

Научно-практическая статья/Research article

УДК 528.9:528.85 (597)

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-101-111>

Оценка изменения и трансформации водных и околотоводных объектов города Хайфон на основе разновременных космических изображений Landsat

Данг Хиен Фам¹✉, В. В. Братков¹

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: lopmaybay@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена изменению и трансформации гидрографической сети города Хайфон (Вьетнам) в период с 1986 по 2025 г. Источником данных послужили разновременные снимки Landsat 5 и Landsat 9, обработанные на платформе Google Earth Engine. Методика включает расчет 78 спектральных индексов, формирование обучающих выборок для классов «вода» и «не-вода», пороговую бинарную классификацию с подбором порога по максимуму F1-меры, объединение результатов 20 наиболее точных индексов и последующую векторизацию полученных растров. Сопоставление карт за 1986 и 2025 гг. показало, что площадь открытой воды сократилась на 87 км² (на 11,6 %), тогда как портовые и промышленные зоны расширились более чем на 40 км²; площадь защитных мангровых лесов выросла более чем на 40 км², а под аквакультуру было освоено свыше 32 км² прибрежных земель. Дополнительно зафиксированы намыв искусственных островов общей площадью около 17 км² и углубление судоходных каналов. Выявленные процессы отражают интенсивное антропогенное воздействие – урбанизацию, развитие портов и меры адаптации к изменению климата. Результаты могут быть использованы при планировании регионального развития.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, Landsat, спектральные индексы, водные объекты, мангровые леса, аквакультура, Хайфон, морские порты

Для цитирования:

Данг Хиен Фам, Братков В. В. Оценка изменения и трансформации водных и околотоводных объектов города Хайфон на основе разновременных космических изображений Landsat. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 5. С. 101–111. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-101-111>

Assessing changes and transformation of aquatic and near-shore features in Hai Phong City using multi-temporal Landsat satellite imagery

Dang Hien Pham¹✉, V. V. Bratkov¹

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: lopmaybay@gmail.com

Abstract. The study quantifies changes and transformation of the hydrographic network of Hai Phong City (Vietnam) over the period 1986–2025. Multi-temporal Landsat 5 and Landsat 9 imagery were processed within the Google Earth Engine platform. The methodology comprised computation of 78 spectral indices, construction of training samples for “water” and “non-water” classes, threshold-based binary classification with thresholds optimized to maximize the F1-score, aggregation of results from the 20 most accurate indices, and subsequent vectorization of the resulting raster maps. Com-

parison of the 1986 and 2025 water-body maps revealed a decrease in open-water area of 87 km² (11.6%), whereas seaport and industrial zones expanded by more than 40 km², protective mangrove forests increased by over 40 km², and more than 32 km² of coastal land was converted to aquaculture. In addition, land reclamation resulting in artificial islands with a total area of approximately 17 km² and deepening of navigation channels were documented. The changes reflect intensive anthropogenic pressures, including urbanization, seaport development, and climate-change adaptation measures. The findings can support evidence-based regional development planning.

Keywords: remote sensing, Landsat, spectral indices, water bodies, mangrove forests, aquaculture, Hai Phong, seaports

For citation:

Dang Hien Pham, Bratkov V. V. (2026). Assessing changes and transformation of aquatic and near-shore features in Hai Phong City using multi-temporal Landsat satellite imagery. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 101–111. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-101-111>

Введение

Город Хайфон, расположенный в северной части Социалистической Республики Вьетнам на побережье Тонкинского залива, представляет собой один из ключевых промышленных, портовых и логистических центров страны. В настоящее время городская территория составляет 1519,2 км², на которой проживает около 2 млн чел. Хайфон характеризуется тропическим муссонным климатом, при этом большая часть из 1 800 мм годовой суммы осадков выпадает с мая по октябрь. Также здесь часто отмечаются тайфуны, что усиливает уязвимость водных и околотовных объектов к действию природных и антропогенных факторов. За последние 40 лет регион претерпел радикальные изменения: урбанизация привела к росту застройки на 300–500 % в период 1989–2013 гг.; расширение портов увеличило грузооборот до 190 млн т в 2024 г., а развитие аквакультуры преобразовало прибрежные земли в фермы по разведению морепродуктов, на которых в 2030 г. планируется получать до 1,4 млн т продукции. Эти процессы протекают на фоне повышения уровня моря со скоростью до 3,56 мм/год (1960–2020 гг.), с эрозией берегов и потерей естественных экосистем, таких как мангровые леса, которые играют роль естественного барьера против наводнений и эрозии [1]. Методические подходы к оценке современных климатических условий территории, основанные на совместном использовании наземных метеонаблюдений

и спутниковых данных низкого пространственного разрешения, рассмотрены в [2].

Исследования изменения и трансформации гидрологической сети в прибрежных зонах Вьетнама активно используют методы дистанционного зондирования Земли. Спутниковые изображения Landsat, предоставляемые Геологической службой США (USGS) с 1972 г., позволяют проводить долгосрочный мониторинг изменений региональных природных и антропогенных ландшафтов, а также водных объектов благодаря их пространственному разрешению (30 м) и достаточно длительным временным рядам данных [3]. Спектральные индексы, такие как NDWI и MNDWI, успешно применялись для выделения внутренних вод в тропических регионах, однако комплексные подходы с множеством индексов и оптимизацией классификации по F1-мере остаются недостаточно разработанными для урбанизированных прибрежных зон типа Хайфона [4]. Например, анализ береговой линии Вьетнама за 1986–2021 гг. выявил эрозию в дельте Красной реки, где расположен Хайфон, с потерей до 10–15 % прибрежных территорий [5]. Кроме того, мангровые леса в Хайфоне расширились с 300 га в 1990 г. до 3 000 га к настоящему времени, но это сопровождалось сокращением открытых водных поверхностей за счет отсыпки и посадки [6]. Прибрежные территории Вьетнама исследуются и российскими специалистами: выполнено картографирование приливно-отливных отмелей вдоль побережья страны по радиолокационным изображениям Sentinel-1

с применением методов глубокого обучения [7], а также классификация устьевых и прибрежных водно-болотных угодий по снимкам Planet NICFI на основе сверточных нейронных сетей и трансферного обучения [8].

Для выделения водных и околотоводных объектов и соответствующих им поверхностей применялись такие спектральные индексы, как NDWI [9], MNDWI [10], AWEI [11] и WI2015 [12], демонстрирующие высокую точность в различных сценариях [13]. Сравнительно новые индексы, например SMBWI, опирающиеся на оптические снимки Sentinel-2, а также комбинация NDWI с интеграцией цифровых моделей рельефа улучшают извлечение искомым параметров в сложных условиях, достигая F1-меры выше 0,9 [14]. Методы пороговой сегментации с оптимизацией порога по F1-мере применяются для бинарной классификации и повышают точность на 10–15 % по сравнению с одиночными индексами [15]. В отечественных работах показано, что разновременные снимки Sentinel-1, Sentinel-2 и Landsat позволяют выявлять природно-антропогенную трансформацию береговой линии за несколько десятилетий [16], а интеграция разнородных данных дистанционного зондирования повышает достоверность мониторинга состояния акваторий [17]. Систематизация методов и средств искусственного интеллекта применительно к анализу и интерпретации данных дистанционного зондирования выполнена в [18].

Цель исследования – оценка изменения и трансформации водных и околотоводных объектов г. Хайфон за 1986–2025 гг. на основе данных дистанционного зондирования Landsat.

Задачи включают: 1) расчет спектральных индексов (78); 2) отбор обучающих выборок и бинарную классификацию с оптимизацией F1-меры; 3) комбинацию результатов и векторизацию; 4) сравнение карт и интерпретацию изменений.

Методы исследования

Алгоритм исследования представлен на рис. 1.

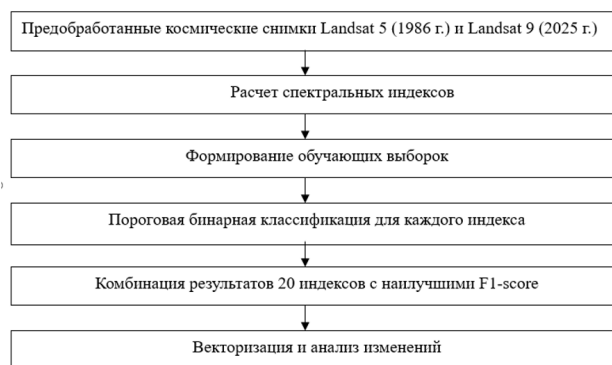


Рис. 1. Алгоритм исследования

Территория исследования охватывает прямоугольный участок размером 53,37×47,4 км (общая площадь около 2 530 км²), который включает не только территорию г. Хайфон, но и прилегающие районы соседних провинций (Куангнинь на северо-востоке, Хайзыонг на северо-западе, Тхайбинь на юго-западе) и часть Тонкинского залива. Спутниковые изображения Landsat не обрезаны по административным границам, а выбраны в форме прямоугольника для обеспечения полного покрытия водных и околотоводных объектов, поскольку административные границы Хайфона часто проходят по середине речных русел (например, по рекам Красной и Тай Бинь), что делает необходимым более широкий обзор для анализа динамики рек, каналов и прибрежных вод. Это позволяет получить всестороннее представление о взаимосвязях в данной части гидросферы, включая влияние соседних регионов на эрозию, седиментацию и водный баланс.

В качестве исходных данных использовались спутниковые изображения Landsat, полученные с платформы Google Earth Engine (GEE) [19]. Выбор этой платформы обусловлен ее возможностями по обработке больших массивов данных, предобработке изображений (атмосферная коррекция, геопривязка, маскирование облачности) и расчету спектральных индексов в облачной среде без загрузки данных на локальный компьютер. Для анализа были выбраны два изображения из коллекций Landsat.

Для 1986 г. (рис. 2, а): изображение из коллекции LANDSAT/LT05/C02/T1_L2 с идентификатором LT05_126046_19861030. Это

изображение получено сенсором Thematic Mapper (TM) спутника Landsat 5, имеет пространственное разрешение 30 м для видимых и инфракрасных каналов. Дата съемки – 30 октября 1986 г., выбрана с учетом минимальной облачности (0 %) и сезонных условий (сухой сезон для минимизации влияния осадков на водные объекты).

Для 2025 г. (рис. 2, б): изображение из коллекции LANDSAT/LC09/C02/T1_L2 с идентификатором LC09_126046_20250102. Это данные сенсора Operational Land Imager (OLI) спутника Landsat 9, также с разрешением 30 м, дата съемки – 2 января 2025 г. Выбор этой даты обеспечивает сопоставимость с 1986 г. по сезонным факторам и низкой облачностью (0 %).

Оба изображения подвергнуты стандартной предобработке в GEE: атмосферная коррекция до уровня поверхностного отражения (Surface Reflectance, SR), маскировка облаков, а также обрезка по границам исследования. Различия в спектральных каналах между Landsat 5 (7 каналов: B1-B7) и Landsat 9 (11 каналов: B1-B11, включая дополнительные термические и панхроматический) учтены при расчете индексов: для Landsat 5 индексы, требующие отсутствующих каналов (например, B8 – панхроматический или B10/B11 – термические), пропусались.

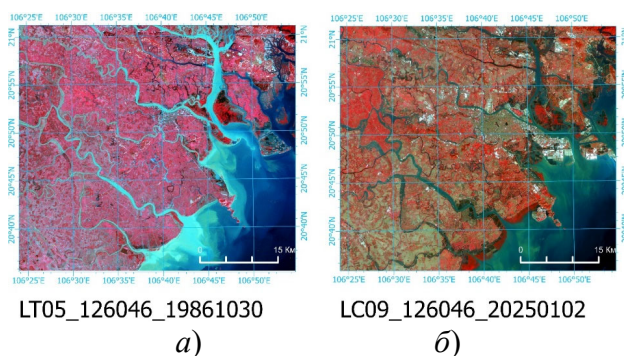


Рис. 2. Исходные снимки:

а) Landsat 5 (1986 г.); б) Landsat 9 (2025 г.)
(комбинация NIR, RED, GREEN)

Расчет спектральных индексов. Список из 78 спектральных индексов составлен на основе базы данных Index Database

(<https://www.indexdatabase.de/>), содержащей индексы для сенсора Landsat 8 OLI (аналогичного Landsat 9) [20]. Из полного списка (114 индексов) отобраны уникальные по формуле, адаптированные для Landsat, с исключением дубликатов и индексов, не применимых к водным объектам. Формулы индексов взяты из базы и реализованы на JavaScript для GEE с заменой обозначений каналов на стандартные (B1 = Coastal, B2 = Blue, B3 = Green, B4 = Red, B5 = NIR, B6 = SWIR1, B7 = SWIR2, B10/Thermal1, B11/Thermal2).

Для Landsat 5 рассчитано 70 индексов, поскольку некоторые требуют каналов, отсутствующих в TM, например, B1 (побережья и аэрозоли 0,433–0,453 мкм), B9 (перистые облака 1,360–1,390 мкм) или TIR2 (дальний ИК 11,50–12,50 мкм). Для Landsat 9 все 78 индексов рассчитаны. Расчет выполнен для каждого индекса, с последующим экспортом в многослойный растр.

Полный список индексов с их формулами представлен в скрипте <https://code.earthengine.google.com/eb0ec2d63e84d8856f0aec7b3788acbe>.

Выборка и классификация. Процесс отбора обучающих выборок был выполнен в программном обеспечении ArcGIS Pro, которое позволяет создавать и управлять геопространственными данными с высокой точностью. Сначала были загружены спутниковые изображения Landsat для 1986 и 2025 гг., полученные из Google Earth Engine (как описано выше). На основе визуальной интерпретации изображений и вспомогательных данных (таких как высококачественные снимки Google Earth, полевые наблюдения 2024 г.) были созданы полигоны для классов покрытия поверхности для каждого снимка.

Для класса «вода» (реки, каналы, морская акватория, участки с аквакультурой) на каждом снимке отобрано 67 000 точек, распределенных равномерно по территории Хайфона, с учетом разнообразия (открытые воды, мелководья, загрязненные зоны).

Для класса «не-вода», /околоводная поверхность / (растительность, урбанизированные территории, мангровые леса) аналогично отобрано более 16 000 и 22 000 точек для снимков 1986 и 2025 гг. соответственно, чтобы охватить все основные типы покрытия

(естественная земная поверхность, сельскохозяйственные угодья, строения).

Оценка точности карты является ключевым фактором для обоснования ее пригодности к практическому применению, например для мониторинга процесса урбанизации в бассейне Красной реки [21]. Для каждого растрового изображения спектрального индекса применена пороговая бинарная классификация; порог оптимизирован по максимуму F_1 -меры с помощью итеративного алгоритма (перебор порогов от минимума до максимума с 500 шагами).

Критерий F_1 (F-мера) рассчитывается с использованием следующего уравнения:

$$F_1 = \frac{2 \cdot (P \cdot R)}{P + R}, \quad (1)$$

где P – точность (Precision) – доля правильно предсказанных положительных случаев среди всех предсказанных положительных:

$$P = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (2)$$

R – полнота (Recall) – доля правильно предсказанных положительных случаев среди всех истинных положительных:

$$R = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3)$$

где TP (True Positives) – истинно положительные (правильно предсказанные положительные случаи); FP (False Positives) – ложноположительные (отрицательные случаи, ошибочно предсказанные как положительные); FN (False Negatives) – ложноотрицательные (положительные случаи, ошибочно предсказанные как отрицательные).

Выбраны 20 индексов с наивысшей F_1 -мерой ($>0,95$). Пиксель считается водой, если ≥ 3 индекса классифицируют его как воду.

Выбор именно 20 спектральных индексов с последующей индивидуальной классификацией и агрегацией результатов (голосование с порогом ≥ 3) позволяет повысить точность идентификации водных объектов. Это обусловлено тем, что отдельные пиксели воды могут быть неверно классифицированы в большинстве индексов из-за вариативности условий (например, тени, загрязнения или смешение с растительностью), но правильно определены в нескольких специфических ин-

дексах, чувствительных к определенным характеристикам. Аналогично, пиксели «невода» (например, влажные почвы или темные крыши) могут быть ложноположительными в одних индексах, но отрицательными в других. Комбинация множественных индексов снижает влияние этих ошибок, обеспечивая более точную классификацию.

Кроме того, использование множества индексов компенсирует ограничения отбора обучающих выборок: несмотря на большую выборку, невозможно охватить все вариации водных поверхностей (разные составы, мутности, цвета – от чистых рек до солоноватых прибрежных вод или прудов с водорослями в качестве аквакультуры). Каждый индекс фокусируется на разных спектральных свойствах (видимый диапазон для цвета, NIR/SWIR для поглощения воды), что в совокупности повышает охват. Этот подход также позволяет выявить области для ручной корректировки: анализ показывает сложные участки, где классификация неоднозначна (низкое количество подтверждающих индексов). Например, на рис. 3 (изображение с агрегацией результатов классификации показывает количество индексов, классифицировавших пиксель как воду) только 3 индекса классифицировали пиксели прибрежных вод, не включенных в обучающую выборку (квадрат № 1) как воду, возможно, из-за высокой мутности, в то время как на дамбе острова (квадрат № 2) 17 индексов классифицировали пиксели «неводы» как воду. Такой подход позволяет вручную уточнить результаты классификации, пороги или добавить обучающие выборки для этих регионов, повышая точность.

После этого растровые изображения векторизованы для корректировки и создания карты изменений площадей водной поверхности (рис. 4).

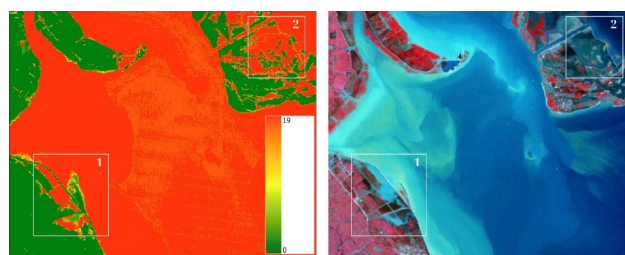


Рис. 3. Фрагмент растрового изображения с агрегацией результатов классификации и Landsat 5 (комбинация NIR, RED, GREEN)

Результаты

Анализ изменений водных и околоводных объектов г. Хайфона на основе изображений Landsat за период 1986–2025 гг. выявил их значительную трансформацию, обусловленную антропогенной деятельностью, урбанизацией и мерами по адаптации к изменению климата (см. рис. 4).

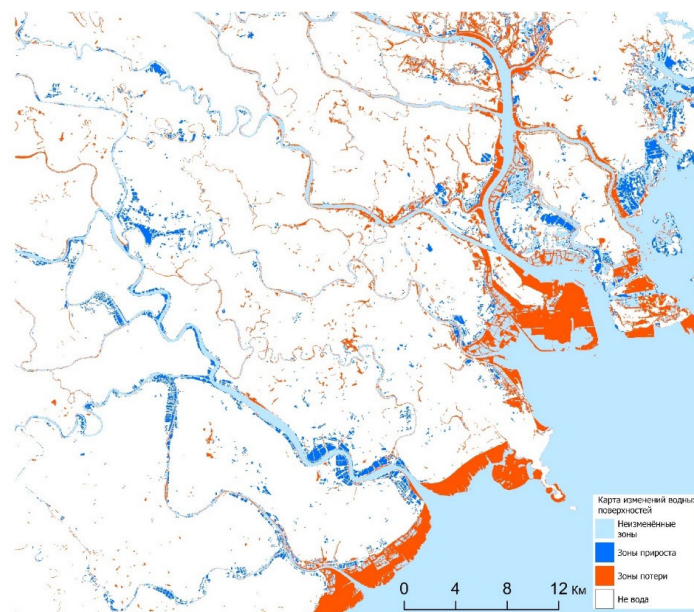


Рис. 4. Изменение и трансформация водных поверхностей г. Хайфона за период 1986–2025 гг.

Площадь мангровых лесов увеличилась более чем на 40 км², что согласуется с общей тенденцией восстановления мангровых экосистем региона, фиксируемой по данным дистанционного зондирования [22].

Для интерактивной визуализации результатов разработана веб-карта, доступная по адресу <https://x102.github.io/waterchange-Haiphong1986-2025/>, где пользователи могут про-

сматривать слои водных и околоводных объектов по состоянию на 1986 и 2025 гг., на основе которых были рассчитаны изменения и соответствующие площади, базовые карты и легенду, с возможностью масштабирования и переключения слоев для детального анализа (рис. 5).

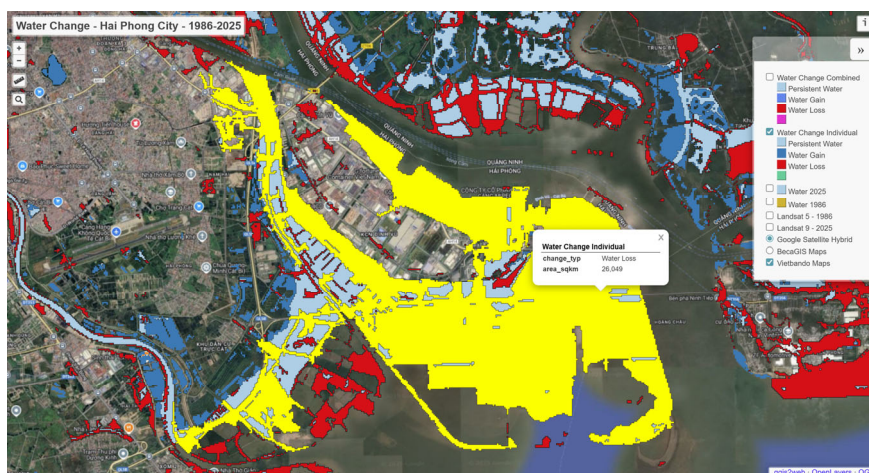


Рис. 5. Интерфейс веб-карты изменений водных поверхностей г. Хайфона

В таблице представлены 20 индексов, их формулы в виде кода Javascript для обработки космических снимков Landsat-9 на платформе

Google Earth Engine, пороговые значения и соответствующие точности для каждого индекса.

20 лучших индексов (по F1-мере) для выделения поверхностных вод по космическим снимкам Landsat 9

Но- мер	Английское назва- ние	Формула для Javascript в GEE	Порог	F1-мера	Accuracy	Каппа
1	Simple Ratio MIR/Red	B7 / B4	0,1737	0,9994	0,9991	0,9977
2	B6	B6	0,0316	0,9994	0,9991	0,9977
3	Gossan	B6 / B4	0,2981	0,9994	0,9991	0,9976
4	B7	B7	0,0166	0,9994	0,9991	0,9975
5	Green Soil Adjusted Vegetation Index (GSAVI)	$(B5 - B3) * (1 + 0.5) / (B5 + B3 + 0.5)$	-0,0836	0,9992	0,9988	0,9969
6	Difference NIR/Green (GDVI)	B5 - B3	-0,0392	0,9992	0,9988	0,9968
7	Green Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (GOSAVI)	$(B5 - B3) / (B5 + B3 + 0.16)$	-0,1134	0,9992	0,9988	0,9968
8	Global Vegetation Moisture Index (GVMI)	$(B5 + 0.1 - B7 + 0.02) / (B5 + 0.1 + B7 + 0.02)$	0,8655	0,9992	0,9988	0,9967
9	Infrared percentage vegetation index (IPVI)	$B5 / (2 * (B5 + B4)) * (((B4 - B3) / (B4 + B3)) + 1)$	0,1986	0,9991	0,9987	0,9965
10	Chlorophyll Index Green (CIgreen)	B5 / B3 - 1	-0,3539	0,9991	0,9987	0,9964
11	Simple Ratio 860/550	B5 / B3	0,6461	0,9991	0,9987	0,9964
12	Normalized Differ- ence Water Index (NDWI)	$(B5 - B3) / (B5 + B3)$	-0,2145	0,9991	0,9986	0,9964
13	Norm NIR	$B5 / (B5 + B4 + B3)$	0,2663	0,9990	0,9986	0,9962
14	Green-Red NDVI (GRNDVI)	$(B5 - (B3 + B4)) / (B5 + (B3 + B4))$	-0,4673	0,9990	0,9986	0,9962
15	Log Ratio (LogR)	$\log(B5/B4)$	-0,1839	0,9986	0,9980	0,9946
16	Transformed NDVI	$\sqrt{(B5 - B4) / (B5 + B4) + 0.5)}$	0,6390	0,9986	0,9980	0,9946
17	Atmospherically Re- sistant Vegetation In- dex 2 (ARVI2)	$-0.18 + 1.17 * ((B5 - B4) / (B5 + B4))$	-0,2873	0,9986	0,9980	0,9946
18	Simple Ratio NIR/RED	B5 / B4	0,8318	0,9986	0,9980	0,9946
19	Modified Simple Ra- tio NIR/RED (MSRNir/Red)	$(B5/B4 - 1) / ((B5/B4 + 1) * 0.5)$	-0,1234	0,9986	0,9980	0,9946
20	Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI)	$(0.1 * B5 - B4) / (0.1 * B5 + B4)$	-0,8462	0,9986	0,9980	0,9946

Обсуждение

Сочетание комбинированной классификации с последующей ручной корректировкой

обеспечило высокую точность выделения водной поверхности – средняя F1-мера превысила 0,97. Такой результат во многом объясняется спектральными свойствами самой

воды: сильным поглощением в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах при низком отражении в видимой области. Эти свойства делают границу «вода – суша» достаточно контрастной, поэтому бинарная классификация воды оказывается заметно надежнее, чем разделение растительности, почв и застройки. Для неводных классов точность ожидаемо ниже: в плотно застроенных кварталах из-за смешанных пикселей значение F_1 -меры опускается ниже 0,80.

Зафиксированные изменения площади водных объектов неоднозначны по своим последствиям. С экономической точки зрения расширение портов и распространение аквакультуры способствуют росту валового продукта города, а мангровые насаждения, помимо защиты берегов от эрозии, создают предпосылки для развития экотуризма. Намытые искусственные острова (около 16 км²) и новые пляжи также увеличивают туристическую привлекательность территории. Вместе с тем сужение и засыпка речных русел ухудшают отвод ливневых вод в городских районах: после тайфунов это оборачивается подтоплениями и дополнительным экономическим ущербом. Таким образом, хозяйственное освоение прибрежной зоны Хайфона дает выигрыш в одних сферах за счет нарастающих рисков в других.

Заключение

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие основные выводы и предложить соответствующие рекомендации.

1. Ключевыми аспектами разработанной методики, показавшими высокую эффектив-

ность выполнения соответствующих технологических операций по дешифрированию данных дистанционного зондирования, являются расчет по 78 спектральным индексам и их отбор по F_1 -мере, объединение результатов 20 наиболее точных индексов и последующей векторизации полученных растров, использование интерактивной веб-карты для актуализации результатов мониторинга соответствующих параметров анализируемой территории.

2. На основании предложенной методики, основанной на дешифрировании разновременных космических изображений Landsat 5 и Landsat 9, обработанные на платформе Google Earth Engine, установлены следующие изменения: сокращение открытой поверхности воды на 87 км²; прирост портовых и промышленных зон более чем на 40 км²; расширение мангровых лесов более чем на 40 км² и увеличение площади под аквакультуру свыше 32 км².

3. Анализ полученных параметров показал, что за период с 1986–2025 гг. водные и околотовные объекты в пределах г. Хайфона претерпели существенные изменения, связанные с природными факторами (повышение уровня моря, абразия берегов), а также трансформацию, обусловленную активным антропогенным освоением территории (урбанизация, расширение портов и развитие аквакультуры).

4. Выявленные существенные изменения и полученные результаты необходимо учитывать при разработке и реализации региональной стратегии развития изучаемого региона, что позволит согласовать экономическое развитие с сохранением природных экосистемы города Хайфон.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nguyen Minh Hai, Ouillon S., Duy Vinh Vu. Sea-level rise in Hai Phong coastal area (Vietnam) and its response to ENSO – evidence from tide gauge measurement of 1960–2020. Vietnam Journal of Earth Sciences. 2022. DOI 10.15625/2615-9783/16961.
2. Бекмурзаева Л. Р., Братков В. В., Керимов И. А. Оценка современных агроклиматических условий Северного Кавказа на основе наземных метеонаблюдений и данных низкого пространственного разрешения. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 6. С. 27–35. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-6-27-35.
3. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature. 2016. Vol. 540. P. 418–422. DOI 10.1038/nature20584.

4. Zhao C. [et al.]. Evaluating spectral indices for water extraction: Limitations and contextual usage recommendations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025. Vol. 139. Art. 104510. DOI 10.1016/j.jag.2025.104510.
5. Lappe R., Ullmann T., Bachofer F. State of the Vietnamese Coast – Assessing Three Decades (1986 to 2021) of Coastline Dynamics Using the Landsat Archive. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 10. Art. 2476. DOI 10.3390/rs14102476.
6. Pham Tien Dat, Yoshino K. Comparing Mangrove Forest Management in Hai Phong City, Vietnam towards Sustainable Aquaculture. *Procedia Environmental Sciences*. 2013. Vol. 17. P. 109–118. DOI 10.1016/j.proenv.2013.02.018.
7. Куен Д. Т., Малинников В. А., Сереке Т. Э., Нго С. Х. Картографирование приливно-отливных отмелей вдоль побережья Вьетнама с использованием методов глубокого обучения на основе изображения Sentinel-1. *Вестник СГУГиТ*. 2024. Т. 29, № 6. С. 70–82. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-70-82.
8. Куен Д. Т., Малинников В. А. Классификация устьевых и прибрежных водно-болотных угодий по снимкам Planet NICFI на основе сверточных нейронных сетей и трансферного обучения. *Геодезия и картография*. 2024. № 6. С. 31–42. DOI 10.22389/0016-7126-2024-1008-6-31-42.
9. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, № 7. P. 1425–1432. DOI 10.1080/01431169608948714.
10. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, № 14. P. 3025–3033. DOI 10.1080/01431160600589179.
11. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 140. P. 23–35. DOI 10.1016/j.rse.2013.08.029.
12. Fisher A., Flood N., Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 175. P. 167–182. DOI 10.1016/j.rse.2015.12.055.
13. Rajeswari S., Rathika P. Exploring Spectral Indices for Improved Water Body Classification in Landsat Imagery. 2024 Third International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS). Krishnankoil, India, 2024. DOI 10.1109/INCOS59338.2024.10527525.
14. Sun Q., Li J. A method for extracting small water bodies based on DEM and remote sensing images. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 760. DOI 10.1038/s41598-024-51346-7.
15. Esposito C., Landrum G. A., Schneider N., Stiefl N., Riniker S. GHOST: Adjusting the Decision Threshold to Handle Imbalanced Data in Machine Learning. *Journal of Chemical Information and Modeling*. 2021. Vol. 61, № 6. P. 2623–2640. DOI 10.1021/acs.jcim.1c00160.
16. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А. Анализ изменений природно-антропогенной трансформации береговой линии Азербайджанского сектора Каспийского моря. *Вестник СГУГиТ*. 2023. Т. 28, № 4. С. 85–93. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-85-93.
17. Гулиев А. Ш., Хлебникова Т. А., Каленицкий А. И. Разработка методики аэрокосмического мониторинга нефтяных загрязнений на основе интеграции данных дистанционного зондирования Земли (на примере акватории азербайджанского сектора Каспийского моря). *Вестник СГУГиТ*. 2024. Т. 29, № 6. С. 53–61. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-6-53-61.
18. Колесников А. А. Анализ методов и средств искусственного интеллекта для анализа и интерпретации данных активного дистанционного зондирования. *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27, № 3. С. 74–94. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94.

19. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI 10.1016/j.rse.2017.06.031.
20. Henrich V., Jung A., Götze C., Sandow C., Thürkow D., Gläßer C. Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. *Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop*. Tel Aviv, Israel, 2009.
21. Фам Ч., Фам Д. Разработка методики автоматического мониторинга процесса урбанизации бассейна Красной реки (Вьетнам). *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024. № 6 (144). DOI 10.60797/IRJ.2024.144.93.
22. Giri C., Ochieng E., Tieszen L. L., Zhu Z., Singh A., Loveland T., Masek J., Duke N. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*. 2011. Vol. 20, № 1. P. 154–159. DOI 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x.

REFERENCES

1. Nguyen Minh, H., Ouillon, S., & Duy Vinh, V. (2022). Sea-level rise in Hai Phong coastal area (Vietnam) and its response to ENSO – evidence from tide gauge measurement of 1960–2020. *Vietnam Journal of Earth Sciences*. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16961>.
2. Bekmurzayeva, L. R., Bratkov, V. V., & Kerimov, I. A. (2025). Assessment of contemporary agroclimatic conditions in the North Caucasus using ground-based meteorological observations and low spatial resolution data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 30(6), 27–35. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-6-27-35> [in Russian].
3. Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>.
4. Zhao, C. et al. (2025). Evaluating spectral indices for water extraction: Limitations and contextual usage recommendations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 139, 104510. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104510>.
5. Lappe, R., Ullmann, T., & Bachofer, F. (2022). State of the Vietnamese Coast – Assessing Three Decades (1986 to 2021) of Coastline Dynamics Using the Landsat Archive. *Remote Sensing*, 14(10), 2476. <https://doi.org/10.3390/rs14102476>.
6. Pham Tien Dat, & Yoshino, K. (2013). Comparing Mangrove Forest Management in Hai Phong City, Vietnam towards Sustainable Aquaculture. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.018>.
7. Quyen, D. T., Malinnikov, V. A., Sereke, T. E., & Ngo, X. H. (2024). Mapping tidal flats along the coast of Vietnam using deep learning techniques based on Sentinel-1 imagery. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29(6), 70–82. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-70-82> [in Russian].
8. Quyen, D. T., & Malinnikov, V. A. (2024). Classification of estuarine and coastal wetlands from Planet NICFI imagery based on convolutional neural networks and transfer learning. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, (6), 31–42. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1008-6-31-42> [in Russian].
9. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
10. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.
11. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>.

12. Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.005>.
13. Rajeswari, S., & Rathika, P. (2024). Exploring Spectral Indices for Improved Water Body Classification in Landsat Imagery. In *2024 Third International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*. Krishnankoil, India: IEEE.
14. Sun, Q., & Li, J. (2024). A method for extracting small water bodies based on DEM and remote sensing images. *Scientific Reports*, 14, 760. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51346-7>.
15. Esposito, C., Landrum, G. A., Schneider, N., Stiefl, N., & Riniker, S. (2021). GHOST: Adjusting the Decision Threshold to Handle Imbalanced Data in Machine Learning. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 61(6), 2623–2640. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.1c00160>.
16. Guliyev, A. Sh., & Khlebnikova, T. A. (2023). Analysis of changes in the natural and anthropogenic transformation of the coastline of the Azerbaijanian sector of the Caspian sea. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(4), 85–93. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2023-28-4-85-93> [in Russian].
17. Guliyev, A. Sh., Khlebnikova, T. A., & Kalenizkiy, A. I. (2024). Development of a methodology for aerospace monitoring of oil pollution based on the integration of Earth remote sensing data (using the example of the waters of the Azerbaijani sector of the Caspian Sea). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 29(6), 53–61. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-6-53-61> [in Russian].
18. Kolesnikov, A. A. (2022). Analysis of methods and tools of artificial intelligence for analysis and interpretation of active remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 27(3), 74–94. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94> [in Russian].
19. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
20. Henrich, V., Jung, A., Götze, C., Sandow, C., Thürkow, D., & Gläßer, C. (2009). Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. In *Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop*. Tel Aviv, Israel.
21. Pham, Ch., & Pham, D. (2024). Development of a methodology for automatic monitoring of urbanization in the Red River basin (Vietnam). *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal]*, 6(144). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.93> [in Russian].
22. Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., & Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154–159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>.

Об авторах

Данг Хиен Фам – аспирант кафедры географии.

Виталий Викторович Братков – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой географии.

Author details

Dang Hien Pham – PhD Student, Department of Geography.

Vitaly V. Bratkov – DSc, Professor, Head of the Department of Geography.

Получено / Received 23.06.2026

Поступила после рецензирования / Revised 11.09.2026

Принята к публикации / Accepted 30.09.2026