



Мониторинг изменений зеленых зон на основе многовременных данных спутника Sentinel-2 в городе Тхайнгуен, Вьетнам

Тхань Фонг Нгуен^{1✉}, Елена Александровна Парахина²

^{1, 2} Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия

^{1✉} thanhphong.dhtt@gmail.com

² parakhina-ea@rudn.ru

Аннотация. Городские зеленые зоны играют важную роль в улучшении городской среды, повышении качества жизни населения, и вносят значительный вклад в устойчивое развитие. Однако стремительная урбанизация привела к существенным изменениям в землепользовании, особенно к сокращению площадей зеленых насаждений в городах. Настоящее исследование использует спутниковые изображения Sentinel-2 и алгоритмы обработки данных для мониторинга и анализа изменений в зеленых пространствах города Тхайнгуен, Вьетнам. Наиболее точные результаты классификации были использованы для повторной классификации территории на две группы: городские зеленые зоны (зеленые насаждения) и прочие объекты (нерастительные объекты и водная поверхность). Сегментация осуществлялась с помощью программного обеспечения QGIS, MapInfo, eCognition и алгоритмов коррекции объектов. Анализ выявил значительные изменения в структуре городских зеленых зон во времени, что подчеркивает влияние расширения городской застройки на распределение зеленых насаждений. Полученные данные отражают как процессы развития, так и деградации зеленых насаждений в пределах города. Результаты исследования могут быть использованы городскими планировщиками и органами власти для разработки стратегий устойчивого развития, направленных на поддержание баланса между урбанизацией и охраной окружающей среды в Тхайнгуене и аналогичных городских районах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, Sentinel-2, городские зеленые зоны, NDVI, устойчивое развитие, Вьетнам

Для цитирования: Нгуен Т. Ф., Парахина Е. А. Мониторинг изменений зеленых зон на основе многовременных данных спутника Sentinel-2 в городе Тхайнгуен, Вьетнам // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2025. Вып. 4. С. 434–444. <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-434-444>.

ECOLOGY

Original article

Monitoring of green zone changes based on multitemporal Sentinel-2 satellite data in the city of Thai Nguyen, Vietnam

Thanh Phong Nguyen^{1✉}, Elena A. Parakhina²

^{1, 2} Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

^{1✉} thanhphong.dhtt@gmail.com

² parakhina-ea@rudn.ru

Abstract. Urban green spaces play an important role in improving the urban environment, enhancing the quality of life for residents, and contributing significantly to sustainable development. However, rapid urbanization has led to substantial changes in land use, particularly the reduction of green areas in cities. This study utilizes Sentinel-2 satellite imagery and data processing algorithms to monitor and analyze changes in green spaces in the city of Thai Nguyen, Vietnam. The most accurate classification results were used to reclassify the area into two groups: urban green zones (vegetation) and other objects (non-vegetative areas and water bodies). Segmentation was carried out using QGIS, MapInfo, eCognition software, and object-based correction algorithms. The analysis revealed significant changes in the structure of urban green spaces over time, highlighting the impact of urban expansion on the distribution of vegetation. The data obtained reflect both the development and degradation processes of green spaces within the city. The research results can be used by urban planners and local authorities to develop sustainable development strategies aimed at maintaining a balance between urbanization and environmental protection in Thai Nguyen and similar urban areas.

Keywords: remote sensing, Sentinel-2, urban green spaces, NDVI, sustainable development, Vietnam

For citation: Thanh Phong N., Parakhina E. A. [Monitoring of green zone changes based on multitemporal Sentinel-2 satellite data in the city of Thai Nguyen, Vietnam]. *Bulletin of the Perm University. Biology*. Iss. 4 (2025): pp. 434-444. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17072/1994-9952-2025-4-434-444>.

Введение

Охрана и развитие городских зеленых зон представляет собой важную задачу в условиях стремительного урбанизационного роста и влияния изменения климата. Зеленые насаждения не только способствуют улучшению качества урбанизированной среды и снижению эффекта городского теплового острова, но и повышают биологическое разнообразие, оказывая положительное влияние на здоровье населения [Grimm et al., 2008; Прохоренко, Демина, Мингазова, 2017; Бессмольная и др., 2023; Парахина, Риттер, 2024; Manika, Dhyani, 2024].

Во Вьетнаме такие города, как Ханой, Хошимин, Дананг и Тхайнгуен, сталкиваются с растущим давлением в части сохранения зеленых зон в условиях интенсивного роста городской инфраструктуры. В частности, в г. Тхайнгуен урбанизация увеличивает нагрузку на зеленые территории, ухудшая экологическую обстановку и оказывая влияние на здоровье общества.

Несмотря на повышающееся экологическое сознание населения и органов управления в Тхайнгуене, возможности мониторинга городских зеленых насаждений остаются ограниченными из-за высоких затрат и сложности охвата больших территорий. Технологии дистанционного зондирования и спутниковые данные, особенно Sentinel-2, предоставляют эффективное решение благодаря многовременной съемке с высоким пространственным разрешением, что позволяет отслеживать изменения городских зеленых зон в динамике.

Многоспектральный инструмент (MSI) спутника Sentinel-2 предоставляет информацию о площади и состоянии растительного покрова, позволяя выявлять тенденции и изменения во времени. Цель настоящего исследования – применить данную технологию для анализа изменений площади и качества зеленых зон г. Тхайнгуен, а также предоставить данные для устойчивого городского планирования.

Настоящая статья фокусируется на использовании данных Sentinel-2 MSI для оценки изменений в структуре зеленых зон Тхайнгуена, выявлении тенденций развития и деградации, а также на формулировании рекомендаций по сохранению и устойчивому развитию городской зеленой инфраструктуры. Исследование направлено на поддержку градостроительной политики, улучшение качества окружающей среды и здоровья населения в условиях урбанизации.

Город Тхайнгуен – административный, экономический и культурный центр одноименной провинции, расположен в северо-восточном среднегорном и горном регионе Вьетнама, примерно в 75 км к северу от столицы Ханой по трассе № 3 (рис. 1). Географические координаты города находятся в диапазоне от 21°25' до 21°45' северной широты и от 105°45' до 106°00' восточной долготы. Город граничит:

- на севере – с провинцией Баккан,
- на западе – с провинциями Виньфук и Туенкуанг,
- на востоке – с провинциями Лангшон и Бакзянг,
- на юге – с провинциями Футхо и Ханой.

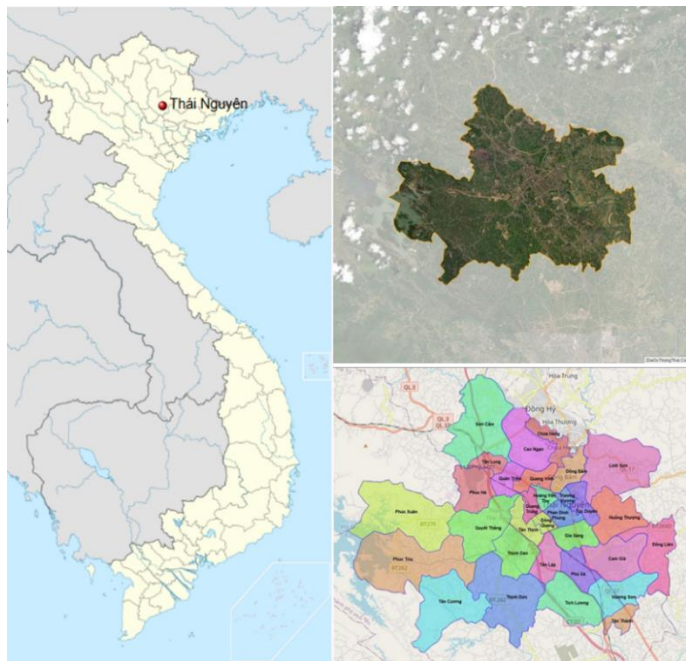


Рис. 1. Географическое положение г. Тхайнгуен [Thai Nguyen Province]
[Geographical location of Thai Nguyen]

Благодаря своему географическому положению Тхайнгуен играет роль моста между дельтой Красной реки и северными горными провинциями, одновременно выступая как важный промышленный и образо-

вательный центр северо-восточного региона. Как индустриальный и академический центр Тхайнгуен сталкивается с необходимостью развивать зеленую инфраструктуру и обеспечивать наличие городских зеленых зон с целью снижения загрязнения окружающей среды и повышения качества жизни населения.

По состоянию на 2023 г. численность населения провинции Тхайнгуен составляла около 1.3 млн человек, из них около 350 тыс. проживают в г. Тхайнгуен. Средняя плотность населения в городской зоне составляет около 1 500 человек на км².

Город Тхайнгуен характеризуется тропическим муссонным климатом (табл. 1). Среднегодовая температура колеблется от 23 до 25°C. Лето жаркое и влажное, температура может достигать 35°C, а зима прохладная, с минимальными температурами около 10°C. Среднегодовое количество осадков составляет от 2 000 до 2 500 мм, основная часть которых выпадает в сезон дождей – с мая по октябрь. Продолжительность солнечного сияния составляет от 1 300 до 1 750 часов в год, что создает благоприятные условия для сельского хозяйства, особенно для выращивания чая и плодовых культур.

Таблица 1

Климат г. Тхайнгуен [Thai Nguyen Province]
[Climate in the city of Thai Nguyen]

Показатель	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.	Год
Абсолютный максимум, °C	31.1	40.7	35.7	37.7	39.4	39.5	38.8	38.4	37.4	34.9	34.0	30.6	40.7
Средний суточный максимум, °C	19.7	20.2	22.8	27.0	31.3	32.6	32.8	32.4	31.7	29.1	25.6	22.2	27.3
Средняя температура, °C	16.0	17.0	19.8	23.6	27.1	28.4	28.6	28.1	27.1	24.5	20.9	17.6	23.2
Средний суточный минимум, °C	13.6	14.9	17.8	21.3	24.0	25.4	25.5	25.2	24.1	21.3	17.6	14.6	20.4
Абсолютный минимум, °C	3.0	1.3	6.1	12.6	16.4	19.7	20.5	21.7	16.3	10.2	7.2	3.2	1.3
Среднее число солнечных часов в месяц	69	46	46	80	170	164	189	184	192	174	147	125	1585
Среднее число дней с осадками	10.4	12.4	17.8	17.5	15.3	17.0	17.7	18.1	13.5	10.7	7.3	5.7	163.5
Норма осадков, мм	25	35	62	121	232	338	410	347	237	146	49	24	2025
Средняя влажность, %	79.7	81.3	85.1	85.8	82	82.8	83.6	85.1	82.5	80.1	77.7	76.9	81.9

Методы исследования

Процесс пространственного анализа городских зеленых насаждений с использованием многовременных изображений Sentinel-2 представлен на рис. 2. Прежде всего отбираются спутниковые снимки, соответствующие району исследования, обеспечивая полное пространственное покрытие и устанавливая временные рамки анализа – сезонные или годовые, в зависимости от целей исследования. Для исключения чрезмерных атмосферных искажений устанавливается порог облачного покрытия, что позволяет повысить качество данных (табл. 2).

Таблица 2

Информация о спутниковых изображениях
[Information about satellite images]

Регион исследования	Путь зоны	Покрывтие облаками, %	Дата получения	ID сцены/продукта
Тхайнгуен	T48QWJ	1.91	27.04.2020	S2A_MSIL2A_20200428T032541_R018_T48QWJ_20200922T095403
Тхайнгуен	T48QWJ	0.08	28.04.2024	S2A_MSIL2A_20240427T032521_R018_T48QWJ_20240427T101549

После отбора изображения Sentinel-2 проходят этапы предварительной обработки, включая фильтрацию облачности, атмосферную коррекцию для нормализации значений отражательной способности, а также повторную дискретизацию спектральных каналов до единого пространственного разрешения.

Причина выбора изображений 2020 и 2024 гг. Для оценки изменений зеленых насаждений на протяжении временного периода были выбраны спутниковые снимки 2020 и 2024 гг., т. к. эти годы отражают важные фазы изменений в развитии городских зеленых зон, что обусловлено активной урбанизацией и изменениями в землепользовании в исследуемом регионе. Выбор этих лет также был продиктован доступностью высококачественных данных и минимальным облачным покрытием, что обеспечило точность и надежность анализа. Сравнение с более ранними изображениями было ограничено из-за недостаточной точности или плохого качества доступных снимков. Кроме того, изображения 2020 и 2024 гг. дают возможность оценить изменения на уровне растительности и преобразования растительного покрова за последние несколько лет, что критично для дальнейшего планирования устойчивого развития.

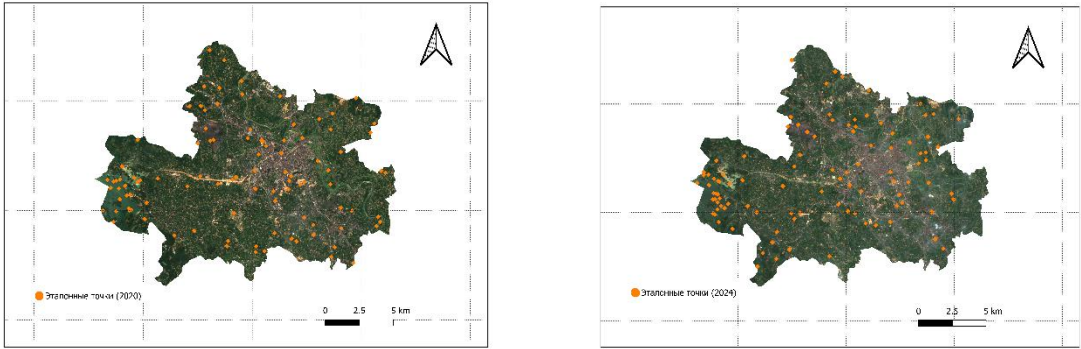


Рис. 2. Сравнение случайных контрольных точек (100 образцов) на карте NDVI и спутниковых изображениях Sentinel-2, Google Earth и Forest Height 2020, полученных в один и тот же период времени

[Comparison of random control points (100 samples) on the NDVI map and Sentinel-2, Google Earth and Forest Height 2020 satellite images obtained during the same time period]

Данный процесс обеспечивает согласованность и точность данных, создавая надежную основу для пространственного анализа. Используемые в исследовании данные доступны на платформе Microsoft STAC API, где уже была проведена предварительная обработка, необходимая для последующего анализа. Расчет NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный индекс растительного покрова) осуществляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}.$$

где: NIR – ближний инфракрасный канал (Near Infrared); Red – красный спектральный канал [Afirah, Sharifah, Asmala, 2017; Климанова, Колбовский, Илларионова, 2020; Ismayilova, Timpf, 2022; Trinh et al., 2024].

Значения NDVI варьируются в диапазоне от -1 до +1. Согласно классификации, предложенной Т. Afirah и соавт. [Afirah, Sharifah, Asmala, 2017], текущее состояние растительного покрова делится на четыре категории (табл. 3).

Таблица 3

Классификация растительного покрова на основе значений NDVI
[Land cover classification based on NDVI values]

Значение NDVI	Категория
$-1 \leq NDVI < 0$	Отсутствие растительности
$0 \leq NDVI < 0.2$	Низкая степень покрытия
$0.2 \leq NDVI < 0.6$	Средняя степень покрытия
$0.6 \leq NDVI < 1$	Высокая степень покрытия

Индекс NDVI является основным инструментом для оценки состояния растительности и ее динамики в рамках данного исследования. Высокие значения NDVI соответствуют зонам с густым растительным покровом, таким как леса, парки и экологические зоны, в то время как низкие значения указывают на наличие застроенных территорий, пустырей или открытых земель. В исследовании использованы определенные пороговые значения NDVI, которые были адаптированы с учетом особенностей района Тхайнгуена за 2020 и 2024 гг. Эти пороги были установлены на основе данных Sentinel-2, а также проверены с использованием изображений Google Earth и данных Forest Height, что позволило более точно соотнести значения NDVI

с реальными изменениями на местности [Potapov et al., 2022; Zanaga et al. 2022].

Вместо использования нескольких аналитических индексов, исследование сосредоточено на применении единой классификации NDVI, основанной на выбранных пороговых значениях, что позволяет достичь высокой точности в анализе растительного покрова и изменений землепользования. Данный индекс использует актуальные данные и является надежным для мониторинга изменений зеленых зон, учитывая факторы урбанизации и изменения в землепользовании в Тхайнгуене в период с 2020 по 2024 гг.

Обучающая выборка формировалась из исследуемой территории и включала 3 основных класса покрытия: растительность, нерастительные объекты и водные поверхности. Класс “растительность” охватывает как густые насаждения, так и кустарники; нерастительные объекты включают застроенные зоны и открытые земли; водные объекты охватывают реки, озера и водно-болотные угодья. Эти данные использовались для обучения и валидации индексов классификации.

Результаты классификации по каждому из трех индексов оценивались по общему коэффициенту точности (Overall Accuracy). Лучший индекс был выбран для дальнейшего анализа, при этом класс “растительность” интерпретировался как зеленое городское пространство, а остальные классы — как прочие объекты.

Индекс Каппа используется для оценки точности карт NDVI, построенных в рамках данного исследования. Для каждой карты NDVI за 2020 и 2024 гг. было случайным образом выбрано 100 контрольных точек (рис. 2, визуальная интерпретация), охватывающих все классы NDVI: высокая растительность (3), средняя (2), низкая (1) и отсутствие растительности (0). Каждая точка была сопоставлена с фактическим классом, определенным визуально на спутниковых изображениях Google Earth и Forest Height, полученных в тот же период времени. После сопоставления была построена матрица ошибок (confusion matrix), отражающая точность классификации NDVI, включающих 3 элемента: рассчитанное значение NDVI, наблюдаемое значение NDVI и значение коэффициента Каппа. Значения коэффициента Каппа варьируются от 0 до 1, где 1 соответствует полной точности (100%). При значении Каппа > 0.75 модель считается высокоточной и хорошо отражающей реальность [Xiong et al., 2022].

Индекс Каппа рассчитывается по следующей формуле:

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}.$$

или:

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=j=1}^r x_{ij} - \sum_{i=j=1}^r (x_{i \cdot} \cdot x_{\cdot j})}{N^2 - \sum_{i=j=1}^r (x_{i \cdot} \cdot x_{\cdot j})} \quad (\text{табл. 4}),$$

где: P_o – наблюдаемая согласованность (*Observed agreement*) – доля совпадений между классификацией и проверкой; P_e – ожидаемая согласованность (*Expected agreement*) – вероятность совпадения между двумя источниками классификации случайным образом.

Таблица 4

Расшифровки обозначений
[Interpretation of the symbols]

Обозначение	Значение
κ	Значение индекса Каппа (от 0 до 1)
N	Общее количество контрольных точек (количество выборок)
r	Количество классов классификации (в данном случае 4 класса NDVI)
x_{ij}	Количество точек, правильно классифицированных в класс ij (значения главной диагонали матрицы ошибок)
x_i	Общее количество точек, наблюдаемых в классе i (сумма по строке i)
x_j	Общее количество точек, классифицированных в класс j (сумма по столбцу j)
$\sum_{i=j=1}^r x_{ij}$	Общее количество правильно классифицированных точек (сумма главной диагонали)
$\sum_{i=j=1}^r (x_{i \cdot} \cdot x_{\cdot j})$	Ожидаемая согласованность ($P_e \cdot N^2$)

Точность классификации зависит не только от качества спутниковых изображений, но и от специфики исследуемой территории, а также от правильного выбора объектов для обучения индекса интерпретации. Автоматическая классификация может привести к ошибкам, особенно при путанице между схожими типами покрытий, например, сельскохозяйственные земли без растительности могут быть ошибочно отнесены к разреженным лесам или застроенным территориям без зеленого покрова.

Тем не менее, карты NDVI за 2020 и 2024 гг. продемонстрировали удовлетворительную точность классификации (табл. 5) с коэффициентами Каппа, равными 0.84 и 0.86667 соответственно, а также общей точностью классификации 88% и 90% соответственно. Эти результаты подтверждают высокую точность проведенной классификации, которая отражает реальные изменения растительного покрова в период с 2020 по 2024 гг.

Таблица 5

Матрица ошибок интерпретации за 2020 и 2024 гг.
[Interpretation Error Matrix for 2020 and 2024]

Год	Классификация	0	1	2	3	Итого	Точность	Каппа
2020	0	25	0	0	0	25	0.88	0.84
	1	2	22	1	0	25		
	2	0	5	20	0	25		
	3	0	0	4	21	25		
	Итого	27	27	25	21	100		
2024	0	23	2	0	0	25	0.9	0.86667
	1	2	23	0	0	25		
	2	0	2	23	0	25		
	3	1	0	3	21	25		
	Итого	26	27	26	21	100		

Сравнение с ранее опубликованными исследованиями, например, работой Norovsuren и соавт. [Norovsuren et al., 2019], где точность классификации карт землепользования (LULC) достигала 86.5% и 89%, показывает, что результаты данного исследования сопоставимы, несмотря на некоторые различия в методах классификации и используемых данных. Таким образом, построенные карты NDVI в настоящем исследовании являются надежным инструментом для анализа изменений зеленых пространств в динамике.

Результаты и их обсуждение

В исследовании использовались спутниковые изображения Sentinel-2, полученные в разные временные периоды. Изображения отбирались с учетом высокого качества данных, минимального облачного покрытия и соответствия сезонности вегетационного цикла растений, что обеспечивало высокую точность расчета вегетационного индекса NDVI. На основе спектральных каналов этих снимков был рассчитан индекс растительности NDVI.

Результаты классификации NDVI и пространственного анализа зеленых зон за 2020 и 2024 гг. демонстрируют значительные изменения в степени покрытия на территории г. Тхайнгуен. Диапазон значений NDVI в 2020 г. составил от -0.529223 до 0.888698, а в 2024 – от -0.215541 до 0.634081. На основе порогов, представленных на рис. 3, значения NDVI были классифицированы следующим образом: 0 – отсутствие растительности, 1 – низкая степень покрытия, 2 – средняя степень покрытия, 3 – высокая степень покрытия (рис. 4).

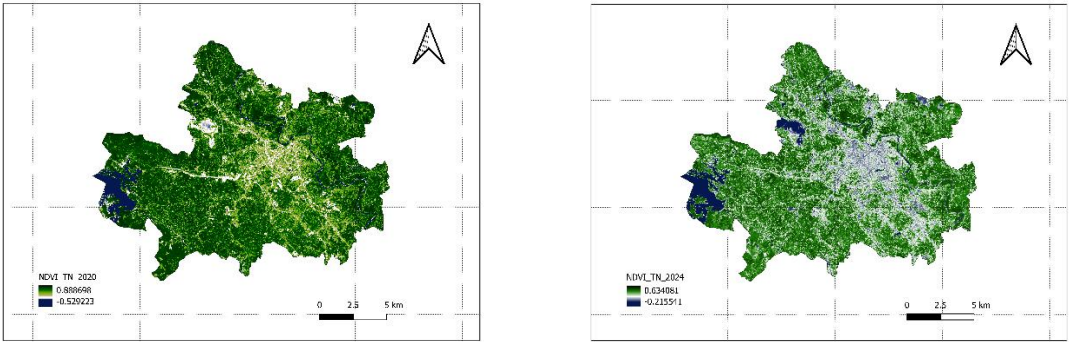


Рис.3. Значения NDVI г. Тхайнгуен по годам
[NDVI values of Thai Nguyen city by year]

Области без растительности обычно соответствуют водным объектам или полностью застроенным территориям. Характерным примером является северо-запад города, где активно ведется добыча угля, что препятствует развитию растительности или делает его крайне слабым. Участки с низким уровнем

покрытия (класс 1) соответствуют жилым зонам, пастбищам, кустарникам и спортивным площадкам. Участки со средней степенью покрытия (класс 2) охватывают сельскохозяйственные земли, сады, цветники и зеленые коридоры в городском ландшафте (табл. 6, рис. 5).. Зоны с высокой степенью покрытия (класс 3) включают леса, природоохранные территории и крупные городские парки.

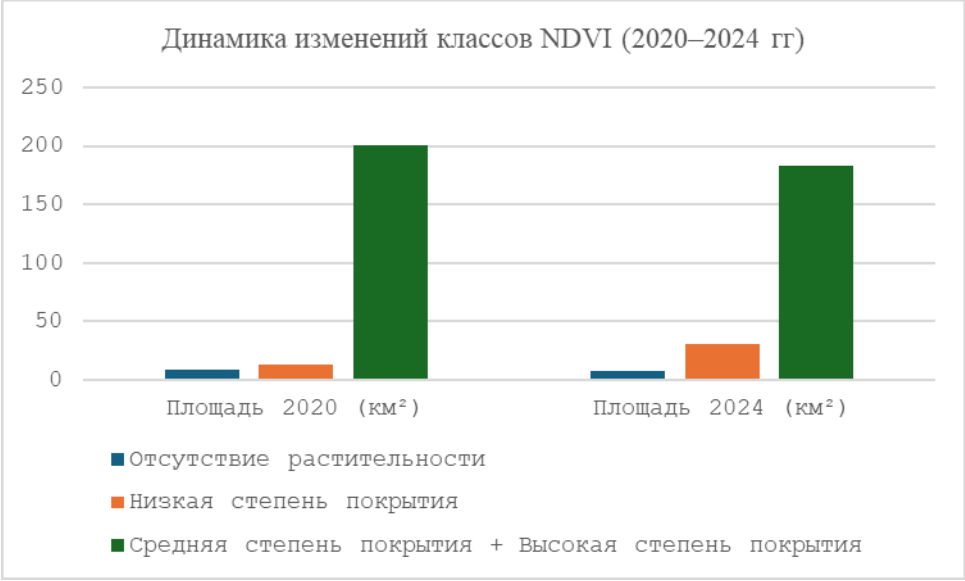


Рис.4. Диаграмма изменений классификаций покрова по уровням NDVI во временной динамике
[Diagram of changes in land cover classifications by NDVI levels over time]

Таблица 6

Площади NDVI-классов (км²) [Areas of NDVI classes (km²)]					
Класс NDVI	Описание покрытия	Площадь 2020 (км²)	Площадь 2024 (км²)	Изменение (км²)	Изменение (%)
0	Отсутствие растительности	8.5849	8.2573	-0.3276	-3.82
1	Низкая степень покрытия	13.5425	31.1282	17.5857	129.86
2	Средняя и Высокая степень покрытия	200.4113	183.1532	-17.2581	-8.61
Итого		222.5387	222.5387	0	0

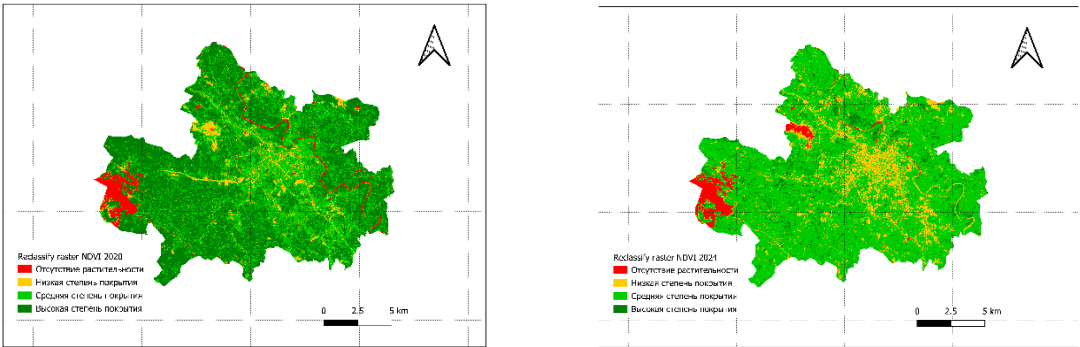


Рис.5. Пространственное распределение плотности растительности
[Spatial distribution of vegetation density]

Анализ пространственного распределения растительности на основе индекса NDVI за 2020 и 2024 гг. выявил следующие изменения в степени покрытия на территории г. Тхайнгуен. Результаты показывают

значительные изменения в структуре растительного покрова, которые можно детализировать следующим образом:

- Отсутствие растительности (класс 0). Площадь участков без растительности в 2020 г. составила 8.5849 км², а в 2024 г. – 8.2573 км², что соответствует уменьшению на 3.82%. Это может свидетельствовать о небольшом снижении площади территорий, лишенных растительности, таких как полностью застроенные участки и водоемы. Однако такие изменения могут быть связаны с природными и человеческими факторами. Например, несмотря на стабилизацию общего числа земель без растительности, в отдельных районах городского развития может наблюдаться увеличение застроенных территорий или преобразования земель в объекты инфраструктуры. В то же время на некоторых территориях может происходить восстановление растительности, что также влияет на эти показатели.
- Низкая степень покрытия (класс 1). Площадь участков с низким уровнем растительности увеличилась с 13.5425 км² в 2020 г. до 31.1282 км² в 2024 г., что представляет собой значительное увеличение – на 129.86%. Это увеличение отражает активную урбанизацию и изменения в землепользовании. В частности, увеличение площади данной категории связано с расширением жилых и коммерческих зон, а также увеличением площадей сельскохозяйственных угодий и пустырей, которые ранее могли быть зелеными территориями. Расширение городской застройки и развитие инфраструктуры, вероятно, являются главными факторами этого процесса. Кроме того, увеличение площади с низким уровнем растительности может указывать на преобразование природных и полуприродных территорий в урбанизированные или сельскохозяйственные зоны с меньшим растительным покрытием.
- Средняя и высокая степень покрытия (классы 2 и 3). Площадь этих классов была объединена в одну категорию для упрощения анализа, поскольку на исследуемой территории наблюдаются схожие тенденции в изменениях этих типов покрытия. В 2020 г. суммарная площадь классов 2 и 3 составила 200.4113 км², а в 2024 г. – 183.1532 км², что означает сокращение на 8.61%. Такое снижение площади растительности связано с процессами урбанизации и возможным расширением сельскохозяйственных угодий, что приводит к частичной утрате природного растительного покрова. Снижение площади с высокой степенью растительного покрова связано с интенсивной урбанизацией и расширением инфраструктуры, что может свидетельствовать о деградации экосистем, включая вырубку лесов и изменение природных экосистем в ответ на климатические изменения. Такие изменения в структуре растительности требуют особого внимания, поскольку они могут повлиять на биоразнообразие, качество воздуха и воды, а также на создание природных коридоров для фауны.

Результаты классификации на основе данных NDVI за 2020 и 2024 гг. позволяют заключить, что на территории г. Тхайнгуен наблюдается заметная динамика изменений растительности в контексте расширения урбанизированных территорий и сельскохозяйственных угодий, что непосредственно влияет на структуру растительного покрова. Применение индекса NDVI обеспечило точную и своевременную оценку этих изменений, позволяя выявить ключевые тенденции в развитии зеленых зон города.

Заключение

Настоящее исследование представляет собой одно из первых комплексных исследований изменений зеленых зон в г. Тхайнгуен (Вьетнам) с использованием многовременных спутниковых изображений Sentinel-2 L2A и индекса NDVI для оценки динамики растительного покрова в период с 2020 по 2024 гг. В работе использованы атмосферно скорректированные данные Sentinel-2 L2A, что позволяет обеспечить высокую точность отражающих свойств поверхности. Индекс NDVI был рассчитан для двух отдельных временных точек, а затем классифицирован на четыре уровня: отсутствие растительности (класс 0), низкая степень покрытия (класс 1), средняя степень покрытия (класс 2) и высокая степень покрытия (класс 3). После этого были проведены пространственные анализы и оценка точности классификации с использованием матрицы ошибок и коэффициента Каппа ($\kappa \approx 0.84$ и 0.86667), что подтверждает стабильность и высокую надежность интерпретации данных.

Результаты анализа изменений растительного покрова показывают, что общая площадь зеленых зон в городе практически не изменилась за период с 2020 по 2024 гг., однако произошли значительные изменения в структуре их распределения. Особенно заметно увеличение площади с низким уровнем покрытия растительностью, что связано с расширением урбанизированных территорий и активным развитием сельскохозяйственных земель. Эти изменения свидетельствуют о процессе деградации зеленых территорий, вызванного интенсивной урбанизацией и утратой природных экосистем в условиях роста города. Преобразования в распределении растительности требуют особого внимания, так как они могут свидетельствовать о потерях экосистемных услуг, таких как поддержание биоразнообразия, улучшение качества воздуха и воды, а также создание природных коридоров для фауны.

Результаты исследования подчеркивают важность интеграции анализа NDVI с использованием многовременных спутниковых данных для мониторинга динамики зеленых инфраструктур на городских территориях. Такой подход позволяет надежно отслеживать пространственно-временные изменения и в дальнейшем использовать эти данные для выработки рекомендаций по устойчивому градостроительному планированию и сохранению экосистемных функций.

Для повышения эффективности управления зелеными зонами в условиях интенсивной урбанизации в качестве приоритетных направлений можно выделить следующие меры.

- Интеграция мониторинга зеленых зон в процессы территориального планирования с использованием вегетационных индексов для оценки состояния и эффективности озеленения.
- Создание и правовая защита зеленых коридоров, соединяющих природные и полустественные экосистемы в городской среде, что поможет сохранить биоразнообразие и улучшить экологическое качество городской среды.
- Внедрение принципов «зеленой архитектуры» и устойчивого урбанизма с акцентом на вертикальное озеленение и озеленение крыш, что позволит увеличить долю зеленых территорий в городах.
- Общественное участие в управлении зелеными территориями, включая создание цифровых платформ для мониторинга состояния зеленых зон и активное участие местных жителей в инициативах по озеленению.
- Разработка локальных нормативов по минимальным стандартам зеленого покрытия на душу населения, что обеспечит равномерное распределение зеленых зон и улучшение качества жизни горожан.

Реализация этих мер позволит не только повысить экологическую устойчивость городской среды, но и улучшить качество жизни населения, способствуя достижению целей Повестки дня ООН по устойчивому развитию (SDG 11: Устойчивые города и населенные пункты). Более того, такие подходы помогут создать сбалансированную экологическую инфраструктуру, содействующую долгосрочной устойчивости городов в условиях изменения климата и роста населения. Таким образом, результаты исследования подчеркивают важность применения спутниковых технологий для мониторинга изменений в городской среде и планирования устойчивых решений для будущих поколений.

Список источников

1. Бессмольная М.Я. и др. Озеленение как фактор устойчивого развития городской среды. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 291 с. DOI: 10.23682/124290. EDN: FAWZUD.
2. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Зеленая инфраструктура города: оценка состояния и проектирование развития. М.: КМК, 2020. 324 с. EDN: PBPUTV.
3. Парахина Е.А., Риттер А.С. Динамика ландшафтов города Воронежа // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16, № 1. С. 1–12. URL: <https://esj.today/PDF/79NZVN124.pdf>.
4. Прохоренко Н.Б., Демина Г.В., Мингазова Д.Н. Оценка жизненного состояния деревьев в урбанизированных условиях Казани // Известия Самарского научного центра РАН, 2017. Т. 2–3. С. 507–512.
5. Afirah T., Sharifah S.S.A., Asmala A. Classification of Landsat 8 satellite data using NDVI thresholds // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2017. Vol. 8, № 4. P. 37–40.
6. Grimm N.B. et al. The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients // Frontiers in Ecology and the Environment. 2008. Vol. 6. P. 264–272. DOI: 10.1890/070147.
7. Ismayilova I., Timpf S. Classifying urban green spaces using a combined Sentinel-2 and random forest approach // AGILE: GIScience Series. 2022. Vol. 3. Art. 38. DOI: 10.5194/agile-giss-3-38-2022.
8. Manika N., Dhyani S. Rampant Urbanization, Loss of Green Spaces, Depleting Foraging Wisdom for Nutrition, Health, and Protecting Urban Greenscapes: Lessons from Populous Uttar Pradesh, India // Urban Foraging in the Changing World. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 79–102. DOI: 10.1007/978-981-97-0345-6_6.
9. Norovsuren B. et al. 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. Art. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012054.
10. Potapov P. et al. The Global 2000–2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive: First Results // Frontiers in Remote Sensing. 2022. Vol. 3. P. 1–22. Art. 856903. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903. EDN: QSFGEW.
11. Thai Nguyen Province E-Portal – Народный совет и Народный комитет города Тхайнгуен. Официальный информационный портал города Тхайнгуен. URL: <https://thainguyen.gov.vn> (дата обращения: 01.01.2025).

12. Trinh L.H. et al. Monitoring of coastline change using Sentinel-2 MSI data. A case study in Thanh Hoa Province, Vietnam // *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2024. № 26. P. 77–87. DOI: 10.12775/bgeo-2024-0006.
13. Xiong N. et al. 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(16). Art. 4041. DOI: 10.3390/rs14164041.
14. Zanaga D. et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200 // *Zenodo*. 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7254221.

References

1. Bessmolnaya M.Y., Imeskenova E.G., Kisova S.V., Mankhanov A.D. *Ozelenenie kak factor rrazvitiya go-rodskoj sredy* [Greening as a factor of sustainable urban development: monograph]. Moscow, IPR MediaPubl., 2023. 291 p. (In Russ.). DOI: 10.23682/124290. EDN: FAWZUD.
2. Klimanova O.A., Kolbovsky E.Y., Illarionova O.A. *Zelenaja infrastruktura goroda* [Urban green infrastructure: condition assessment and development planning]. Moscow, KMK Publ., 2020. 324 p. (In Russ.). EDN: PBPUTV.
3. Parakhina E.A., Ritter A.S. [Landscape dynamics of the city of Voronezh]. *Vestnik evrazijskoj nauki*. V. 16, No. 1 (2024): pp. 1-12. (In Russ.). URL: <https://esj.today/PDF/79NZVN124.pdf>.
4. Prokhorenko N.B., Demina G.V., Mingazova D.N. [Assessment of tree vitality under urban conditions of Kazan]. *Izvestija Samarskogo naučnogo centra RAN*. V. 2-3 (2017): pp. 507-512. (In Russ.).
5. Afirah T., Sharifah S.S.A., Asmala A. Classification of Landsat 8 satellite data using NDVI thresholds. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. V. 8, No. 4 (2017): pp. 37-40.
6. Grimm N.B., Foster D., Groffman P., Grove J.M., Hopkinson C.S., Nadelhoffer K.J., Pataki D.E., Peters D.P. The changing landscape: Ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Frontiers in Ecology and the Environment*. V. 6 (2008): pp. 264-272. DOI: 10.1890/070147.
7. Ismayilova I., Timpf S. Classifying urban green spaces using a combined Sentinel-2 and random forest approach. *AGILE: GIScience Series*. V. 3 (2022). Art. 38. DOI: 10.5194/agile-giss-3-38-2022.
8. Manika N., Dhyani S. Rampant Urbanization, Loss of Green Spaces, Depleting Foraging Wisdom for Nutrition, Health, and Protecting Urban Greenspaces: Lessons from Populous Uttar Pradesh, India. In: *Urban Foraging in the Changing World*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 79-102. DOI: 10.1007/978-981-97-0345-6_6.
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*. V. 381 (2019). Art. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/381/1/012054.
10. Potapov P., Hansen M.C., Pickens A., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Turubanova S., Zalles V., Li X., Khan A., Stolle F., Harris N., Song X., Baggett A., Kommareddy I., Kommareddy A. The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive: First Results. *Frontiers in Remote Sensing*. V. 3 (2022): pp. 1-22. Art. 856903. DOI: 10.3389/frsen.2022.856903. EDN: QSFGEW.
11. Thai Nguyen Province E-Portal – The People's Council and the People's Committee of Thainguayen City. The official information portal of the city of Thainguayen. Available at: <https://thainguayen.gov.vn> (accessed 01.01.2025)
12. Trinh L.H., Le T.G., Tran X.B., Tran Q.V., Le V.P., To T.P. Monitoring of coastline change using Sentinel-2 MSI data. A case study in Thanh Hoa Province, Vietnam. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. No. 26 (2024): pp. 77-87. DOI: 10.12775/bgeo-2024-0006.
13. Xiong N., Yu R., Yan F., Wang J., Feng Z. Land use and land cover changes and prediction based on multi-scenario simulation: A case study of Qishan County, China. *Remote Sensing*. V. 14(16) (2022). Art. 4041. DOI: 10.3390/rs14164041.
14. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D., De Keersmaecker W., Brockmann C., Kirches G., Wevers J., Cartus O., Santoro M., Fritz S., Lesiv M., Herold M., Tsendbazar N.-E., Xu P., Ramoino F., Arino O. ESA WorldCover 10 m 2021 v200: global earth coverage map. *Zenodo*. (2022). DOI: 10.5281/zenodo.7254221.

Статья поступила в редакцию 25.08.2025; одобрена после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 02.12.2025.

The article was submitted 25.08.2025; approved after reviewing 19.11.2025; accepted for publication 02.12.2025.

Информация об авторах

Т. Ф. Нгуен – аспирант, кафедра рационального природопользования, Институт экологии, РУДН;

Е. А. Парахина – канд. биол. наук, доцент кафедры рационального природопользования, Институт экологии, РУДН.

Information about the authors

T. P. Nguyen – PhD candidate, Department of Rational Nature Management, Institute of Ecology, RUDN;

E. A. Parakhina – candidate of biological sciences, associate professor of the Department of Rational Nature Management, Institute of Ecology, RUDN.

Вклад авторов:

Нгуен Т. Ф. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; статистическая обработка материала; итоговые выводы.

Парахина Е. А. – доработка текста; итоговые выводы.

Contribution of the authors:

Nguyen T. P. – research supervision; research concept; methodology development; writing the draft; statistical processing of the material; final conclusions.

Parakhina E. A. – text revision; final conclusions.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.