Научный журнал

https://sibran.ru/journals/GIPR/

ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 528.92

DOI: 10.15372/GIPR20230416

Б.Б. ТИЕН*,**, В.Т. ФУОНГ***

*Национальный университет Лаоса, 01170, дер. Донгдок, р-н Шайтханы, Вьентьян, Лаос, buibaothienha@gmail.com **Южный федеральный университет, 344006, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, Россия, buibaothienha@gmail.com ***Университет Хонг Дык, 40130, Тханьхоа, ул. Куан Чынг, 565, Вьетнам, vuthiphuong@hdu.edu.vn

ВЫЯВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ И ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ГИС НА ПРИМЕРЕ ПРОВИНЦИИ БАРИА-ВУНГТАУ (ВЬЕТНАМ)

Изменения в землепользовании и почвенно-растительном покрове в результате деятельности человека оказывают значительное влияние на окружающую среду и экосистемы. Обнаружение и картирование изменений почвеннорастительного покрова в провинции Бариа-Вунгтау (Вьетнам) имеют решающее значение для устойчивого развития, планирования и управления. В данном исследовании был применен алгоритм классификатора максимального правдоподобия контролируемой классификации в программе ArcGIS 10.8 для выявления наблюдаемых изменений почвенно-растительного покрова на исследуемой территории в период 2000-2020 гг. с использованием разновременных спутниковых снимков. Для каждого спутникового изображения применялись спектральные индексы: нормализованный дифференциальный индекс растительности и нормализованный разностный индекс влажности, используемые для классификации и оценки изменений почвенно-растительного покрова. Проведена оценка точности классификационных карт, полученных на основе Landsat 5-TM за 2000 и 2010 гг. и Landsat 8-OLI за 2020 г. при использовании коэффициента Kanna Коэна, — 0,882, 0,891 и 0,915 соответственно. На исследуемой территории выделяются пять основных классов почвенно-растительного покрова: сельское хозяйство, водные объекты, леса, поселения и голые почвы/скальные породы. Карты состояния и изменения нормализованного разностного водного индекса, созданные в ArcGIS 10.8, показывают значительные изменения почвенно-растительного покрова. Площади земель поселений постоянно увеличивались в течение 20 лет (с 128,09 км² (2000 г.) до 300,30 км² (2020 г.)); площади сельскохозяйственных земель возросли на 124,96 км² за период 2000—2020 гг. Территории остальных трех классов — леса, водных объектов и обнаженной почвы/скальных пород — за данный период уменьшились. Выявленные изменения почвенно-растительного покрова представляют собой серьезную угрозу, оказывая воздействие на окружающую среду и нарушая ее. Результаты данного исследования могут быть использованы в управлении и планировании будущего землепользования в данном районе.

Ключевые слова: контролируемая классификация, коэффициент Каппа Коэна, классы почвенно-растительного покрова, окружающая среда, антропогенное воздействие, Landsat.

B.B. THIEN*,**, V.T. PHUONG***

*National University of Laos, 01170, Dongdok Village, Xaythany District, Vientiane, Laos, buibaothienha@gmail.com
**Southern Federal University,
344006, Rostov-on-Don, ul. Bol'shaya Sadovaya, 105/42, Russia, buibaothienha@gmail.com
***Hung Duc University, 40130, Thanh Hoa, Quang Trung Street, 565, Vietnam,

vuthiphuong@hdu.edu.vn

IDENTIFICATION OF CHANGES IN LAND USE AND LAND COVER USING REMOTE SENSING AND GIS: A CASE STUDY OF THE BA RIA-VUNG TAU PROVINCE (VIETNAM)

Changes in land use and land cover (LULC) resulting from human activities have significant impacts on the surrounding environment and ecosystems. Detecting and mapping changes in LULC in the Ba Ria-Vung Tau province, Vietnam, is critical for sustainable development, planning, and management. This study applied the maximum likelihood classifier algorithm of supervised classification in ArcGIS 10.8 software to detect observed LULC changes in the study area during the period of 2000-2020 using multi-temporal satellite images. For each satellite image, the study applied spectral indices (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index, and NDWI — Normalized Difference Water Index) and a supervised classification to classify and assess LULC changes. The study performed an accuracy assessment of the classification maps derived from Landsat 5-TM for 2000 and 2010 and Landsat 8-OLI for 2020 using kappa coefficients of 0,882, 0,891, and 0,915, respectively. The area was classified into five main LULC classes including agriculture, water bodies, forest, settlement, and bare soil/rock. The LULC status and change maps created in ArcGIS 10.8 show a significant change in LULC. The settlement class has increased continuously over 20 years from 128,09 km² (2000) to 300,30 km² (2020); the agricultural land class has increased by 124,96 km² in the period 2000–2020. The remaining three classes, forest, water bodies, and bare soil/rock, all decreased in area during this period. These LULC changes pose a serious threat, impacting and disturbing the environment. The results of this study can be used in the management and planning of future land use in the area.

Keywords: controlled classification, Cohen's Kappa coefficient, land cover classes, environment, anthropogenic impact, Landsat.

введение

Программы исследования изменений землепользования и почвенно-растительного покрова (ПРП) стали центральными в современных стратегиях мониторинга динамики окружающей среды и управления природными ресурсами [1, 2]. Изменения ПРП представляют собой наиболее важный фактор изменения стоимости экосистемных услуг. Они наблюдаются, начиная с 1950-х гг. [3], связаны с трансформацией землепользования и являются результатом сложных взаимодействий между людьми и природной средой [4]. Изменения в ПРП, особенно в развивающихся странах [5, 6], привели к сокращению таких важных природных ресурсов, как растительность, почва и вода [7–10]. Более того, они тесно связаны с устойчивым социально-экономическим развитием. Прогрессирующие изменения вызывают тревогу и могут оказать значительное воздействие на местную, региональную, национальную и мировую окружающую среду [11, 12]. Таким образом, оценка моделей землепользования и их изменчивости на региональном уровне важна для конкретного планирования, управления и использования и использования ресурсов.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и географические информационные системы (ГИС) представляют собой важнейшие инструменты для своевременного и точного сбора пространственных данных о ПРП, а также для анализа его изменений в пределах изучаемой территории [13–15]. Для извлечения информации из данных ДЗЗ используется несколько методов обнаружения изменений и анализа изображений [16]. Изображения ДЗЗ могут эффективно регистрировать землепользование и являются отличным источником данных, из которых можно действенно извлекать, анализировать и моделировать текущую информацию и изменения ПРП [17, 18]. Нормализованный дифференциальный индекс растительности (НДИР, NDVI) также полезен для мониторинга и оценки растительности и вычисляется с использованием диапазона красного и ближнего инфракрасного излучений, более высокие значения НДИР обычно характеризуют более высокую энергоемкость растительного покрова и способность к фотосинтезу [19, 20]. Аналогично, для определения и мониторинга изменений содержания поверхностных вод. также широко применяется анализ нормализованного разностного индекса влажности (НРИВ, NDWI) с использованием зеленого и ближнего инфракрасного спектров многогранных спутниковых изображений [21]. Совместное использование ДЗЗ и ГИС было продемонстрировано как мощный и экономически эффективный метод мониторинга изменений ПРП [22-25]. С развитием методов ДЗЗ и ГИС подробные карты ПРП стали полезным средством выбора территорий для различных видов использования [12, 14, 23].

В последнее время было разработано несколько методов обнаружения изменений ПРП с использованием изображений, полученных с помощью дистанционных датчиков. Различные методы и алгоритмы идентификации изменений были разработаны и применены с помощью ряда классификаций: без наблюдения (или кластеризация), под наблюдением, гибридной и нечеткой [26–28]. Многие методы контролируемой классификации использовались во всем мире для анализа изменчивости землепользования, при этом исследователи полагались на сочетание фоновых знаний и личного опыта в большей степени, чем в других областях. С помощью этих знаний получают сигнатуру на пиксель и сохраняют ее в сигнатурных файлах; необработанные цифровые числа каждого пикселя в сцене преобразуются в радиационные значения [29].

Основная цель данного исследования — выявление степени изменения ПРП с использованием данных ДЗЗ и инструментов ГИС в провинции Бариа-Вунгтау (Вьетнам) за 20-летний период для создания карты землепользования и определение воздействия, которое привело к этим изменениям. Задачами проведенной работы стало выявление и классификация различных типов ПРП, создание модели его изменения в регионе в период 2000–2020 гг., рассмотрение потенциала интеграции данных ДЗЗ и ГИС в изучение пространственного распределения различных изменений ПРП, а также определение вариации типов ПРП путем пространственного сравнения созданных карт почвенно-растительного покрова.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Район исследования. Исследование проводилось в провинции Бариа-Вунгтау, расположенной вдоль побережья в юго-восточном регионе Вьетнама. Район исследования находится в южном ключевом экономическом регионе, у ворот в Восточное море провинций юго-восточного региона. Провинция Бариа-Вунгтау связана с Хошимином и другими населенными пунктами автомобильными, водными и воздушными путями. На материке расположено семь административных единиц с двумя крупными городами (Бариа и Вунгтау) и одной островной административной единицей (район Кон Дао). Территория исследования простирается на семь внутренних административных единиц, общая площадь которых составляет 1905,61 км², в 2017 г. здесь проживало около 1 159 000 жителей, что составляет 99 % от общего городского населения [30] (рис. 1).

Рельеф всей территории провинции Бариа-Вунгтау имеет тенденцию к уклону в сторону моря. Однако рядом с морем есть несколько небольших гор. Самая высокая из них имеет высоту всего около 500 м. Материк, составляющий 96 % площади провинции, относится к шельфу плато Ди Линь — юго-восточному региону, наклоненному с северо-запада на юго-восток и граничащему с Восточным морем. Более половины территории провинции занимают горы и низкие долины. Высота более 50 гор превышает 100 м, а береговая линия протянулась на 100 км вдоль Восточного моря. Высоте более 400—500 м соответствуют три горы: Онг Тринх, Чуа и Святой Крест. В рельефе выделяют четыре типа (узкие равнины, горы, холмы, континентальные шельфы). Бариа-Вунгтау имеет разнообразный ландшафт с высокогорным районом на севере и низменным на юге. В провинции протекает несколько рек и ручьев, включая реки Донг Най и Рей. Кроме того, на территории провинции расположено множество национальных парков и заповедников, самые значимые из которых Национальный парк Кон Дао и заповедник Бинь Чау-Фуок Буу.

Климат Бариа-Вунгтау тропический муссонный; год делится на два отдельных сезона. Сезон дождей длится с мая по октябрь и включает юго-западный муссон. Сухой сезон приходится на период с ноября по апрель и включает в себя северо-восточный муссон. Среднегодовая температура составляет 27,0 °C. В самый холодный месяц средняя температура составляет около 26,8 °C, в самый теплый — около 28,6 °C. Среднегодовое количество часов солнечного сияния примерно равно 2400 ч; среднее количество осадков — примерно 1500 мм.

Сбор данных. Информация, использованная в этом исследовании, была разделена на спутниковую и вспомогательную. Данные спутниковой съемки Landsat с пространственным разрешением 30 м были взяты из бесплатных онлайн-архивов USGS Glovis и USGS Earth Explorer. Характеристики спутниковых данных, полученных для анализа изменений, представлены в табл. 1. Вспомогательная информация, включая отображение наземных данных для классов ПРП, состояла из аэрофотоснимков территории исследования и прилегающих территорий, а также топографических карт. Наземные данные в виде опорных точек были собраны случайным образом с помощью программного обеспечения ArcGIS 10.8 и сопоставлены с другими вспомогательными для точного определения каждой точки для классов ПРП. Они, в свою очередь, использовались для классификации изображений и оценки общей точности ее результатов.

Предварительная обработка и классификация изображений. Предварительная обработка изображений проводилась для извлечения значимой информации из спутниковых данных, чтобы их было легче интерпретировать [31]. Для обработки изображений мы использовали программное обеспечение



Рис. 1. Карта территории исследования в провинции Ба Риа-Вунг Тау (Вьетнам). Границы: *1* — провинции Ба Риа-Вунг Тау, *2* — Вьетнама.

ArcGIS 10.8. Этот процесс используется для первоначальной обработки исходных данных и обычно включает такие процедуры, как геометрическая коррекция, улучшение изображения, удаление шума и топографическая коррекция. Спутниковые изображения, представленные в табл. 1, были геометрически скорректированы в соответствии с Универсальной поперечной проекцией Меркатора WGS84 и зоной отсчета 48. Данные были скомпонованы и обрезаны в соответствии с заранее определенными границами исследуемой территории. Все спутниковые данные изучены путем присвоения подписей на пиксель и разделения водосборов на пять классов на основе конкретных числовых значений различных элементов ландшафта и земель. Выделены следующие классы: земли сельского хозяйства, водные объекты, лес, поселение и обнаженная почва/скальные породы (табл. 2). Перед отбором пробных образцов проведен тщательный экспериментальный анализ спутниковых снимков и изображений территории, полученных с помощью Google Earth. Для каждого предопределенного типа

Таблица 1

· · · · · ·								
Спутниковый снимок	Сенсор	Путь/ряд	Разрешение, м	Дата получения	Источник			
Landsat 5	ТМ	124/053	30	28.03.2000	USGS glovis			
Landsat 5	TM	124/053	30	04.02.2010	USGS glovis			
Landsat 8	OLI	124/053	30	14.11.2020	USGS			

Использованные в исследовании спутниковые снимки Landsat

Таблица 2

Илентифицирован	ные с помошью	супервизорной	классификании	классы
1 Actin the man pobuli	mble e nomomblo	e, nepbnoopnon	macomprinted	muccon

Класс	Описание			
Сельское хозяйство	Возделываемые поля, приусадебные садовые участки, аквакультура, соляные поля и небольшие разрозненные участки пастбищных земель			
Водные объекты Леса	Реки, каналы, озера, искусственные пруды Лесные хозяйства, естественные леса, отдельные деревья, мангровые заросли			
Поселения Обнаженные почвы/скальные породы	Жилые здания, промышленные объекты, дороги, деревни Нераспаханные земли, пески, земляные отвалы			

ПРП после анализа были отобраны пробные образцы. Полигоны выделены в репрезентативных местах. Спектральные сигнатуры для типов почвенно-растительного покрова, полученные со спутниковых снимков, были записаны с помощью пикселей, окруженных этими полигонами. В исследовании использовался алгоритм контролируемой классификации на основе правил — классификатор максимального правдоподобия для классификации ПРП для полученных изображений 2000, 2010 и 2020 гг. [16].

Анализ индексов НДИР и НРИВ. НРИВ подходит для определения растительного покрова исследуемой территории [20, 21]. НДИР — это спутниковый индекс для количественной оценки зеленого цвета растительности, а также для понимания плотности и состояния здоровья растений. НДИР территории может быть получен из диапазона числовых значений от -1 до +1, в зависимости от активности реакции фотосинтеза, осуществляемого зеленой растительностью. Высокие значения НДИР отражают высокую плотность растительности, а отрицательные значения указывают на наличие на данной территории воды. Чем выше НДИР, тем более зеленая растительность в пределах пикселя, при этом индекс НДИР определяется как

$$H\mathcal{I} HP = (NIR - RED)/(NIR + RED), \tag{1}$$

где NIR — отражательная способность, излучаемая в ближнем инфракрасном диапазоне волн, а RED — отражательная способность, излучаемая в видимом красном диапазоне волн спутникового радиометра.

Аналогично, НРИВ — это индекс, разработанный для анализа особенностей открытой воды и содержания воды в растительности [19]. НРИВ является ценным показателем для мониторинга засухи, водного стресса и деградации земель. НРИВ не имеет размерности, и его значение варьируется от -1 до +1. Высокие значения НРИВ отражают содержание воды в растительности и высокие характеристики открытой воды, а низкие указывают на меньшее содержание воды, при этом индекс НРИВ рассчитывается с помощью уравнения

$$HPHB = (GREEN - NIR)/(GREEN + NIR), (2)$$

где GREEN — отражение в зеленом диапазоне спектра.

Оценка точности. Коэффициент Каппа Коэна является статистической мерой, используемой для оценки уровня согласия между двумя классификаторами при работе с категориальными данными [30]. Он учитывает возможность случайного возникновения согласия и предлагает более точную оценку межрейтинговой надежности по сравнению с простым процентным согласием [31, 32]. Оценка точности классификации изображений 2000, 2010 и 2020 гг. была проведена для определения качества информации, полученной из данных. Проверка точности проводилась по 250 точкам на основе наземных данных и визуальной интерпретации. Сравнение данных точек и результатов классификации проводилось с помощью матрицы смешения. Для проверки точности классификатора использовался

именно коэффициент Каппа Коэна, так как он учитывает диагональные элементы и все части слов в матрице смешения [30, 31]. Общая точность и коэффициент Каппа Коэна были рассчитаны по 250 истинным точкам, случайно отобранным за все три года [32, 33], с использованием уравнений

Общая точность =
$$\frac{\sum_{i=1}^{k} n_{ii}}{n}$$
, (3)

Коэффициент Каппа Коэна =
$$\frac{\sum_{i=1}^{k} n_{ii} - \sum_{i=1}^{k} n_{ii} (G_i C_i)}{n^2 - \sum_{i=1}^{k} n_{ii} (G_i C_i)},$$
 (4)

где *i* — номер класса; *n* — общее количество классифицированных пикселей, которые сравниваются с фактическими данными; n_{ii} — количество пикселей, принадлежащих классу фактических данных *i*, которые были классифицированы с классом *i*; C_i — общее количество классифицированных пикселей, принадлежащих классу *i*; G_i — общее количество пикселей фактических данных, принадлежащих классу *i*.

Обнаружение изменений ПРП. В данном исследовании использовалось обнаружение изменений после классификации для выявления изменений ПРП на изучаемой территории за определенный период времени. Метод сравнения после классификации был выполнен с применением программного обеспечения ArcGIS 10.8 для сопоставления результатов классификации двух изображений на основе пикселей. С помощью этой процедуры получена двусторонняя перекрестная матрица, которая использовалась для описания основных закономерностей изменений на исследуемой территории. Матрица изменений создана для периода 2000–2020 гг. с целью оценки общих изменений в каждой категории почвенно-растительного покрова.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты классификации предварительно обработанных спутниковых изображений 2000, 2010 и 2020 гг. показаны на рис. 2; площадь и соотношение каждого типа ПРП по годам представлены в табл. 3. Общая точность классификации составила более 80 %, а коэффициент Каппа Коэна — более 0,8, что указывает на хорошие результаты, согласно предыдущим исследованиям [34, 35]. Общая точность классификации равна 90,4, 91,2 и 93,2 %, а коэффициент Каппа Коэна — 0,882, 0,891 и 0,915 для изображений 2000, 2010 и 2020 гг. соответственно, что указывает на почти идеальную точность классификации. Такой уровень согласия является превосходным для обнаружения и классификации колебаний в состоянии почвенно-растительного покрова.

Таблица 3 и схема изменения ПРП (рис. 3) показывают, что в период 2000–2010 гг. площадь сельскохозяйственных и поселенческих земель увеличилась, а площадь водных объектов, лесов и обнаженных почв/скальных пород уменьшилась. Площадь земель поселений возросла с 6,72 до 12,81 % от общей. Сельскохозяйственные земли были самым большим классом в 2000 г. (55,06 %), и их площадь увеличились до 72,73 % в 2010 г. Лесные земли составляли 30,56 % от общей площади в 2000 г. и сократились до 8,48 % в 2010 г. Доля площади водных объектов уменьшилась с 4,79 до 2,91 %; доля обнаженных почв/скальных пород сократилась с 3,06 до 2,88 %. Из данных табл. 3 и рис. 3 видно, что площадь сельскохозяйственных земель уменьшилась до 61,61 % к 2020 г. Площадь лесов и водных объектов увеличилась с 8,48 и 2,91 % (2010 г.) до 16,15 и 4,45 % (2020 г.) соответственно. Площадь земель, занятых поселениями, увеличилась до 15,76 % в 2020 г. (см. табл. 3).

В период 2000—2020 гг. произошло заметное изменение в ПРП (см. рис. 3). Территории, отданные под поселения, увеличились на 9,04 % (см. табл. 3) в связи с рядом новых проектов жилых районов, ферм и рекреационных объектов, разработанных в районе и вокруг него за последние 20 лет. В районе исследования также функционирует крупный морской порт для перевозки товаров по морю. В соответствии с этими факторами политика штата и местных властей была направлена на строительство других объектов для доступа к району, включая новые дороги, магистрали, тротуары и др. Исследование, проведенное Д. Лаббе в 2019 г. в регионе дельты р. Красной во Вьетнаме [36], показало, что масштабы урбанизации быстро растут благодаря новым формам городского развития и способам инвестирования. Инвестиции в недвижимость превысили существующий подход к планированию во



Таблица 3

Результаты классификации землепользования и земного покрова и сценарий изменений с 2000 по 2020 года в провинции Ба Риа-Вунг Тау

V roog	2000		2010		2020		Изменение пло- щади в период 2000-2020 гг.	
Khace	Площадь		Площадь		Площадь		Площадь	
	км ²	%	км ²	%	км ²	%	км ²	%
Сельское хозяйство	1049,17	55,06	1385,98	72,73	1174,13	61,61	124,96	6,56
Водные объекты	91,27	4,79	55,53	2,91	84,72	4,45	-6,55	-0,34
Леса	582,29	30,56	161,66	8,48	307,82	16,15	-274,47	-14,40
Поселения	128,09	6,72	244,15	12,81	300,30	15,76	172,21	9,04
Обнаженные почвы/скальные породы	54,79	2,88	58,29	3,06	38,64	2,03	-16,15	-0,85
Итого	1905,61	100,00	1905,61	100,00	1905,61	100,00		



Рис. 3. Изменения в землепользовании и почвенно-растительном покрове провинции Бариа-Вунгтау в периоды 2000–2010 (*a*), 2010–2020 (*б*) и 2000–2020 (*в*) гг.

1 — сельскохозяйственные земли; переход сельскохозяйственных земель: 2 — в обнаженные почвы/скальные породы; 3 — в лес, 4 — в земли поселений, 5 — в водоемы; 6 — обнаженные почвы/скальные породы; переход обнаженных почв/скальных пород: 7 — в сельскохозяйственные земли, 8 — в лесные угодья, 9 — в земли поселений, 10 — в водоемы; 11 — лес; переход леса: 12 — в сельскохозяйственные земли, 13 — в обнаженные почвы/скальные земли, 13 — в обнаженные земли, 15 — в водоемы; 16 — земли поселений; переход земель поселений:
 17 — в сельскохозяйственные земли, 18 — в обнаженные почвы/скальные породы, 19 — в лесные угодья, 20 — в водоемы; 21 — водоемы; переход водоемов: 22 — в сельскохозяйственные угодья, 23 — в обнаженные почвы/скальные почвы/скальные почвы/скальные почвы/скальные почвы/

Вьетнаме. Увеличение площади земель поселений значительно сократило площадь обнаженных почв/ скальных пород. Результаты классификации согласуются с данными, показывающими, что площадь обнаженных почв/скальных пород уменьшилась на 0,85 % с 2000 по 2020 г. (см. табл. 3).

Доля сельскохозяйственных угодий увеличилась на 6,56 % за исследуемый период (см. табл. 3). Большинство земель сельскохозяйственного назначения в настоящее время деградирует и подвергается эрозии, а питательные вещества вымываются. Таким образом, провинция Бариа-Вунгтау реализовала план по разработке модели органического сельскохозяйственного производства в этом районе, чтобы внести свой вклад в защиту земельных ресурсов, особенно сельскохозяйственных земель. На их площадь также повлияли урбанизация и индустриализация. Меры по переходу от традиционных

методов производства к высокотехнологичным моделям необходимы для повышения производительности, улучшения качества продукции и сохранения земель.

Согласно данным табл. 3, площадь лесов сократилась на 14,40 % с 2000 по 2020 г. из-за прессинга, вызванного повышением цен на некоторые сельскохозяйственные и водные продукты. Рост производства привел к увеличению спроса на пахотные земли, что способствовало уничтожению лесов, захвату земель для посадки деревьев, производства высокоценных водных продуктов или торговли [37]. Нарушения законов об обезлесении и эксплуатация лесов по-прежнему имеют место и являются основными причинами деградации зеленых насаждений [38, 39]. Для изменения ситуации необходимо усовершенствовать систему управления лесным фондом, усилить охрану лесов и повысить роль в контроле над ними правоохранительных органов.

Площадь водных объектов — это общая площадь территорий, покрытых водой, расположенных на данной территории суши, включая реки, озера, пруды, заливы, болота и искусственные водоемы, в частности, водохранилища. Также создаются ирригационные сооружения, необходимые для различных целей, таких как орошение, промышленное использование или бытовое водоснабжение. Территория водных объектов играет важную роль в управлении водными ресурсами и охране окружающей среды. Площадь, покрытая водными объектами, также уменьшилась с 2000 по 2020 г. до 0,34 % (см. табл. 3). За эти 20 лет динамика ПРП в других классах повлияла на водные объекты. В условиях изменения климата и антропогенного воздействия они представляют собой наиболее явно пострадавший природный ресурс [40]. Из таксономического сравнения (см. рис. 3) видно, что озера и реки в районе исследования претерпели значительные морфологические изменения и сокращение площадей из-за значительного вмешательства человека и изменчивости водного потока, аллювиальных наносов, получаемых от питающих притоков, что является важным фактором, способствующим уменьшению глубины воды. Кроме того, неэффективные методы управления привели к загрязнению и ухудшению состояния ценных водных экосистем.

Исследуемая территория также была проанализирована с помощью индексов НДИР и НРИВ. Оба индекса дают схожие результаты. Пять выбранных характеристик почвенно-растительного покрова можно различить с помощью обоих индексов. Индекс НДИР обычно используется для мониторинга состояния растительности. На рис. 4 представлено пространственное распределение значений НДИР за три года (2000, 2010 и 2020 гг.), значения варьируются от -0,82 до 0,74. Лесные участки были хорошо видны, выделяясь темно-зеленым цветом, а значения индекса для них превышали 0,5. В связи с обилием сельского хозяйства в районе исследования (например, выращивание риса, плодовых и других многолетних сельскохозяйственных культур), очевидно, что сельскохозяйственные районы имеют значения индекса от 0,2 до 0,5 (светло-зеленый цвет) и от -0,2 до 0,0 (светло-фиолетовый цвет) (см. рис. 4). Однако водные территории представлены фиолетовым цветом, и значения индекса для них ниже -0,3. Поселения и оголенные участки почвы/скальные породы представлены заливкой беловатых оттенков, а значения индекса варьируются от 0,0 до 0,2 (см. рис. 4). Анализ НДИР также показал, что сельскохозяйственные площади значительно увеличились, а лесные существенно сократились за этот период времени.

Индекс НРИВ обычно используется для мониторинга условий водного стресса, влияющего на содержание воды в растительности. Поэтому индекс НРИВ был проверен и использован в исследованиях водно-болотных угодий, рек, озер и океанов [41, 42]. Исследуемая территория также была изучена с помощью данного индекса, и полученные результаты весьма схожи с результатами НДИР. На рис. 4 представлено пространственное распределение значений НРИВ за три указанных года. В указанный период значения НРИВ варьируются между -0,76 и 0,89. Лесные участки были выделены темно-зеленым цветом, а значения индекса для них были менее -0,4. Для сельскохозяйственных территорий были актуальны светло-зеленый и светло-фиолетовый цвета, и значения индекса для них варьируются от -0,4 до -0,1 и от 0,1 до 0,2 соответственно (см. рис. 4). В то же время водные территории представлены темно-фиолетовым цветом, и значения НРИВ для них выше 0,2. Поселения и участки обнаженной почвы/скальных пород представлены светло-кофейным цветом, а значения индекса также показывает значительное сокращение площади лесов в период 2000–2020 гг. Кроме того, очевидно, что заметное расширение площади поселений всегда сопровождается увеличением площади земель сельского хозяйства.

На основе применения ГИС и постклассификационного сравнения обнаруженных изменений была составлена карта для понимания пространственной структуры изменений между годами. Для получения общего представления о более чем 20-летних исследованиях две классифицированные



Рис. 4. Пространственное распределение значений индексов НДИР (*a*, *б*, *в*) и НРИВ (*c*, *д*, *e*) в провинции Бариа-Вунгтау в 2000, 2010 и 2020 гг.

карты были наложены друг на друга для создания карты изменчивости ПРП, в дополнение к матрице перекрестной табуляции, которая также была подготовлена для данного исследования. Матрица перекрестной табуляции (табл. 4) показывает характер вариаций по различным категориям. Из 1049,14 км² сельскохозяйственных земель в 2000 году 768,74 км² оставались сельскохозяйственными землями в 2020 г.; 248,88 км² были преобразованы в леса и земли поселений; остальная часть приходилась на обнаженные почвы/скальные породы и водные объекты. Увеличение сельскохозяйственных земель с 2000 по 2020 г. произошло в основном за счет сокращения лесных земель (302,34 км²). В 2000 г. лесные земли составляли 582,29 км², а в 2020 г. — 152,96 км². Площадь естественных посевов; естественные леса были уничтожены ради сельского хозяйства, преимущественно для выращивания технических культур.

Площадь земель поселений увеличилась с 128,09 км² в 2000 г. до 300,30 км² в 2020 г. В 2020 г. они в основном заменили сельскохозяйственные (106,02 км²) и лесные земли (107,72 км²) (см. табл. 4). Процесс урбанизации включает рост жилых районов, производственных земель и несельскохозяйственных предприятий, а также строительство объектов общественного благосостояния, развитие транспортной инфраструктуры и ирригации; сочетание этих факторов привело к значительным изменениям в площади земель поселений [43].

Водные объекты сохранились только на 54,36 км² в 2020 г. из 91,27 км² в 2000 г. и были заменены в основном сельскохозяйственными. Изменения ПРП, наблюдаемые во всех других классах за последние два десятилетия, затронули и класс водных объектов. Легкий доступ к воде, в конечном итоге, имеет тенденцию приводить к истощению водных ресурсов, образованию сухих притоков и замене водотоков засушливой местностью [44]. Площадь обнаженных почв/скальных пород уменьшилась с 54,79 км² (2000 г.) до 38,61 км² (2020 г.) и сохранилась лишь на 5,46 км² от общей площади в 2000 году (см. табл. 4).

Данное исследование проливает свет на важность сочетания ДЗЗ и ГИС для выявления изменений в ПРП на территории за разные периоды времени, поскольку данные методы дают важную информацию о пространственном распределении и характере этих изменений. В представленном исследовании использовался сокращенный метод классификации с общей точностью более 90 %, что указывает его эффективность для документирования изменений ПРП в районе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном исследовании при использовании данных Landsat 5 ТМ и Landsat 8 OLI за период 2000–2020 гг. выявлены и оценены изменения в модели ПРП в провинции Бариа-Вунгтау (Вьетнам). Можно сделать вывод, что за последние два десятилетия в этом регионе наблюдалась значительная динамика состояния почвенно-растительного покрова, вызванная хозяйственной деятельностью человека и изменением климата. Изменение ПРП в исследуемой провинции выражается в увеличении площади земель сельского хозяйства и поселений (11,91 и 134,44 % соответственно) и уменьшении площади, занятой лесами (47,14 %), обнаженной почвой/скальными породами (29,48 %) и водоемами (7,18 %). Индексы НДИР и НРИВ также способствовали детализации процесса изменений в характеристиках почвенно-растительного покрова между 2000 и 2020 гг. Расширение сельско-

Таблица 4

2000	Сельское хозяйство	Водные объекты	Лес	Поселения	Обнажен- ные почвы/ скальные породы	Итого		
Сельское хозяйство	768,74	28,43	302,34	47,67	26,95	1174,13		
Водные объекты	18,88	54,36	7,46	2,29	1,73	84,72		
Леса	142,86	0,04	152,96	6,22	5,74	307,82		
Поселения	106,02	4,04	107,72	67,61	14,91	300,30		
Обнаженные почвы/скальные породы	12,64	4,40	11,81	4,30	5,46	38,61		
Итого	1049,14	91,27	582,29	128,09	54,79			

Классы почвенно-растительного покрова в период с 2000 по 2020 года (площадь в км²)

хозяйственных земель, особенно поселковых территорий, в основном было вызвано процессом урбанизации и отсутствием планирования и рационального управления земельными ресурсами, так как отчет о генеральном планировании не был подготовлен до начала освоения земель в данном районе. Это расширение оказало воздействие на лесные угодья и водные объекты, что привело, соответственно, к обезлесению территории и истощению водных ресурсов.

Результаты проведенного исследования могут помочь в выявлении ограниченных ресурсов и экологически значимых территорий, которые могут быть выделены как «горячие точки» для сохранения или восстановления. В данной работе использовались методы ДЗЗ и ГИС — наиболее известные современные технологии для пространственно-временного анализа, который невозможно выполнить с помощью обычных методов картографирования. Анализ и результаты исследования могут предоставить важную информацию, которая будет способствовать планированию и реализации более устойчивого развития во Вьетнаме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Kumari M., Das A., Sharma R., Saikia S. Change detection analysis using multi temporal satellite data of Poba reserve forest, Assam and Arunachal Pradesh // Int. Journ. Geomat. Geosci. - 2014. - Vol. 4, N 3. - P. 517.
- 2. Han H., Yang C., Song J. Scenario simulation and the prediction of land use and land cover change in Beijing, China // Sustainability. 2015. Vol. 7, N 4. P. 4260–4279. DOI: 10.3390/su7044260
- Liu W., Zhan J., Zhao F., Yan H., Zhang F., Wei X. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China // Ecol. Indic. – 2019. – Vol. 98. – P. 228–238. – DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.10.054
- 4. Pielke Sr R.A., Pitman A., Niyogi D., Mahmood R., McAlpine C., Hossain F., Goldewijk K.K., Nair U., Betts R., Fall S., Reichstein M., Kabat P., de Noblet N. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence, Wiley Interdiscip // Rev.: Clim. Change. – 2011. – Vol. 2, N 6. – P. 828–850. – DOI: 10.1002/wcc.144
- Hegazy I.R., Kaloop M.R. Monitoring urban growth and land use change detection with GIS and remote sensing techniques in Daqahlia governorate Egypt // Int. Journ. Sustain. Built Environ. – 2015. – Vol. 4, N 1. – P. 117– 124. – DOI: 10.1016/j.ijsbe.2015.02.005
- Larasati D.A., Hariyanto B. The impact of land use changes in the Banjarsari village, Cerme district of Gresik Regency, East Java Province // Journ. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 953, N 1. P. 012178. DOI: 10.1088/17426596/-953/1/012178
- Erb K.H., Kastner T., Plutzar C., Bais A.L.S., Carvalhais N., Fetzel T., Gingrich S., Haberl H., Lauk C., Niedertscheider M., Pongratz J., Thurner M., Luyssaert S. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass // Nature. – 2018. – Vol. 553, N 7686. – P. 73–76. – DOI: 10.1038/nature25138
- 8. Hyandye C.B., Worqul A., Martz L.W., Muzuka A.N. The impact of future climate and land use/cover change on water resources in the Ndembera watershed and their mitigation and adaptation strategies // Environ. Syst. Res. 2018. Vol. 7, N 1. P. 1–24. DOI: 10.1186/s40068-018-0110-4
- Azimi Sardari M.R., Bazrafshan O., Panagopoulos T., Sardooi E.R. Modeling the impact of climate change and land use change scenarios on soil erosion at the Minab Dam Watershed // Sustainability. — 2019. — Vol. 11, N 12. — P. 3353. — DOI: 10.3390/su11123353
- Thien B.B., Sosamphanh B., Yachongtou B., Phuong V.T. Land use/land cover changes in the period of 2015–2020 in AngYai Village, Sikhottabong District, Vientiane Capital, Lao PDR // Geology Geophys. Environ. – 2022. – Vol. 48, N 3. – P. 279–286. – DOI: 10.7494/geol.2022.48.3.279
- Meshesha T.W., Tripathi S.K., Khare D. Analyses of land use and land cover change dynamics using GIS and remote sensing during 1984 and 2015 in the Beressa Watershed Northern Central Highland of Ethiopia // Model. Earth Syst. Environ. – 2016. – Vol. 2, N 4. – P. 1–12. – DOI: https://doi.org/10.1007/s40808-016-0233-4
- Olorunfemi I.E., Fasinmirin J.T., Olufayo A.A., Komolafe A.A. GIS and remote sensing-based analysis of the impacts of land use/land cover change (LULCC) on the environmental sustainability of Ekiti State, southwestern Nigeria, Environ // Dev. Sustain. – 2020. – Vol. 22, N 2. – P. 661–692. – DOI: 10.1007/-s10668-018-0214-z
- Banerjee R., Srivastava P.P.K. Reconstruction of contested landscape: Detecting land cover transformation hosting cultural heritage sites from Central India using remote sensing // Land Use Policy. 2013. Vol. 34. P. 193–203. DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.03.005
- Schaefer M., Thinh N.X. Evaluation of land cover change and agricultural protection sites: a GIS and remote sensing approach for Ho Chi Minh city, Vietnam // Heliyon. – 2019. – Vol. 5, N 5. – P. e01773. – DOI: 10.1016/j. heliyon.2019.-e01773
- Elagouz M.H., Abou-Shleel S.M., Belal A.A., El-Mohandes M.A.O. Detection of land use/cover change in Egyptian Nile Delta using remote sensing, Egypt // Journ. Remote. Sens. Space Sci. – 2020. – Vol. 23, N 1. – P. 57–62. – DOI: 10.1016/j.ejrs.2018.10.004

- Mishra P.K., Rai A., Rai S.C. Land use and land cover change detection using geospatial techniques in the Sikkim Himalaya, India, Egypt // Journ. Remote. Sens. Space Sci. – 2020. – Vol. 23, N 2. – P. 133–143. – DOI: 10.1016/j.ejrs.-2019.02.001
- Singh S.K., Laari P.P.B., Mustak S.K., Srivastava P.P.K., Szaby S. Modelling of land use land cover change using earth observation data-sets of Tons River Basin, Madhya Pradesh, India // Geocarto Int. – 2018. – Vol. 33, N 11. – P. 1202–1222. – DOI: 10.1080/10106049.2017.1343390
- Hussain S., Lu L., Mubee M., Nasim W., Karuppannan S., Fahad S., Tariq A., Mousa B.G., Mumtaz F., Aslam M. Spatiotemporal variation in land use land cover in the response to local climate change using multispectral remote sensing data // Land. – 2022. – Vol. 11, N 5. – P. 595. – DOI: 10.3390/land-11050595
- Huete A.R. Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring // Geogr. Compass. 2012. Vol. 6, N 9. P. 513–532. – DOI: 10.1111/j.17498198.-2012.00507.x
- 20. Cao L., Liu T., Wei L. A comparison of multi-resource remote sensing data for vegetation indices // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2014. – Vol. 17, N 1. – P. 012067. – DOI: 10.1088/1755-1315/17/1/012067
- Gao B.C. NDWI A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sens. Environ. – 1996. – Vol. 58, N 3. – P. 257–266. – DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- Hazarika N., Das A.K., Borah S.B. Assessing land-use changes driven by river dynamics in chronically flood affected Upper Brahmaputra plains, India, using RS-GIS techniques, Egypt // Journ. Remote. Sens. Space Sci. – 2015. – Vol. 18, N 1. – P. 107–118. – DOI: 10.1016/j.ejrs.2015.02.001
- Shawul A.A., Chakma S. Spatiotemporal detection of land use/land cover change in the large basin using integrated approaches of remote sensing and GIS in the Upper Awash basin, Ethiopia // Environ. Earth Sci. 2019. Vol. 78, N 5. P. 1–13. DOI: 10.1007/s12665-019-8154-y
- Rahman M.N. Urban expansion analysis and land use changes in Rangpur city corporation area, Bangladesh, using remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) techniques // Geos. Ind. – 2019. – Vol. 4, N 3. – P. 217–229. – DOI: 10.19184/geosi.v4i3.13921
- Avand M., Moradi H. Using machine learning models, remote sensing, and GIS to investigate the effects of changing climates and land uses on flood probability // Journ. Hydrol. — 2021. — Vol. 595. — P. 125663. — DOI: 10.1016/ j.jhyd-rol.2020.125663
- 26. Lu D., Mausel P.P., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques // Int. J. Remote Sens. 2004. Vol. 25, N 12. – P. 2365–2401. – DOI: 10.1080/-0143116031000139863
- Alawamy J.S., Balasundram S.K., Mohd Hanif A.H., Boon Sung C.T. Detecting and analyzing land use and land cover changes in the region of Al-Jabal Al-Akhdar, Libya using time-series landsat data from 1985 to 2017 // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, N 11. – P. 4490. – DOI: 10.3390/su12114490
- Pande C.B., Moharir K.N., Khadri S.F.R., Patil S. Study of land use classification in an arid region using multispectral satellite images // Appl. Water Sci. 2018. Vol. 8, N 5. P. 1–11. DOI: 10.1007/s13201-018-0764-0
- 29. Ba Ria-Vung Tau Statistics Office, Ba Ra-Vung Tau Statistical Yearbook 2017 [Electronic resource]. https://se-adelt.net/Asset/Source/Document_ID-438_No-01.pdf (date of application 10.02.2022).
- Ikiel C., Ustaoglu B., Dutucu A.A., Kilic D.E. Remote sensing and GIS-based integrated analysis of land cover change in Duzce plain and its surroundings (north western Turkey) // Environ. Monit. Assess. – 2013. – Vol. 185, N 2. – P. 1699–1709. – DOI: 10.1007/s10661-012-2661-6
- Thien B.B., Phuong V.T., Huong D.T. Detection and assessment of the spatio-temporal land use/cover change in the Thai Binh province of Vietnam's Red River delta using remote sensing and GIS // Model. Earth Syst. Environ. – 2022. – N 9 (4). – P. 1–2. – DOI: 10.1007/s40808-022-01636-8
- 32. Congalton R.G., Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. Boca Raton: CRC Press, 2019. 346 p. DOI: 10.1201/9780429052729
- 33. Alam A., Bhat M.S., Maheen M. Using Landsat satellite data for assessing the land use and land cover change in Kashmir valley // Geo Journ. 2020. Vol. 85, N 6. P. 1529–1543. DOI: 10.1007/s10708-019-10037-x
- 34. Manonmani R., Suganya G. Remote sensing and GIS application in change detection study in urban zone using multi temporal satellite // Int. Journ. Geomat. Geosci. 2010. Vol. 1, N 1. P. 60-65.
- Lea C., Curtis A.C. Thematic accuracy assessment procedures: National Park Service vegetation inventory, version 2.0 (Natural resource report NPS/2010/NRR-2010/204) [Electronic resource]. — https://www.yumpu.com/-en/ document/read/6550814/thematic-accuracy-assessment-procedures-version-2-usgs (date of application 28.02.2022).
- 36. Labbe D. Examining the governance of emerging urban regions in Vietnam: the case of the Red River Delta // Int. Plan. Stud. 2019. Vol. 24, N 1. P. 40-52. DOI: 10.1080/13563475.2018.1517593
- 37. Meyfroidt P.P., Rudel T.K., Lambin E.F. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2010. Vol. 107, N 49. P. 20917–20922. DOI: 10.1073/pnas.1014773107
- Chakravarty S., Ghosh S.K., Suresh C.P., Dey A.N., Shukla G. Deforestation: causes, effects and control strategies // Global Perspectives on Sustainable Forest Management. – 2012. – Vol. 1. – P. 1–26.
- Thien B.B., Phuong V.T. Using Landsat satellite imagery for assessment and monitoring of long-term forest cover changes in Dak Nong province, Vietnam // Geogr. Pannonica. – 2023. – Vol. 27, N 1. – P. 69–82. – DOI: 10.5937/gp27-41813
- Salerno F., Gaetano V., Gianni T. Urbanization and climate change impacts on surface water quality: Enhancing the resilience by reducing impervious surfaces // Water Res. - 2018. - Vol. 144. - P. 491-502. - DOI: 10.1016/j. watres.-2018.07.058

- 41. Shashikant V., Mohamed Shariff A.R., Wayayok A., Kamal M.R., Lee Y.P., Takeuchi W. Utilizing TVDI and NDWI to classify severity of agricultural drought in Chuping, Malaysia // Agron. 2021. Vol. 11, N 6. P. 1243. DOI: 10.3390/agronomy11061243
- 42. Ashok A., Rani H.P., Jayakumar K.V. Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery // Remote Sens. Appl.: Soc. Environ. 2021. Vol. 23. P. 100547. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100547
- 43. Yu Z., Yao Y., Yang G., Wang X., Vejre H. Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution // For. Ecol. Manag. 2019. Vol. 446. P. 214–225. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.05.046
- 44. Butt A., Shabbir R., Ahmad S.S., Aziz N. Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan, Egypt // Journ. Remote Sens. Space. Sci. – 2015. – Vol. 18, N 2. – P. 251–259. – DOI: 10.1016/j.ejrs.2015.07.003

Поступила в редакцию 28.12.2022 После доработки 28.04.2023 Принята к публикации 29.06.2023