

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-1-112-128

EDN: YECZRP

УДК 712.4

Научная статья / Research article

Исследование изменений городских зеленых насаждений с использованием данных Sentinel-2 в городе Тхайбинь, Вьетнам

Т.Ф. Нгуен¹, Е.А. Парахина²¹Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация thanhphong.dhtt@gmail.com

Аннотация. Городские зеленые насаждения играют важнейшую роль в регулировании окружающей среды, повышении качества жизни населения и вносят значительный вклад в достижение целей устойчивого городского развития. Однако быстрые темпы урбанизации в последние годы вызвали существенные изменения в землепользовании, в частности сокращение площади зеленых насаждений и городских зеленых зон. В исследовании использованы спутниковые данные Sentinel-2 L2A, обладающие преимуществами пространственного разрешения и возможностью многовременных наблюдений. Для дополнения информации о состоянии растительного покрова был рассчитан индекс NDVI. Для классификации основных категорий объектов, включая водные поверхности, растительность, городские территории и открытые земли, применен алгоритм машинного обучения Random Forest. Результаты анализа показали, что городские зеленые насаждения в Тхайбине претерпели значительные изменения во времени, при этом главным фактором сокращения площади растительного покрова является расширение городской застройки. Полученные выводы не только дают четкое представление о развитии и деградации зеленых насаждений на местном уровне, но и имеют практическое значение для управления и планирования, способствуя формированию стратегий устойчивого городского развития, обеспечивающих баланс между ростом городов и охраной окружающей среды, применимых как для Тхайбина, так и для других городов Вьетнама.

Ключевые слова: зеленые зоны города, дистанционное зондирование, космические снимки, Random Forest, NDVI

Вклад авторов. *Нгуен Т.Ф.* — проведение исследования, визуализация, анализ исследования, создание рукописи. *Парахина Е.А.* — разработка концепции, анализ текста, руководство исследованием. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 27.10.2025; доработана после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

© Нгуен Т.Ф., Парахина Е.А., 2026

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Нгуен Т.Ф., Парахина Е.А. Исследование изменений городских зеленых насаждений с использованием данных Sentinel-2 в городе Тхайбинь, Вьетнам // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 1. С. 112–128. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-1-112-128> EDN: YECZRP

Study of urban green space changes using Sentinel-2 data in Thai Binh City, Vietnam

Thanh Phong Nguyen¹, Elena A. Parakhina²

¹RUDN University, Moscow, Russian Federation

²RUDN University, Moscow, Russian Federation

 thanhphong.dhtt@gmail.com

Abstract. Urban green spaces play a crucial role in regulating the environment, improving the quality of life, and contributing significantly to achieving the goals of sustainable urban development. However, the rapid pace of urbanization in recent years has led to substantial changes in land use, particularly a reduction in the area of vegetation and urban green zones. This study utilizes Sentinel-2 L2A satellite data, which offer advantages in spatial resolution and multitemporal observation capabilities. To complement information on vegetation conditions, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated. For the classification of major land-cover categories, including water bodies, vegetation, urban areas, and bare land, the Random Forest machine learning algorithm was applied. The analysis results show that urban green spaces in Thai Binh have undergone significant temporal changes, with urban expansion identified as the main factor contributing to the decline of vegetation cover. The findings provide a clear understanding of the development and degradation of urban greenery at the local level and have practical significance for management and planning. They contribute to forming sustainable urban development strategies that balance urban growth and environmental protection, applicable not only to Thai Binh but also to other cities in Vietnam.

Keywords: green areas of the city, remote sensing, satellite images, Random Forest, NDVI

Authors' contribution. *T.P. Nguyen* — conducting research, visualization, analysis of research, creation of a manuscript. *E.A. Parakhina* — concept development, text analysis, supervision. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 27.10.2025; revised 19.11.2025; accepted 02.12.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Nguyen TP, Parakhina EA. Study of urban green space changes using Sentinel-2 data in Thai Binh City, Vietnam. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(1):112–128. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-1-112-128> EDN: YECZRP

Введение

Поддержание и расширение городских зеленых насаждений в настоящее время становится серьезной проблемой в условиях стремительной урбанизации и все более серьезного воздействия изменений климата. Зеленые насаждения не только способствуют улучшению качества воздуха, снижению эффекта городского острова тепла, повышению биоразнообразия и защите общественного здоровья, но и рассматриваются как один из важнейших факторов, отражающих облик и уровень устойчивого развития каждого города. Вместе с тем расширение городской застройки, развитие сельского хозяйства и промышленности сопровождаются тенденцией сокращения естественных зеленых территорий, формируя дополнительную нагрузку на городскую среду и экосистемы [1–3].

Во Вьетнаме крупные города, такие как Ханой, Хошимин и Дананг, сталкиваются с серьезными трудностями в сохранении зеленых насаждений на фоне интенсивного социально-экономического развития. Город Тхайбинь, несмотря на принадлежность к категории средних и малых городов, также испытывает аналогичное давление. Настоящее исследование рассматривает зеленые насаждения в административных границах города Тхайбинь. Усиление процессов урбанизации и индустриализации здесь оказывает влияние на зеленые пространства, качество городской среды и здоровье населения. Несмотря на рост экологической осведомленности со стороны местных органов управления и жителей, мониторинг и управление зелеными насаждениями остаются ограниченными, в том числе из-за высокой стоимости традиционных методов наблюдений и трудностей планирования на обширных территориях [4–5].

Технологии дистанционного зондирования Земли и спутниковые данные, в частности данные с мультиспектрального прибора MSI спутника Sentinel-2, доказали свою эффективность для мониторинга и оценки состояния зеленых насаждений. Обладая преимуществами пространственного разрешения, многовременных данных и возможностями многоспектрального анализа, Sentinel-2 предоставляет детальную информацию о распределении и текущем состоянии растительного покрова, что позволяет выявлять тенденции его изменений в городской среде. При интерпретации временной динамики растительного покрова также учитываются возможные сезонные колебания вегетационных индексов. На этой основе проведено исследование в городе Тхайбинь с целью анализа динамики городских зеленых насаждений во времени, а также предоставления данных для пространственного планирования и разработки направлений устойчивого городского развития [7].

Исследование направлено на использование данных Sentinel-2 для выявления степени изменений зеленых насаждений в городе, сочетая количественные показатели и наглядные иллюстрации для уточнения тенденций транс-

формации, и предлагает рекомендации по сохранению и развитию городской зеленой инфраструктуры. Результаты исследования имеют значение не только для поддержки пространственного планирования, но и для повышения качества окружающей среды и здоровья населения в условиях глобального изменения климата.

Цель исследования — выявление и количественная оценка изменений городских зеленых насаждений в городе Тхайбинь на основе мультиспектральных спутниковых данных Sentinel-2 за период 2020–2025 гг. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- проанализировать динамику NDVI и пространственное перераспределение классов землекрытия в пределах городской территории в 2020 и 2025 гг.;
- оценить влияние процессов урбанизации на сокращение и трансформацию зеленых зон, включая выявление пространственных закономерностей утраты растительности;
- сопоставить точность двух схем классификации (Sentinel-2 и Sentinel-2 + NDVI) и определить их применимость для мониторинга зеленых насаждений в условиях быстро меняющихся городских ландшафтов.

Объект и методы исследования

Район исследования и используемые данные

Город Тхайбинь ранее являлся административным центром одноименной провинции. После принятия Резолюции № 60-NQ/TW в 2025 г. провинция Тхайбинь была объединена с провинцией Хынгйен, и в настоящее время город административно подчинен провинции Хынгйен. Тхайбинь расположен в дельте реки Хонг и занимает площадь около 67 км² (рис. 1). Его стратегическое положение обеспечивает транспортные связи с Ханоем, Хайфоном и Намдином через сеть национальных автодорог № 10, 39, а также речные пути. Рельеф территории преимущественно равнинный, с плодородными аллювиальными почвами, благоприятными для ведения сельского хозяйства. Климат тропический муссонный, что способствует выращиванию риса и овощных культур и одновременно оказывает заметное влияние на образ жизни населения. Характерной чертой экосистемы являются обширные рисовые поля, перемежающиеся с районами аквакультуры вдоль реки Чалу. Однако процессы урбанизации и изменения климата приводят к сокращению площади сельскохозяйственных угодий, создавая серьезные вызовы для устойчивого развития города¹.

¹ Official portal of Hung Yen Province. URL: <https://thaibinh.gov.vn/> (accessed: 01.05.2025).

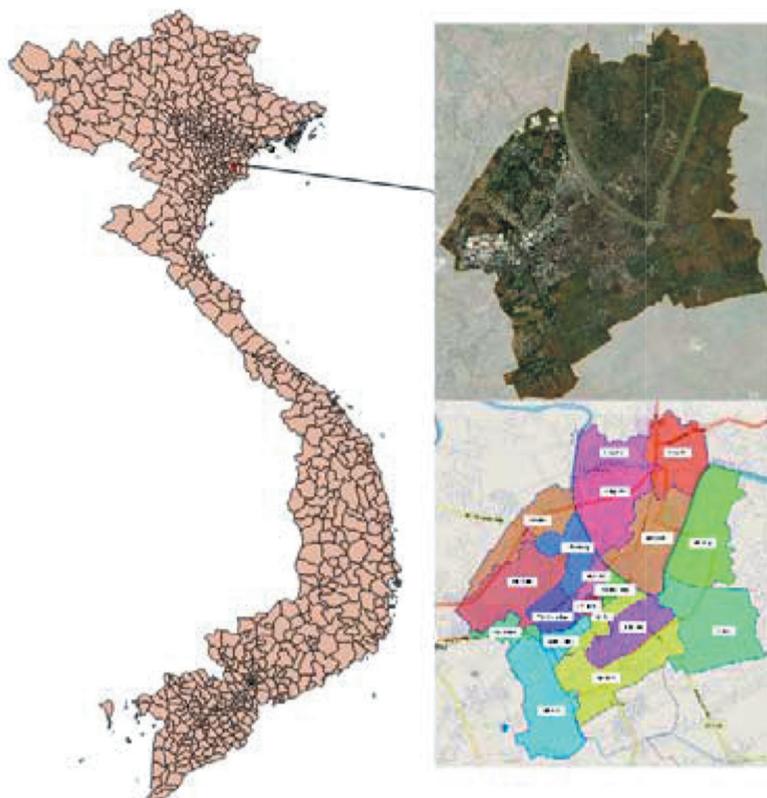


Рис. 1. Географическое положение города Тхайбинь

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном с использованием программного обеспечения QGIS.

Данные Sentinel-2 входят в состав программы Copernicus, реализуемой Европейским космическим агентством, и предоставляют спутниковые изображения высокого качества для широкого спектра исследований — от мониторинга состояния окружающей среды и сельского хозяйства до предотвращения стихийных бедствий и планирования городских территорий. Система включает два спутника: Sentinel-2A, запущенный в 2015 г., и Sentinel-2B, выведенный на орбиту в 2017 г. Оба спутника оснащены мультиспектральным прибором (MSI), который позволяет получать данные в 13 спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 10 до 60 м при площади покрытия одной территории около 290×290 км. Благодаря короткому периоду повторного облета Sentinel-2 обеспечивает практически непрерывное получение данных во времени, что делает его эффективным инструментом для мониторинга состояния и динамики окружающей среды, включая анализ землепользования, растительного покрова, водных ресурсов и городских территорий, а также играет важную роль в оценке водных ресурсов и изучении процессов урбанизации. В настоящем исследовании анализ выполнялся строго в административных границах города Тхайбинь. Граница города была получена в виде векторного слоя (shapefile) из официальных административных данных

и использовалась для обрезки (clip) спутниковых изображений Sentinel-2 на этапе предварительной обработки.

Методы исследования

Процесс анализа городских зеленых насаждений с использованием многовременных спутниковых снимков Sentinel-2 представлен на рис. 2. На первом этапе осуществляется выбор изображений, соответствующих району исследования, с обеспечением полного охвата территории и установлением временного интервала анализа по годам в зависимости от целей исследования. Для повышения качества анализа выбирались изображения с минимальной облачностью. Используемые данные были загружены и откорректированы с помощью плагинов Microsoft STAC API и Semi-Automatic Classification в программной среде QGIS, после чего выполнялась предварительная обработка, необходимая для последующих этапов анализа.

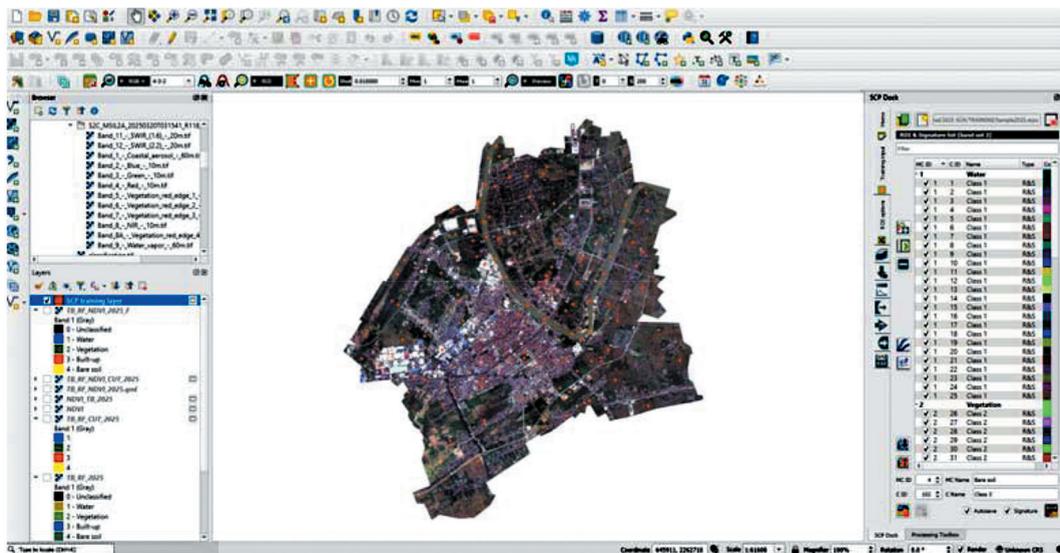


Рис. 2. Формирование обучающих точек/областей (ROIs — Regions of Interest)

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном с использованием программного обеспечения QGIS.

Схема:

Процесс создания тематических карт с использованием спутниковых снимков Sentinel-2

Начало → Выбор и проверка входных параметров: данные Sentinel-2 L2A — район исследования, период наблюдения, облачность → Предварительная обработка изображений → Расчет вегетационного индекса → Создание обучающих точек/областей (ROIs — Regions of Interest) → Выбор алгоритма классификации и проведение классификации объектов → Определение эталонной модели → Оценка точности → Завершение.

Выбор и проверка входных параметров

Для корректного анализа динамики растительного покрова были использованы спутниковые снимки Sentinel-2, отобранные за сходные сезонные периоды — 18.02.2020 и 20.03.2025. Снимки выбирались с учетом высокого качества и минимальной облачности, что обеспечивает точность последующих расчетов вегетационных индексов и процедуры классификации. Такой подход позволяет минимизировать сезонные колебания и надежность сопоставления значений NDVI, при этом выявленные различия интерпретируются как результат совокупного влияния урбанизационных процессов и природных факторов. Характеристики использованных спутниковых данных представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики данных Sentinel-2, использованных для создания тематических карт в исследуемом городе

Регион исследования	Путь зоны	Покрывтие облаками, %	Дата получения	ID сцены/продукта
Тхайбинь	T48QXH	4.92	18.02.2020	S2A_MSIL2A_20200218T032811_R018_T48QXH_20200929T182117
	T48QXH	9.1	20.03.2025	S2C_MSIL2A_20250320T031541_R118_T48QXH_20250320T090115

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном.

Методика расчета NDVI

Индекс NDVI определяется на основе различий спектрального отражения растительности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. Формула имеет вид

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4},$$

где B8 (NIR) и B4 (RED) — значения спектрального отражения в ближнем инфракрасном и красном каналах спутникового изображения соответственно (для спутников Sentinel-2 это каналы 8 и 4). [2; 6]

Значения NDVI изменяются в диапазоне от –1 до 1. Низкие значения NDVI указывают на участки с малым растительным покровом; высокие значения NDVI соответствуют территориям с густой растительностью; отрицательные значения отражают влажные почвы и водные поверхности. Индекс NDVI широко используется для оценки состояния растительности, управления водными ресурсами, классификации зеленых насаждений и мониторинга процессов урбанизации. Он предоставляет надежную информацию, необходимую для устойчивого планирования и эффективного экологического мониторинга [2; 8–10].

На основе данных Sentinel-2 и индекса NDVI была построена аналитическая модель:

- использование только каналов Sentinel-2;
- использование Sentinel-2 в сочетании с NDVI.

Обучающая выборка формировалась по району исследования и содержала четыре основных класса землекорытия: водные объекты, растительность, урбанизированные территории и открытые земли. Класс «растительность» включал плотные лесные массивы, сельскохозяйственные угодья и кустарники; класс «нерастительность» охватывал застроенные территории и открытые почвы; класс «водные объекты» включал реки, озера, пруды и акватории, что обеспечивало обучение и валидацию классификационной модели. Для оценки точности использовался независимый набор контрольных точек, не участвовавших в обучении модели, с последующим построением матриц ошибок и расчетом показателей общей и поклассовой точности.

В исследовании применялся алгоритм машинного обучения Random Forest (RF) в сочетании с методом объектно-ориентированной классификации для обеспечения высокой точности выделения классов землекорытия. На этапе сегментации использовался алгоритм SNIC, позволяющий группировать пиксели в объекты, что снижает погрешности и повышает соответствие реальной пространственной структуре [11].

Результаты классификации оценивались по показателям общей точности (ОА) и коэффициенту Каппа. Для последующего анализа был выбран наилучший вариант модели. Класс «растительность» интерпретировался как городские зеленые насаждения, остальные классы относились к другим типам объектов. На основе полученных данных были рассчитаны общая площадь и доля зеленых насаждений в разные временные периоды, что позволило выявить тенденции изменений и динамику развития городских зеленых пространств.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты предварительной обработки и индекса растительности NDVI

Данные Sentinel-2 (L2A) за 2020 и 2025 гг. (рис. 3 и 4 соответственно) были подвергнуты атмосферной коррекции, обрезке по административным границам города Тхайбинь и объединены в набор спектральных каналов для последующего анализа. На всех этапах анализа использовались только пиксели, попадающие в границы города. После этапа предварительной обработки карта поверхностного отражения выявила четкие различия между центральной частью города и пригородными районами: жилые кварталы характеризуются высоким отражением в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, тогда как зеленые массивы демонстрируют типичные значения отражения в ближнем инфракрасном канале (NIR).

На основе выбранных спектральных каналов был рассчитан индекс NDVI, отражающий степень покрытия и состояние растительного покрова. Результаты показали, что в 2020 г. значения NDVI в пределах городской территории варьировались от $-0,284341$ до $0,770541$ (рис. 3). Зеленые насаждения имели

мозаичное распределение, формируя отдельные кластеры, преимущественно вдоль речных долин и на сельскохозяйственных землях. К 2025 г. диапазон значений NDVI сократился до интервала от $-0,105477$ до $0,530818$ (рис. 4), что свидетельствует о тенденции снижения как площади, так и качества растительного покрова.

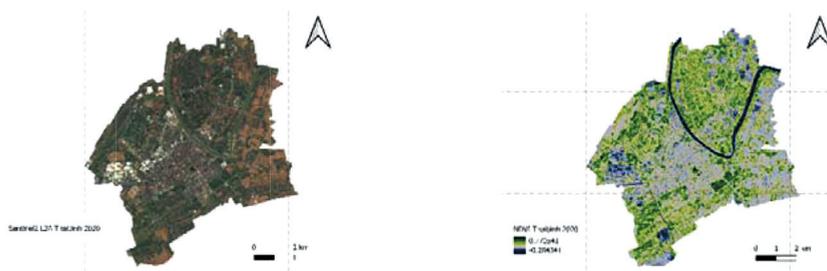


Рис. 3. Спутниковое изображение Sentinel-2 исследуемого района, полученное 18.02.2020, и рассчитанные индексы растительности.

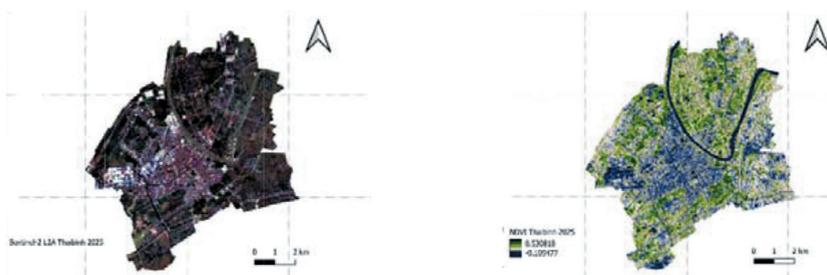


Рис. 4. Спутниковое изображение Sentinel-2 исследуемого района, полученное 20.03.2025, и рассчитанные индексы растительности.

Таблица 2. Площадь и изменения площади объектов с индексом NDVI в 2020 и 2025 гг.

Значение	2020 Площадь, га	2025 Площадь, га
NDVI < 0,4	5123,39	5592,16
NDVI > 0,4	1687,71	1218,94

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном.

Площадь с NDVI > 0,4 (условно «плотная растительность») в 2020 г. составила 1687,71 га, а к 2025 г. сократилась до 1218,94 га (табл. 2), что свидетельствует о значительном сокращении зеленых насаждений. Важно отметить, что снижение этой площади не означает исчезновение растительности, а скорее ее фрагментацию и снижение плотности, что связано с продолжающимся процессом урбанизации, строительством новых объектов инфраструктуры и развитием земель. В тропическом климате многие типы растительности, такие как газоны, деревья вдоль улиц, а также сельскохозяйственные участки, часто имеют зна-

чения NDVI в диапазоне от 0,20 до 0,38, особенно в сезоны с повышенной влажностью или при антропогенном стрессе. Следовательно, снижение площади с $NDVI > 0,4$ отражает изменения в структуре растительности и указывает не на полное исчезновение зеленых территорий, а скорее на их ослабление в плотности и площади.

Дополнительно снижение максимальных значений NDVI до 0,53 в 2025 г. полностью соответствует тенденциям для быстро урбанизирующихся территорий, что свидетельствует о снижении биомассы или повышении антропогенной нагрузки. Это подтверждается на примере центральной части города и вдоль крупных магистралей, где произошла интенсивная застройка и преобразование земель.

Пространственные изменения растительности особенно заметны в зонах с высокой урбанизацией. Снижение доли территорий с $NDVI > 0,4$ указывает на уменьшение крупных зеленых массивов, расширение смешанных зон, где растительность соседствует с застройкой, а также сокращение участков с высокой биомассой в результате строительства, развития дорожной инфраструктуры и увеличения плотности застройки.

Карта NDVI, представленная в исследовании, ясно демонстрирует процесс преобразования зеленых территорий в урбанизированные зоны и формирования новых жилых массивов. Эти изменения особенно выражены в центральной части города и вдоль ключевых транспортных коридоров, что предоставляет количественные доказательства сокращения зеленых насаждений в период с 2020 по 2025 г.

Результаты классификации с использованием алгоритма Random Forest

Для оценки точности классификации была использована независимая выборка из 100 контрольных точек, отобранных методом случайной стратифицированной выборки. В целях обеспечения сопоставимости результатов и исключения смещения между классами землепользования для каждого класса (вода, растительность, застроенные территории и открытые земли) было выбрано по 25 точек. Контрольные точки формировались на основе визуальной интерпретации спутниковых изображений Sentinel-2 высокого пространственного разрешения и вспомогательных картографических данных.

На основе полученной выборки были построены матрицы ошибок и рассчитаны стандартные показатели точности классификации, включая общую точность (Overall Accuracy, OA), коэффициент Каппа, а также метрики по отдельным классам (User's Accuracy и Producer's Accuracy (табл. 3)). Такой подход широко применяется в исследованиях по дистанционному зондированию и обеспечивает надежную и воспроизводимую оценку качества классификации.

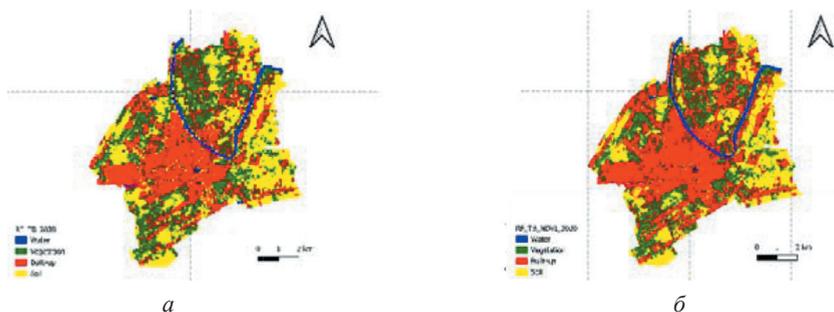


Рис. 5. Результаты объектно-ориентированной классификации по сценариям применения алгоритма RF за 2020 г.: а — только каналы Sentinel-2; б — каналы Sentinel-2 и NDVI

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном.

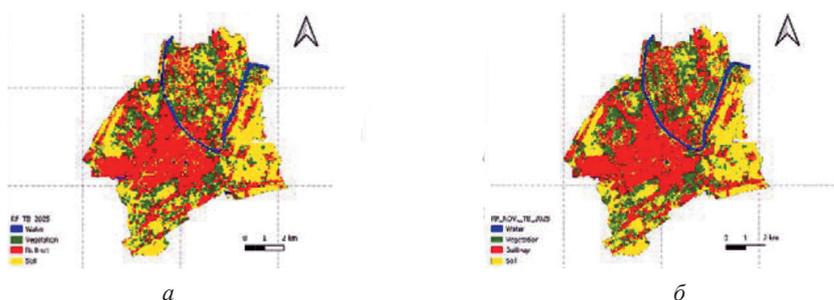


Рис. 6. Результаты объектно-ориентированной классификации по сценариям применения алгоритма RF за 2025 г.: а — только каналы Sentinel-2; б — каналы Sentinel-2 и NDVI

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном.

В сценарии классификации с использованием только спектральных каналов Sentinel-2 общая точность (Overall Accuracy, OA) составила 0,95 в 2020 г. и 0,89 в 2025 г., при коэффициенте Каппа 0,933 и 0,853 соответственно. Полученные значения свидетельствуют о высокой достоверности классификации и подтверждают пригодность данных Sentinel-2 для анализа структуры землепользования в городских условиях.

При интеграции индекса NDVI в набор входных признаков модели Random Forest наблюдается дополнительное улучшение показателей точности. В 2020 г. значение OA увеличилось с 0,95 до 0,96, а коэффициент Каппа — с 0,933 до 0,9467 (рис. 5). В 2025 г. значение OA увеличилось с 0,89 до 0,9, а коэффициент Каппа — с 0,8533 до 0,8667 (рис. 6), что указывает на более устойчивое согласие между классифицированными и эталонными данными по сравнению со сценарием без NDVI.

Улучшение метрик точности при использовании NDVI связано с повышением способности модели различать классы с близкими спектральными характеристиками, прежде всего между зелеными насаждениями, открытыми землями и застроенными территориями. Это подтверждается уменьшением числа ошибок смешения в соответствующих классах в матрицах ошибок для обоих исследуемых лет. Таким образом, интеграция индекса NDVI в набор

входных данных для Random Forest не только повышает общую точность классификации, но и обеспечивает стабильность модели на протяжении разных лет. Эти результаты являются научным доказательством того, что NDVI представляет собой ключевой показатель, который необходимо включать в исследования по мониторингу изменений городских зеленых насаждений с использованием данных дистанционного зондирования.

Таблица 3. Матрицы ошибок и показатели точности классификации (ОА и коэффициент Каппа) для различных сценариев и годов

Только каналы Sentinel-2	2020	Классификация	1	2	3	4	Итого	0.95	0.9333
		1	21	1	0	3	25		
		2	0	25	0	0	25		
		3	0	0	24	1	25		
		4	0	0	0	25	25		
	Итого	21	26	24	29	100			
	2025	Классификация	1	2	3	4	Итого	0.89	0.8533
		1	22	0	1	2	25		
		2	0	20	1	4	25		
		3	0	0	23	2	25		
4		0	1	0	24	25			
Итого	22	21	25	32	100				
Каналы Sentinel-2 и индекс NDVI	2020	Классификация	1	2	3	4	Итого	0.96	0.9467
		1	23	1	0	1	25		
		2	0	24	1	0	25		
		3	0	0	24	1	25		
		4	0	0	0	25	25		
	Итого	23	25	25	27	100			
	2025	Классификация	1	2	3	4	Итого	0.9	0.8667
		1	24	0	0	1	25		
		2	0	21	0	4	25		
		3	0	0	23	2	25		
4		1	2	0	22	25			
Итого	25	23	23	29	100				

Примечание: 1 — вода; 2 — растительность; 3 — застроенные территории; 4 — открытые земли.

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном.

Динамика площади классов землепользования

Результаты статистической оценки площадей классов землепользования, представленные в табл. 4, свидетельствуют о заметных изменениях в структуре землепользования города Тхайбинь в период 2020–2025 гг., при этом характер и направление этих изменений различаются в зависимости от используемой схемы классификации.

При использовании только спектральных каналов Sentinel-2 площадь водных объектов увеличилась с 201,24 га в 2020 г. до 229,32 га в 2025 г. (+28,08 га). В то же время при интеграции индекса NDVI наблюдается незначительное сокращение водной поверхности — с 214,80 га до 207,55 га (–7,25 га). Данное

различие обусловлено более точным разделением открытой воды и прибрежных территорий, частично покрытых водной растительностью или имеющих смешанные спектральные характеристики, что подтверждает корректирующую роль NDVI при классификации гидрологических объектов.

Таблица 4. Площадь и доля площади объектов землепокрития в 2020 и 2025 гг.

Объект	Использование каналов Sentinel-2			Использование Sentinel-2 и NDVI		
	2020, га	2025, га	Изменение	2020, га	2025, га	Изменение
Вода	201,24	229,32	+28,08	214,8	207,55	-7,25
Растительность	1940,76	1466,64	-474,12	1685,15	1557,2	-127,95
Урбанизированные территории	2421,36	2382,12	-39,24	2925,76	2477,49	-448,27
Открытые земли	2245,32	2730,6	+485,28	1985,35	2568,79	583,44

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном.

Для растительного покрова обе методики выявляют устойчивую тенденцию к сокращению площади, однако степень снижения существенно различается. В сценарии с использованием только каналов Sentinel-2 площадь растительности уменьшилась на 474,12 га (с 1940,76 га до 1466,64 га). При добавлении NDVI сокращение оказалось менее выраженным — 127,95 га (с 1685,15 га до 1557,20 га), что указывает на более взвешенную оценку состояния зеленых территорий. Это подтверждает, что при отсутствии NDVI часть разреженной растительности и сельскохозяйственных угодий может быть ошибочно отнесена к другим классам землепокрития.

Анализ урбанизированных территорий показывает разнонаправленные результаты двух сценариев. При классификации только по каналам Sentinel-2 площадь застроенных территорий незначительно сократилась (-39,24 га), в то время как при использовании Sentinel-2 совместно с NDVI зафиксировано существенное уменьшение площади урбанизированных зон — на 448,31 га. Такое расхождение объясняется более строгим отделением плотной застройки от открытых земель и переходных зон, что снижает эффект спектрального смешения и подчеркивает повышенную надежность комбинированного подхода.

Площадь открытых земель увеличилась в обоих сценариях: на 485,28 га при использовании только Sentinel-2 и на 583,44 га при применении Sentinel-2 с NDVI (рис. 7). Данный рост отражает трансформацию части сельскохозяйственных и зеленых территорий в участки с пониженной плотностью растительного покрова, а также формирование временных и переходных пространств в процессе урбанизационного развития.

Классификация Sentinel-2 + NDVI демонстрирует хорошую согласованность с результатами других исследований, посвященных динамике зеленых зон в районах с интенсивной урбанизацией как во Вьетнаме, так и в Азии в целом. В частности, исследования Le et al. в провинции Тханьхоа и Phuong et al. в прибрежных регионах также фиксируют сокращение растительности,

наиболее выраженное в пригородных зонах и вдоль основных транспортных магистралей [5; 7]. Аналогичные тенденции выявлены в работах Liyaqat et al. и Ali et al., где отмечено уменьшение растительного покрова в быстро развивающихся городах Азии [16; 17]. Полученные в Тхайбине данные подтверждают эти выводы: происходит активное преобразование сельскохозяйственных территорий и зеленых зон в участки застройки, что приводит к фрагментации растительного покрова и увеличению площади открытых земель.

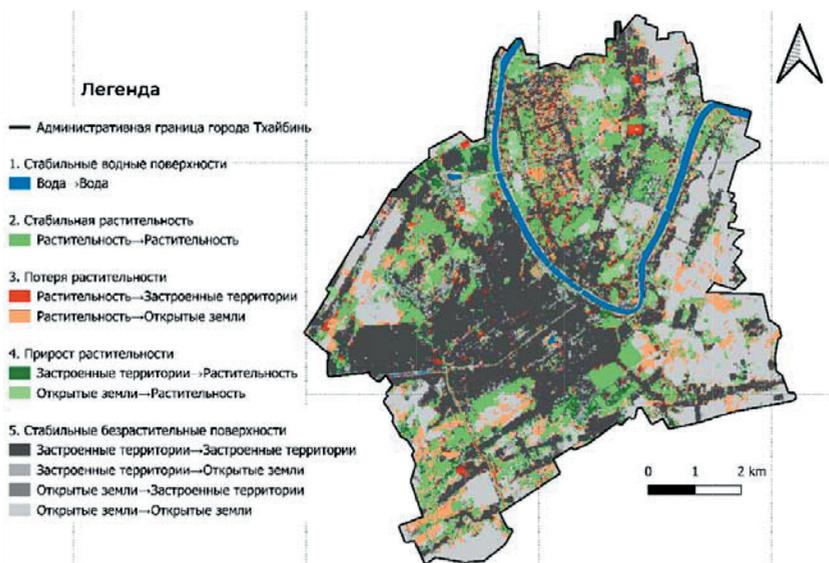


Рис. 7. Карта изменений землепользования города Тхайбинь в 2020–2025 гг., полученная на основе объектно-ориентированной классификации данных Sentinel-2 с использованием индекса NDVI и алгоритма Random Forest.

Источник: составлено Т.Ф. Нгуеном.

Пространственная структура изменений растительности в городе имеет следующие особенности:

- **пригородная зона:** ранее крупные массивы зелени становятся фрагментированными вследствие расширения жилых районов;
- **основные транспортные коридоры:** наблюдается появление продольных полос открытых земель, отражающих модернизацию дорожной инфраструктуры;
- **прибрежные и рекреационные зоны:** снижение NDVI предполагает влияние изменений гидрологического режима, преобразования землепользования или роста антропогенной нагрузки;
- **центр города:** высокая степень застройки приводит к сокращению малых и изолированных зеленых участков.

Таким образом, использование NDVI совместно с данными Sentinel-2 не только улучшает точность количественной оценки, но и позволяет более четко

выявлять пространственные закономерности деградации растительного покрова. Полученные результаты согласуются с международными исследованиями и подтверждают применимость данной методики для мониторинга динамики землепокрития в условиях ускоренной урбанизации.

Заключение

В настоящем исследовании на основе данных спутников Sentinel-2 в сочетании с объектно-ориентированным подходом и алгоритмом Random Forest был выполнен анализ изменений городских зеленых насаждений в городе Тхайбинь в период 2020–2025 гг. Для минимизации сезонного влияния были подобраны снимки, относящиеся к сопоставимым временным интервалам, что позволило повысить надежность межгодового сравнения.

Результаты оценки точности классификации показали, что при использовании только спектральных каналов Sentinel-2 общая точность (ОА) составила 95 % при коэффициенте Каппа 0,9333 в 2020 г. и 89 % при Каппа 0,8533 в 2025 г. Интеграция индекса NDVI привела к повышению и стабилизации качества классификации: значения ОА достигли 96 и 90 %, а коэффициента Каппа — 0,9467 и 0,8667 соответственно. Это подтверждает, что включение NDVI способствует более корректному разграничению классов с близкими спектральными характеристиками, прежде всего между растительностью, открытыми землями и застроенными территориями.

Анализ динамики землепокрития выявил тенденцию к сокращению площадей растительного покрова в 2020–2025 гг., сопровождающуюся увеличением площадей открытых земель и изменением конфигурации урбанизированных территорий. При этом сценарий Sentinel-2 + NDVI продемонстрировал более сдержанные и реалистичные оценки изменений. Зафиксированные изменения отражают процессы трансформации землепользования и усиливающееся антропогенное воздействие, однако полученные результаты интерпретируются с учетом возможного влияния сезонных и природных факторов.

В целом проведенное исследование обеспечивает целостное представление о пространственно-структурных изменениях городской среды Тхайбиня и подтверждает эффективность комбинированного использования данных Sentinel-2 и индекса NDVI для мониторинга динамики зеленой инфраструктуры. Полученные выводы могут служить научно обоснованной информационной основой для органов управления и специалистов в области территориального планирования при разработке стратегий сохранения зеленых насаждений и устойчивого развития города.

Список литературы

- [1] *Olivadese M., Dindo M. L.* Water, ecosystem services, and urban green spaces in the anthropocene // *Land*. 2024. Vol. 13. No. 11. Article no. 1948. <https://doi.org/10.3390/land13111948> EDN: ZBTKRO

- [2] Zhang F., Qian H. A comprehensive review of the environmental benefits of urban green spaces // *Environmental Research*. 2024. Vol. 252. Part 2. Article no. 118837. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118837> EDN: BNVEZS
- [3] Zhanwen Q., Islam M. Z. Urban equilibrium: legal imperatives for sustainable development and habitat preservation in Shenzhen, China // *Urban Ecosystems*. 2024. Vol. 27. P. 2223–2243. <https://doi.org/10.1007/s11252-024-01588-0> EDN: CKSEBB
- [4] Huong P. L., Tuan N. T. Ecosystem service value in the context of urbanization: Comparison among economic-social regions of Vietnam // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Iss. 21. Article no. e39878. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39878>.
- [5] Le K. T., Le K. B., Le V. P. Monitoring urban green space changes using multi-temporal Sentinel-2 MSI Data in Thanh Hoa Province, Vietnam // *Journal of Construction*. 2025. No. 1. P. 202–205. URL: <https://vjol.info.vn/index.php/tcxd/article/view/107316> (дата обращения: 25.09.2025).
- [6] Han H., Liu Z., Li J., Zeng Z. Challenges in remote sensing based climate and crop monitoring: navigating the complexities using AI // *Journal of Cloud Computing*. 2024. Vol. 13. Article no. 34. <https://doi.org/10.1186/s13677-023-00583-8> EDN: EQGUES
- [7] Thi Phuong To, Le Hung T., Thi Giang Le, Xuan Bien T., Van Phu Le. Assessment of land cover changes using sentinel-2 satellite image data: a case study of Thanh Hoa coastal area, Viet Nam // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1345. No. 1. Article no. 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1345/1/012026> EDN: GVTPKP
- [8] Xiong N., Yu R., Yan F., Wang J., Feng Zh. Land use and land cover changes and prediction based on multi-scenario simulation: A case study of Qishan County, China // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 16. P. 4041. <https://doi.org/10.3390/rs14164041> EDN: HSRRMW
- [9] Norovsuren B., Tseveen B., Batomunkuev V., Renchin T., Natsagdorj E., Yangiv A., Mart Z. Land cover classification using maximum likelihood method (2000 and 2019) at Khandgait valley in Mongolia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 381. P. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012054>.
- [10] Chaikaew P. Land use change monitoring and modelling using GIS and remote sensing data for watershed scale in Thailand // *Land Use — Assessing the Past, Envisioning the Future* / L. C. Loures (Ed.). London : IntechOpen, 2019. P. 165–181. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79167>.
- [11] Ismayilova I., Timpf S. Classifying Urban Green Spaces using a combined Sentinel-2 and Random Forest approach // *AGILE: GIScience Series*. 2022. Vol. 3. P. 38. <https://doi.org/10.5194/agile-giss-3-38-2022>
- [12] Pham V. D., Hoang V. K., Nguyen V. T. Mapping of green space distribution with random forest algorithm (RF) on the Google Earth Engine cloud platform: case study in Ba Vi district, Hanoi City // *Vietnam National University of Forestry*. 2022. No. 6. P. 58–67. <https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.2022.6.058-067>.
- [13] Manika N., Dhyan S. Rampant urbanization, loss of green spaces, depleting foraging wisdom for nutrition, health, and protecting urban green spaces: lessons from populous Uttar Pradesh, India // *Urban Foraging in the Changing World* / S. Dhyan, M. Sardeshpande (eds.). Singapore : Springer. P. 79–102. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0345-6_6
- [14] Sadler J., Bates A., Hale J., James P. Bringing cities alive: the importance of urban green spaces for people and biodiversity // *Urban Ecology* / K.J. Gaston (ed.). Cambridge : Cambridge University Press, 2010. P. 230–260. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778483.011>

- [15] Wang J., Zhou W., Wang J., Qian Y. From quantity to quality: enhanced understanding of the changes in urban greenspace // *Landscape Ecology*. 2019. Vol. 34. P. 1145–1160. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00828-5>
- [16] Liyaqat S., Dasti M.Y.S., Hussain E., Mumtaz F., Kucher D.E., Tariq A. Urban heat island dynamics in Rawalpindi: a 30-year remote sensing analysis and future projections // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article no. 32760. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13844-0> EDN: SQXVXG
- [17] Ali M.A., Jamal S., Ahmad W.S., Rafi S., Kucher D.E. Integrating earth observation and CA-ANN modelling to predict LULC dynamics in wetland ecosystem under urban pressure // *GeoJournal*. 2025. Vol. 90. Article no. 236. <https://doi.org/10.1007/s10708-025-11482-7> EDN: MVCAJB

Сведения об авторах:

Неуен Тхань Фонг — аспирант, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0009-0005-7371-173X. E-mail: thanhphong.dhtt@gmail.com.

Парахина Елена Александровна — кандидат биологических наук, доцент департамента рационального природопользования, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-2865-0780. E-mail: parakhina-ea@rudn.ru.