

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА СИНТЕЗИРОВАННЫХ И ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЕЛЬ КОТ-Д'ИВУАРА)

Ассех К.Ф., Беленко В.В.

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

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

Динамика землепользования является важным показателем экологических и социально-экономических изменений, особенно в развивающихся странах, которые испытывают сильное антропогенное давление. В Кот-д'Ивуаре часто отмечается постоянное отсутствие системы мониторинга землепользования, что ограничивает возможности государственных органов по прогнозированию и управлению изменениями на территории. Таким образом, цель данной статьи — предложить методологию автоматизированного обнаружения изменений в составе земель на основе набора индексных изображений. Методология основана на двух подходах: контролируемой классификации максимального правдоподобия и спектральных индексах, основанных на композиции каналов, что позволяет лучше различать классы землепользования. Ожидаемые результаты демонстрируют потенциал методологии в создании однородных и сопоставимых во времени тематических карт на основе спутниковых изображений разных периодов.

Ключевые слова: землепользование, автоматизированное обнаружение изменений, синтезированные и индексные изображения, пространственно-временной анализ, картографирование, Кот-д'Ивуар.

METHODOLOGY FOR AUTOMATED DETECTION OF CHANGES IN LAND COMPOSITION BASED ON A SET OF SYNTHESISED AND INDEX IMAGES (USING THE EXAMPLE OF LAND IN IVORY COST)

Asseh K.F., Belenko V.V.

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

Land use dynamics are a key indicator of environmental and socio-economic changes, particularly in developing countries that are under significant anthropogenic pressure. In Ivory cost, there is often a continuing lack of land use monitoring systems, limiting the ability of government authorities to predict and manage changes in the territory. The aim of this article is therefore to propose a methodology for the automated detection of changes in land composition based on a set of indexed images. The methodology is based on two approaches: supervised classification by maximum likelihood and spectral indices using a combination of multispectral bands to better discriminate between different land use classes. The expected results highlight the methodology's potential to generate homogeneous thematic maps that are comparable over time from satellite images from different periods.

Keywords: land use, automated change detection, spatio-temporal analysis, mapping, synthesiz and index images, Ivory Cost.

Введение

Изменения в землепользовании и землеустройстве являются ключевым фактором устойчивого развития [1], и их изучение представляет собой важную задачу. Демографические изменения оказывают сильное давление на природные образования, которые подвергаются серьезной деградации [2]. В связи с бесконтрольными методами эксплуатации, которые сегодня используют прибрежные населенные пункты для добычи ресурсов, а также в связи с очень сильным демографическим ростом, характерным для Кот-д'Ивуара, существование всех без исключения природных ресурсов находится под угрозой [3]. Эта ситуация не обходит стороной территорию Кот-д'Ивуара, которая в течение нескольких десятилетий переживает глубокие преобразования из-за сильного давления со стороны земельных и демографических факторов.

В Кот-д'Ивуаре эта проблема имеет особое значение. На протяжении нескольких десятилетий Кот-д'Ивуар переживает ускоренную трансформацию

своей территории из-за стремительного роста населения, интенсификации сельского хозяйства, развития инфраструктуры, лесозаготовок и урбанизации. По данным Национального бюро технических исследований и развития (BNETD) и Постоянного исполнительного секретариата REDD+ (SEP-REDD+), 57% лесов Кот-д'Ивуара исчезли в период с 1990 по 2015 год, а лесной покров сократился с 7.8 млн га в 1990 году до 5.1 млн га в 2000 году, а затем до 3.4 млн га в 2015 году, что составляет около 11% территории страны [4]. Все эти изменения территории влияют на качество жизни населения, подвергая его экологическим рискам и затрудняя городское планирование [5]. Во многих развивающихся странах динамика изменений земель документируется редко или недостаточно из-за отсутствия систем мониторинга изменения и использования земель. Реализация этой стратегии требует, среди прочего, регулярного мониторинга динамики землепользования и землеустройства с помощью дистанционного зондирования [6].

Несмотря на то, что динамике землепользования в Кот-д'Ивуаре посвящено множество исследований, большинство из них носят фрагментарный характер и ограничиваются небольшими территориями. Кроме того, отсутствует автоматизированная методология обнаружения, основанная на сочетании спектральных индексов с пороговыми значениями с использованием космических изображений для решения проблемы землепользования. В связи с этим была поставлена цель разработать методику автоматизированного обнаружения изменений в землепользовании на основе набора индексных изображений. Этот подход предназначен для органов, ответственных за территориальное планирование, с целью более эффективного мониторинга урбанизации в рамках наблюдения за обезлесением, чтобы обеспечить его восстановление экологическими учреждениями, а также для реализации политики устойчивого управления.

Материалы и методы исследования

Материалы. В рамках данного исследования использовались спутниковые изображения Landsat. Изображения Landsat TM и ETM+ уже давно используются для анализа динамики землепользования. Преимуществом этих изображений является их достаточное пространственное разрешение (30 метров) и широкий временной охват [7]. Изображения LANDSAT используются чаще всего, поскольку они бесплатны и позволяют получить доступ к более старым данным, что дает возможность проводить дихроматический анализ за несколько десятилетий. Landsat был выбран потому, что его датчики предо-

ставляют больше изображений для обнаружения изменений в составе земель за более длительные промежутки времени. Основные характеристики Landsat представлены в таблице 1.

Методы исследования. Принятый методологический подход основан на системном и структурированном методе, направленном на автоматизированное обнаружение изменений в землепользовании на основе набора индексных изображений. Он структурирован в четыре функционально взаимосвязанных блока обработки данных ДЗЗ из космоса: блок предварительной обработки, блок дешифрирования и анализ, блок оценки качества результатов дешифрирования и анализа данных ДЗЗ из космоса, блок оформления результатов дешифрирования и анализа данных ДЗЗ из космоса (рис. 1).

Блок предварительной обработки данных ДЗЗ из космоса. Предварительная обработка заключается в корректировке изображений Landsat путем удаления ошибок, артефактов и искажений, возникших в процессе съемки, с обеспечением их временной сопоставимости. Радиометрическая коррекция направлена на устранение атмосферных эффектов (поглощения и рассеяния) и угловых эффектов солнечного света, которые изменяют спектральные свойства, характерные для типа землепользования на изображении [8]. Атмосферная коррекция направлена на устранение воздействия атмосферы и получение реальных измерений отражательной способности исследуемых объектов [9]. Затем изображения объединяются в цветной синтез и определяется область исследования. После этих

Таблица 1

Характеристики космических оптико-электронных аппаратов

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.

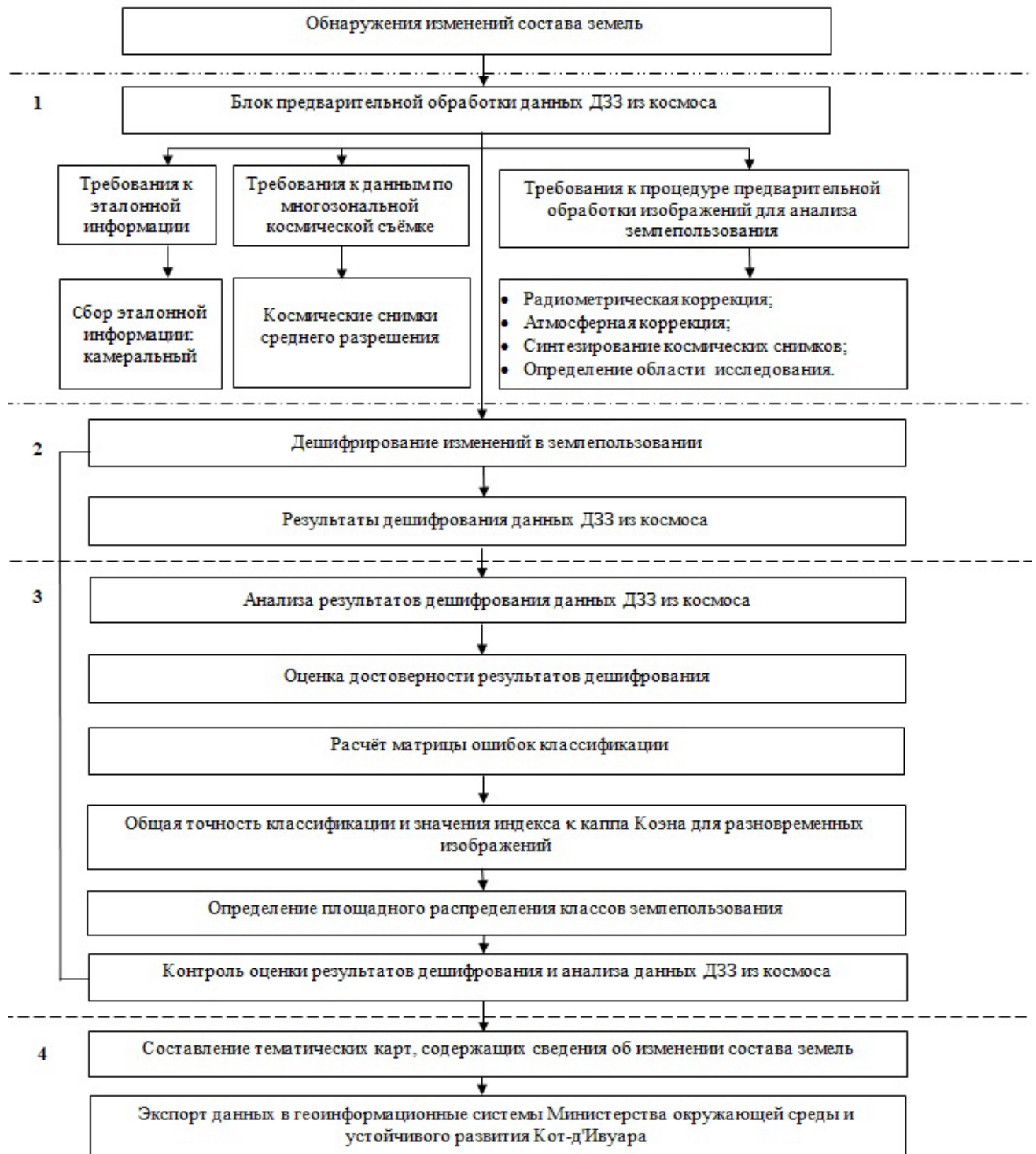


Рис. 1. Схема методики обнаружения изменений состава земель по данным многозональной космической съёмки

операций предварительной обработки мы получаем исправленные, однородные спутниковые изображения, готовые к использованию для визуальной интерпретации и классификации земельных участков по компонентам.

Блок дешифрования и анализа данных ДЗЗ из космоса. Цель этого этапа – идентифицировать и классифицировать различные классы землепользования на основе предварительно обработанных изображений. Применяется контро-

лируемая классификация методом максимальным правдоподобием, с целью отнести каждый пиксель к определенному классу. Спектральные индексы рассчитываются с целью улучшения различения между различными классами землепользования. В результате применения этих двух подходов получается серия многовременных карт землепользования, описывающих пространственное распределение различных классов землепользования.

Блок оценки качества результатов дешифрования и анализа данных ДЗЗ из космоса. Эта фаза направлена на оценку надежности классификации и изменений классов. Составленные карты сравниваются с эталонными данными, такими как тематические карты или результаты полевых измерений, с помощью матрицы ошибок. Рассчитываются общая точность и коэффициент Карра для проверки соответствия полученных классов реальным классам на местности. Этот этап позволяет проверить статистические карты, гарантируя их точность и надежность для научного применения.

Блок оформления результатов дешифрирования и анализа данных ДЗЗ из космоса. На этом этапе результаты анализа преобразуются в карты, пригодные для использования. Растровые данные преобразуются в векторные и интегрируются в географическую информационную систему. Тематические карты, иллюстрирующие изменения в землепользовании, разрабатываются и оформляются для использования в учреждениях. Конечный продукт состоит из серии карт, готовых к использованию Министерством окружающей среды и устойчивого развития Кот-д'Ивуара в рамках мониторинга и планирования территории.

Методы цифровой обработки космических снимков. Цифровая обработка спутниковых изображений осуществлялась в два основных этапа: предварительная обработка и обработка.

Предварительная обработка. Предварительная обработка данных включает в себя все операции, необходимые перед основным анализом [10]. Процесс предварительной обработки изображений Landsat состоит из 4 этапов. Радиометрическая коррекция выполняется для калибровки значений пикселей и/или исправления ошибок в значениях [11]. Атмосферная коррекция состоит в преобразовании, с одной стороны, числового значения DN в радиантность TOA, а с другой стороны, отражательной способности TOA в значения отражательной способности поверхности с использованием алгоритма DOS (Dark Object subtraction) [12]. Этот процесс был выполнен с помощью плагина SCP (Semi Automatic Classification) программного обеспечения QGIS. Выбор комбинации полос состоит в объединении информации, содержащейся в трех полосах, и отображении ее в трех основных цветах (красном, зеленом и синем). Цель состоит в том, чтобы получить изображение, позволяющее четко различать различные типы объектов. Различные цветовые композиции позволили определить и выделить шесть основных классов землепользования (таблица 2). Спектральные каналы были выбраны, поскольку они представляют собой наилучшую комбинацию для классификации изображения по типу землепользования. Различные комбинации цветов были созданы с помощью QGIS. После определения клас-

сов землепользования пространственные изображения были разбиты по границам зоны интереса, чтобы упростить обработку и сократить время. Для выполнения этой задачи был использован алгоритм (extract by mask), включенный в программное обеспечение ArcGIS.

Методы обработки космических снимков. 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.

Контролируемая классификация. Контролируемая классификация, также известная как направленная классификация, является краеугольным камнем обработки изображений, которая отразит качество работы и предоставит тематическую информацию о выполненной работе. Нами в качестве алгоритма контролируемой классификации был выбран метод максимального правдоподобия. Классификация с контролем по максимальному правдоподобию заключалась в присвоении каждому пикселю наиболее вероятного класса в зависимости от спектрального сходства между пикселями и сигнатурой класса. Таким образом, все пиксели каждого спутникового изображения были классифицированы по алгоритму максимального правдоподобия путем экстраполяции спектральных характеристик обучающих зон на все изображение. С этой целью были определены зоны обучения, соответствующие шести классам землепользования. Затем оценка точности классификации изображений была основана на матрице ошибок, на основе которой были рассчитаны общая точность и коэффициент Каппа Козна. Эта матрица ошибок генерируется автоматически с помощью плагина SCP (Semi Automatic Classification), включенного в программное обеспечение QGIS. Общая точность определяет общую эффективность алгоритма, которая измеряется путем деления общего числа правильно помеченных образцов на общее число протестированных образцов [13]. Коэффициент Каппа указывает степень согласованности между фактическими данными и прогнозируемыми значениями [14].

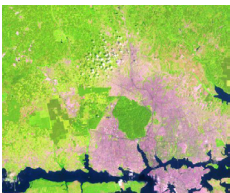
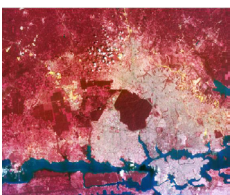
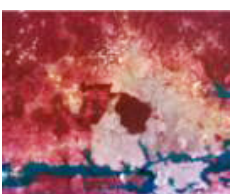
Оценка точности классификации позволяет количественно определить степень согласованности результатов классификации с эталонными данными.

После классификации и оценки точности классифицированные изображения были векторизованы и преобразованы в тематические карты, иллюстрирующие динамику во времени, чтобы облегчить управление ими в программном обеспечении для анализа ГИС QGIS.

Анализ динамики землепользования. Для оценки изменений в землепользовании территорий Кот-д'Ивуар были определены разные зоны для

Таблица 2

Классификация землепользования по данным Landsat: спектральные комбинации каналов

Класс землепользования	Комбинация и изображение каналов	Спектральный диапазон	Роль комбинации
Застроенные территории	7:6:4 	Коротковолновый инфракрасный (SWIR)	Четкое 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 счет разной поглощающей способности в MIR.
Посадки леса	6:4:2 	Красный и зеленый	Усиление контраста между искусственными посадками (ровные ряды) и естественными экосистемами через анализ текстуры и цвета.
Поверхностные водотоки и водоемы	4:3:2 	Видимый диапазон	Оптимальное распознавание водных объектов благодаря поглощению света водой в видимом спектре.
Открытые грунты	6:4:2 	Красный и зеленый	Красный и зеленый диапазоны подчеркивают высокую отражательную способность открытых грунтов, в отличие от растительности, поглощающей красный свет.

разных классов земельного покрова. Изменения были проанализированы за исследуемый период с основной целью определить, как площади различных типов земель изменились с течением времени. Для измерения этих изменений использовались два показателя: общая скорость изменения (T_g) и среднегодовая скорость пространственного расширения (T_c) [15]. Глобальная скорость изменения

была рассчитана с использованием математической формулы, которая позволяет определить изменение площади каждого класса земного покрова между двумя периодами исследования. Общая скорость изменения определяется по формуле (1):

$$T_g = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100 \quad (1)$$

где T_g – общая скорость изменения; S_1 – площадь класса на дату t_1 ; S_2 – площадь класса на дату t_2 .

После чего был проведен углубленный анализ для детальной оценки изменений, произошедших внутри каждого класса землепользования. Этот анализ проводился по скорости изменения (T_c) или среднегодовому пространственному выражению. Среднегодовая скорость пространственного расширения определяется по формуле (2):

$$T_c = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/t} - 1 \right] \times 100 \quad (2)$$

где T_c – скорость изменения (%); S_1 – площадь класса на дату t_1 ; S_2 – площадь класса на дату t_2 ; t – количество лет между двумя датами.

Когда значения скорости изменения являются положительными, они указывают на прогрессию, а когда они являются отрицательными, это объясняется деградацией класса. Что касается значений, близких к нулю, это означает, что класс стабилен.

Анализ спектральных индексов. На основе мультиспектральных данных Landsat было сгенерировано пять радиометрических индексов. Формулы этих индексов приведены в таблице 3. Каждый индекс предназначен для представления основных категорий землепользования. Среди этих индексов мы использовали спектральные индексы, такие как NDVI, NDWI, NDBI, NDSI и SAVI, которые позволяют извлекать важную информацию о растительном покрове и широко используются для картографирования землепользования. Индекс нормализованной разницы растительности (NDVI) позволяет идентифицировать, обнаруживать и четко различать растительные зоны (такие как леса) и нерастительные зоны (водоемы и голые земли) [16]. Для различения водных поверхностей и растительности был использован индекс нормализованной разницы водных поверхностей (NDWI). Этот индекс позволил уточнить особенности водных объектов и составить карту водоемов, лагун, озер и рек. Индекс застроенных территорий с нормализованной разницей (NDBI) [17] используется для указания плотности застройки территории. Он был выбран для выделения и обозначения застроенных территорий, в частности жилых районов, зданий и дорожной инфраструктуры, и их отличия от незастроенных земель. Индекс NDSI используется для различения незастроенных земель и застроенных территорий [18]. Этот индекс использовался для отличия голых земель, особенно песчаных карьеров, развивающихся промышленных зон, расчищенных сельскохозяйственных земель и эродированных почв от других типов почвенного покрова исследуемой зоны, в частности урбанизированных зон и водно-болотных угодий, которые имеют сходное спектральное отражение и

не идентифицируются индексом NDSI. Индекс растительности, скорректированный с учетом почвы (SAVI), представляет собой индекс растительности, который направлен на минимизацию влияния яркости почвы с помощью поправочного коэффициента [19]. Этот индекс был использован для выделения сельскохозяйственных зон, затронутых человеческой деятельностью, таких как плантации какао, каучуковых деревьев и бананов, которые быстро расширяются в нашей исследуемой зоне.

Спектральные индексы были рассчитаны с помощью инструмента raster calculator программного обеспечения QGIS. Такой подход позволяет лучше различать и создавать изображения, на которых четко видны различные классы землепользования.

Результаты и обсуждение

Применение методологии, предложенной в данной статье, направлено на создание структурированной, воспроизводимой и научно обоснованной системы для автоматического обнаружения изменений в составе земель на основе набора индексных изображений. На данном этапе нашего исследования полученные результаты не являются окончательными тематическими картами, а скорее, методологическими и аналитическими результатами, позволяющими оценить эффективность подхода к выявлению, сравнению и интерпретации пространственно-временных изменений, связанных с землепользованием на территории Кот-д'Ивуара.

Процесс обработки направлен на создание однородных и сопоставимых во времени тематических карт на основе спутниковых изображений, полученных в разные периоды времени. Применение двух подходов – классификации с максимальной вероятностью и одновременной интеграции мультиспектральных изображений и спектральных индексов – направлено на значительное улучшение различения между различными категориями землепользования. Использование комбинации спектральных каналов, адаптированных к каждому классу, позволяет уменьшить спектральную путаницу, часто наблюдаемую в случаях, когда классификация с контролем основана только на одной комбинации спектральных каналов. Структурирование методологии по функциональным блокам позволяет лучше контролировать каждый этап, избегать кумулятивных ошибок и улучшить воспроизводимость анализа, что является фундаментальным элементом для пространственно-временного мониторинга.

Результаты этого исследования являются продолжением предыдущих исследований, проведенных, в частности, в Западной Африке и других регионах, с учетом значительных методологических усовершенствований.

Кроме того, исследования, проведенные A.S. Koffi, A.A. Fora, H. Elbelrhiti [20] и S.E.B. Bouiadja, W.E. Zerey, K. Benabdeli [21], базируются на

Индексные изображения, использованные в настоящем исследовании

Название индекса	Идентификатор индекса	Используемые полосы	Формула	Функция
Нормализованный разностный индекс растительности	NDVI	NIR, красный	$\frac{(NIR - \text{красный})}{(NIR + \text{красный})}$	Позволяет идентифицировать, обнаружить и четко отделить растительные участки (густые леса, вторичные леса) от нерастительных (водоемы и открытые грунты) с целью картографирования и оценки воздействия антропогенных изменений на лесной покров.
Нормализованный индекс разности воды	NDWI	Зеленый - NIR	$\frac{(\text{Зеленый} - NIR)}{(\text{Зеленый} + NIR)}$	Для различения водных поверхностей (лагун, озер и рек) от растительных поверхностей, для картографирования водоемов и обнаружения изменений в окружающей среде.
Нормализованная разность индекса застройки	NDBI	SWIR, NIR	$\frac{SWIR - NIR}{(SWIR + NIR)}$	Различать и выделять все застроено, то есть жилые районы, здания и дорожную инфраструктуру, и отделять их от незастроенных земель.
Нормализованный разностный почвенный индекс	NDSI	SWIR, NIR	$\frac{SWIR - NIR}{(SWIR + NIR)}$	Для выделения оголенных участков, включая песчаные карьеры, развивающиеся промышленные зоны, расчищенные сельскохозяйственные угодья, эродированные почвы из других типов почвенного покрова.
Индекс растительности с поправкой на почву	SAVI	NIR, красный	$\frac{((NIR - Rouge) / (NIR + Rouge + 0.5))}{* 1.5}$	для выявления сельскохозяйственных зон, подверженных воздействию человеческой деятельности, таких как плантации какао, каучука и бананов, которые быстро расширяются.

использовании спектрального индекса NDVI для оценки состояния растительного покрова. Хотя этот метод эффективен для определения наличия или отсутствия растительности, он имеет значительные ограничения, когда речь идет об идентификации нескольких классов землепользования. Данное исследование позволяет преодолеть это ограничение, в частности, путем объединения спектральных индексов со спектральными изображениями, что улучшает различие категорий землепользования, в частности между естественной растительностью, вторичной растительностью и сельскохозяйственными угодьями.

Исследования L. Coulibaly, K.H. KOUASSI, G.E. Soro, I. Savane [22] основаны на классификации с максимальной вероятностью на основе изображений Landsat. Этот метод позволил выделить 5 классов землепользования и выявить пространственно-временную динамику землепользования. Хотя эта методология является актуальной, она базируется на использовании комбинации спектральных каналов (синтез 4-5-7), применяемой в целом ко всем

различным классам. В тропических условиях такая конфигурация может привести к спектральной путанице даже при использовании данных, полученных на местности, из-за сильной пространственной неоднородности и близких спектральных сигнатур между классами. В нашем исследовании специфическое использование комбинации спектральных каналов, адаптированных к каждому классу, способствует лучшей идентификации классов при их определении, тем самым уменьшая спектральную путаницу, когда классификация основана на одной комбинации спектральных полос, а также позволяя лучше различать категории землепользования и иметь несколько классов землепользования.

Кроме того, в научных исследованиях C.B. Tiesse, E.N. Wandan, H.D. N'da [23] и Z. Koumoi, A. Allassane, M. Djangbedja, T. Boukpepsi, A.E. Kouya [24] ни в одном случае не представлены результаты матриц ошибок для различных исследуемых дат. Этот факт не позволяет оценить надежность и точность полученных классификаций. Напротив, методология, предложенная в данном исследовании,

уделяет большое внимание оценке надежности результатов, систематически генерируя матрицы ошибок и указания на точность. Этот этап, который часто не описывается подробно в предыдущих работах, имеет важное значение для обеспечения научной обоснованности исследования.

Полученные результаты демонстрируют, что предложенная методология представляет собой последовательный и подходящий подход к анализу изменений в составе и использовании земель на основе набора индексных изображений. Использование комбинации спектральных каналов для обнаружения каждого класса в рамках контролируемой классификации значительно улучшает разграничение между различными категориями землепользования, особенно в тропических условиях, где высокая неоднородность ландшафта способствует спектральной путанице. Сравнение методологии с предыдущими исследованиями показывает, что во многих исследованиях для обнаружения различных классов используется либо один спектральный индекс, либо одна комбинация спектральных каналов. Этот метод снижает точность различения между различными категориями землепользования. В отличие от предлагаемого подхода, данное исследование основано на точном выборе комбинации спектральных каналов и индексов, подходящих для каждого класса, что позволяет уменьшить путаницу между классами и получить представление, более близкое к наблюдаемой пространственной организации.

Таким образом, предлагаемая методология не просто воспроизводит существующие методы, но обогащает и совершенствует их, предоставляя организованную, воспроизводимую и основанную на научных данных структуру. Она составляет прочную основу для долгосрочного мониторинга динамики землепользования на территории Кот-д'Ивуара и может использоваться в различных областях, в частности в области территориального планирования, управления природными ресурсами и экологического планирования.

Заключение

Это исследование позволило разработать четко структурированную методологию анализа изменений в составе и использовании земель на основе набора мультиспектральных изображений Landsat со средним пространственным разрешением. Результаты этого исследования показывают, что предложенная методология эффективно соответствует особенностям тропической среды, где разнообразие

ландшафта и близость спектральных сигнатур затрудняют исследование по анализу землепользования.

Научный вклад данного исследования заключается в дифференцированном применении различных комбинаций мультиспектральных полос и спектральных индексов, которые выбираются в зависимости от каждой категории землепользования в рамках тщательно организованной методологии, состоящей из нескольких этапов. В отличие от многих исследований, в которых авторы ограничиваются применением комбинации единственных мультиспектральных каналов или единственного спектрального индекса ко всем классам, предлагаемая методология позволяет улучшить различие между различными категориями землепользования. Эта способность лучше различать классы важна для изучения динамики землепользования.

С методологической точки зрения, интеграция оценки точности посредством расчета матриц ошибок и показателей надежности является одним из основных преимуществ данного исследования. Этот этап часто отсутствует в некоторых предыдущих исследованиях, проводившихся в Западной Африке. Он очень важен, поскольку позволяет объективно оценить качество различных полученных классификаций с целью повышения научной достоверности результатов.

С практической точки зрения, полученные результаты имеют важное значение для Кот-д'Ивуара. Предложенная методология может служить оперативным инструментом для органов, ответственных за территориальное планирование, с целью более эффективного контроля за урбанизацией в рамках мониторинга обезлесения, чтобы обеспечить его восстановление экологическими учреждениями, а также для реализации политики устойчивого управления.

В итоге, это исследование выходит за рамки простого использования технологий дистанционного зондирования, предлагая релевантный методологический подход, основанный на научных принципах и адаптированный к экологическим и институциональным реалиям территории Кот-д'Ивуара. Оно также представляет собой релевантную основу для будущих исследований в области разработки методологии мониторинга территориальной динамики. Результаты экспериментальных исследований будут представлены в следующей статье.

Список литературы

1. Dires T., Temesgen. F. Assessing land use and land cover change detection using remote sensing in the Lake Tana Basin, Northwest Ethiopia. *Cogent Environmental Science*. 2020. V. 6. No. 1.
2. Ouattara T.A., Kouamé K.F., Zo-Bi I.C., Vaudry R., Grinand C. Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt. *Bois et Forêts des Tropiques*. 2021. No. 347. Pp. 89-104.

3. El Hage Hassan. H, Ardillier-Carras F, Charbel L. Les changements d'occupation des sols dans la Béqaa Ouest (Liban) : le rôle des actions anthropiques. *Cahiers Agricultures*. 2019. V. 28. Pp. 10.
4. BNETD. Réalisation d'une étude sur l'identification, l'analyse et la cartographie des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en Côte d'Ivoire. Rapport technique. Abidjan, Côte d'Ivoire. 2016. Pp. 104.
5. FAO, SEP-REDD+. Données forestières de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire: Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015. Rome, Italie, FAO. 2017. Pp. 32.
6. Jofack Sokeng V., Akpa Y. L., Assoma T., Kouamé F., Corgne S., Rudant J.P. Suivi par télédétection des affectations des terres pour la promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier en Côte d'Ivoire. HAL science ouverte. 2019. Pp. 17.
7. Ваш спутник в мире геопространственных решений: офиц. сайт. URL: <https://innoter.com/sputniki/> (дата обращения: 17.09.2021).
8. Manjula K.R., Jyothi S., Anand K.V. Data Preprocessing in Multi-Temporal Remote Sensing Data for Deforestation. *Global Journal of Computer Science and Technology Software & Data Engineering*. 2013. V. 13. No. 6.
9. Jensen J.R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Third edition, Prentice Hall. 2005. Pp. 316.
10. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote sensing and image interpretation. Seventh Edition. 2015. Pp. 736.
11. Congedo L. Semi-automatic classification plugin documentation. Release. 2016. Pp. 29.
12. Chavez P.S. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. V. 62. No. 9. Pp. 1025-1036.
13. Understanding Maximum Likelihood Estimation in Supervised: офиц. сайт. URL: <https://theaisummer.com/mle/> (дата обращения: 05/05/2025).
14. Congalton R.G., Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. Principles and Practices, Third Edition. 2009. Pp. 200.
15. Geist H.J., Lambin E.F. 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. Pp. 136.
16. Clandillon S., Fraipont P., Yesou H. 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.
17. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. No. 3. Pp. 583-594.
18. Elhag M. Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia. *Journal of Sensors*. 2016. Pp. 96175.
19. Rodgers J.L., Nicewander W.A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *390 The American Statistician*. 1988. V. 42. No. 1. Pp. 59-66.
20. Koffi A.S., Fora A.A., Elbelhiti H. 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*. 2016. V. 12. No. 29. Pp. 204.
21. Bouiadja S.E.B., Zerey W.E., Benabdeli K. Étude diachronique des changements du couvert végétal dans un écosystème montagneux par télédétection spatiale : cas des monts du Tessala (Algérie occidentale). *Physio-Géo*. 2011. V. 5. Pp. 59-66.
22. Coulibaly L., KOUASSI K.H., Soro G.E., Savane I. Analyse du processus de savanisation du nord de la Côte d'Ivoire par télédétection: Cas du département de Ferkessédougou. *International Journal of Innovation and Applied Studies*. 2017. V. 1. No. 1. Pp. 136-143.
23. Tiesse C.B., Wandan E.N., N'da H.D. Apport De La Teledetection Pour Le Suivi SpatioTemporel De L'occupation Du Sol Dans La Region Montagneuse Du Tonkpi (Cote D'Ivoire). *European Scientific journal*. 2017. V. 15. Pp. 310.
24. Koumou Z., Alassane A., Djangbedja M., Boukpepsi T., Kouya A.E. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le centre-Togo. *AHOHO – Revue de Géographie du LARDYMES*. 2013. V. 10. Pp. 163-172.

References

1. Dires T., Temesgen. F. Assessing land use and land cover change detection using remote sensing in the Lake Tana Basin, Northwest Ethiopia. *Cogent Environmental Science*. 2020. V. 6. No. 1.
2. Ouattara T.A., Kouamé K.F., Zo-Bi I.C., Vaudry R., Grinand C. Changements d'occupation et d'usage des terres entre 2016 et 2019 dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire : impact des cultures de rente sur la forêt. *Bois et Forêts des Tropiques*. 2021. No. 347. Pp. 89-104.
3. El Hage Hassan. H, Ardillier-Carras F, Charbel L. Les changements d'occupation des sols dans la Béqaa Ouest (Liban) : le rôle des actions anthropiques. *Cahiers Agricultures*. 2019. V. 28. Pp. 10.
4. BNETD. Réalisation d'une étude sur l'identification, l'analyse et la cartographie des causes de la déforestation et de la dégradation des forêts en Côte d'Ivoire. Rapport technique. Abidjan, Côte d'Ivoire. 2016. Pp. 104.
5. FAO, SEP-REDD+. Données forestières de base pour la REDD+ en Côte d'Ivoire: Cartographie de la dynamique forestière de 1986 à 2015. Rome, Italie, FAO. 2017. Pp. 32.
6. Jofack Sokeng V., Akpa Y. L., Assoma T., Kouamé F., Corgne S., Rudant J.P. Suivi par télédétection des affectations des terres pour la promotion d'une agriculture intégrée au développement forestier en Côte d'Ivoire. HAL science ouverte. 2019. Pp. 17.
7. Your companion in the world of geospatial solutions: official website. URL: <https://innoter.com/sputniki/> (date of access: 17.09.2021).
8. Manjula K.R., Jyothi S., Anand K.V. Data Preprocessing in Multi-Temporal Remote Sensing Data for Deforestation. *Global Journal of Computer Science and Technology Software & Data Engineering*. 2013. V. 13. No. 6.
9. Jensen J.R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Third edition, Prentice Hall. 2005. Pp. 316.
10. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote sensing and image interpretation. Seventh Edition. 2015. Pp. 736.
11. Congedo L. Semi-automatic classification plugin documentation. Release. 2016. Pp. 29.
12. Chavez P.S. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. V. 62. No. 9. Pp. 1025-1036.
13. Understanding Maximum Likelihood Estimation in Supervised: офиц. сайт. URL: <https://theaisummer.com/mle/> (date of access: 05/05/2025).
14. Congalton R.G., Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. Principles and Practices, Third Edition. 2009. Pp. 200.
15. Geist H.J., Lambin E.F. 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. Pp. 136.

16. Clandillon S., Fraipont P., Yesou H. 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.
17. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing. 2003. V. 24. No. 3. Pp. 583-594.
18. Elhag M. Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia. Journal of Sensors. 2016. Pp. 96175.
19. Rodgers J.L., Nicewander W.A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient. 390 The American Statistician. 1988. V. 42. No. 1. Pp. 59-66.
20. Koffi A.S., Fora A.A., Elbelrhiti H. 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. 2016. V. 12. No. 29. Pp. 204.
21. Bouiadjra S.E.B., Zerey W.E., Benabdeli K. Étude diachronique des changements du couvert végétal dans un écosystème montagneux par télédétection spatiale : cas des monts du Tessala (Algérie occidentale). Physio-Géo. 2011. V. 5. Pp. 59-66.
22. Coulibaly L., KOUASSI K.H., Soro G.E., Savane I. Analyse du processus de savanisation du nord de la Côte d'Ivoire par télédétection: Cas du département de Ferkessédougou. International Journal of Innovation and Applied Studies. 2017. V. 1. No. 1. Pp. 136-143.
23. Tiesse C.B., Wandan E.N., N'da H.D. Apport De La Teledetection Pour Le Suivi SpatioTemporel De L'occupation Du Sol Dans La Region Montagneuse Du Tonkpi (Cote D'ivoire). European Scientific journal. 2017. V. 15. Pp. 310.
24. Koumoi Z., Alassane A., Djangbedja M., Boukpressi T., Kouya A.E. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le centre-Togo. АНОНО – Revue de Geographie du LARDYMES. 2013. V. 10. Pp. 163-172.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Ассех Куаме Фабрис

соискатель, кафедра космического мониторинга и экологии, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Беленко Виктор Владимирович

доктор технических наук, профессор, кафедра космического мониторинга и экологии, 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 24.02.2026 г.