50,51,52 и 53, а также выделить таблицы 3.8 и 3,9, показывающую динамику густых лесов, и таблицу, показывающую их изменение площадей за 17 лет.

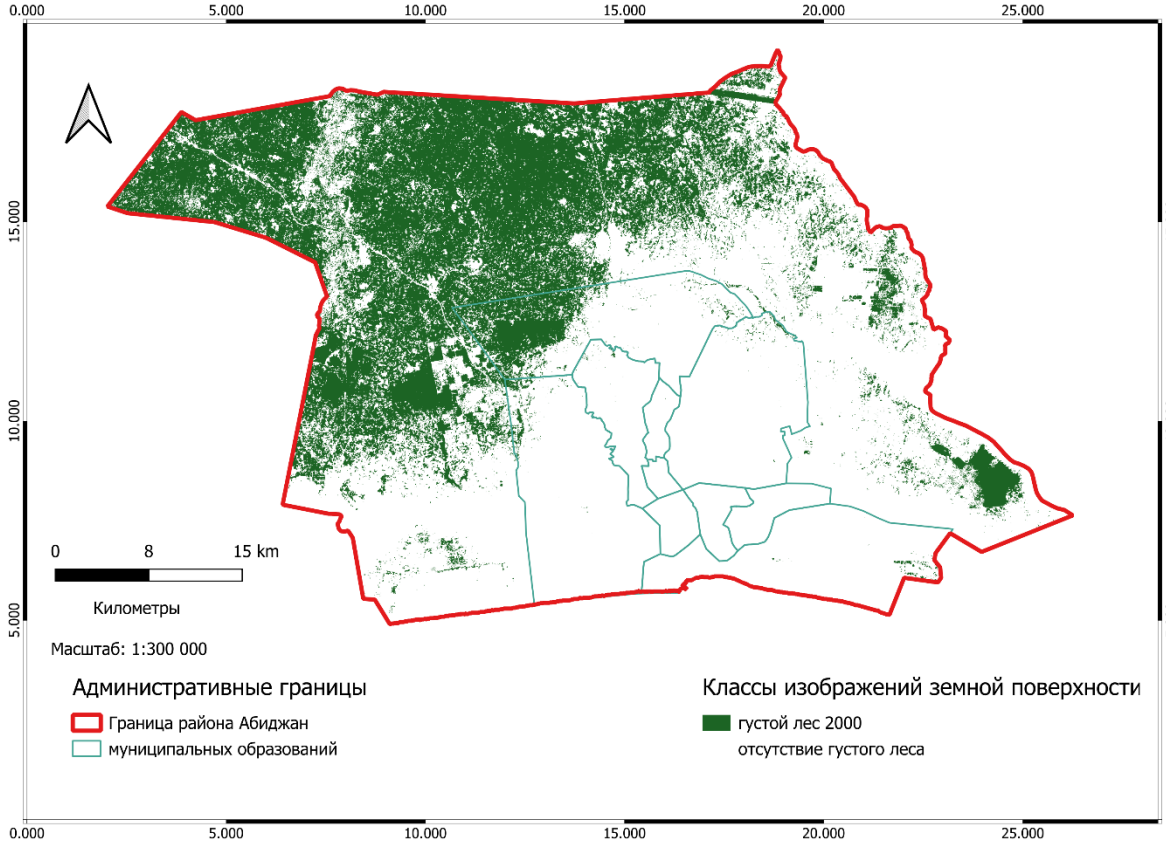


Рисунок 49 – Пространственное распределение густых лесов в 2000 г.

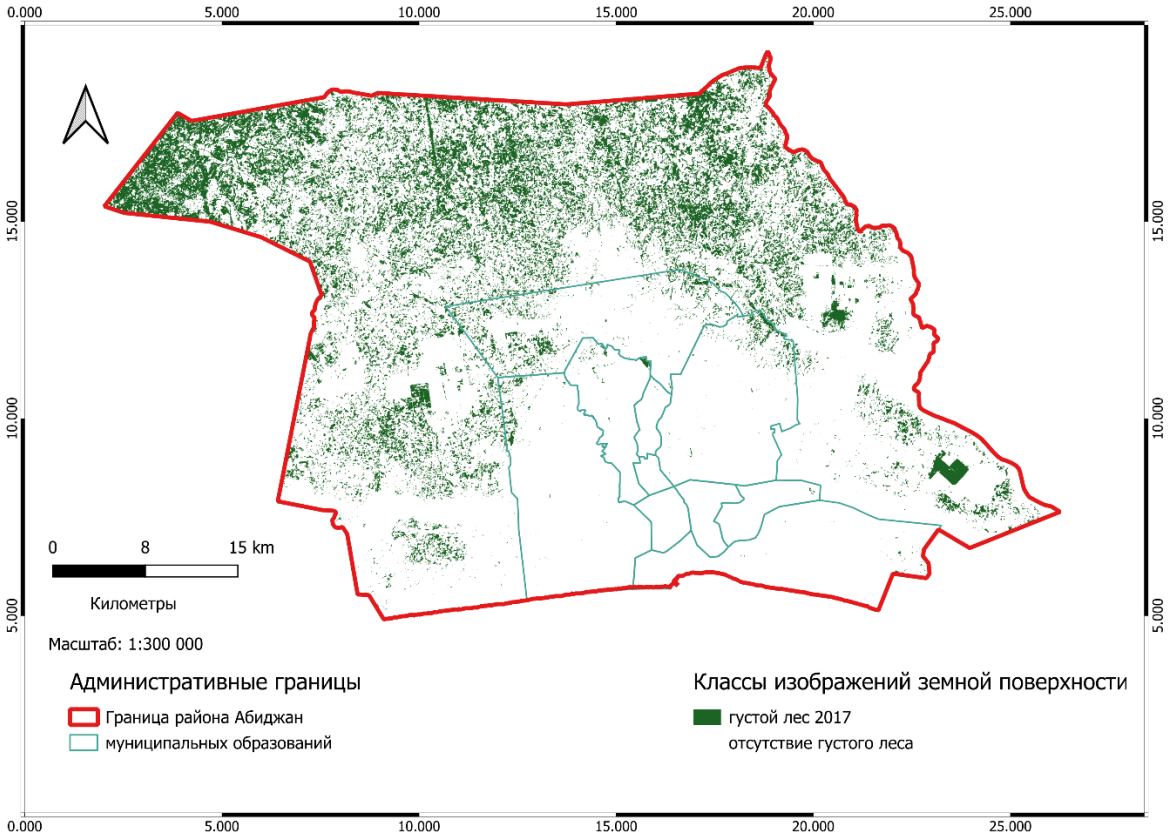


Рисунок 50 – Пространственное распределение густых лесов в 2017 г.

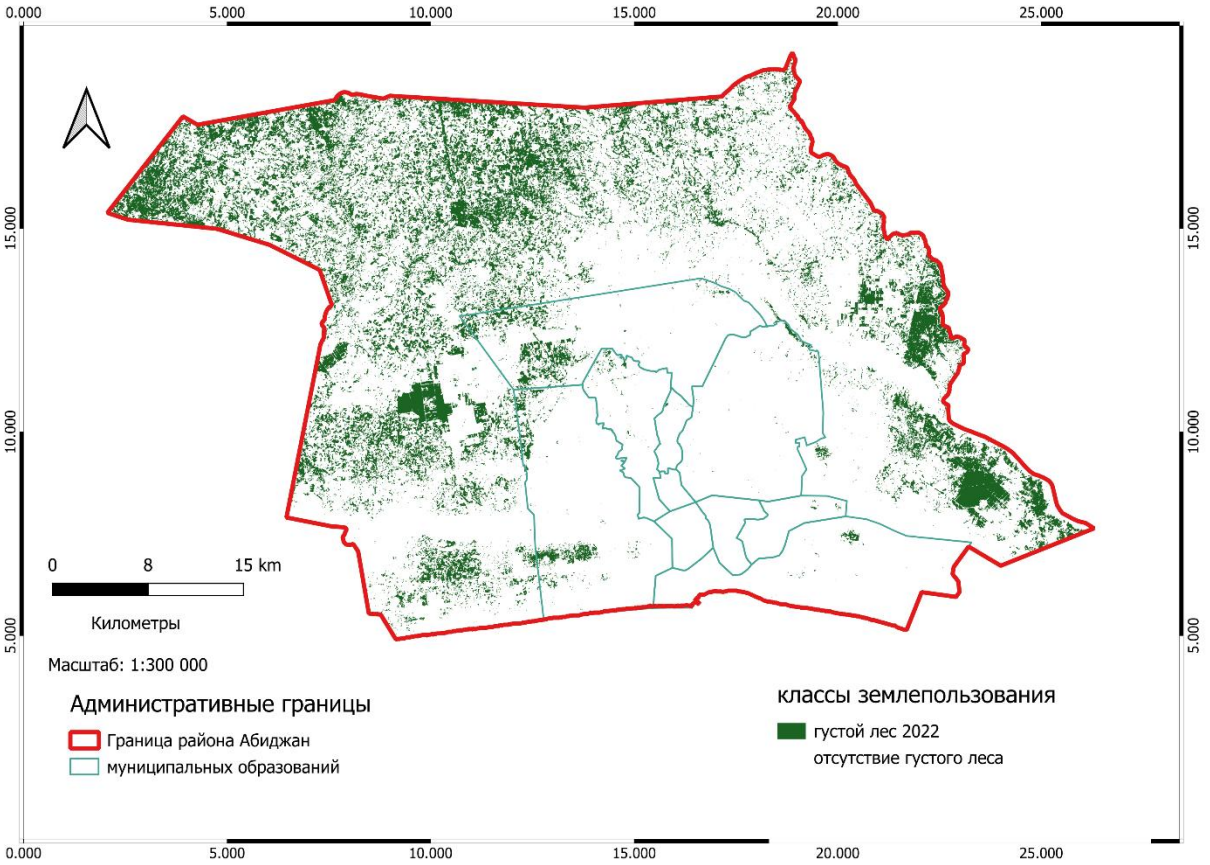


Рисунок 51 – Пространственное распределение густых лесов в 2022 г.

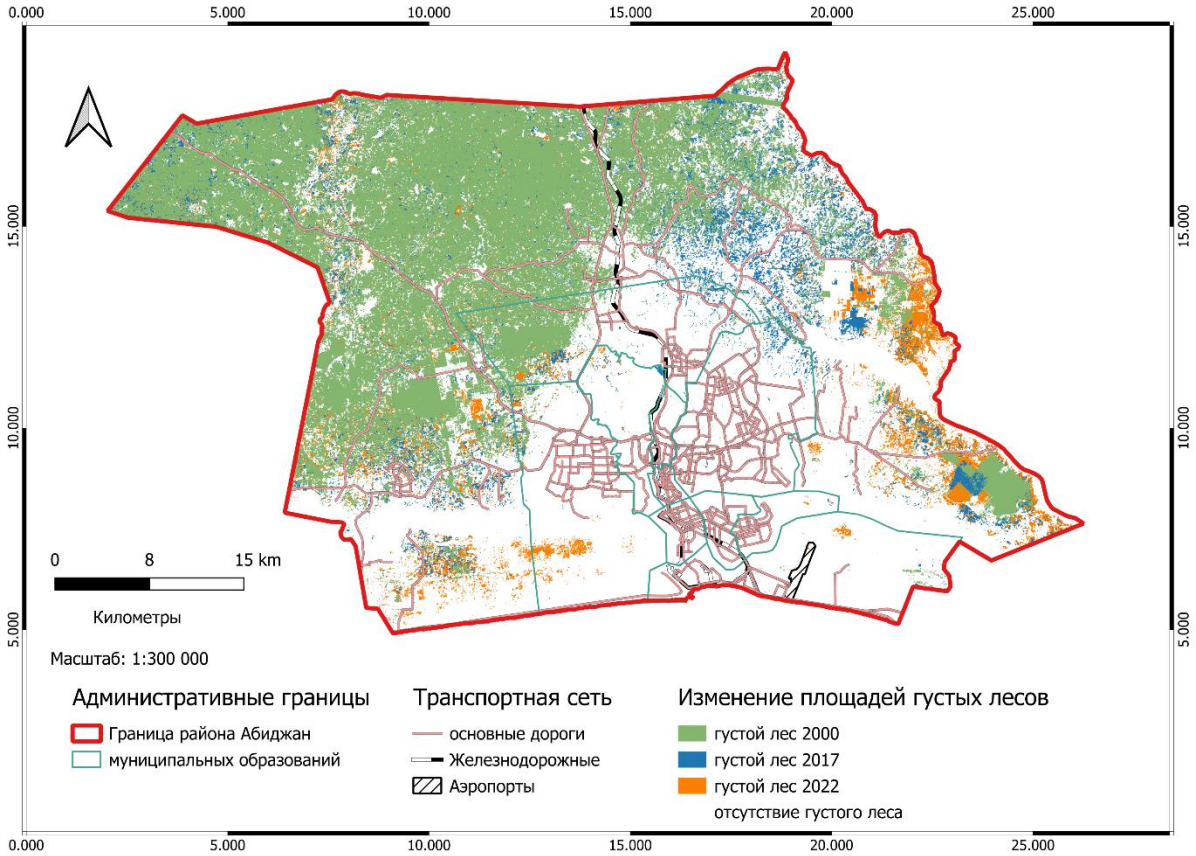


Рисунок 52 – Распространение густого леса в 2000, 2017 и 2022 гг.

Таблица 3.8 – Наличие и отсутствие густого леса

Год	Густой лес (км^2)	Отсутствие густого леса (км^2)	Общая площадь (км^2)
2000	588,88	1518,57	2107,45
2017	463,01	1654,44	2107,45
2022	438,04	1669,41	2107,45

Таблица 3.9 – Изменение площади густых лесов

Период	Площадь утраченного густого леса (км^2)	Изменение площади (%)
с 2000 по 2017 год	-125,87	-21,37
с 2017 по 2022 год	-24,97	-5,39
с 2000 по 2022 год	-150,84	-25,61

Хронологический анализ, основанный на результатах NDVI, показывает динамику преобразований на исследуемой территории в период с 2000 по 2022 год. В 2000 году площадь густых лесов оценивалась в 588,88 км2, что составляло около 29,19% от общей площади города Абиджана. В 2017 году произошло

значительное сокращение густых лесов, их площадь составила 463,01 км^{2,} что эквивалентно сокращению на 125,87 км^2 в год, или примерно 21,37% обезлесения за 17 лет. Это значительное сокращение густых лесов отражается в увеличении территорий отсутствия густых лесов, что, вероятно, связано с деятельностью человека.

В период с 2017 по 2022 год произойдет незначительное сокращение густых лесов - с 463,01 до 438,04 км2, то есть на 24,97 км^2 за 5 лет.

Анализ динамики густых лесов в течение трёх исследуемых периодов показывает их постоянное сокращение. Это явление объясняется сильным антропогенным воздействием на лесной покров.

3.6.3 Изменения площади вторичного леса

Для выявления вторичных лесов, которые обычно представляют собой растительные формации, восстанавливающиеся в результате деятельности человека или естественных нарушений. Мы использовали маску, полученную из NDVI, которая находится в диапазоне от 0,3 до 0,06 (рисунок 53).

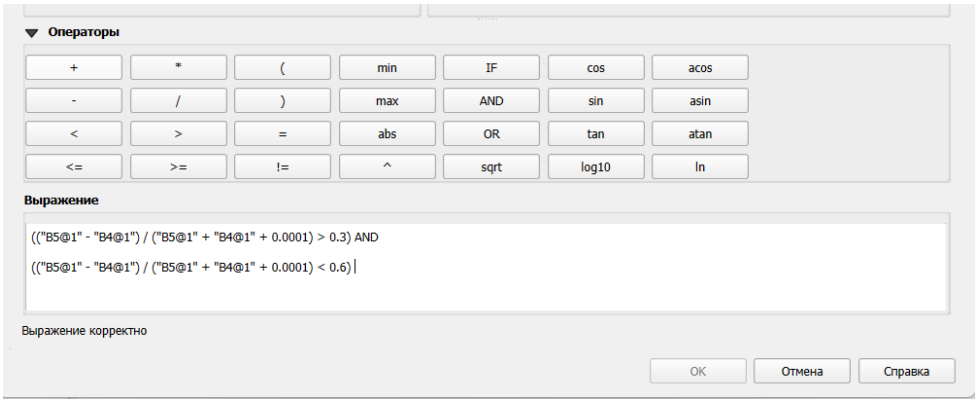


Рисунок 53 – Интерфейс растрового калькулятора NDVI в QGIS

В нашем исследовании мы объединили два условия, чтобы выбрать только менее плотные поверхности растительности, соответствующие вторичным лесам, при значениях NDVI между 0,3 и 0,6. Этот порог позволяет отделить вторичные леса от других типов растительного покрова, в частности от густых лесов с NDVI> 0,6, и при этом свести к минимуму путаницу с лесными насаждениями. Этот метод, примененный к снимкам Landsat, позволил создать

бинарные изображения, преобразованные в векторы, демаркирующие вторичные леса от отсутствия вторичных лесов (рисунки 54 - 57), а также оценить пространственное распределение вторичного леса и динамику изменения его площади за 17-летний период (таблицы 3.10 и 3.11), что свидетельствует о заметном сокращении площади вторичного леса.

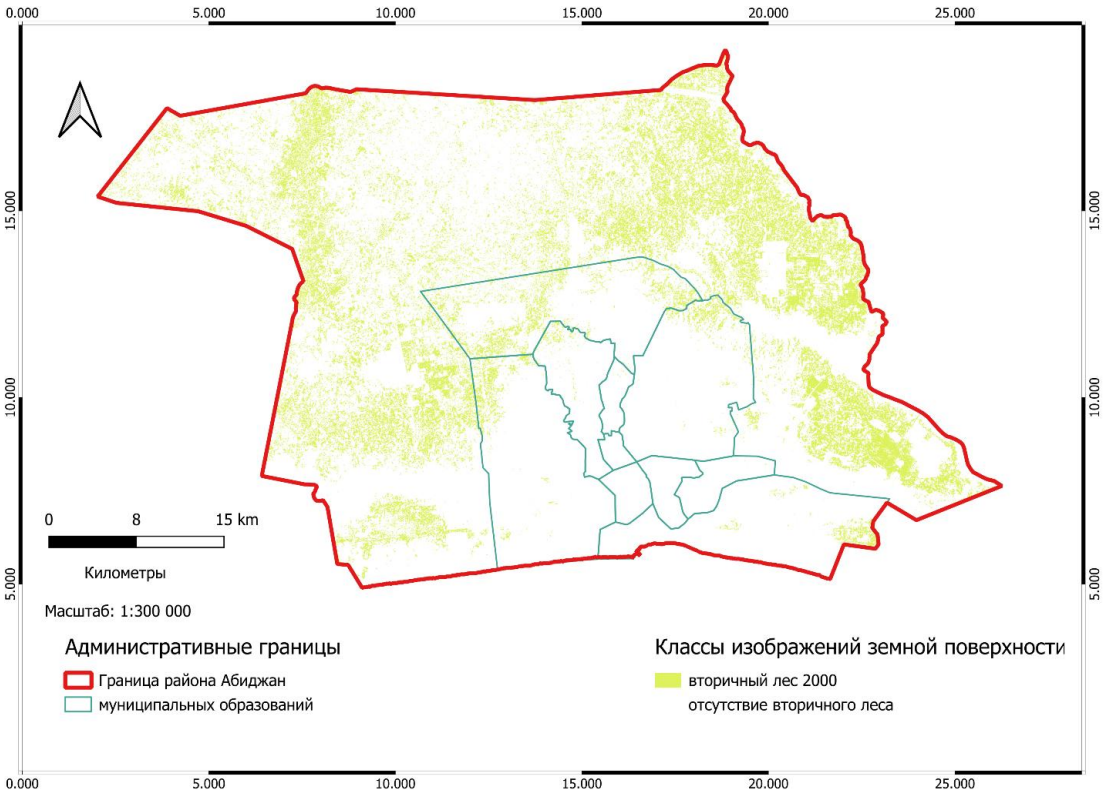


Рисунок 54 – Пространственное распределение вторичных лесов в 2000 г.

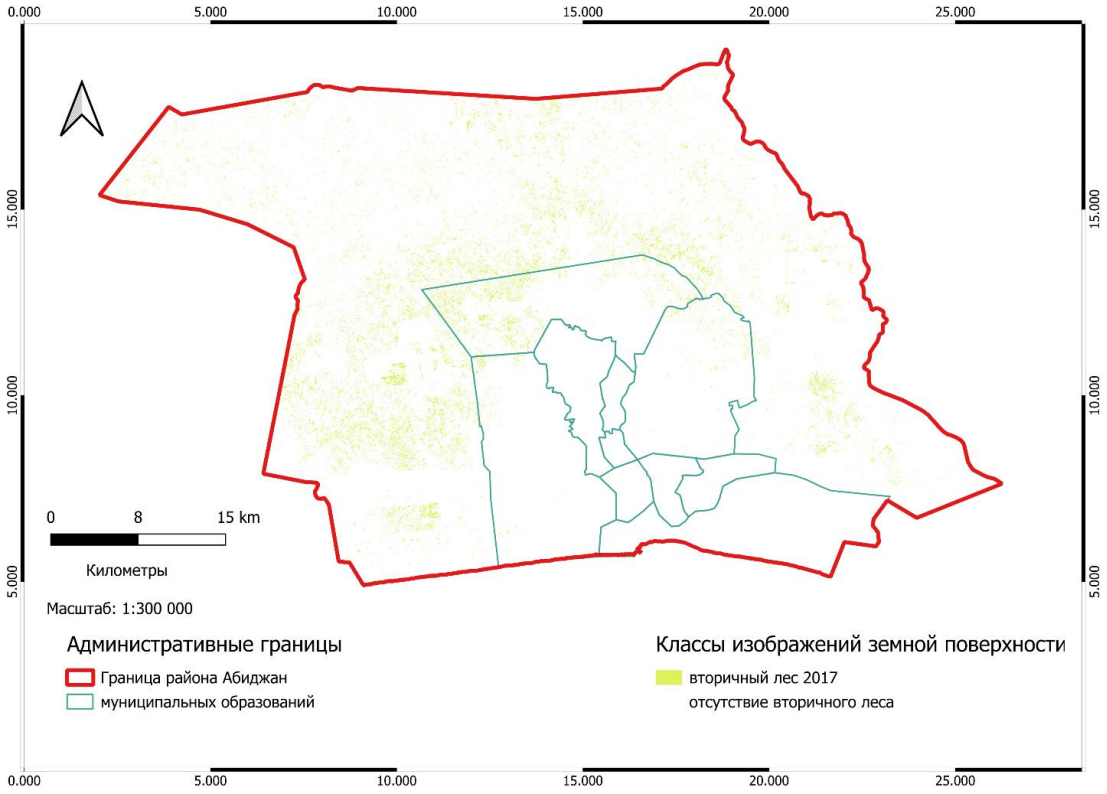


Рисунок 55 – Пространственное распределение вторичных лесов в 2017 г.

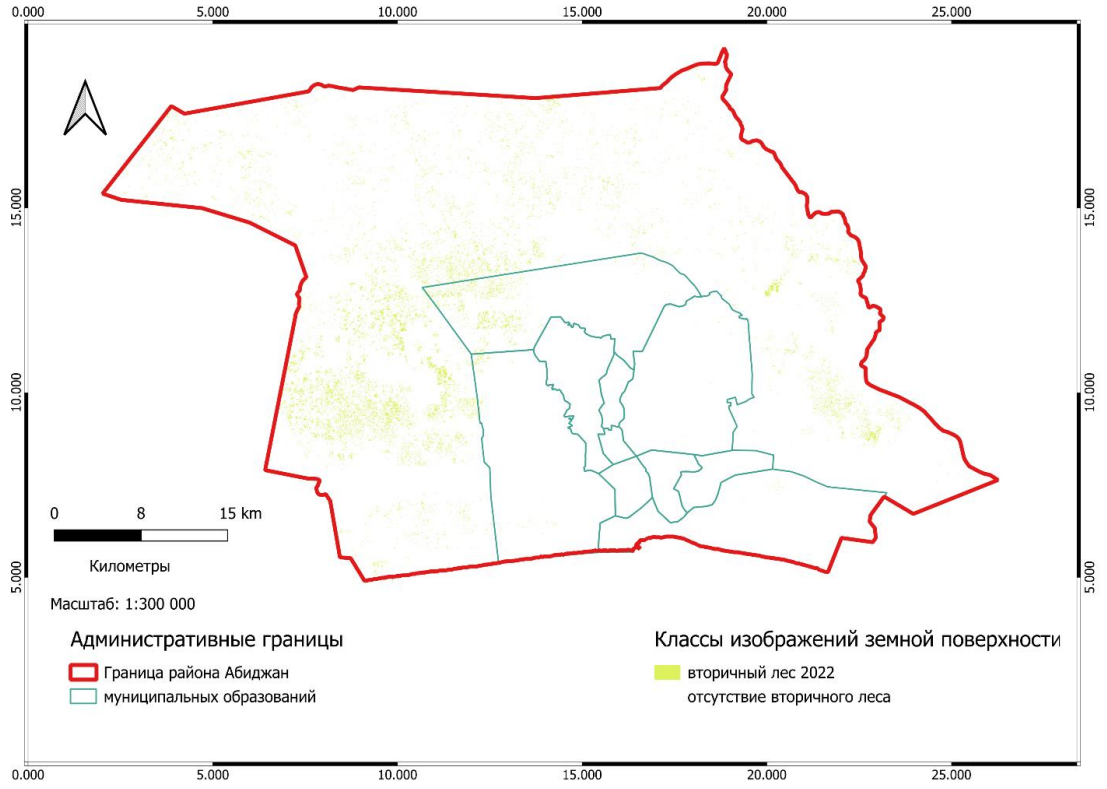


Рисунок 56 – Пространственное распределение вторичных лесов в 2022 г.

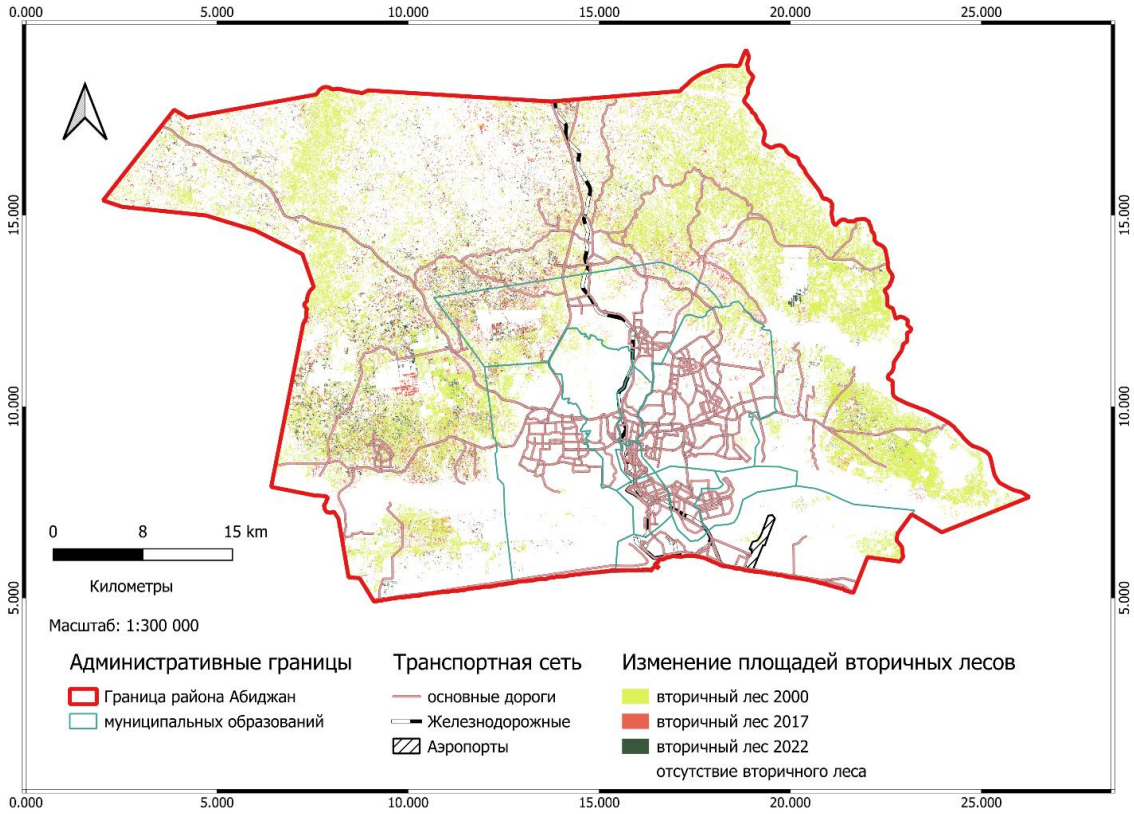


Рисунок 57 – Распространение вторичного леса в 2000, 2017, 2022 гг.

Таблица 3.10 – Наличие и отсутствие вторичного леса

Год	Вторичный лес ($км^2$)	Отсутствие вторичного леса ($км^2$)	Общая площадь ($км^2$)
2000	578,92	1528,53	2107,45
2017	501,73	1605,72	2107,45
2022	480,48	1626,97	2017,45

Таблица 3.11 – Изменение площади вторичных лесов

Период	Площадь утраченного вторичного леса ($км^2$)	Изменение площади (%)
с 2000 по 2017 год	-77,19	-13,33
с 2017 по 2022 год	-21,25	-4,23
с 2000 по 2022 год	-98,44	-17

Анализ данных мультиспектральной космической съемки свидетельствует о продолжающейся деградации вторичных лесов. Площадь вторичных лесов, составлявшая 578,92 $км^2$, или около 27,7%, в 2017 году сократилась до 501,73 $км^2$. Это соответствует сокращению площади вторичных лесов на 77,19 $км^2$ за 17

лет, что соответствует скорости потери 4,54 км^2 в год. За этой значительной потерей следует увеличение дефицита вторичных лесов, который вырос с 1 438,53 км^2 до 1465,72 км^2 в 2017 году. Этот рост нехватки вторичных лесов отражается в расширении сельскохозяйственных земель и территорий, используемых для человеческой деятельности.

В период с 2017 по 2022 год, напротив, произойдет более умеренное сокращение площади вторичных лесов на 21,25 км^2 или 4,25 км^2 в год, при этом сокращение площади вторичных лесов будет продолжаться, но умеренными темпами.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что наибольшая потеря вторичных лесов произошла в период с 2000 по 2017 год из-за разрастания городов и незапланированного роста населения, а также усиления давления на земли для пригородного сельского хозяйства.

3.6.4 Изменения площади лесопосадок

Для выявления лесопосадок на исследуемой территории использовались значения индекса SAVI в диапазоне от 0,1452 до 0,3984. Такой диапазон значений позволяет исключить только неплотную растительность, в частности сельскохозяйственные и агролесомелиоративные насаждения. Условие выделения данного класса выражается формулой, представленной на рисунке 58.

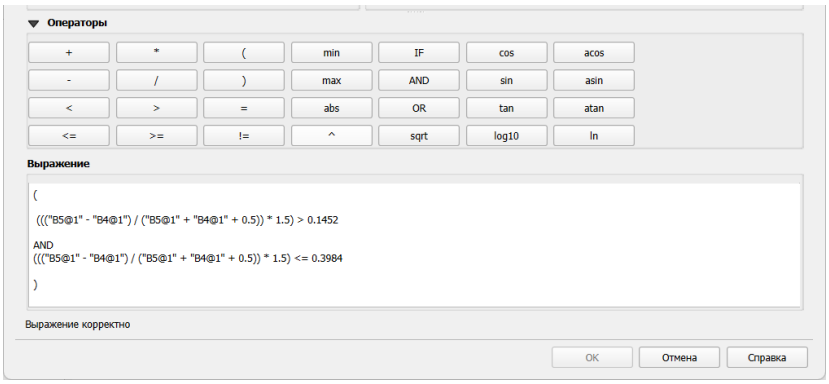


Рисунок 58 – Интерфейс растрового калькулятора SAVI в QGIS

Значения в этом диапазоне SAVI позволяют:

- SAVI <0,1 исключает голую почву или участки с низким растительным покровом;

- SAVI> 0,4 исключает густые леса;
- Диапазон значений индекса SAVI от 0,1452 до 0,3984 используется для выделения лесопосадок и сельскохозяйственных территорий.

Метод, примененный к снимкам Landsat, позволил оценить пространственно-временную динамику лесопосадок, представленную на рисунках 59–62 и в таблицах 3.12 и 3.13.

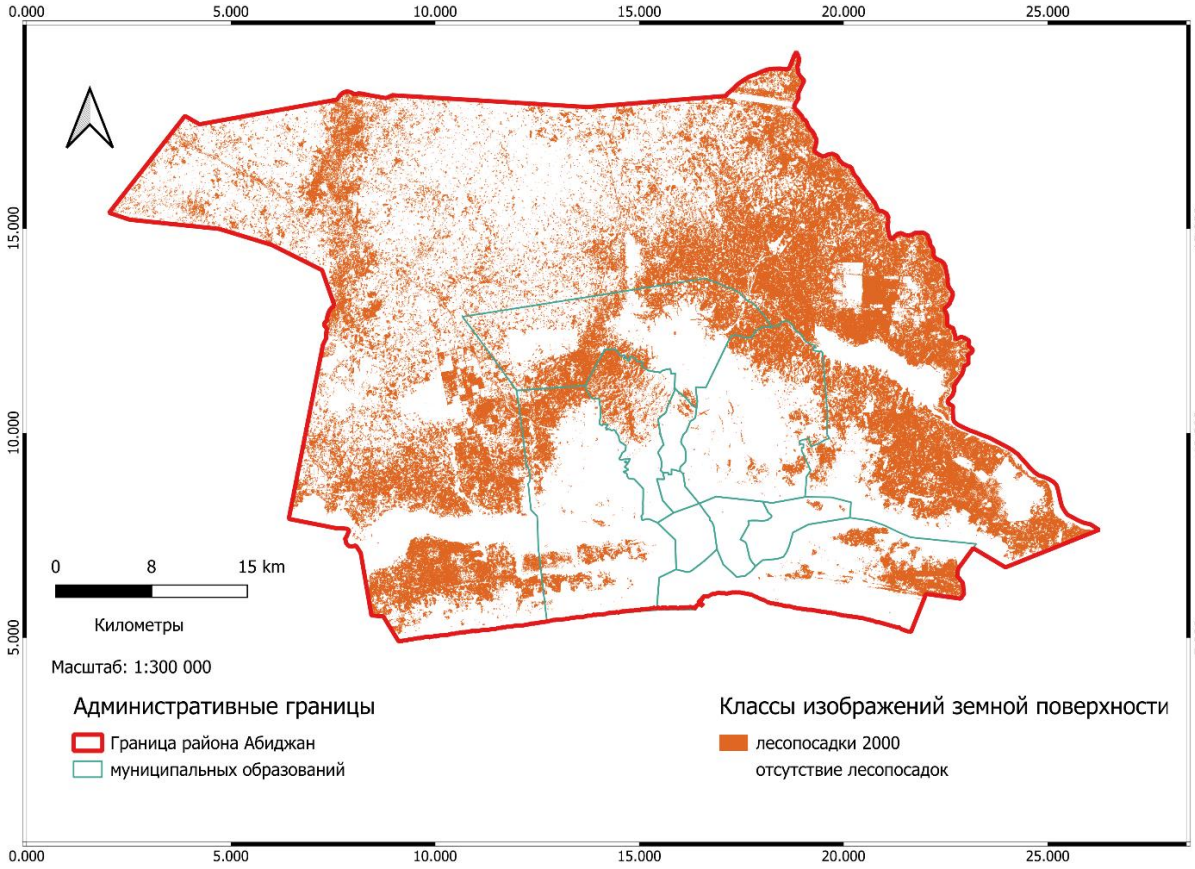


Рисунок 59 – Пространственное распределение лесопосадок в 2000 г.

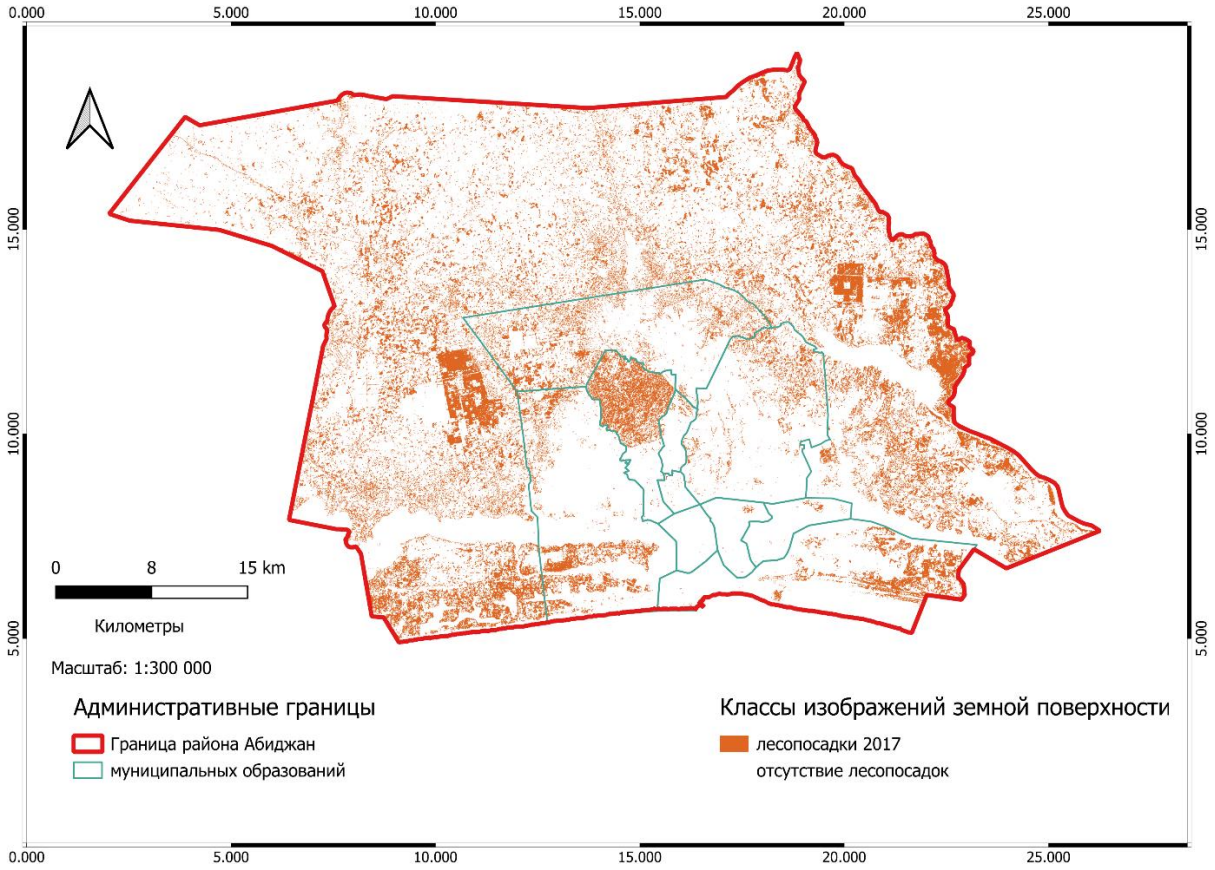


Рисунок 60 – Пространственное распределение лесопосадок в 2017 г.

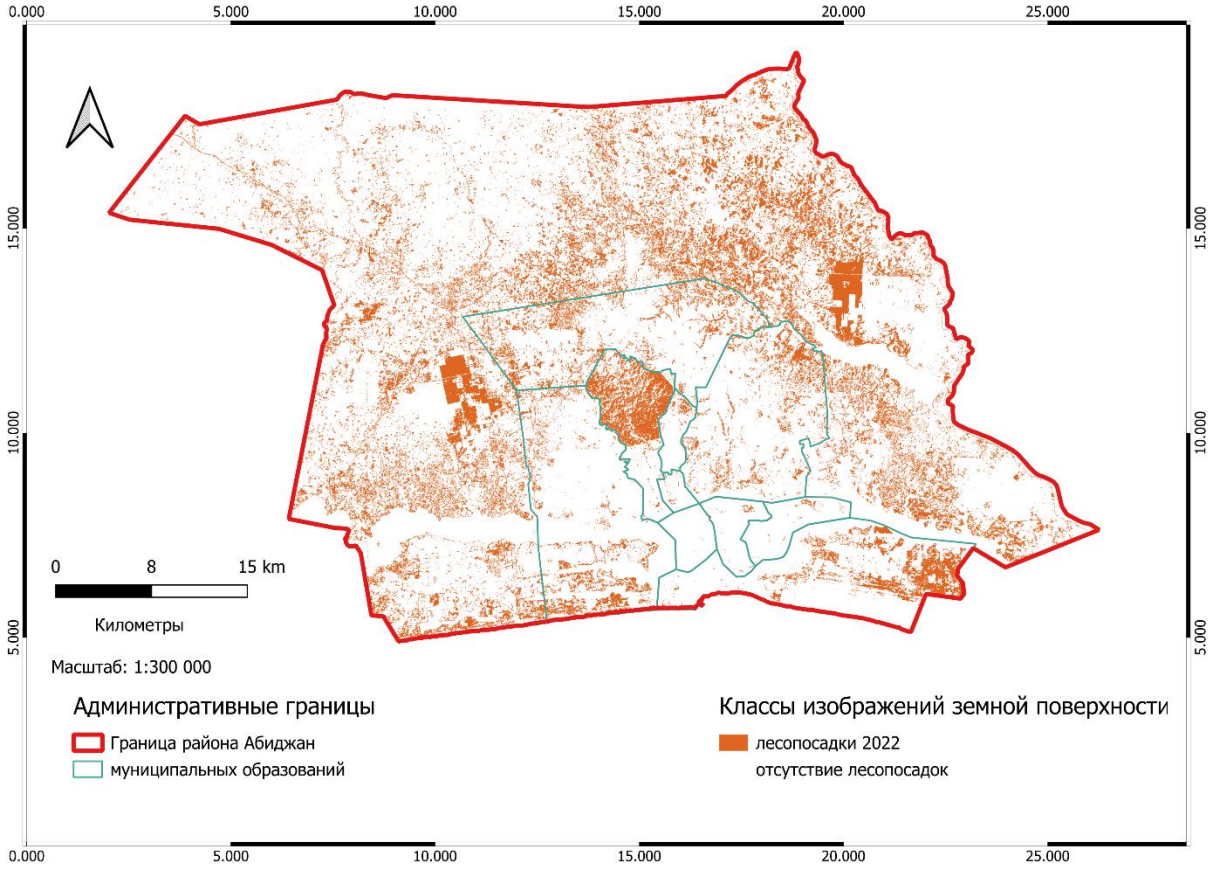


Рисунок 61 – Пространственное распределение лесопосадок в 2022 г.

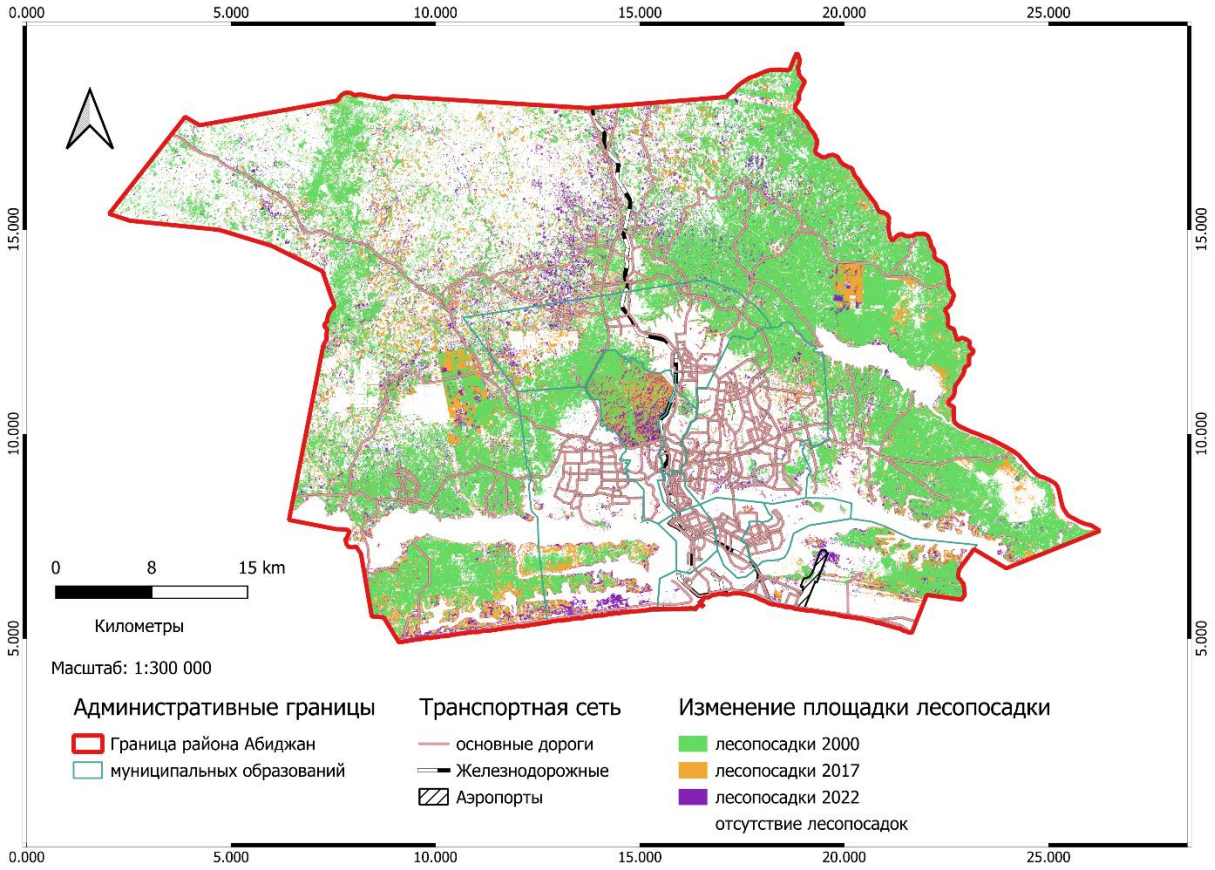


Рисунок 62 – Распространение лесопосадок в 2000, 2017 и 2022 гг.

Таблица 3.12 – Наличие и отсутствие лесопосадок

Год	Лесопосадки (км^2)	Отсутствие лесопосадок (км^2)	Общая площадь (км^2)
2000	589,72	1517,73	2107,45
2017	464,33	1643,12	2107,45
2022	426,24	1681,21	2107,45

Таблица 3.13 – Изменение площади лесопосадок

Период	Площадь утраченных лесопосадок (км^2)	Изменение площади (%)
с 2000 по 2017 год	-125,39	-21,26
с 2017 по 2022 год	-38,09	-8,20
с 2000 по 2022 год	-163,48	-27,72

В 2000 году площадь лесопосадок в области нашего исследования составляла 702,74 км^2, что равнялось примерно 33,34% от общей площади Абиджана.

В период с 2000 по 2017 год площадь лесопосадок значительно сократилась за 17 лет. Она уменьшилась примерно до 464,33 км², что

представляет собой сокращение на 21,26% со среднегодовым скоростью сокращения 1,25 %, или потерей почти одной пятой от первоначальной площади менее чем за два десятилетия. Эта значительная потеря может быть объяснена несколькими факторами, в том числе растущим давлением со стороны быстро расширяющихся городских территорий и неустойчивой эксплуатацией лесных ресурсов.

В период с 2017 по 2022 год площадь сократилась на 38,09 км², что представляет собой снижение примерно на 8,20 % за 5 лет с годовой скоростью сокращения 1,64%. За 22-летний период с 2000 по 2022 год лесопосадок сократился с 589,72 км² до 426,24 км², что составляет 27,72% при годовой скорости сокращения 1,26%.

Пространственно-временной анализ лесистости за 22 года показывает крайне тревожное сокращение площади лесов. Эта тенденция свидетельствует об уязвимости лесов перед лицом человеческой деятельности. Леса часто расположены в пригородных или сельских районах, подверженных урбанизации.

3.6.5 Изменения площади поверхностных водотоков и водоёмов

Для определения пространственно-временной динамики поверхностных водотоков и водоемов был использован метод, основанный на сочетании трех спектральных индексов - NDWI, NDVI и NDBI, как показано на рисунке 63

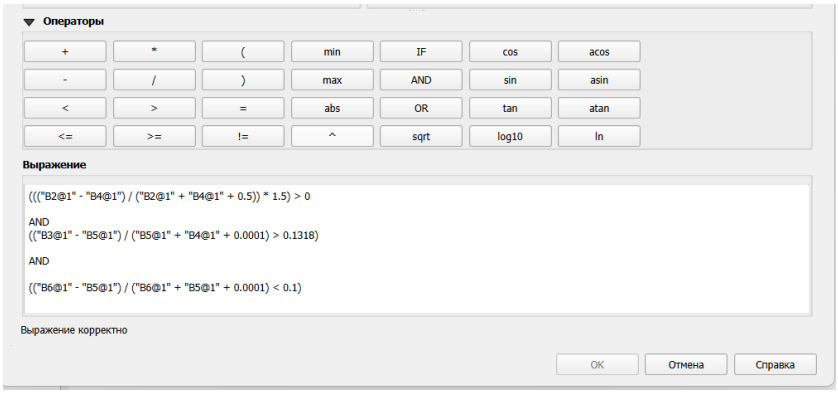


Рисунок 63 – Интерфейс растрового калькулятора NDWI NDVI и NDBI

где:

B2 = синий диапазон;

B3 = зеленый диапазон;

B4 = красный диапазон;

B5 = ближний инфракрасный диапазон (NIR);

B6 = коротковолновый инфракрасный диапазон (SWIR2);

0.0001, чтобы избежать деления на 0 в областях, где сумма полос может быть нулевой или низкой.

Первое выражение, NDWI> 0, используется для обнаружения и идентификации водных объектов с высокой отражательной способностью в синем и средней отражательной способностью в красном диапазоне. Второе выражение, NDVI> - 0,1318, используется для исключения растительности с высокой отражательной способностью в ближней инфракрасной области, а третье выражение, NDBI <0,1, используется для исключения городских территорий и зданий.

В общем, комбинация этих трех индексов позволяет точно выделить поверхностные водотоки и водоемы, минимизируя при этом спектральную путаницу с другими классами изображений земной поверхности землепользования.

Пространственная и временная динамика изменений в поверхностных водотоках и водоёмах представлена на рисунках (64-67) и в таблицах (3.13 и 3.14).

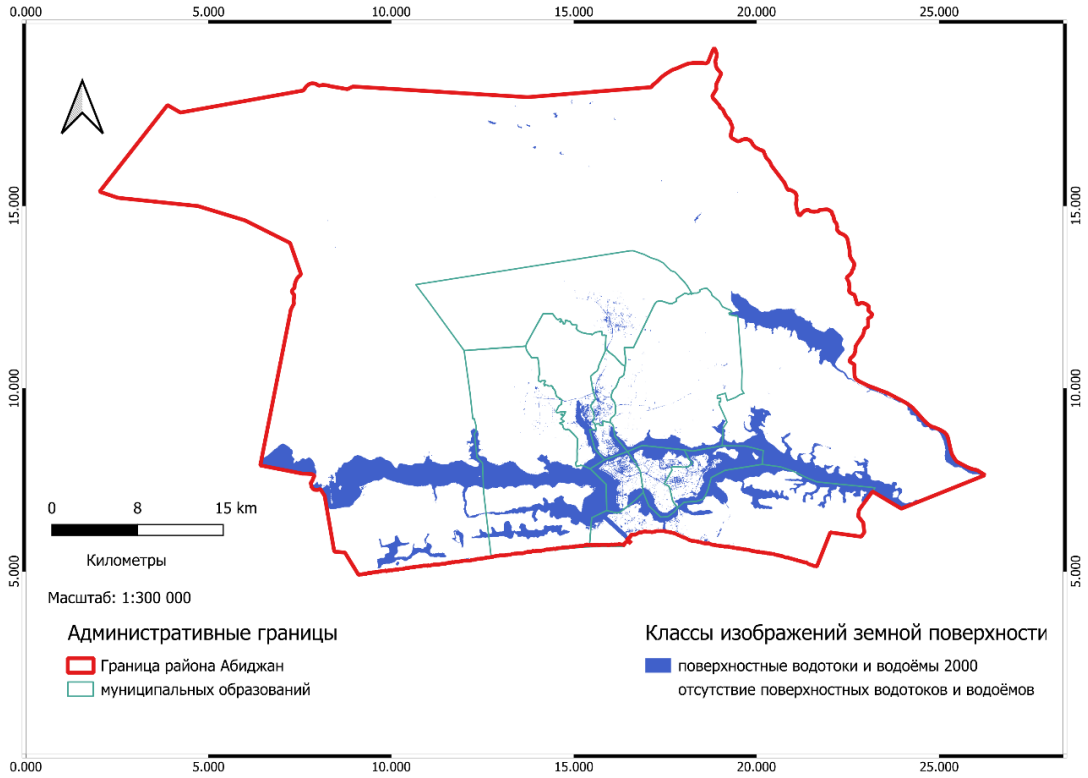


Рисунок 64 – Пространственное распределение поверхностных водотоков и водоёмов в 2000 г.

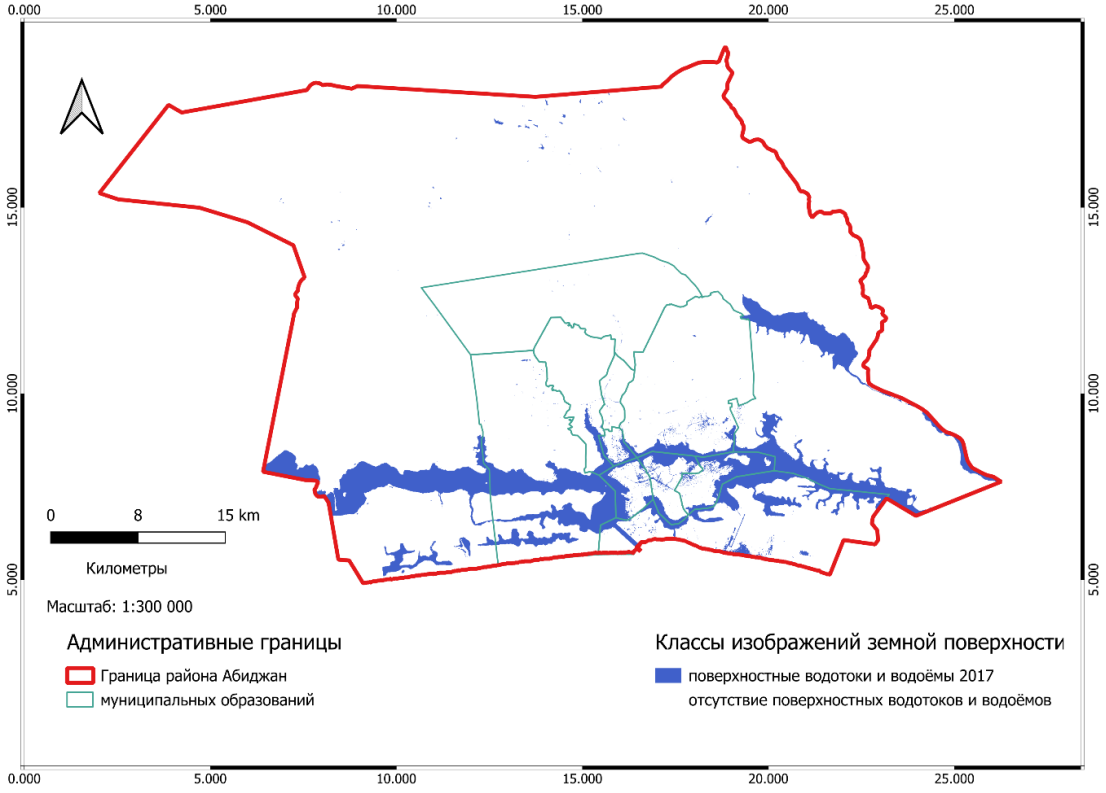


Рисунок 65 – Пространственное распределение поверхностных водотоков и водоёмов в 2017 г.

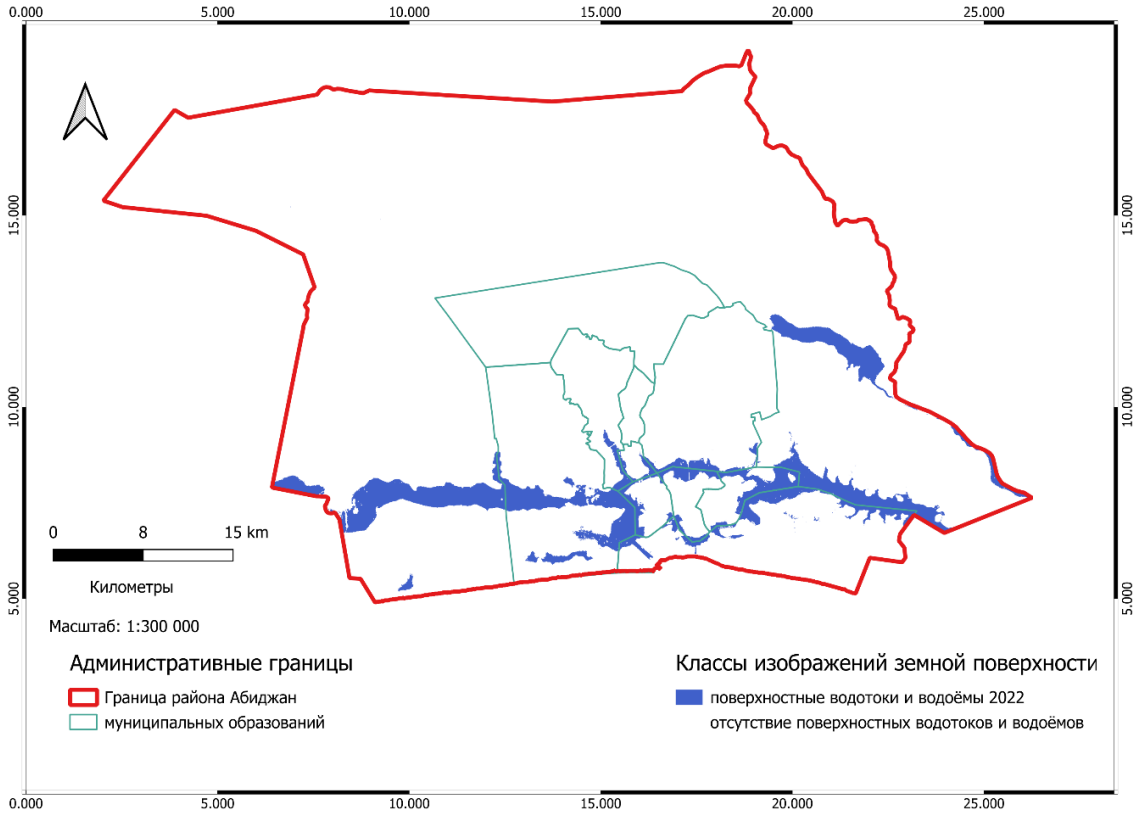


Рисунок 66 – Пространственное распределение поверхностных водотоков и водоёмов в 2022 г.

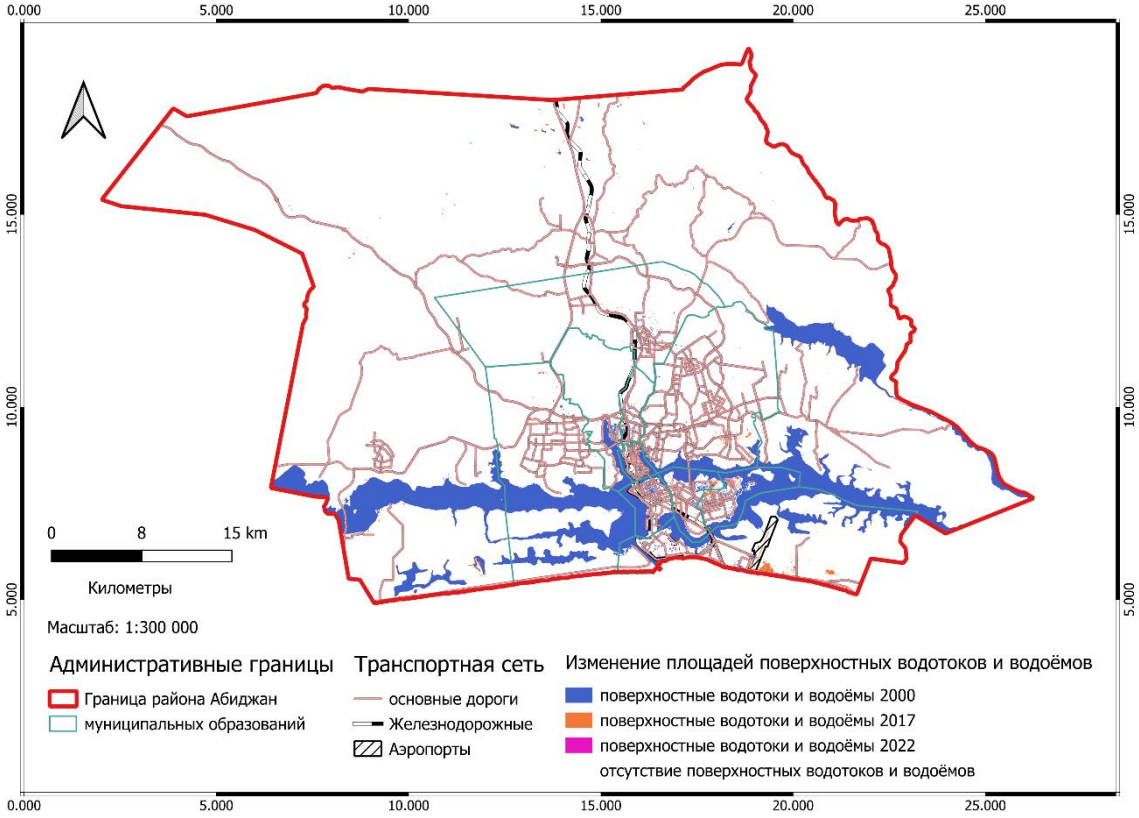


Рисунок 67 – Распространение поверхностных водотоков и водоёмов в 2000, 2017 и 2022 гг.

Таблица 3.13 – Наличие и отсутствие поверхностных водотоков и водоемов

Год	Поверхностные водотоки и водоёмы (км^2)	Отсутствие поверхностных водотоков и водоёмов (км^2)	Общая площадь (км^2)
2000	210,90	1896,55	2107,45
2017	193,59	1913,86	2107,45
2022	150,89	1956,56	2107,45

Таблица 3.14 – Изменение площади поверхностных водотоков и водоемов

Период	Площадь утраченных поверхностных водотоков и водоемов (км^2)	Изменение площади (%)
с 2000 по 2017 год	-17,31	-8,21
с 2017 по 2022 год	-42,70	-22,06
с 2000 по 2022 год	-60,01	-28,46

Анализ поверхностных водотоков и водоемов показывает очень значительные изменения между 2000 и 2022 годами в Абиджане. Результаты различных таблиц показывают постепенное сокращение поверхностных водотоков и водоемов в пользу других типов землепользования.

В 2000 году на площади 210,90 км^2 поверхностные водотоки и водоемы составляли около 10,45% территории исследуемого нами региона. Такая высокая доля водных объектов отражена в различных водотоках, которые характеризуют природный ландшафт южной части Кот-д'Ивуара.

В 2017 году площадь поверхностные водотоки и водоемы сократилась на 193,59 км², что составляет снижение на 17,31 км² за 17 лет, или 8,21%. Ежегодное сокращение составляет 1,02 км² в год. Это постепенное сокращение связано с ускоренной урбанизацией, которая приводит к засыпке водно-болотных угодий для расширения городских территорий. В период с 2017 по 2022 год мы наблюдали сокращение площади на 42,70 км², что составляет 22,06% по сравнению с 2017 годом. Ежегодный темп утраты составляет 8,54 км².

В период с 2000 по 2022 год площадь, утраченная поверхностными водотоками и водоемами, достигла 60,01 км², что составляет примерно 28,46% за

весь исследуемый период. За 22 года годовая потеря составила 2,73 км². Эти результаты свидетельствуют о значительной потере поверхностных водотоков и водоемов в Абиджане.

Пространственно-временной анализ поверхностных водотоков и водоемов за 22-летний период показывает тревожный спад: постепенное снижение в период с 2000 по 2017 год, а затем более быстрое снижение в период с 2017 по 2022 год. Такая динамика свидетельствует об уязвимости поверхностных водотоков и водоемов перед антропогенным давлением в Абиджане.

3.6.6 Изменения площади открытых грунтов

В нашем исследовании для выявления изменений на открытых землях использовалась комбинация трех спектральных индексов для точного выделения открытых грунтов, чтобы избежать путаницы с другими классами изображений земной поверхности (рисунок 68).

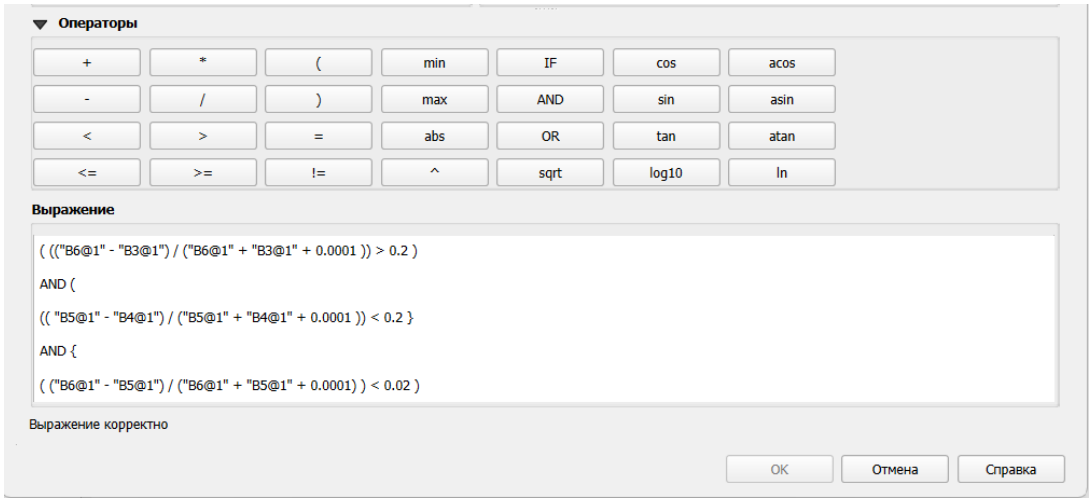


Рисунок 68 – Интерфейс растрового калькулятора NDSI, NDVI и NDBI в QGIS

Первое выражение основано на NDSI (Normalized Difference Soil Index), где шестая полоса представляет коротковолновую инфракрасную полосу, а третья - зеленую. Пороговое значение 0,2 было выбрано потому, что оно обеспечивает сохранение только классов с заметным контрастом между полосами, а также позволяет исключить частично покрытые или нарушенные участки.

Второе выражение - NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), где пятая полоса представляет ближний инфракрасный диапазон, а четвертая - красный. Этот индекс используется для обнаружения растительных зон. Для определения почв, лишенных растительности, к этому индексу применяется пороговое значение менее 0,2.

Кроме того, третьим выражением является NDBI (Normalized Difference Built Index), который предназначен для обнаружения искусственных поверхностей. На самом деле здания обычно характеризуются отражением в коротком инфракрасном диапазоне, которое выше, чем отражение в ближнем инфракрасном диапазоне, что приводит к положительным значениям NDBI. Очень низкий порог (<0,02) позволяет исключить городские районы, которые можно спутать с открытыми землями.

Пространственная и временная динамика обнаруженных земель иллюстрируется рисунками 69-72 и таблицами 3.15 и 3.16, которые показывают различные изменения на территории нашего исследования. Комбинация спектральных индексов NDSI, NDVI и NDBI, примененная к снимкам Landsat, позволила нам точно наблюдать и оценивать различные изменения в обнаруженных землях с течением времени, а также наблюдать и анализировать их пространственное распределение в регионе Абиджана.

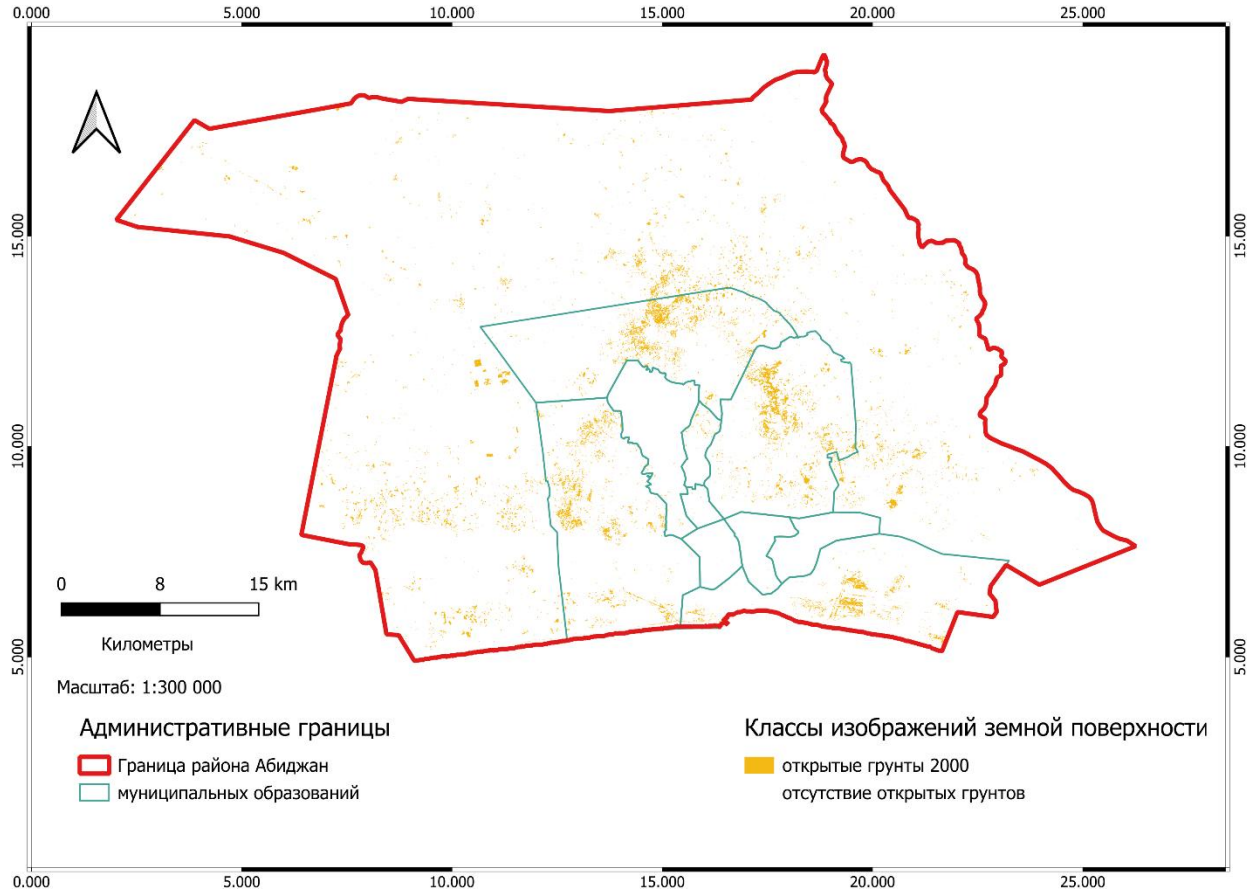


Рисунок 69 – Пространственное распределение открытых грунтов в 2000 г.

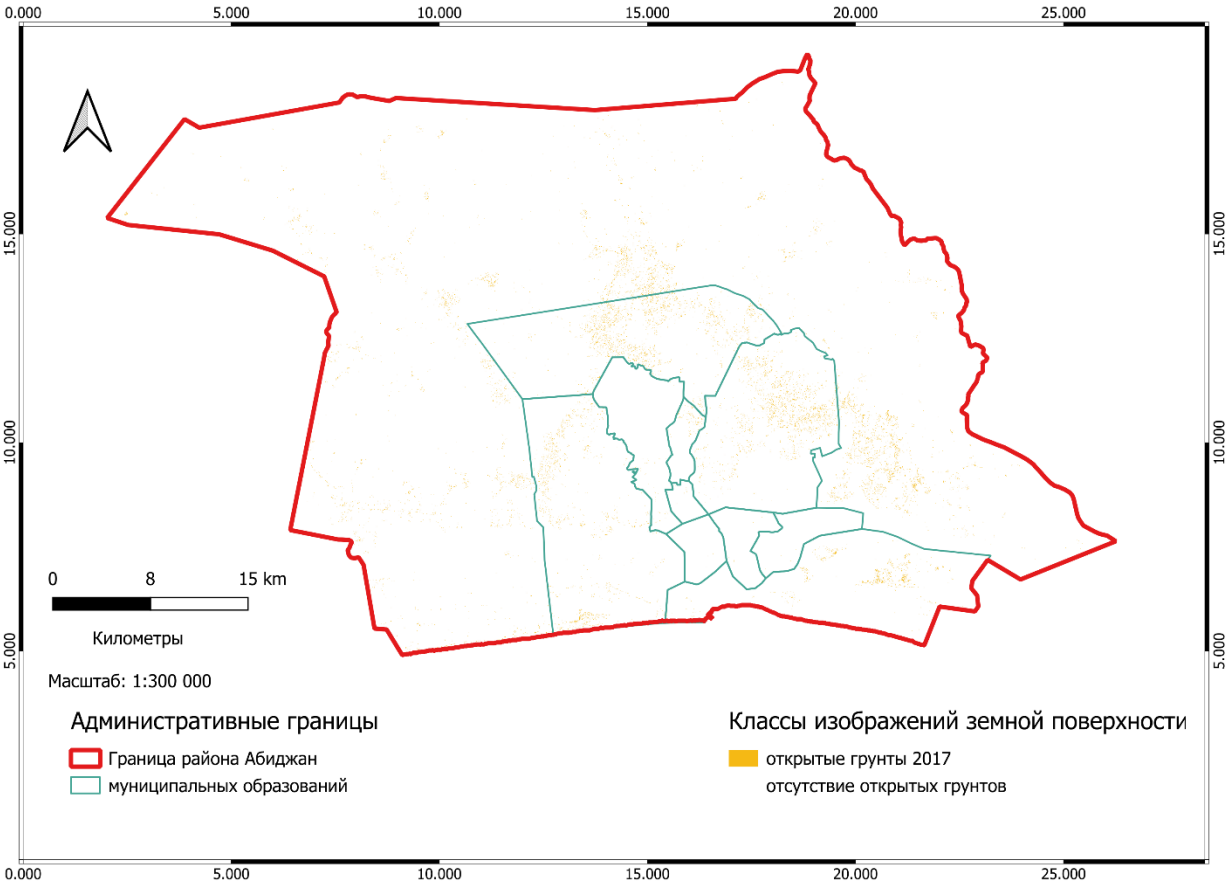


Рисунок 70 – Пространственное распределение открытых грунтов в 2017 г.

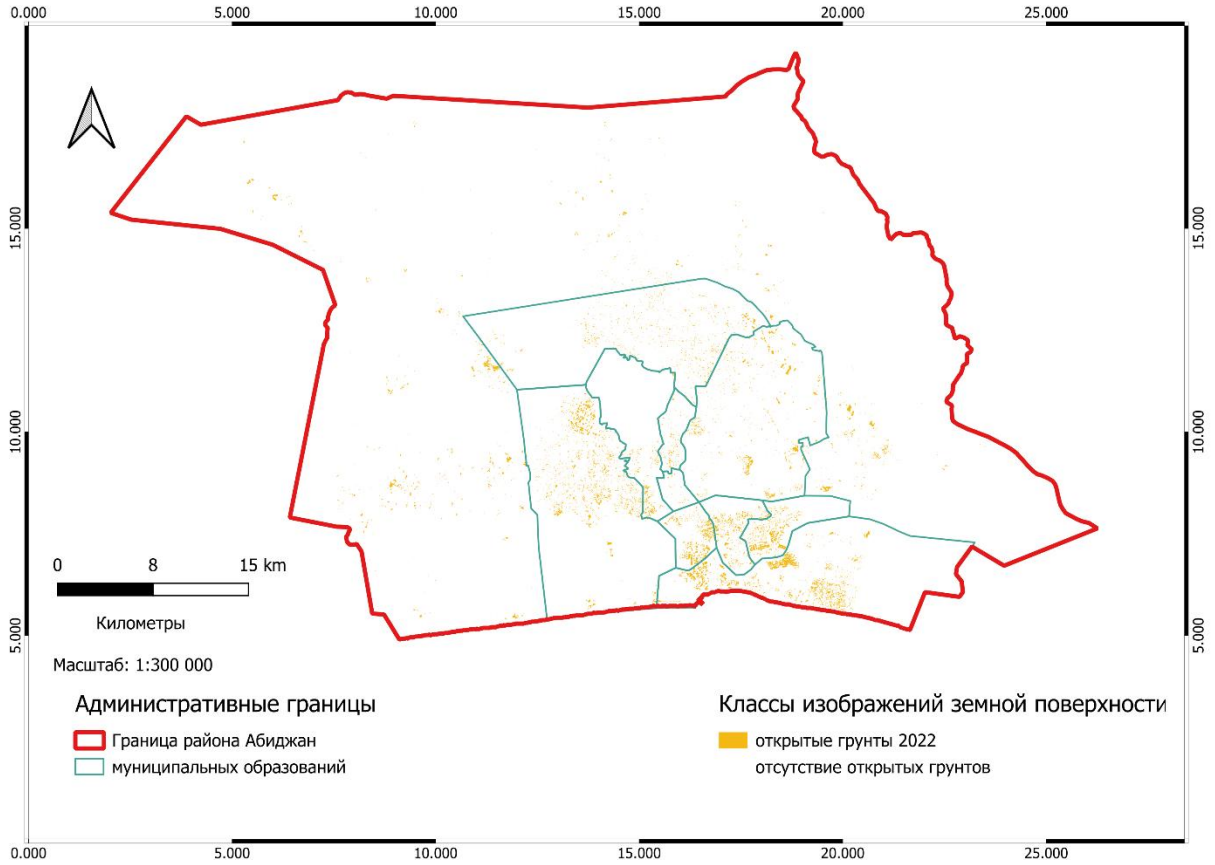


Рисунок 71 – Пространственное распределение открытых грунтов в 2022 г.

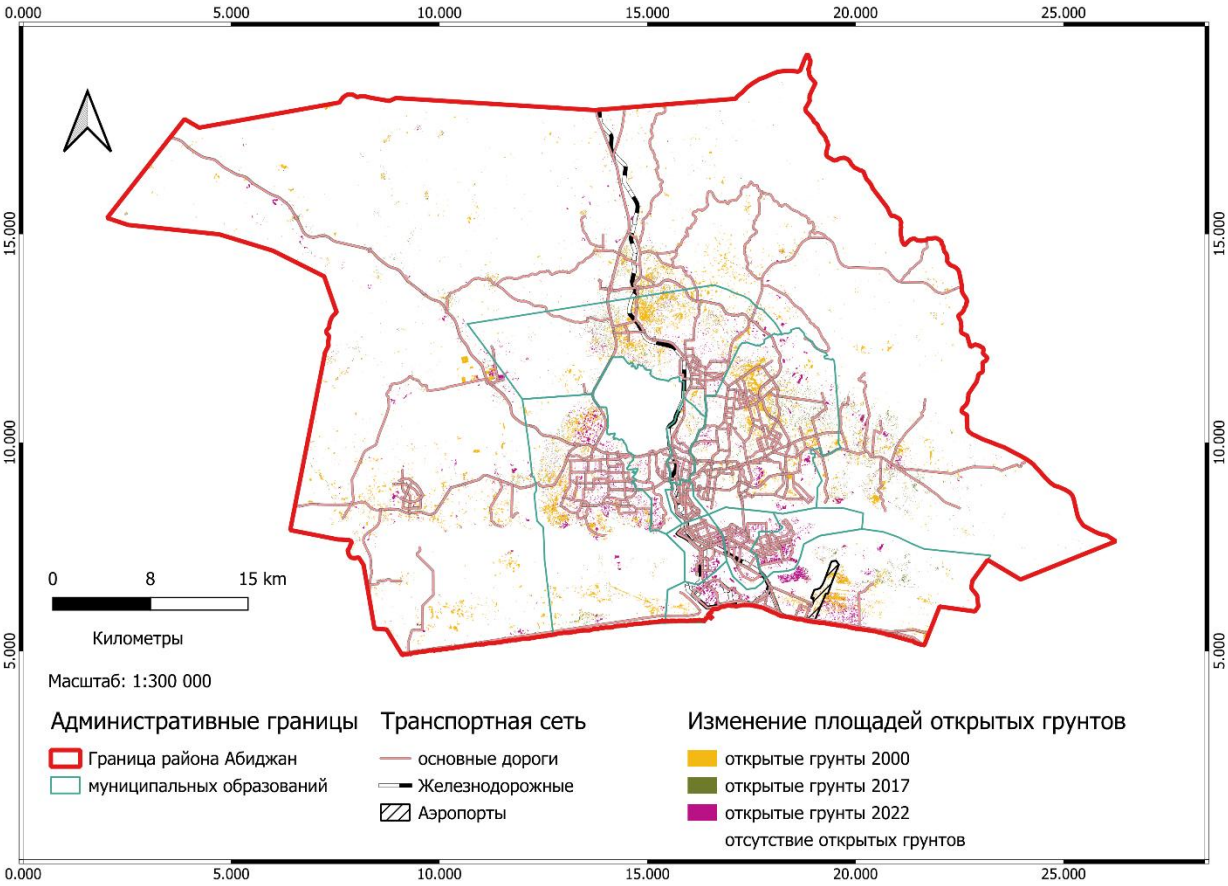


Рисунок 72 – Распространение открытых грунтов в 2000, 2017 и 2022 гг.

Таблица 3.13 – Наличие и отсутствие открытых грунтов

Год	Открытые грунты ($км^2$)	отсутствие открытых грунтов ($км^2$)	Общая площадь ($км^2$)
2000	38,62	2068,83	2107,45
2017	15,93	2091,52	2107,45
2022	30,38	2077,07	2107,45

Таблица 3.14 – Изменение площади открытых грунтов

Период	Площадь утраченных открытых грунтов ($км^2$)	Изменение площади (%)
с 2000 по 2017 год	-22,69	-58,75
с 2017 по 2022 год	+14,45	+90,66
с 2000 по 2022 год	-8,24	- 21,34

Временной анализ открытых грунтов, основанный на данных спутника Landsat, выявил контрастную двухфазную динамику в период с 2000 по 2022 год в регионе Абиджан.

В 2000 году площадь открытых грунтов на всей территории исследования составляла 38,62 $км^2$. Этот тип землепользования часто ассоциируется со строительными площадками - территориями, временно лишенными других объектов землепользования.

В период с 2000 по 2017 год площадь открытых грунтов значительно сократилась и составила 15,93 $км^2$, что соответствует потере 22,69 $км^2$, то есть на 58,75% за 17 лет, со средней скоростью -1,34 $км^2$ в год. Это сокращение, несомненно, связано с урбанизацией территорий, которые раньше были открытыми грунтами с постройками или растительностью.

Однако в период с 2017 по 2022 год тенденция изменилась, и площадь открытых грунтов увеличилась до 30,38 $км^2$, что на 14,45 $км^2$ больше за 5 лет. Это изменение может быть связано с интенсификацией строительных работ, расширением карьеров, вырубкой лесов и расширением территорий, находящихся в процессе городской трансформации.

В целом за период 2000-2022 гг. мы видим сокращение открытых грунтов на 8,24 км^2, что составляет 21,34%, причем динамика происходит в две разные фазы: первоначальная потеря площади и последующее восстановление.

Эти результаты показывают динамику, в которой открытые грунты играют двойную роль в качестве индикатора зон строительства и развития. Это свидетельствует о хрупкости открытых грунтов в условиях неконтролируемой динамики и практики землепользования.

3.7 Выводы по разделу

Мониторинг состояния земель является одним из основных приоритетов для рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды в Кот-д'Ивуаре. Он позволяет получить более полное представление о составе земель и их изменениях с течением времени. В рамках данного исследования была предложена методология, позволяющая обнаруживать и идентифицировать пространственно-временные изменения в составе земель на основе мультиспектральных изображений Landsat за период с 2000 по 2022 год. Были разработаны два взаимодополняющих подхода для оптимизации надежности классификации землепользования: контролируемая классификация с помощью метода максимального правдоподобия и комбинация спектральных индексов (NDBI, NDVI, NDSI, SAVI, NDWI) с определением конкретных пороговых значений для каждого класса изображения земной поверхности.

Эти два подхода позволили нам выделить шесть тематических классов изображений земной поверхности на территории Абиджана, а именно: застроенные территории, густые леса, вторичные леса, лесопосадки, поверхностные водотоки и водоёмы, а также открытые грунты. Классификация была оценена с помощью матрицы ошибок и показателей, а именно общей точности и коэффициента Каппа, которые показали очень удовлетворительные результаты. Показатели точности для различных исследуемых лет составляют соответственно для 2000 года 94,99% с коэффициентом Каппа 0,93, а точность

по классам составляет: 91% для застроенных территорий, 93% для густых лесов, 88% для вторичных лесов, 92% для лесопосадок, 98% для поверхностных водотоков и водоёмов, и 89% для открытых грунтов. Что касается 2017 года, общая точность составляет 94,06%, а коэффициент Каппа — 0,92. Точность по классам достигла 90% для застроенных территорий, 92% для густых лесов, 87% для вторичных лесов, 91% для лесопосадок, 97% для поверхностных водотоков и водоёмов и 88% для открытых грунтов. В 2022 году мы получили лучшие результаты по сравнению с предыдущими годами (2000 и 2017) с общей точностью 97,17% и коэффициентом Каппа 0,96, в то время как точность по классам составляет 98% для застроенных территорий, 95% для густых лесов, 91% для вторичных лесов, 94% для лесопосадок, 97% для поверхностных водотоков и водоёмов и 92% для открытых грунтов. Учитывая полученные результаты, мы можем сказать, что использованный метод является надежным, но тем не менее мы обнаружили некоторые путаницы между густыми лесами и вторичными лесами, которые обусловлены сходством спектральных сигнатур и, вероятно, постепенным переходом между этими двумя классами.

Пространственно-временной анализ результатов нашего исследования выявил заметную территориальную динамику. Быстрое ускорение урбанизации, именно после 2017 года, привело к значительному расширению застроенных территорий. Густые леса и вторичные леса продолжали сокращаться, в отличие от водотоков и водоёмов, которые относительно стабилизировались, и небольшого увеличения площади незастроенных земель на окраинах городов. Эти изменения в землепользовании обусловлены антропогенным давлением, которое является результатом урбанизации города Абиджана.

Методология, разработанная в рамках нашего исследования, отличается надежностью и гибкостью применения. Она представляет собой эффективный инструмент для мониторинга окружающей среды, планирования землепользования, сельского хозяйства и лесоводства, управления водными ресурсами и оценки антропогенного воздействия. Этот подход доказал свою эффективность в городе Абиджан, подтвердив свою научную обоснованность и

потенциал применения в других регионах, подверженных схожим динамическим процессам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является результатом исследований, проведенных автором с целью решения важной научной проблемы: обнаружения изменений в составе земель на основе многоспектральных спутниковых изображений. Для достижения этой цели были проведены эксперименты с целью оценки эффективности разработанного автором метода выявления изменений в землепользовании с помощью автоматизированных технологий цифровой обработки изображений, а именно: контролируемой классификации с использованием метода максимального правдоподобия и комбинации спектральных индексов (NDBI, NDVI, NDSI, SAVI, NDWI) с определением специфических пороговых значений для каждого класса изображений земной поверхности. В качестве зоны исследования для проведения этих экспериментов был выбран город Абиджан.

Наше исследование проводилось на трёх годах: 2000, 2017 и 2022, и позволило выделить и нанести на карту шесть типов землепользования, а именно: застроенные территории, густые леса, вторичные леса, лесопосадок, поверхностные водотоки и водоёмы, и открытые грунты. Различные методы обработки космических изображений, выполненные с помощью QGIS, позволили нам оценить пространственно-временные изменения различных типов землепользования, что дало возможность детально проследить за динамикой нашего района исследования.

В результате исследований автора были получены новые важные научные результаты, а именно:

1. В результате отечественного и зарубежного опыта использования космических снимков для мониторинга землепользования позволило выявить основные недостатки существующих методов и технологий обнаружения изменений состава земель применительно к условиям Республики Кот-д’Ивуар. Установлено отсутствие единого научно-методологического обеспечения комплексного обнаружения изменений состава земель, определения их

пространственных границ и отдельного картографического отображения изменений различных типов землепользования.

2. Разработанная методика обнаружения состава земель по материалам космической съёмки с использованием автоматизированного дешифрирования комплекса синтезированных многозональных комических изображений, позволяет с высокой степенью достоверности (97,17%) выявлять состав земель и их изменения по сравнению с аналогичными работами других авторов;

3. Разработан подход к обнаружению изменений состава земель, основанный на сочетании спектральных индексов NDVI, NDBI, NDSI, SAVI и NDWI с пороговыми значениями, установленными для тематических классов изображений земной поверхности. Применение спектральных индексов позволило уточнить выделение соответствующих типов землепользования и выполнить их отдельное картографическое отображение.

4. Проведены экспериментальные исследования на территории городской агломерации города Абиджан на основе спутниковых снимков Landsat за 2000, 2017 и 2022 годы. Было выделено шесть типов землепользования и составлены тематические карты.

5. Выполнен сравнительный и количественный анализ пространственно-временных изменений землепользования городской агломерации города Абиджан за период 2000–2022 годов, позволяющий выявить изменения в структуре состава земель с учётом природно-экологических особенностей тропического влажного региона. Установлены расширение застроенных территорий, сокращение площадей густых и вторичных лесов, а также уменьшение площади водотоков и водоемов.

С научной точки зрения, это исследование показывает, что использование контролируемой классификации и спектральных индексов с определенными пороговыми значениями повышает точность обнаружения изменений в землепользовании. Наше исследование также вносит существенный вклад в развитие знаний в области дистанционного зондирования, применяемого для

мониторинга земель. Наконец, предлагаемая методология, основанная на данных из открытых источников, может также использоваться в других географических регионах Африки.

Полученные автором теоретические и экспериментальные результаты имеют большую практическую ценность. Различные карты землепользования, составленные в рамках нашего исследования, могут быть непосредственно использованы органами власти в области территориального планирования для более эффективного мониторинга урбанизации, в рамках наблюдения за обезлесением с целью обеспечения его восстановления экологическими учреждениями, а также для внедрения устойчивого управления политиками. Наконец, результаты нашего исследования являются отправной точкой для будущих исследований в области дистанционного зондирования в сфере управления земельными ресурсами.

Наше исследование отличается оригинальным подходом, сочетающим метод классификации и корректировку спектральных индексов с пороговыми значениями, адаптированными к экологическим и урбанистическим характеристикам города Абиджана. Кроме того, наш подход позволил нам более четко различать типы землепользования, а также повысить точность результатов.

Дальнейшие исследования связаны с использованием космических снимков более высокого пространственного разрешением и алгоритмов искусственного интеллекта, в частности сверточных нейронных сетей, с целью повышения точности классификации изображений. Разработка интерактивной ГИС-платформы, предназначенной для мониторинга изменений землепользовании, представляет собой перспективное направление работы. Эта платформа позволит визуализировать и сравнивать тематические карты за разные периоды, выявлять пространственные изменения, рассчитывать площади различных типов землепользования, анализировать статистические данные и обновлять информацию по мере появления новых спутниковых снимков. Рекомендуется внедрение такой платформы в систему мониторинга и управления земельными ресурсами Республики Кот-д’Ивуар.

В конечном итоге, наше исследование показало, что использование контролируемой классификации и сочетание спектральных индексов с определенными пороговыми значениями представляет собой надежный метод, который подходит для идентификации и обнаружения изменений в землепользовании на основе спутниковых изображений Landsat. Результаты, полученные в ходе этого исследования, подтверждают научную обоснованность данного подхода, подчеркивая его полезность для устойчивого управления землепользованием на территории Кот-д'Ивуара. Таким образом, наше исследование открывает новые перспективы для мониторинга земель с помощью дистанционного зондирования, способствуя более глубокому пониманию пространственно-временной динамики территории для более эффективного управления землепользованием.

Список литература

1. Loi n°2019-868 du 14 novembre 2019 modifiant la loi n°98-750 relative au domaine foncier rural - Côte d'Ivoire / [Электронный ресурс] URL: https://www.documents.clientearth.org/wp-content/uploads/library/2019-10-14-loi nxx2019-868-du-14-novembre-2019-modifiant-la-loi-nxx98-750-du-23-decembre 1998-ext-fr.pdf (дата обращения : 03.04.2021).

2. Décret n°2019-977 du 27 novembre 2019 portant procédures de classement des forêts et agro-forêts [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.documents.clientearth.org/wp-content/uploads/library/2019-11-27-decret-nxx2019-977-du-27-novembre-2019-portant-procedures-de-classement-des-forets-et-agro-forets-ext-fr.pdf (дата обращения: 03.04.2021).

3. FAOLEX Database [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC188538 (дата обращения: 04.04.2021).

4. FAOLEX Database / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC188537/ (дата обращения: 04.04.2021).

5. FAOLEX Database / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC188534 (дата обращения: 05.04.2021).

6. Décret n°2019-979 du 27 novembre 2019 portant modalités d'aménagement des agro-forêts, d'exploitation des plantations agricoles et de commercialisation des produits agricoles dans les agro-forêts [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.spibci.org/pdf/De%CC%81cret%202019979%20du%2027%20novembre%202019%20portant%20modalite%CC%81s%20d'ame%CC%81nagements%20des%20AgroFore%CC%82ts%20Exploitat%C2%B0%20Ccialisat%C2%B0.pdf (дата обращения: 03.04.2021).

7. Décret n°2019-978 du 27 novembre 2019 relatif à la concession de la gestion du domaine forestier privé de l'Etat et des collectivités territoriales [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.documents.clientearth.org/wp-

content/uploads/library/2019-11-27-decret-nxx2019-978-du-27-novembre-2019-relatif-a-la-concession-de-la-gestion-du-domaine-forestier-prive-de-l039etat-ext-fr.pdf (дата обращения: 03.04.2021).

8. Cadre d'analyse de la gouvernance foncière de la côte d'ivoire / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://nelga-afrique-ouest-francophone.org/wp-content/uploads/2019/03/Analytical_Framework_for_Land_Governance_Ivory_Coast.pdf (дата обращения: 05.04.2021).

9. Côte d'Ivoire Domaine foncier rural / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.droit-afrique.com/upload/doc/cote-divoire/RCI-Loi-1998-750-domaine-foncier-rural-MAJ-2004.pdf (дата обращения: 05.04.2021).

10. Земельный кодекс Российской Федерации / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/744100004 (дата обращения: 06.04.2021).

11. ФЗ РФ "О землеустройстве" / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://urnature.ru/spravka/11-zakoni/39-zemleustr.html (дата обращения: 06.04.2021).

12. Постановление Правительства РФ от 30 июля 2009 г. N 621 "Об утверждении формы карты (плана) объекта землеустройства и требований к ее составлению" (с изменениями и дополнениями) / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://base.garant.ru/12168780/(дата обращения: 06.04.2021).

13. Положение о государственной экспертизе землеустроительной документации (утв. Постановлением Правительства РФ от 4 апреля 2002 г. № 214). [Электронный ресурс]. Режим доступа: (дата обращения: 08.04.2021).

14. Положение о Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии (утв. Постановлением Правительства РФ от 1 июня 2009 г. № 457). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https:// base.garant.ru/12126378/ (дата обращения: 08.04.2021).

15. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами: Учеб. пособие / В.А. Малинников, А.Ф. Стеценко, А.Е. Алтынов, С.М. Попов; МИИГАиК. – Москва: Изд. МИИГАиК. 2008. – 145 с. – УДК: 528.8; 528.914.

16. Бондур, В.Г. Аэрокосмический мониторинг природной среды // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–14.

17. Книжников, Ю.Ф., Кравцова, В.И., Тутубалина, О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: Учебник для студ. высш. учеб. заведений. – Москва: Издательский центр «Академия», 2011. – 416 с.

18. Лялько, В.И., Попов, М.А. Дистанционное зондирование Земли из космоса: методы и технологии обработки данных. – Киев: Наукова думка, 2007. – 392 с.

19. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing // Third Edition, Prentice Hall, 2008. – P. 954.

20. Jensen J.R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective // Third edition, Prentice Hall, 2005. – P. 316.

21. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote Sensing and Image Interpretation // Seventh edition, Wiley, 2015. – P. 736.

22. Richards J.A., Jia X. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction // Springer, 2006. – P. 439.

23. Campbell J.B., Wynne R.H. Introduction to Remote Sensing // Fifth edition, Guilford Press, 2011. – P. 667.

24. Ваш спутник в мире геопространственных решений/ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https:// https://innoter.com/sputniki///(дата обращения: 17.09.2021).

25. Геоинформационные системы и аэрокосмический мониторинг/ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites//(дата обращения: 17.09.2021).

26. Advanced Land Observing Satellite-3 (ALOS-3) / [Электронный ресурс]. Режим доступа: JAXA ALOS-3 Mission (дата обращения: 17.09.2021).

27. Ingenio (SEOSat) Satellite / [Электронный ресурс]. Режим доступа : European Space Agency – Ingenio Mission (дата обращения : 17.09.2021).

28. FORMOSAT-2 / [Электронный ресурс]. Режим доступа: NSPO FORMOSAT-2 (дата обращения: 18.09.2021).

29. SPOT-5 Satellite / [Электронный ресурс]. Режим доступа: CNES SPOT Program (дата обращения: 18.09.2021).

30. THEOS Satellite / [Электронный ресурс]. Режим доступа: GISTDA THEOS Mission (дата обращения: 18.09.2021).

31. RESOURCESAT-2 / RESOURCESAT-2A / [Электронный ресурс]. Режим доступа: ISRO Resourcesat Missions (дата обращения: 18.09.2021).

32. NigeriaSat-2 / [Электронный ресурс]. Режим доступа: SSTL NigeriaSat-2 Mission (дата обращения: 18.09.2021).

33. SSOT (FASat-Charlie) / [Электронный ресурс]. Режим доступа: Airbus Defence and Space SSOT (дата обращения: 18.09.2021).

34. WorldView-1 Satellite / [Электронный ресурс]. Режим доступа: Maxar WorldView-1 (дата обращения: 18.09.2021).

35. Cartosat Satellites / [Электронный ресурс]. Режим доступа: ISRO Cartosat Program (дата обращения: 18.09.2021).

36. GeoEye-1 Satellite / [Электронный ресурс]. Режим доступа: Maxar GeoEye-1 (дата обращения: 18.09.2021).

37. KOMPSAT-2 / [Электронный ресурс]. Режим доступа: KARI KOMPSAT Missions (дата обращения: 18.09.2021).

38. Landsat-8/LDCM [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.eoportal.org/satellite-missions/landsat-8-ldcm#mission-status(дата обращения: 01.10.2021).

39. eoPortal [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.eoportal.org/satellite-missions/landsat-9 (дата обращения: 01.10.2021).

40. G. Soro, E. K. Ahoussi, E. K. Kouadio, T. D. Soro, S. Oulare, M. B. Saley, N. Soro, J. Biemi. Apport de la télédétection à la cartographie de l’évolution spatio-temporelle de la dynamique de l’occupation du sol dans la région des Lacs (Centre de la Côte d’Ivoire) // Afrique SCIENCE 10(3) (2014) P. 146 – 160.

41. K. K. Eugène, M. K. Combo. Apport de la télédétection et des sig dans l’étude de la pression humaine sur la forêt classée d’okromodou, sud-ouest ivoirien // Revue de Géographie Tropicale et l'Environnement, № 1, 2015 г.

42. C. B. Tiesse, E. N. Wandan, H. D. N'da. Apport De La Teledetection Pour Le Suivi Spatio-Temporel De L'occupation Du Sol Dans La Region Montagneuse Du Tonkpi (Cote D'ivoire) // European Scientific Journal May 2017 edition Vol.13, No.15 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.

43. A. S. Koffi, A. A. Fora, H. Elbelrhiti. Cartographie De L'état Du Couvert Végétal Du Nord De La Côte D'ivoire À Partir D'images Satellites: Exemple De La Zone De Korhogo // European Scientific Journal October 2016 edition vol.12, No.29 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.

44. M.C.M. Solefack, O. Chabrerie, E. G. Morona, B.A. Nkongmeneck, O.N. L.Leumbec, G.Decocq. Analyse de la dynamique de déforestation par télédétection couplée aux modèles d'équations structurales : exemple de la forêt néphéliphile du mont Oku (Cameroun) // Acta Botanica Gallica: Botany Letters Vol. 159, No. 4, December 2012, p.451–466.

45. S. Binsangou, S. A. Ifo, F. Koubouana, L. Louvouandou, S. Nzingoula, L. Mansisse .Suivi par télédétection de la déforestation due à la croissance urbaine de la ville de Ouesso dans la période de 2000-2016, République du Congo // International Journal of Innovation and Scientific Research ISSN 2351-8014 Vol. 30 No. 2 May. 2017, p. 186-197.

46. S. E. B.Bouiadjra, W.E.Zerey, K.Benabdeli. étude diachronique des changements du couvert végétal dans un écosystème montagneux par télédétection spatiale : cas des monts du tessala (algérie occidentale). // physio-géo - géographie physique et environnement, 2011, volume v.

47. H.T.O.Ali, S.Niculescu, V.Sellin, C.Bougault. Contribution de la nouvelle série d'images Sentinel-1 pour le suivi de la végétation côtière dans le Pays de Brest // hal-01650671 Submitted on 28 Nov 2017.

48. Беленко, В.В. Экспериментальные исследования типов и динамики застройки по космическим снимкам для картографирования застраиваемых территорий / В.В. Беленко // Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2018 – №1. – С. 52–62.

49. Беленко, В.В. Исследование динамики водно-болотных экосистем на основе материалов дистанционного зондирования Земли (на примере озера Селигер) / В.В. Беленко, Е.П. Данилина // Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2020.– № 2. – С. 169 –177.

50. Малинников, В. А. Использование цепей Маркова и данных дзз для прогнозирования конверсии видов землепользования в крупных городских агломерациях / В. А. Малинников, В. Н. Нгуен // Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2017. – № 5. – С. 99 –105.

51. Хунг, Ч. Л. Методика Мониторинг динамики растительного покрова по данным разновременных изображений индекса NDVI (на примере провинции лам донг –центральные нагорья Вьетнама) / Ч.Л. Хунг, Е.Б. Мельникова // Геодезия и аэрофотосъёмка. –2016. – № 1. – С. 69 –74.

52. Балдина, Е.А. Картографирование современного состояния и многолетних изменений в использовании сельскохозяйственных земель в дельте Волги / Балдина, Е.А. Трошко, К. А. // Геодезия и картография. –2016. –№ 10. – С. 28 – 35.

53. Аввакумова, А.О. Анализ динамики структуры землепользования на основании данных дистанционного зондирования земли / А.О. Аввакумова // Серия Естественные науки. – 2018. – № 2. – С. 214 –222.

54. Хлебникова, Е.П. Использование геопространственных данных для решения задач мониторинга особо охраняемых природных территорий/ Е.П. Хлебникова, С.А. Арбузов // Вестник СГУГиТ. – 2020. – № 1. – С. 96 –105.

55. Иванов, М.А. Методика картографирования динамики пахотных угодий в бассейнах рек Европейской территории России за Период 1985–2015 гг. / М.А. Иванов, А.В. Прищепов, В.Н. Голосов, Р.Р. Залялиев, К.В. Ефимов, А.А. Кондратьева, А.Д. Киняшова, Ю.К. Ионова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. –2017. – № 5. – С. 161–171.

56. Сизов, А.П. Новые подходы к картографированию результатов мониторинга земель сверхкрупного города / А.П. Сизов // Геодезия и аэрофотосъёмка. –2010. –№ 5. – С. 63–71.

57. Foody G.M. Remote sensing of land cover change: state of the art and future perspectives // Progress in Physical Geography. – 2002. – Vol. 26(4). – P. 504–520.

58. Foody G.M. Remote sensing of land cover change: state of the art and future perspectives // Progress in Physical Geography. – 2002. – Vol. 26(4). – P. 504–520.

59. Weng Q. Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications // McGraw-Hill, 2010. – P. 298.

60. D. Arrouays, J. Balesdent, J. C Germon, P. A. Jayet, J. F. Soussana, P. Stengel. Stocker du carbone dans les sols agricoles en France // Expertise scientifique collective. INRA. (2002) p.332

61. Landsat Science Team. Landsat 8 & 9 Data Users Handbook / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.usgs.gov/landsat-missions (дата обращения: 10.10.2021).

62. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance // International Journal of Remote Sensing. – 2007. – Vol. 28(5). – P. 823–870.

63. V. Dubreuil, R. Lecerf, L. Hubert-Moy. Analyse de la variabilité climatique interannuelle en région de paysage hétérogène (Bretagne) à partir de synthèses mensuelles NDVI à basse résolution // 17ème colloque international de climatologie (2004) p. 31–34.

64. V.C. Jofack Sokeng, Y.L. Akpa, T.V. Assoma, K.F Kouamé, S. Corgne, J.P. Rudant, T.A. Ouattara, F.M. Sorho, N. Yao, P. Kouamé, (2019). Suivi par télédétection des affectations des terres pour la promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier en Côte d'Ivoire. // Conférence OSFACO Des images satellites pour la gestion durable des territoires en Afrique (2019) P.17.

65. L. Kurvonen, J. Pulliainen, M. Hallikainen. Active and passive microwave remote sensing of boreal forests // Acta Astronautica (2002) P. 707–713.

66. E. Mitchard, S. Saatchi, S. Lewis, T. Feldpausch, I. Woodhouse, B. Sonké, C. Rowland, P. Meir. Measuring biomass changes due to woody encroachment and deforestation/degradation in a forest-savanna boundary region of central Africa using multi-temporal L-band radar backscatter // Remote Sensing of Environment, (2011) P. 2861–2873.

67. Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing // Academic Press, 2007. – P. 560.

68. BELGIAN EARTH OBSERVATION [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://eo.belspo.be/fr/corrections-geometriques-et-radiometriques (дата обращения: 01.10.2021).

69. Chavez P.S. Image-based atmospheric corrections—revisited and improved // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1996. – Vol. 62(9). – P. 1025–1036.

70. Moran M.S., Jackson R.D., Slater P.N., Teillet P.M. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output // Remote Sensing of Environment. – 1992. – Vol. 41(2–3). – P. 169–184.

71. Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S): An Overview // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1997. – Vol. 35(3). – P. 675–686.

72. Jensen J.R. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective // Second edition, Pearson Education, 2007. – P. 592.

73. USGS. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook (дата обращения: 01.10.2021).

74. J.R Jensen. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective // Third edition, Prentice Hall (2005) P. 316.

75. Richter R., Schläpfer D. Atmospheric / Topographic Correction for Satellite Imagery // DLR German Aerospace Center, ATCOR-2/3 User Guide, 2018. – P. 245.

76. Chavez P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data // Remote Sensing of Environment. – 1988. – Vol. 24(3). – P. 459–479.

77. USGS. Landsat Collection 2 Surface Reflectance / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance (дата обращения: 02.10.2021).

78. OPEN LIBRARY / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ecampusontario.pressbooks.pub/teledetection/chapter/chapter-5-visualisation-et-manipulation-d-images-satellites//(дата обращения: 04/05/2025).

79. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing // Third edition, Prentice Hall, 2008. – P. 954.

80. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote Sensing and Image Interpretation // Seventh edition, Wiley, 2015. – P. 736.

81. Campbell J.B., Wynne R.H. Introduction to Remote Sensing // Fifth edition, Guilford Press, 2011. – P. 667.

82. Chuvieco E. Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach // Second edition, CRC Press, 2016. – P. 468.

83. Campbell J.B., Wynne R.H. Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications / Springer, 2011. – P. 256–260.

84. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. – 2009. – Vol. 113(5). – P. 893–903.

85. Understanding Maximum Likelihood Estimation in Supervised Learning / [Электронный ресурс]. Режим доступа: //theaisummer.com/mle/ (дата обращения: 05/05/2025).

86. OPEN LIBRARY / [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ecampusontario.pressbooks.pub/teledetection/chapter/chapter-6-classification/(дата обращения: 07/05/2025).

87. S. Clandillon, P. Fraipont, H. Yesou. In Assessment of the future spot 4 mir for wetland monitoring and soil moisture analysis: Simulation over the ried center Alsace

France// SPIE Remote Sensing for Agriculture, Forestry, and Natural Resources, Paris, France (1995).

88. ResearchGate [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/figure/Normalized-difference-vegetation-index-NDVI-images-generated-from-Landsat-8-cloud-free_fig2_349429657 (дата обращения : 03.04.2025).

89. EOS DATA ANALYTICS [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://eos.com/fr/make-an-analysis/ndwi/ (дата обращения: 06.04.2025).

90. ResearchGate [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/figure/Normalize-Difference-Water-Index-NDWI-Maps-a-NDWI-in-2009-b-NDWI-in-2019-Map-shows_fig3_355455677 (дата обращения: 07.04.2025).

91. Y. Zha, J. Gao, S. Ni. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // International Journal of Remote Sensing, 24(3) (2003) P. 583–594.

92. ResearchGate [Электронный ресурс]. Режим доступа:https://www.researchgate.net/figure/a-Normalized-difference-built-up-index-NDBI-warmer-colors-indicate-a-higher-index_fig1_327352547 (дата обращения : 08.04.2025).

93. M. Elhag. Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia // Journal of Sensors (2016) P. 96175 – 96175.

94. ResearchGate [Электронный ресурс]. Режим доступа:https://www.researchgate.net/figure/Normalized-Difference Salinity-Index-NDSI-thematic-map-over-the-study-area_fig3_311526496(дата обращения : 09.04.2025).

95. J.L Rodgers, W.A. Nicewander. Thirteen ways to look at the correlation coefficient // 390 The American Statistician, 42 (1) (1988) P.59–66.

96. ResearchGate [Электронный ресурс]. Режим https://www.researchgate.net/figure/Normalized-Difference-Salinity-Index-NDSI-thematic-map-over-the-study-area_fig3_311526496(дата обращения : 11.04.2025).

97. H. J Geist, E. F. Lambin. What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence// LUCC Report Series 2001, No. 4, 136 p.

98. T.Annelise, M.Renaud , H.Vincent. Indices spectraux et classifications d'images multispectrales pour la cartographie du risque vectoriel // OpenEdition Books P. 43–52

99. Чабан, Л.Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2013г., - 96 с.

100. Способ минимального расстояния [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://nrcgit.ru/aster/methods/metods/min_distance.htm (дата обращения: 15.10.2021).

101. Story M., Congalton R.G. Accuracy assessment: a user's perspective // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1986. – Vol. 52(3). – P. 397–399.

102. Richards J.A. Remote sensing digital image analysis. An introduction / J.A. Richards. – Sekond, revised and enlarged edition. – Berlin Heidelberg: Springer – Verlag, 1993. – 339 c.

103. Davis J., Goadrich M. The relationship between Precision-Recall and ROC curves // Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning, 2006. – P. 233–240.

104. He H., Garcia E.A. Learning from Imbalanced Data // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2009. – Vol. 21(9). – P. 1263–1284.

105. Completeness and classification correctness of features on topographic maps: An analysis of the estonian basic map [Электронный ресурс]. Режим доступа: https: //https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/tgis.12257 / (дата обращения: 17.10.2022).

106. Données sur la Côte d'Ivoire [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.presidence.ci/presentation-ci/(дата обращения: 17.11.2022).

107. Grande carte Côte d'Ivoire [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.carte-du-monde.net/pays-432-grande-carte-cote-d-ivoire.html

108. Abidjan [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.liege.be/fr/vie-communale/services communaux/international/jumelages-et-partenaires/abidjan-cote-divoire (дата обращения: 18.11.2022).

109. A.E.H Fatiha, L. Ouadif, A. Akhssas. Monitoring Land Use and Land Cover Changes Using Remote Sensing Techniques and the Precipitation-Vegetation Indexes in Morocco // Ecological Engineering & Environmental Technology 2023, 24(1) P.272–286.

110. L.Zhang, L. Zhang, B. Du. Deep Learning for Remote Sensing Data: A Technical Tutorial on the State of the Art. // IEEE Geosci. Remote Sens. Mag. 2016, 4, P.22–40.

111. H. J Geist, E. F. Lambin. What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence// LUCC Report Series 2001, No. 4, 136 p.

Приложение А

Характеристики космических аппаратов с оптико-электронными системами дистанционного зондирования земной поверхности (ДЗЗ), и радиолокационные спутники

Таблица А.1 – Основные характеристики оптико-электронных космических аппаратов

Название аппарата	**Дата запуска**	**Стартовая площадка**	**Средство выведения**	**Разработчики**	**Масса**	**Тип**	**Высота**	**Наклонение**	**Расчетный срок функциониро-вания**	**Оператор**
ALOS-3	2021 г.		РН H–2A (Япония)	JAXA (Японское аэрокосмическое агентство)	2000 кг	Солнечно-синхронная	618 км	97,9 град.	5 лет	
ALOS/PRISM, AVNIR-2	24 января 2006 г. Выведен из эксплуатации 12 мая 2011 г.	космодром Танегашима (Япония)	РН H–2A (Япония)	JAXA (Японское аэрокосмическое агентство)	4000 кг	Солнечно-синхронная	691,65 км	98,16 град.	5 лет	RESTEC (Япония)
AlSat-2A,2B	12 июля 2010 г. (AlSat-2A), 26 сентября 2016 г. (AlSat-2B)	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV-CA (Индия) (AlSat-2A), РН PSLV-G (Индия) (AlSat-2B)	Airbus Defence and Space (быв. EADS Astrium Satellites) (Франция)	116 кг	Солнечно-синхронная	680 км	97,9 град.	5 лет	Алжирское космическое агентство (ASAL)
Auriga	-	Dauria Aerospace (Россия)			25–30 кг	Солнечно-синхронная				Dauria Aerospace (Россия)
Cartosat-2	10 января 2007 г.	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV–C7 (Индия)	ISRO (Indian Space Research	650 кг	Солнечно-синхронная	630 км	97,91 град.	5 лет	ISRO, Antrix (Индия; поставщик данных)

				Organization; Индия						
Cartosat-2B	12 июля 2010 г.	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV–C15 (Индия)	ISRO (Indian Space Research Organization; Индия)	694 кг	Солнечно-синхронная	630 км	97,71 град.	5 лет	ISRO, Antrix (Индия; поставщик данных)
Cartosat-2C, 2D, 2E, 2F	22 июня 2016 г. (Cartosat-2C), 15 февраля 2017 г. (Cartosat-2D), 23 июня 2017 г. (Cartosat-2E), 12 января 2018 г. (Cartosat-2F)	космодром Шрихарикота (Индия)	PSLV-XL (Индия)	ISRO (Indian Space Research Organization; Индия)	727,5 кг (Cartosat-2C), 714 кг (Cartosat-2D), 712 кг (Cartosat-2E, 2F)	Солнечно-синхронная	505 км (Cartosat-2C, 2E, 2F), 512 км (Cartosat-2D)	97,5 град. (Cartosat-2C, 2E, 2F), 97,85 град. (Cartosat-2D)	5 лет	ISRO, Antrix (Индия; поставщик данных)
Cartosat-3	27 ноября 2019 г.	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV–C15 (Индия)	ISRO (Indian Space Research Organization; Индия)	1600 кг	Солнечно-синхронная	509 км	97,5 град.		ISRO, Antrix (Индия; поставщик данных)
CBERS-4,4A	7 декабря 2014 г. (CBERS-4); 20 декабря 2019 г. (CBERS-4A	космодром Тайюань (Китай)	«Чанчжэн-4B» (Китай)	CAST (China Acdemy of Space Technology; Китай), INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; Бразилия)	1980 кг	Солнечно-синхронная	778 км (CBERS-4); 629 км (CBERS-4A)	97,5 град.	3 лет	

EgyptSat	16 апреля 2014 г. Выведен из эксплуатации 14 апреля 2015 г. (EgyptSat-2); 21 февраля 2019 г. (EgyptSat-A	космодром Байконур (Россия)	РН «Союз-ФГ» (Россия)	РКК «Энергия» им. С.П. Королева (Россия)	1050 кг	Солнечно-синхронная	700 км	51,6 град	5 лет	National Authority for Remote Sensing & Space Sciences (NARSS
EROS-A	EROS-A	космодром Свободный (Россия)	РН «Старт-1»	IAI (Israel Aircraft Industries; Израиль)	250 кг	Солнечно-синхронная	490–505 км	97,3 град.	10 лет	ImageSat International (Израиль)
EROS-B	25 апреля 2006 г.	космодром Свободный (Россия)	РН «Старт-1»	IAI (Israel Aircraft Industries; Израиль)	350 кг	Солнечно-синхронная	510 км	97,4 град.	10 лет	ImageSat International (Израиль)
Formosat-2	20 мая 2004 г. Выведен из эксплуатации в июле 2016 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Taurus (США)	EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)	764 кг	Солнечно-синхронная	891 км	99,1 град.	5 лет	NSPO (National Space Organization; Тайвань). Эксклюзивные права на поставку данных: Airbus Defence and Space
Formosat-5	24 августа 2017 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Falcon-9 (США)	NSPO (National Space Organization; Тайвань)	525 кг	Солнечно-синхронная	720 км	98,3 град.	5 лет	NSPO (National Space Organization; Тайвань)
GeoEye-1	6 сентября 2008 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Delta II (США)	General Dynamics (США), EXELIS (США;	1955 кг	Полярная солнечно-синхронная	678 км	98,1 град.	7 лет	DigitalGlobe (США)

				бортовая съемочная						
GF-1,6,7,10,11,13, 14	26 апреля 2013 г. (GF-1-1), 31 марта 2018 г. (GF-1-2,3,4), 2 июня 2018 г. (GF-6), 31 июля 2018 г. (GF-11), 4 октября 2019 г. (GF-10), 3 ноября 2019 г. (GF-7), 7 сентября 2020 г. (GF-11-02), 11 октября 2020 г. (GF-13), 6 декабря 2020 г. (GF-14)	Космодром Цзюцюань (Китай) (GF-1-1, GF-6), космодром Тайюань (Китай) (GF-1-2,3,4,7,10,11 ,11-02), (GF-13,14	CZ-2D (Китай) (GF-1-1, GF-6), CZ-4C (GF-1-2,3,4), CZ-4B (GF-7,10, 11,11-02), CZ-3B (GF-13,14	CAST/BISSE (China's Academy of Space Technology / Beijing Institute of Spacecraft System Engineering)	1080 – 2400 кг	Солнечно-синхронная	500–650 км	97,5–98 град.	5–8 лет	
GF-2	19 августа 2014 г.	Космодром Цзюцюань (Китай)	CZ-4B (Китай)	CAST/BISSE (China's Academy of Space Technology / Beijing Institute of Spacecraft	2100	Солнечно-синхронная	631 км	98 град.	5–8 лет	

				System Engineering)						
GF-5	8 мая 2018 г. (GF-5), 7 сентября 2021 г. (GF-5-2)	Космодром Тайюань (Китай)	CZ-4C (Китай)	CAST/BISSE (China's Academy of Space Technology / Beijing Institute of Spacecraft System Engineering)		Солнечно-синхронная	700 км	98,1 град.	8 лет	
Ikonos	24 сентября 1999 г. Выведен из эксплуатации в марте 2015 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Athena-2 (США)	Lockheed Martin (США)	726 кг	Солнечно-синхронная	680 км	98,1 град.	7 лет	DigitalGlobe (США)
Ingenio	17 ноября 2020 г. (запуск закончился неудачей)			EADS CASA (Construcciones Aeronauticas S.A.; Испания)	750 кг	Солнечно-синхронная	670 км	98,9 град.	7 лет	HISDESAT (Hisdesat Servicios Estratйgicos, S.A.; Испания)
KazEOSat-1	30 апреля 2014 г.	космодром Куру (Французская Гвиана)	РН Vega (Франция)	Airbus Defence and Space (Франция)	830 кг	Солнечно-синхронная	750 км	98,5 град.	7 лет	АО НК «Қазақстан Ғарыш Сапары»
KazEOSat-2	19 июня 2014 г	пусковая база «Ясный» (Россия)	РН «Днепр» (Россия)	Airbus Defence and Space (Франция), SSTL (Великобритания)	185 кг	Солнечно-синхронная	630 км	98 град	7 лет	АО НК «Қазақстан Ғарыш Сапары»

KhalifaSat	29 октября 2018 г.	MBRSC (Mohammed Bin Rashid Space Center ; ОАЭ)	космодром Танегашима (Япония)	РН H-2A-202 (Япония)	330 кг	Солнечно-синхронная	613 км	97,1 град.	5 лет	MBRSC (Mohammed Bin Rashid Space Center; ОАЭ)
Kompsat-2	28 июля 2006 г	космодром Плесецк (Россия)	РН «Рокот» (Россия	KARI (Korea Aerospace Research Institute; Республика Корея), EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)	800 кг	Солнечно-синхронная	685 км	98 град.		KARI. Эксклюзивные права на поставку данных: Airbus Defence and Space
Kompsat-3, 3A	17 мая 2012 г. (KOMPSAT-3), 25 марта 2015 г. (KOMPSAT-3A)	космодром Танегашима (Япония) (KOMPSAT-3), пусковая база «Ясный» (Россия) (KOMPSAT-3A)	РН H–2A (Япония) (KOMPSAT-3), РН «Днепр» (Россия) (KOMPSAT-3A)	KARI (Korea Aerospace Research Institute; Республика Корея), EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)	1000 кг	Солнечно-синхронная	700 км	98,1 град	4 года	KARI
Landsat-7	15 апреля 1999 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Delta II (США)	Lockheed Martin (США)	1973 кг	Солнечно-синхронная	705 км	98,2 град.	7 лет	NASA (США), NOAA (США) и USGS (США)
Landsat-8	11 февраля 2013 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Atlas 5 (США)	Orbital Sciences Corporation (OSC) (США; быв. General Dynamics	2623 кг	Солнечно-синхронная	705 км	98,2 град.	5 лет	NASA (США) и USGS (США)

				Advanced Information Systems) (платформа); Ball Aerospace (полезная нагрузка) (США)						
Landsat-9	27 сентября 2021 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Atlas 5 (США)	Northrop Grumman Innovation Systems (США)	2623 кг	Солнечно-синхронная	650 км	98,2 град.	7 лет	NASA (США) и USGS (США)
Miranda VRSS-1	29 сентября 2012 г.	космодром Цзюцюань (Китай)	РН Long March-2D (Китай)	CAST (China Acdemy of Space Technology; Китай)	880 кг	Солнечно-синхронная	639 км	98 град.	5 лет	ABAE (Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales — Венесуэльское космическое агентство
Mohammed VI A, B	8 ноября 2017 г. (Mohammed VI A), 21 ноября 2018 г. (Mohammed VI B)	космодром Куру (Французская Гвиана)	РН «Vega» (Франция)	Airbus Defence and Space (Франция; платформа), Thales Alenia Space (Италия; оборудование)	1110 кг	Солнечно-синхронная	620 км	98 град.	5 лет	CRTS (Centre Royal de Télédétection Spatiale; Марокко)
Nigeriasat-2	17 августа 2011 г	пусковая база «Ясный» (Россия)	РН «Днепр» (Россия)	SSTL (Великобритания)	286 кг	Солнечно-синхронная	718 км	98,2 град.	7 лет	Национальное космическое агентство Нигерии (NASRDA)
OrbView-3	26 июня 2003 г. Выведен из эксплуатации 4 марта 2007 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Pegasus-XL (США)	Orbital Sciences Corporation (США)	304 кг	Солнечно-синхронная	470 км	97 град		DigitalGlobe (США)

Pleiades-1A, 1B	17 декабря 2011 г. (Pleiades-1A), 2 декабря 2012 г.(Pleiades-1B)	космодром Куру (Французская Гвиана)	РН «Союз» (Россия)	EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)	1015 кг	Солнечно-синхронная	705 км	98,2 град.	5 лет	Airbus Defence and Space
PRISMA	PRISMA	Космодром Куру (Французская Гвиана	РН Vega (Франция)	OHB Italia SpA (Италия)	879 кг	Солнечно-синхронная	615 км	97,8 град.	5 лет	Итальянское космическое агентство (ASI)
QuickBird	18 октября 2001 г. Выведен из эксплуатации в декабре 2014 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Delta II (США)	Ball Aerospace & Technologies (США	1018 кг	Солнечно-синхронная	450/482 км	98 град.	7 лет	DigitalGlobe (США)
RapidEye	29 августа 2008 г. Выведены из эксплуатации 1 апреля 2020 г.	космодром Байконур (Россия)	РН «Днепр» (Россия)	MDA (Канада), SSTL (Великобритания)	150 кг	Солнечно-синхронная	630 км	97,8 град.	7 лет	Planet (США)
Resourcesat-1 (IRS-P6)	17 октября 2003 г. Выведен из эксплуатации 7	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV-C5 (Индия)	ISRO (Indian Space Research Organization; Индия)	1360 кг	Солнечно-синхронная	817 км	98,7 град.	98,7 град.	ISRO, Antrix (Индия; поставщик данных)

	декабря 2013 г.									
Resourcesat-2,2A	20 апреля 2011 г. (RESOURCESAT-2), 6 декабря 2016 г. (RESOURCESAT-2A)	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV-C16 (Индия)	ISRO (Indian Space Research Organization; Индия)	1206 кг	Солнечно-синхронная	822 км	98,7 град.	5 лет	ISRO, Antrix (Индия; поставщик данных)
Sentinel-2A, 2B	29 августа 2008 г. Выведены из эксплуатации 1 апреля 2020 г.	космодром Байконур (Россия)	РН «Днепр» (Россия	MDA (Канада), SSTL (Великобритания)	150 кг	Солнечно-синхронная	630 км	97,8 град.	7 лет	Planet (США)
Spot-2, 4	21 января 1990 г. Выведен из эксплуатации в 2009 г.(Spot-2). 24 марта 1998 г. Выведен из эксплуатации 11 января 2013 г.(SPOT-4).	космодром Куру (Французская Гвиана)	РН Ariane (Франция)	EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)	1870 кг (Spot-2). 822 кг (Spot-4).	Солнечно-синхронная	825 км(Spot-2). 822 км (Spot-4).	98,7 град.	5 лет	Airbus Defence and Space
Spot-5	3 мая 2002 г.	космодром Куру	РН Ariane (Франция)	EADS Astrium Satellites	3000 кг	Солнечно-синхронная	822 км	98,7 град.	5 лет	Airbus Defence and Space

	Выведен из эксплуатации 29 марта 2015 г.	(Французская Гвиана)		(Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)						
SSOT	16 декабря 2011 г.	космодром Куру (Французская Гвиана)	РН «Союз» (Россия)	EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)	117 кг	Солнечно-синхронная	620 км	97,9 град.	5 лет	ACE (Agencia Chilena del Espacio — Чилийское космическое агентство
SuperView-1	26 декабря 2016 г. (SuperView-1A,B); 9 января 2018 г. (SuperView-1C,D)	Космодром Цзюцюань (Китай) (SuperView-1A,B); Космодром Тайюань (Китай) (SuperView-1C,D	CZ-2D (Китай)		560 кг	Солнечно-синхронная	530 км	97,6 град.	8 лет	SpaceWill
Terra/ASTER	18 декабря 1999 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Atlas II (США)	Lockheed Martin (США)	5190 кг	Полярная солнечно-синхронная	705 км	98,2 град.	6–7 лет	NASA (США)
TH-1, TH-2	24 августа 2010 г. (TH-1-1), 6 мая 2012 г. (TH-1-2), 26 октября 2015 г. (TH-1-3), 29 апреля 2019 г (TH-2-1A,	Космодром Цзюцюань (Китай) (TH-1), космодром Тайюань (TH-2)	CZ-2D (Китай) (TH-1), CZ-4B (TH-2)	China Aerospace Science and Technology Corporation, Chinese Academy of Space Technology (CAST)	1000 кг	Солнечно-синхронная	500 км	97,3 град.	3 лет	Beijing Space Eye Innovation Technology Company (BSEI)

	B), 29 июля 2021 г. (TH-1-4),18 августа 2021 (TH-2-2A, B)									
THEOS	1 октября 2008 г.	пусковая база «Ясный» (Россия)	РН «Днепр» (Россия)	EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)	715 кг	Солнечно-синхронная	825 км	98,8 град.	5–7 лет	GISTDA (Таиландское агентство по геоинформатике и развитию космических технологий)
TripleSat Constellation (DMC-3)	10 июля 2015 г.	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV-28 (Индия)	SSTL (Великобритания)	447 кг	Солнечно-синхронная	630 км	98,1 град.	7 лет	21AT (Китай), DMCii (Великобритания)
VRSS-2	8 октября 2017 г.	космодром Цзюцюань (Китай)	РН Long March-2D (Китай)	CAST (China Acdemy of Space Technology; Китай)	1000 кг	Солнечно-синхронная	650 км	98 град.	5 лет	ABAE (Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales — Венесуэльское космическое агентство)
WorldView-1	18 сентября 2007 г.	авиабаза Ванденберг (США	РН Delta II (США)	Ball Aerospace & Technologies (США; платформа, интеграция), Eastman Kodak (США; оптическая камера), EXELIS (США; интеграция), BAE Systems (США; система обработки)	2500 кг	Солнечно-синхронная	496 км	97,2 град.	7 лет	DigitalGlobe (США)

WorldView-2	8 октября 2009 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Delta II (США)	Ball Aerospace & Technologies (США; платформа, интеграция), Eastman Kodak (США; оптическая камера), EXELIS (США; интеграция), BAE Systems (США; система обработки)	2800 кг	Солнечно-синхронная	770 км	97,2 град.	7 лет	DigitalGlobe (США)
WorldView-3	13 августа 2014 г.	Ball Aerospace & Technologies (США), EXELIS (США; бортовая съемочная аппаратура)	авиабаза Ванденберг (США)	РН Atlas-5 (США)	2800 кг	Солнечно-синхронная	620 км	98 град.	7 лет	DigitalGlobe (США)
WorldView-4	11 ноября 2016 г. Выведен из эксплуатации 7 января 2019 г.	Lockheed Martin (США), Harris Corporation (США; бортовая съемочная аппаратура)	авиабаза Ванденберг (США)	РН Atlas-V-401 (США)	2087 кг	Солнечно-синхронная	617 км		7 лет	DigitalGlobe (США)
Zhuhai-1	15 июня 2017 г. (OVS-1A, B), 26 апреля 2018 г.	Космодром Цзюцюань (Китай)	CZ-4B (Китай) (OVS-1A, B), CZ-11 (OVS-2,3A, OHS -	Orbita Aerospace (Китай)	50–90 кг	Солнечно-синхронная	500 км			

	(OVS-2, OHS - 1,2,3,4), 19 сентября 2019 г. (OVS-3A, OHS-3A, B, C, D)		1,2,3,4, 3A, B, C, D)							
ZY-3	9 января 2012 г. (КА ZY-3-1), 30 мая 2016 г. (КА ZY-3-2), 25 июля 2020 г. (КА ZY-3-3)	Космодром Тайюань	CZ-4B (Китай)	CAST/BISSE (China's Academy of Space Technology / Beijing Institute of Spacecraft System Engineering)	2630 кг	Солнечно-синхронная	509 км	97,4 град.	5 лет	
Аист-2Д	9 января 2012 г. (КА ZY-3-1), 30 мая 2016 г. (КА ZY-3-2), 25 июля 2020 г. (КА ZY-3-3)	Космодром Тайюань	CZ-4B (Китай)	CAST/BISSE (China's Academy of Space Technology / Beijing Institute of Spacecraft System Engineering)	2630 кг	Солнечно-синхронная	509 км	97,4 град.	5 лет	
МКА-Н-1,2	14 июля 2017 г. (спутники на связь не вышли и считаются потерянными)	космодром Байконур (Россия)	РН «Союз-2.1а» (Россия)	Компания «Даурия Аэроспейс» (Россия)	10 кг		450 км		3 лет	

Монитор-Э	26 августа 2005 г. Выведен из эксплуатации в августе 2008 г.	космодром Плесецк (Россия)	РН «Рокот» (Россия)	ГКНПЦ им. М.В. Хруничева (Россия)	750 кг	Солнечно-синхронная	550 км	97,5 град	5 лет	НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы» (Россия)

Таблица А.2 – Основные характеристики радиолокационных спутников

Название аппарата	**Дата запуска**	**Стартовая площадка**	**Средство выведения**	**Разработчики**	**Масса**	**Тип**	**Высота**	**Наклонение**	**Расчетный срок функционирования**	**Оператор**
ALOS (PALSAR)	24 января 2006 г. Выведен из эксплуатации 12 мая 2011 г.	космодром Танегашима (Япония)	РН H–2A (Япония)	JAXA (Японское аэрокосмическое агентство)	4000 кг	Солнечно-синхронная	691,65 км	98,16 град.	5 лет	JAXA (Японское аэрокосмическое агентство)
ALOS-2	24 мая 2014 г.	космодром Танегашима (Япония)	РН H-2A (Япония)	JAXA (Японское аэрокосмическое агентство)	2000 кг	Солнечно-синхронная	628 км	97,9 град.	5 лет	JAXA (Японское аэрокосмическое агентство)
ASNARO-2	24 января 2006 г. Выведен из эксплуатации 12 мая 2011 г.	космодром Танегашима (Япония)	РН H–2A (Япония)	JAXA (Японское аэрокосмическое агентство)	4000 кг	Солнечно-синхронная	691,65 км	98,16 град.	5 лет	JAXA (Японское аэрокосмическое агентство)
Capella	3 декабря 2018 г. (Capella-1), 31 августа 2020 г. (Capella-2), 24 января 2021 г. (Capella-3,4), 30 июня 2021 г. (Capella-5),	авиабаза Ванденберг (США) (Capella-1), космодром Махиа (Новая Зеландия) (Capella-2), космодром Мыс	РН Falcon-9 (США) (Capella-1,3,4,5,6), Electron KS (Новая Зеландия) (Capella-2)	Capella Space (США)	40 кг (Capella-1), 100 кг (Capella-2,3,4)	Солнечно-синхронная	570 км	97,8 град.	5 лет	

	15 мая 2021 г. (Capella-6)	Канаверал (США) (Capella-3,4,5,6)								
Envisat	1 марта 2002 г. Выведен из эксплуатации 9 мая 2012 г.	космодром Куру (Французская Гвиана)	РН Ariane (Франция)	EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space	8211 кг	Солнечно-синхронная	790 км	98,55 град.	4 лет	Европейское космическое агентство (ESA)
GF-3,12, 12-2	1 марта 2002 г. Выведен из эксплуатации 9 мая 2012 г.	космодром Куру (Французская Гвиана)	РН Ariane (Франция)	EADS Astrium Satellites (Франция) (ныне — Airbus Defence and Space)	8211 кг	Солнечно-синхронная	790 км	98, 55 град.	4 лет	Европейское космическое агентство (ESA)
KOMPSAT-5	22 августа 2013 г.	пусковая база «Ясный» (Россия)	РН «Днепр» (Россия)	KARI (Korea Aerospace Research Institute; Корея), Thales Alenia Space (Италия; бортовая радарная съемочная система — SAR)	1400 кг	Солнечно-синхронная	550 км	97,6 град.	5	KARI
NovaSAR-S	16 сентября 2018 г.	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV-CA (Индия)	SSTL (Великобритания)	430 кг	Солнечно-синхронная	580 км	... град.	7	SSTL (Великобритания)
Radarsat-1	4 ноября 1995 г. Выведен из эксплуатации 9 мая 2013 г.	авиабаза Ванденберг (США)	РН Delta II (США)	CSA (Канадское космическое агентство), MDA (Канада)	2750 кг	Солнечно-синхронная	798 км	98,6 град.	7	MDA
RISAT-2B, EOS-01	22 мая 2019 г. (RISAT-2B), 11 декабря 2019 г. (RISAT-2BR1), 7 ноября 2020 г. (EOS-01)	космодром Шрихарикота (Индия)	РН PSLV-CA	ISRO (Indian Space Research Organization; Индия)	615 кг	Солнечно-синхронная	555 км	37 град.	5 лет	ISRO

StriX	15 декабря 2020	Electron KS (Новая Зеландия)	космодром Махиа (Новая Зеландия)	Synspective (Япония)	150 кг					Synspective (Япония)
Umbra-SAR	30 июня 2021 г.	PH Falcon-9 (США)Стар	космодром Мыс Канаверал (США)		50 кг (Capella-1)	Солнечно-синхронная				Umbra (США)