

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

Ассех К.Ф., Беленко В.В.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,

105064, Москва, Россия

e-mail: belenko.v.v@yandex.ru

Мониторинг землепользования является одним из главных приоритетов рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды в Кот-д'Ивуаре. В городе Абиджан, экономической столице Кот-д'Ивуара, наблюдаются пространственно-временные изменения в землепользовании, вызванные антропогенной деятельностью и ростом населения. В рамках данного исследования была предложена методология для обнаружения и идентификации пространственно-временных изменений в составе земель на основе мультиспектральных снимков Landsat, охватывающих период с 2000 по 2022 год. Был разработан метод комбинации спектральных индексов (NDBI, NDVI, NDSI, SAVI, NDWI) с определенными пороговыми значениями. Полученные результаты показали увеличение площади застроенных территорий и сокращение других видов землепользования. Общая точность, превышающая 94%, что свидетельствует о надёжности методологии.

Ключевые слова: землепользование, космические снимки, пространственно-временное изменение, тематическая картография, Абиджан.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF METHODS FOR DETECTING CHANGES IN LAND COMPOSITION BASED ON A COMPLEX OF SYNTHESIZED AND INDEXED IMAGES

Asseh K.F., Belenko V.V.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Land-use monitoring is one of the main priorities for the sustainable use of natural resources and environmental protection in Ivory Coast. The city of Abidjan, the economic capital of Ivory Coast, is experiencing spatio-temporal changes in land use due to human activities and population growth. As part of this study, a methodology was proposed to detect and identify spatio-temporal changes in land cover using Landsat multispectral imagery covering the period from 2000 to 2022. Two complementary approaches were developed: a combination of spectral indices (NDBI, NDVI, NDSI, SAVI, NDWI) with specific thresholds. The results revealed an increase in built-up areas and a decrease in other land-use types. The overall accuracy, which exceeds 94%, demonstrates the reliability of the methodology.

Keywords: land use, satellite imagery, spatio-temporal change, thematic cartography, Abidjan.

Введение

В последние годы нормальное функционирование глобальной земной системы было нарушено резкими и систематическими изменениями в её различных компонентах [1,2]. Изменение землепользования является надёжным индикатором совокупного воздействия природных явлений и антропогенной деятельности на Земле [3,4]. Социально-экономические факторы, такие как рост населения, экономическое развитие, урбанизация и политика, специфичная для каждого места и конкретного момента времени, являются основными причинами изменения землепользования в Африке [5]. Абиджан, экономическая столица Кот-д'Ивуара, как и все крупные африканские города на протяжении десятилетий, сталкивается с ускоренным пространственным и демографическим ростом [6]. Однако эта урбанизация сопровождается множеством проблем, таких как сокращение растительного покрова, деградация почв, расширение площадей непроницаемых поверхностей [7]. В этом контексте

необходимо отслеживать и количественно оценивать динамику землепользования в этом густонаселённом районе.

Материалы и методы исследования

Объект исследования. В качестве объекта исследования выбран город Абиджан на территории Кот-д'Ивуара (рисунок 1). Абиджан – экономическая столица Кот-д'Ивуара, с населением 4.5 миллиона человек (по состоянию на 2025 год), что составляет 20% от общей численности населения страны, является одним из самых густонаселённых 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 [8].

Для исследования отобраны данные ДЗЗ из космоса, соответствующие продолжительному сухому сезону (с декабря по февраль) периоду, в течение которого облачный покров является самым низким. Кроме того, этот выбор способствует снижению

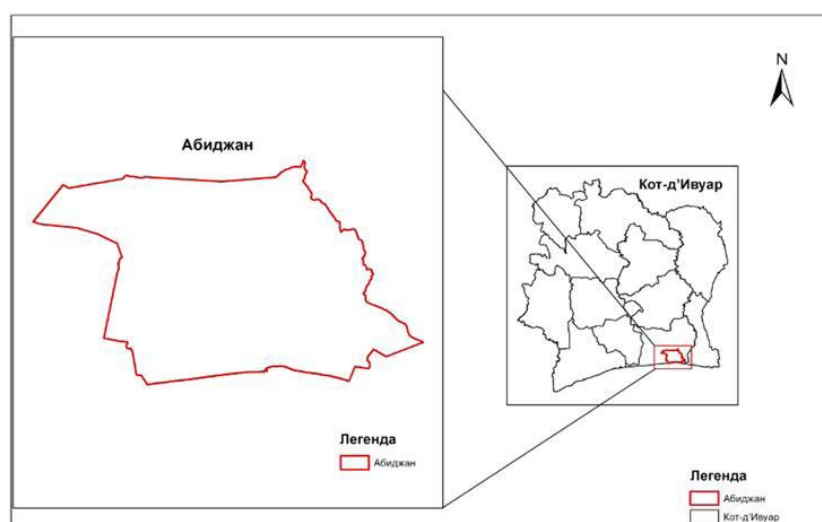


Рис. 1. Расположение района исследования выделено красными линиями

возможных сезонных эффектов (таблице 1).

Методы исследования. Цифровая обработка спутниковых изображений осуществлялась в два основных этапа: предварительная обработка и обработка.

Предварительная обработка. Предварительная обработка, выполненная в QGIS, включала атмосферную коррекцию с помощью алгоритма DOS1 (Dark Object Subtraction) для уменьшения мешающих эффектов атмосферы [9,10]. Затем были созданы мозаики и цветовые комбинации спектральных полос (7-6-4, 5-4-3, 6-5-4, 6-4-2 и 4-3-2) с целью облегчения визуальной интерпретации, которые послужили основой для определения границ обучаю-

щих зон для контролируемой классификации.

Контролируемая классификация. Используемый нами алгоритм классификации SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) в программе QGIS требует определения двух уровней классификации: уровня метаклассов и уровня классов. Метакласс – это, например, растительность, которая объединяет такие классы, как леса и луга. Каждый метакласс и каждый класс будет иметь метку, а также целочисленный идентификатор, необходимый для работы алгоритма классификации. В нашем случае классификация снимков Landsat была выполнена, как указано в таблице 2.

Было выделено шесть мета-классов,

Таблица 1

Исходные снимки для анализа изменений

Территория	Спутник	Дата съемки	Пролет, сцена
г. 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

Таблица 2

Иерархия классов землепользования¹

ID (идентификация) мета-класса	Метка мета-класса	ID (идентификация) класса	Метка класса
1	застроенные территории	1	застроенные территории
2	густой лес	2	густой лес
3	вторичный лес	3	вторичный лес
4	посадки леса	4	посадка леса
5	поверхностные водотоки и водоемы	5	поверхностные водотоки и водоемы
6	открытые грунты	6	открытые грунты

¹Категория землепользования приведен в соответствии с законодательством Кот-д'Ивуара и реквизиты того документа, который это содержит:
 – Закон №2019-675 от 23 июля 2019 года о Лесном кодексе;
 – Закон №2014-417 от 14 августа 2014 года об управлении лесами;
 – Закон №96-766 от 3 октября 1996 года о воде;
 – Закон №98-750 от 23 декабря 1998 года о Кодексе сельских земель;
 – Закон №2014-141 от 24 марта 2014 года об Экологическом кодексе.

подразделенных на шесть классов землепользования. Затем для каждого класса были определены и оцифрованы полигоны обучения ROI (Region Of Interest), чтобы отразить спектральную изменчивость внутри одного и того же класса и послужить основой для обучения алгоритма классификации. Затем была применена классификация с помощью алгоритма максимального правдоподобия и оценена с помощью матрицы ошибок, коэффициента Каппа и общей точности, сгенерированных алгоритмом SCP программного обеспечения QGIS. Наконец, классифицированные изображения были векторизованы и преобразованы в тематические карты, иллюстрирующие пространственно-временную динамику землепользования.

Статистический анализ темпов изменения единиц землепользования

Для количественной оценки изменений в землепользовании после классификации снимков был

проведен статистический анализ различных классов. Использовались два показателя: коэффициент общего изменения (Tg) позволил определить изменение площади каждого класса землепользования между двумя периодами исследования, а среднегодовой коэффициент пространственной экспансии (Tc) позволил детально оценить изменения, произошедшие внутри каждого класса землепользования [11].

Анализ спектральных индексов

Для индивидуального определения каждого класса землепользования мы использовали комбинацию спектральных индексов с определением конкретных пороговых значений для каждого класса землепользования (таблица 3).

Результаты и обсуждение

Классификация изображений Landsat, на основе синтеза каналов 7-6-4, 5-4-3, 6-5-4, 6-4-2 и 4-3-2, позволила определить шесть основных классов

Таблица 3

Спектральные индексы, используемые для различения различных классов землепользования

Цель анализа	Спектральные индексы	Математическое выражение (растровый калькулятор QGIS)	Роль в обнаружении
Оценка расширения застроенных территорий	NDBI и NDVI	$\frac{((("B6@1" - "B5@1") / ("B6@1" + "B5@1" + 0.0001)) > -0.01) \text{ AND } ((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) < 0.2)}$	NDBI > -0,01 (выбор зон застройки) и NDVI < 0,2. Константа 0,0001 предотвращает деление на 0, обеспечивая цифровую стабильность.
Идентификация густых лесов	NDVI	$((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) > 0.6)$	NDVI > 0,6 позволяет отличить густые леса от других типов землепользования
Нарушение вторичных лесов	NDVI	$((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) > 0.3) \text{ AND } ((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) < 0.6)$	0,3 < NDVI < 0,6 позволяет отличить вторичные леса от густых лесов (NDVI > 0,6)
Обнаружение посадок леса	SAVI	$(((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.5)) * 1.5) > 0.1452) \text{ AND } (((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.5)) * 1.5) \leq 0.3984)$	0,1452 ≤ SAVI ≤ 0,3984 позволяет включить только сельскохозяйственные насаждения
Идентификация поверхностных водотоков и водоемов	NDWI, NDVI и NDBI	$(((("B2@1" - "B4@1") / ("B2@1" + "B4@1" + 0.5)) * 1.5) > 0) \text{ AND } (((("B3@1" - "B5@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) > 0.1318) \text{ AND } ((("B6@1" - "B5@1") / ("B6@1" + "B5@1" + 0.0001)) < 0.1))$	NDWI > 0 обнаружение и идентификация водоемов. NDVI > -0,1318 исключение растительности. NDBI < 0,1, исключение городских зон и зданий.
Идентификация открытых грунтов	NDSI, NDVI, NDBI	$(((("B6@1" - "B3@1") / ("B6@1" + "B3@1" + 0.0001)) > 0.2) \text{ AND } ((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) < 0.2) \text{ AND } ((("B6@1" - "B5@1") / ("B6@1" + "B5@1" + 0.0001)) < 0.02)$	NDSI > 0,2 позволяет выделять классы на основе значительного контраста между полосами. NDVI < 0,2 исключает зоны с растительностью. NDBI > 0,02 исключает зоны, которые можно спутать с открытыми грунтами.

землепользования – застроенные территории, густые леса, вторичные леса, посадки леса, поверхностные водотоки и водоёмы и открытые грунты (рисунок 2).

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 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. Фактически, значения индекса для пикселей 2022 года, правильно отнесенных к классам, указывают на общую точность 97.17 % и статистический коэффициент Каппа-Коэна 0.96.

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 (2000, 2017 и 2022). Этот метод позволял получить общее представление об изменениях, происходивших на изучаемой территории. Состояние земного покрова за 2000, 2017 и 2022 годы на территории анализа представлено в таблице 4 и на рисунке 3.

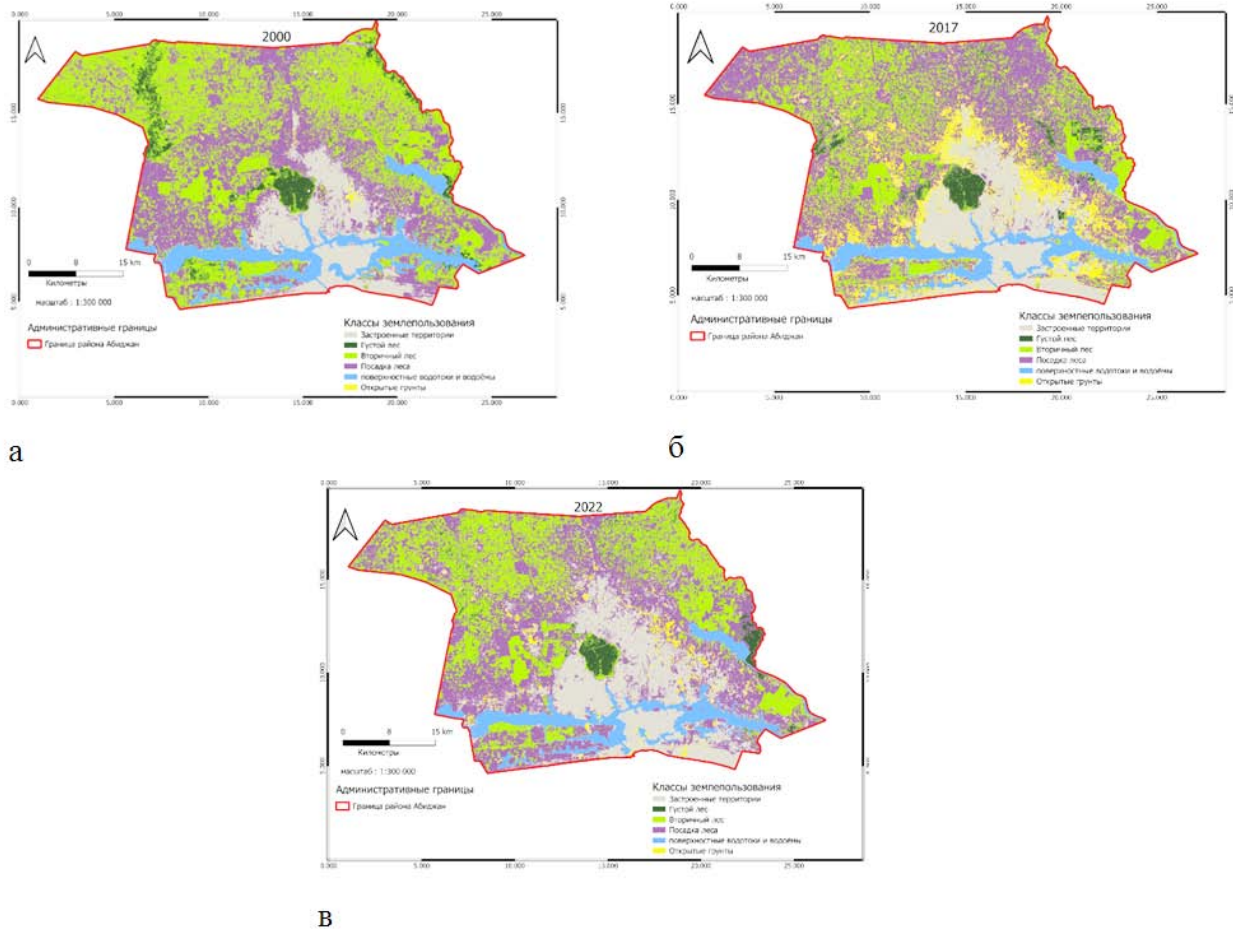


Рис. 2. Карто-схема землепользования в Абиджане за период: а – 2000; б – 2017; в – 2022

Таблица 4

Площадь в квадратных километрах (км²) и процент (%) классов землепользования

Классы землепользования	Площадь 2000		Площадь 2017		Площадь 2022	
	км ²	Процент (%)	км ²	Процент (%)	км ²	%
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
Посадки леса	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

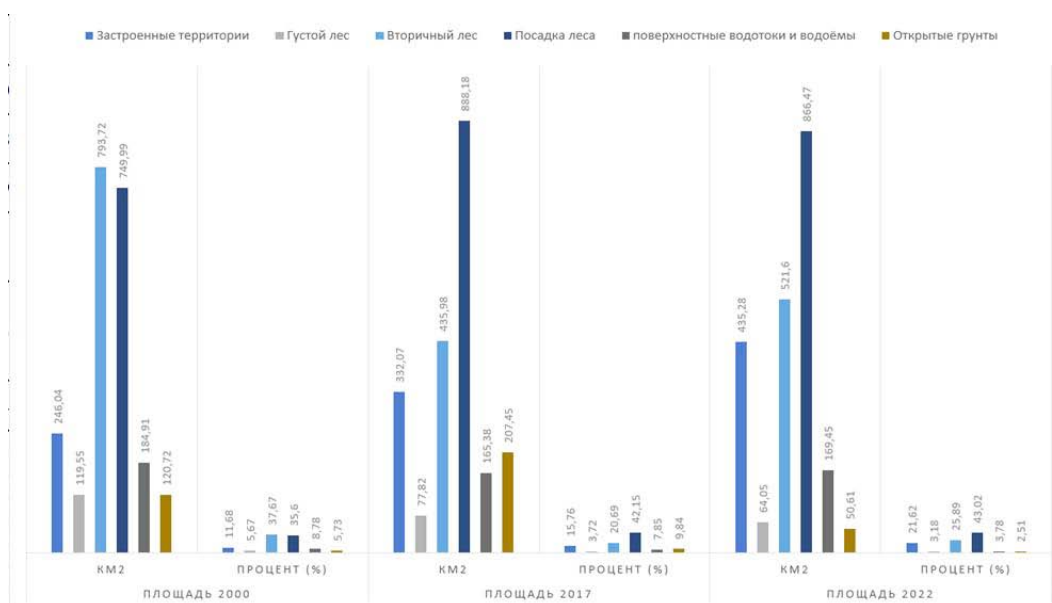


Рис. 3. Диаграмма эволюции площадей различных классов земного покрова 2000, 2017 и 2022 гг.

Следуя приведенной выше таблице, была построена диаграмма эволюции площадей различных классов землепользования 2000, 2017 и 2022 годов.

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 посадки леса (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. Однако эти изменения могут быть также связаны с давлением со стороны сельского хозяйства, лесопользования, климатических колебаний, деградации почв и пожаров растительного покрова. Действительно, увеличение площади застроенных территорий и посадки леса указывает на расширение городской инфраструктуры и экономической деятельности.

В этой связи оценка землепользования с 2000 по 2022 год представлена в таблице 5. Она суммирует различные классы землепользования и уровни изменения, которые являются следующими: общая скорость изменения (T_g) и среднегодовая норма пространственного расширения (T_c).

Анализ таблицы показывает, что из шести определенных классов земного покрова четыре испытали снижение. Эти классы представляют 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 два других класса землепользования, а именно застроенные территории (2.41%) и посадки леса (0.63%). Действительно, это увеличение застроенных территорий и посадки леса наносит ущерб лесам и открытым грунтам.

Результаты, полученные в результате объединения спектральных индексов с определением пороговых значений для каждой категории использования, позволили нам создать двоичные изображения, преобразованные в вектор, что дало возможность индвидуально различать различные классы. В таблице 6

Таблица 5

Оценка землепользования с 2000 по 2022 гг.

Классы землепользования	Общая скорость изменения (T_g) (%)	Среднегодовая скорость пространственного расширения (T_c) (%)
Застроенные территории	+76.91	+2.41
Густой лес	-46.43	-2.64
Вторичный лес	-34.27	-1.90
Посадки леса	+15.53	+0.63
Поверхностные водотоки и водоёмы	-8.36	-0.39
Открытые грунты	-58.08	-4.14

представлена эволюция застроенных территорий и незастроенных территорий, а в таблице 7 – переходы для застроенных территорий.

Анализ результатов, полученных с помощью комбинации NDBI и NDVI, показывает значительное увеличение площади урбанизированных территорий в период с 2000 по 2022 год. В 2000 году площадь составляла 100.71 км², или примерно 4.99%, а затем в 2017 году увеличилась до 468,86 км², то есть за 17 лет произошло увеличение на 368.15 км², что объясняется периодом ускоренной урбанизации, связанным с сильным ростом населения, оттоком населения из сельских районов и неконтролируемой урбанизацией. Затем застроенные территории увеличиваются, достигнув 581.42 км² в период с 2017 по 2022 год, то есть на 112.56 км² больше, чем за пять лет. Анализ динамики площади исследуемой территории показывает постоянное сокращение площади незастроенных территорий: в 2000 году она составляла 2 006.75 км², в 2017 году сократилась до 1 638,59 км², а затем – до 1 526.03 км².

Затем мы исследовали динамику развития густых лесов, а также отслеживали их эволюции (таблицы 8 и 9), где показаны изменения за 17 лет.

Хронологический анализ, основанный на результатах NDVI, показывает динамику изменений на исследуемой территории в период с 2000

по 2022 год. Наблюдается постоянное сокращение площади густых лесов в период с 2000 по 2022 год: с 588.88 км², что составляет примерно 29.19% от общей площади города Абиджан, до 463.01 км², что соответствует сокращению на 125.87 км² в год, или примерно на 21.37% в 2017 году, а затем до 438.04 км² в 2022 году. Анализ динамики густых лесов за три исследуемых периода показывает их постоянное сокращение. Это явление объясняется сильным антропогенным воздействием на лесной покров. Что касается вторичных лесов, то в таблицах 10-11 представлен анализ их пространственного распределения с 2000 по 2022 год по всему округу Абиджан.

Анализ данных мультиспектральной космической съемки свидетельствует о продолжающейся деградации вторичных лесов. Их площадь, которая в 2000 году составляла 578.92 км² (27.7%), сократилась до 501.73 км² в 2017 году, что соответствует уменьшению на 77.19 км² и темпам утраты в 4.54 км² в год. Эта значительная потеря сопровождается увеличением дефицита вторичных лесов, что приводит к расширению сельскохозяйственных угодий и территорий, используемых для деятельности человека. В период с 2017 по 2022 год, напротив, будет наблюдаться более умеренное сокращение площади вторичных лесов – на 21.25 км², или 4.25 км² в

Таблица 6

Развитие застроенных территорий и отсутствие застроенных территорий

Год	Застроенные территории (км ²)	Отсутствие застроенных территорий(км ²)	Итого (км ²)
2000	100.71	2006.75	2107.45
2017	332.06	1775.39	2107.45
2022	342.94	1764.54	2107.45

Таблица 7

Переходы застроенных территорий

Период	Площадь застроенных территорий, приобретенных (км ²)	Развитие (%)
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

Таблица 8

Развитие густого леса и отсутствие густого леса

Год	Густой лес (км ²)	Отсутствие густого леса (км ²)	Итого (км ²)
2000	588.88	1518.57	2107.45
2017	463.01	1654.44	2107.45
2022	438.04	1669.41	2107.45

Таблица 9

Переходы густого леса

Период	Площадь утраченного густого леса (км ²)	Развитие (%)
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

Таблица 10

Развитие вторичных лесов и отсутствие вторичных лесов

Год	Вторичный лес (км²)	Отсутствие вторичного леса (км²)	Итого (км²)
2000	578.92	1528.53	2107.45
2017	501.73	1605.72	2107.45
2022	480.48	1626.97	2107.45

Таблица 11

Переходы вторичных лесов

Период	Площадь утраченного Вторичного леса (км²)	Развитие (%)
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

год. 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.

Пространственно-временная динамика изменений посадок лесов представлена в таблицах 12 и 13.

В 2000 году площадь посадки леса в области нашего исследования составляла 589.72 км² (27.98%). В период с 2000 по 2017 год площадь посадки леса значительно сократилась, достигнув 464.33 км², что соответствует снижению на 21.26% при среднегодовом темпе сокращения 1.25%, то есть потере почти одной пятой от первоначальной площади менее чем за два десятилетия. Эта значительная потеря объясняется несколькими факторами, в частности растущим давлением со стороны быстрого расширения городских территорий и нерациональной эксплуатацией лесных ресурсов. В период с 2017 по 2022 год

площадь сократилась на 38.09 км², что соответствует снижению примерно на 8.20% за 5 лет при годовом темпе сокращения 1.64%. За 22-летний период с 2000 по 2022 год площадь посадки леса сократилась с 589.72 км² до 426.24 км², что соответствует снижению на 27.72% при годовом темпе сокращения 1,26%.

Результат комбинации трех спектральных индексов с определенными пороговыми значениями (NDWI, NDVI и NDBI) позволил точно идентифицировать водотоки и поверхностные водоёмы, минимизировав при этом риск спектральной путаницы с другими категориями землепользования. Пространственная и временная динамика изменений, затрагивающих водотоки и поверхностные водоёмы, представлена в таблицах 14 и 15.

Анализ поверхностных водотоков и водоемов показывает постепенное сокращение их площади в Абиджане в период с 2000 по 2022 год. В 2000 году на территории площадью 210.90 км² поверхност-

Таблица 12

Развитие посадки леса и отсутствие посадки леса

Год	Посадка леса (км²)	Отсутствие посадки леса (км²)	Итого (км²)
2000	589.72	1517.73	2107.45
2017	464.33	1643.12	2107.45
2022	426.24	1681.21	2107.45

Таблица 13

Переходы посадки леса

Период	Посадка леса (км²)	Развитие (%)
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

Таблица 14

Развитие поверхностных водотоков и водоемов и отсутствие поверхностных водотоков и водоёмов

Год	Поверхностные водотоки и водоёмы (км²)	Отсутствие поверхностных водотоков и водоёмов (км²)	Итого (км²)
2000	210.90	1896.55	2107.45
2017	193.59	1913.86	2107.45
2022	150.89	1956.56	2107.45

Таблица 15

Переходы поверхностных водотоков и водоемов

Период	Площадь утраченных поверхностных водотоков и водоемов (км ²)	Развитие (%)
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

ные водотоки и водоемы занимали около 10.45%. Эта значительная доля водных ресурсов отражается в различных водотоках, которые характеризуют природный ландшафт юга Кот-д'Ивуара. В 2017 году площадь поверхностных водотоков и водоемов сократилась на 193.59 км², что соответствует снижению на 17.31 км² (8.21%) за 17 лет. В период с 2017 по 2022 год мы наблюдали сокращение площади на 42.70 км², что составляет 22.06% по сравнению с 2017 годом. Годовой темп утраты составляет 8.54 км². Это постепенное сокращение связано с ускоренной урбанизацией, которая приводит к засыпке водно-болотных угодий для расширения городских территорий. Такая динамика свидетельствует об уязвимости поверхностных водотоков и водоемов перед антропогенным воздействием в Абиджане.

Наконец, пространственная и временная динамика открытых грунтов представлена в таблицах 16 и 17, где показаны различные изменения в пределах нашего района исследования. Применение спектральных индексов NDSI, NDVI и NDBI к изображениям Landsat позволило нам точно наблюдать и оценивать различные изменения открытых земель с течением времени, а также наблюдать и анализировать их пространственное распределение в регионе Абиджана.

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

В 2000 году площадь незастроенных земель на всей территории исследования составляла 38.62 км², а в 2017 году сократилась до 15.93 км²,

что соответствует потере 22.69 км², или 58.75% за 17 лет, со средним темпом сокращения -1.34 км² в год. Затем, в период с 2017 по 2022 год, тенденция изменилась на противоположную, и площадь незастроенных земель увеличилась до 30.38 км², что соответствует приросту на 14.45 км² за пять лет. Эта динамика может быть связана с активизацией строительных работ, расширением карьеров, вырубкой лесов и расширением зон, подвергающихся урбанизации. 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.

Пространственно-временной анализ результатов выявил значительную пространственную динамику в пределах исследуемой территории. Быстрое расширение урбанизированных зон, особенно с 2017 года, отражает процесс ускоренной урбанизации района Абиджана. Эта урбанизация происходит в ущерб густым и вторичным лесам, поверхностным водотокам и водоемам, площади которых постепенно сокращаются. С другой стороны, наблюдается сокращение, а затем небольшое увеличение открытых грунтов на окраинах, вероятно, в связи с проектами городского благоустройства. Таким образом, можно сказать, что давление, оказываемое антропогенной деятельностью, является основным фактором трансформации землепользования в Абиджане.

Заключение

Разработанный метод, основанный на автоматизированном дешифрировании набора

Таблица 16

Развитие открытых грунтов и отсутствие открытых грунтов

Год	Открытые грунты (км ²)	отсутствие открытых грунтов (км ²)	Итого (км ²)
2000	38.62	2068.83	2107.45
2017	15.93	2091.52	2107.45
2022	30.38	2077.07	2107.45

Таблица 17

Переходы открытых грунтов

Период	Площадь утраченных открытых грунтов (км ²)	Развитие (%)
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

многозональных снимков, позволил с высокой степенью достоверности (97.17%) определить состав земель и их изменения по сравнению с аналогичными работами других авторов, подтвердив тем самым надёжность методологии. Сочетание спектральных индексов с пороговыми значениями, определёнными для каждого класса, позволило точно классифицировать различные категории землепользования и более эффективно анализировать их пространственно-временную динамику. Предложенная методология, основанная на данных из открытых источников, может использоваться в других географических

регионах Африки.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные авторами, имеют большую практическую ценность. Различные карты землепользования, составленные в рамках нашего исследования, могут быть непосредственно использованы органами, ответственными за территориальное планирование, для более эффективного контроля за урбанизацией, в рамках мониторинга обезлесения с целью обеспечения его восстановления экологическими учреждениями, а также для реализации политики устойчивого управления.

Список литературы

1. Lambin E.F., Geist H.J., Lepers.E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2003. V. 28. Pp. 206-216.
2. Turner A.B.L., Meyer W.B., Skole D.L. Global Land-Use/Land-Change: Towards an Integrated Study. *Integr. Earth Syst. Sci.* 2009. V. 23. Pp. 91-95.
3. Ehlers E., Krafft T. (Eds.) *Earth System Science in the Anthropocene*. Springer: Berlin/Heidelberg. 2016. V. 53.
4. Steffen W., Sanderson A., Tyson P., Jäger J., Matson P., Moore B.III, Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.-J., Turner B.L., Global Change and the Earth System: A Plane under Pressure; Springer: Berlin/Heidelberg. 2005.
5. Geist H.J., Lambin E.F. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *Bioscience*. 2002. V. 52. Pp. 143-150.
6. Balogun I.A., Adeyewa D.Z., Balogun A.A., Morakinyo T.E. Analysis of Urban Expansion and Land Use Changes in Akure, Nigeria, Using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) Techniques. *Journal of Geography and Regional Planning*. 2011. V. 4. Pp. 533-541.
7. Ahmed H.A., Singh S.K., Kumar M. Impact of urbanization and land cover change on urban climate: Case study of Nigeria. *Urban Clim.* 2020. V. 32.
8. Abidjan офиц. сайт. URL: <https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/international/jumelages-et-partenaires/abidjan-cote-divoire> (дата обращения: 18.11.2022).
9. Bio Y. K. A., Kouamé F. K., N'da D. H., Brou Y.T., Jofack Sokeng V.-C., Hauhouot A. C., Kouadio K., Kouamé J., Rudant J-P. Étude de la dynamique forestière du sud-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection optique (moyenne et haute résolution spatiale): contribution des images MODIS ET LANDSAT. 2ème Conférence Internationale GEOFORAFRI. 2016. V. 32.
10. Song C., Woodcock C E., Seto K.C., Lenney Mary. P., Macomber S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sens. Environ.* 2001. V. 75. Pp. 230-244.
11. Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R. Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Télédétection*. 2006. V. 6. Pp. 9-17.

References

1. Lambin E.F., Geist H.J., Lepers.E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2003. V. 28. Pp. 206-216.
2. Turner A.B.L., Meyer W.B., Skole D.L. Global Land-Use/Land-Change: Towards an Integrated Study. *Integr. Earth Syst. Sci.* 2009. V. 23. Pp. 91-95.
3. Ehlers E., Krafft T. (Eds.) *Earth System Science in the Anthropocene*. Springer: Berlin/Heidelberg. 2016. V. 53.
4. Steffen W., Sanderson A., Tyson P., Jäger J., Matson P., Moore B.III, Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.-J., Turner B.L., Global Change and the Earth System: A Plane under Pressure; Springer: Berlin/Heidelberg. 2005.
5. Geist H.J., Lambin E.F. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *Bioscience*. 2002. V. 52. Pp. 143-150.
6. Balogun I.A., Adeyewa D.Z., Balogun A.A., Morakinyo T.E. Analysis of Urban Expansion and Land Use Changes in Akure, Nigeria, Using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) Techniques. *Journal of Geography and Regional Planning*. 2011. V. 4. Pp. 533-541.
7. Ahmed H.A., Singh S.K., Kumar M. Impact of urbanization and land cover change on urban climate: Case study of Nigeria. *Urban Clim.* 2020. V. 32.
8. Abidjan ofic. website. URL: <https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/international/jumelages-et-partenaires/abidjan-cote-divoire> (date of request: 18.11.2022).
9. Bio Y. K. A., Kouamé F. K., N'da D. H., Brou Y.T., Jofack Sokeng V.-C., Hauhouot A. C., Kouadio K., Kouamé J., Rudant J-P. Étude de la dynamique forestière du sud-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection optique (moyenne et haute résolution spatiale): contribution des images MODIS ET LANDSAT. 2ème Conférence Internationale GEOFORAFRI. 2016. V. 32.
10. Song C., Woodcock C E., Seto K.C., Lenney Mary. P., Macomber S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sens. Environ.* 2001. V. 75. Pp. 230-244.
11. Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R. Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Télédétection*. 2006. V. 6. Pp. 9-17.

**Сведения об авторах
Принадлежность к организации**

Ассех Куаме Фабрис

соискатель, кафедра космического мониторинга и экологии, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Беленко Виктор Владимирович

[доктор технических наук](#), профессор, кафедра космического мониторинга и экологии, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

**Information about authors
Affiliations**

Asseh Kouame Fabrice

Applicant, Department of Space Monitoring and Ecology, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Belenko Viktor Vladimirovich

[Doctor of Technical Science](#), Professor, Head of the Department of Space Monitoring and Ecology, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 30.04.2026 г.