

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ ПО ДАННЫМ РАЗНОВРЕМЕННЫХ СНИМКОВ LANDSAT 5 И 8 НА ПРИМЕРЕ ПРОВИНЦИИ ТХАНЬХОА, ВЬЕТНАМ

© 2024 г. Т. З. Ле¹, Л. Х. Чинь², *, В. Р. Заблоцкий³, К. В. Чан¹, С. Б. Чан⁴, Т. Ф. То⁵,
В. Ф. Ле², В. Т. Ле⁶

¹Вьетнамская сельскохозяйственная академия, Ханой, Вьетнам

²Технический университет им. Ле Куи Дон, Ханой, Вьетнам

³Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

⁴Ханойский университет природных ресурсов и окружающей среды, Ханой, Вьетнам

⁵Университет Тхань Донг, провинция Хайзыонг, Вьетнам

⁶Тхайнгуен университет сельского и хозяйства, Тхайнгуен, Вьетнам

*E-mail: trinhlehung@lqdtu.edu.vn

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

В последние годы деятельность человека оказывает глубокое воздействие на состояние устьев рек и прибрежных районов Вьетнама, что выражается в активной эрозии и аккреции (увеличение) береговой линии. В работе использовались изображения Landsat за период 1988 – 2022 гг. для оценки динамики береговой линии провинции Тханьхоа (Северный Центральный Вьетнам). Водные индексы NDWI, ANDWI, MNDWI, AWEI_{nsh}, AWEI_{sh} и BandWet, определенные на основе изображений Landsat, применялись для дешифрирования водной поверхности. Пороговый метод Otsu использовался для отделения “водной поверхности” от “объектов суши” с последующей оценкой точности разделения на основе коэффициента Каппа. Полученные результаты показали, что индекс ANDWI имеет наибольшую точность дешифрирования береговой линии изучаемой территории, коэффициент Каппа достигал величины 0.95, для остальных индексов NDWI, MNDWI, AWEI_{nsh}, AWEI_{sh}, BandWet коэффициент Каппа был соответственно равен 0.91, 0.92, 0.93, 0.92 и 0.92. После дешифрирования границ водной поверхности с помощью ANDWI проводилась векторизация границ и наложение векторных изображений друг на друга для оценки изменчивости береговой линии и построения карты динамики береговой линии. Обнаружено, что в северной части прибрежной зоны провинции Тханьхоа наблюдается активная аккреция береговой линии. Средняя скорость аккреции составляла 150 м/год, максимальная скорость – 457 м/год. Наоборот, на южном побережье провинции Тханьхоа преобладает эрозия береговой линии с максимальной скоростью 38 м/год и средней скоростью около 10 м/год.

Ключевые слова: динамика береговой линии, дистанционное зондирование, Landsat, водные индексы, провинция Тханьхоа, Вьетнам

DOI: 10.31857/S0205961424030038, EDN: FBBCDQ

ВВЕДЕНИЕ

Вьетнам – страна с береговой линией протяженностью более 3260 км от Куангниня (Quang Ninh) до Кьензянг (Kien Giang), с множеством устьев крупных рек, на которых развиваются мангровые экосистемы. В последние годы ситуация с береговой эрозией и аккрецией (расширение территории суши в результате переноса и осадения речных отложений в дельтах рек) в прибрежных районах Вьетнама резко обострилась, вызывая серьезные последствия в состоянии природных экосистем (Cuong и Су, 2014).

Дистанционное зондирование и космический мониторинг эффективно применяются в решении многих научных вопросов при изучении аэрозольного состава атмосферы, прогнозирования землетрясений (Бондур, 2015; Бондур, Зверев, 2005). Данные оптических спутниковых изображений, таких как Landsat, Aster и др., часто используются для выделения береговых линий, оценки изменений устьев рек. Многие алгоритмы отделения водной поверхности от суши были разработаны для изображений, получаемых с датчиков дистанционного зондирования. Метод оцифровки, основанный на визуальном дешифрировании с ис-

пользованием изображений в красном, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах, хотя и имеет достаточную точность, но трудозатратен и требует много времени (Yang et al., 2015). В исследовании Winasro и др. (Winasro and Budhiman, 2001), Alesheikh и др. (Alesheikh et al., 2007) использовались зеленый, ближний и средний инфракрасный каналы изображений Landsat TM для расчета отношений каналов GREEN/NIR и GREEN/SWIR₁ и дешифрирования границ водной поверхности на основе метода пороговой обработки. Этот метод использовался и в исследованиях (Trung and Khanh, 2016; Tran и Doan, 2017) для определения границы “вода/суша” и оценки изменения береговых и прибрежных территорий во Вьетнаме.

Низкая спектральная отражательная способность воды по сравнению с почвой и растениями, особенно в ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазоне (Frazier and Page, 2000), позволяет эффективно использовать водные индексы для повышения точности классификации водных объектов по оптическим спутниковым снимкам. McFeeters (1996) предложил использовать нормализованный разностный водный индекс (Normalized Difference Water Index – NDWI), рассчитываемый на основе зеленого и ближнего инфракрасного каналов спутниковых снимков Landsat. Индекс NDWI изменяется в диапазоне от –1 до 1, причем водная поверхность имеет положительные значения и представлена светлыми пикселями, остальные объекты характеризуются отрицательными значениями и представлены темными пикселями (McFeeters, 1996; Duong et al., 2021). Gao (1996), независимо от McFeeters, также предложил водный индекс NDWI, основанный на использовании спектральной отражательной способности в зеленом и ближнем инфракрасном каналах (Gao, 1996). Модифицированный нормализованный разностный индекс (Modified Normalized Difference Water Index – MNDWI) был разработан Xu (2006) на основе индекса NDWI, который использует зеленый и коротковолновый инфракрасный (SWIR1) каналы для дешифрирования водной поверхности на спутниковых изображениях Landsat (Xu, 2006). Полученные результаты показывают, что индекс MNDWI позволяет классифицировать водные объекты с большей точностью, нежели чем индекс NDWI, особенно на территориях с затопленной растительностью.

Yan и др. использовали расширенный водный индекс (Enhanced Water Index – EWI), чтобы подчеркнуть разницу между пересыхающими руслами рек и окружающей территорией и повысить точность дешифрирования таких специфических водных объектов (Yan et al., 2007). Wang и др. разрабо-

тали многоканальный водный индекс (Multi-Band Water Index – MBWI), который обеспечивал большую надежность дешифрирования воды в сложных фоновых условиях с высоким уровнем шума (Wang et al., 2018). Rad и др. (2021) предложили индекс ANDWI (Augmented Normalized Difference Water Index), с использованием спектральных каналов в видимом диапазоне, NIR и SWIR1-2, чтобы максимизировать контраст между водной поверхностью и остальной территорией (Rad et al., 2021). Применяются и другие водные индексы, например нормализованный разностный индекс влажности (Normalized Difference Moisture Index – NDMI) (Gao, 1996), New Water Index (Ding et al., 2018), Water Ratio Index (WRI) (Shen and Li, 2010), Index of Water Surfaces (IWS) (Hassani et al., 2015), Automated Water Extraction Index (AWEI) (Feyisa et al., 2014). Отметим, что индекс AWEI имеет две модификации: AWEI_{sh} – оптимальный для участков с мангровым растительным покровом и AWEI_{nsh} – для водной поверхности без мангровой растительности. Данный индекс AWEI показал хорошие результаты в исследовании прибрежной зоны, покрытой протяженными мангровыми зарослями, Намдинь-Ниньбинь в северном Вьетнаме (Trinh et al., 2020).

Во многих исследованиях (Acharya et al., 2018a; Acharya et al., 2018b; Mustafa et al., 2017; Sarp and Ozcelik, 2017; Liu et al., 2022; Serban et al., 2022; Laonamsai et al., 2023) использовались различные водные индексы для классификации водных объектов и проводились оценки точности полученной классификации. В дополнение к оптическим изображениям также применялись радиолокационные изображения для оценки площади затопленной территории (Acar et al., 2012; Paz-Delgado et al., 2022) и анализа динамики береговой линии (Trinh et al., 2015; Baghermanesh et al., 2022; Wu et al., 2022).

Отмеченные выше исследования подтверждают эффективность использования дистанционного зондирования для оценки изменчивости береговой линии. Однако прибрежные территории характеризуются различными природными условиями, следовательно, сравнение и выбор соответствующего водного индекса для оценки вариации береговой линии представляет собой важную задачу, имеющую научное и практическое значение. В данной работе многозональные изображения Landsat использовались для расчета водных индексов NDWI, MNDWI, ANDWI, AWEI_{sh}, AWEI_{nsh} и BandWet. Метод классификации по порогу для дешифрирования границы водной поверхности на основе индекса ANDWI и последующая векторизация изображений для выделения береговой линии позволили оценить динамику береговой линии за период 1988–2022 гг. провинции Тханьхоа.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Исследуемая территория и данные дистанционного зондирования

Исследуемая территория. Областью исследования являлась прибрежная зона провинции Тханьхоа (Thanh Hoa), расположенная в Северо-Центральном регионе Вьетнама (рис. 1). Провинция имеет береговую линию протяженностью 102 км и территориальное море площадью 17 000 км², включая глубоководный порт Нги Сон (Nghi Son). Вдоль побережья расположены 5 крупных лиманов.

Береговая линия провинции Тханьхоа подвергается динамическим процессам эрозии и расширения за счет речных отложений. Современное просадочное движение земной коры в отсутствие речных отложений приводит к тому, что морская вода вызывает энергичную эрозию берегов. Такие процессы наблюдаются в прибрежной полосе районов Хоанг Хоа (Hoang Hoa), Хау Лок (Hau Loc), Куанг Сюонг (Quang Xuong) и Нги Сон (Nghi Son).

Однако для района Нга Соне (Nga Son) опускание территории сопровождается большим количеством поступающих речных взвесей, скорость седиментации частиц высока и в результате континент все больше и больше расширяется в сторону моря (Nguyen и Pham, 2016).

Исходные данные. Для оценки изменения береговой линии провинции Тханьхоа использовались 9 снимков Landsat, в том числе снимки Landsat 5 TM и Landsat 8/9 OLI за период с 1988 по 2022 г. В табл. 1 представлена информация об использованном спутнике дистанционного зондирования и времени съемки исследуемой территории. Изображения Landsat получены в засушливые сезоны разных лет, длящиеся с января по март, в которые погодные условия, как правило, оказываются одинаковыми (рис. 2).

Методика обработки данных

Данные дистанционного зондирования собирались и обрабатывались непосредственно на платформе облачных вычислений Google Earth Engine (GEE).

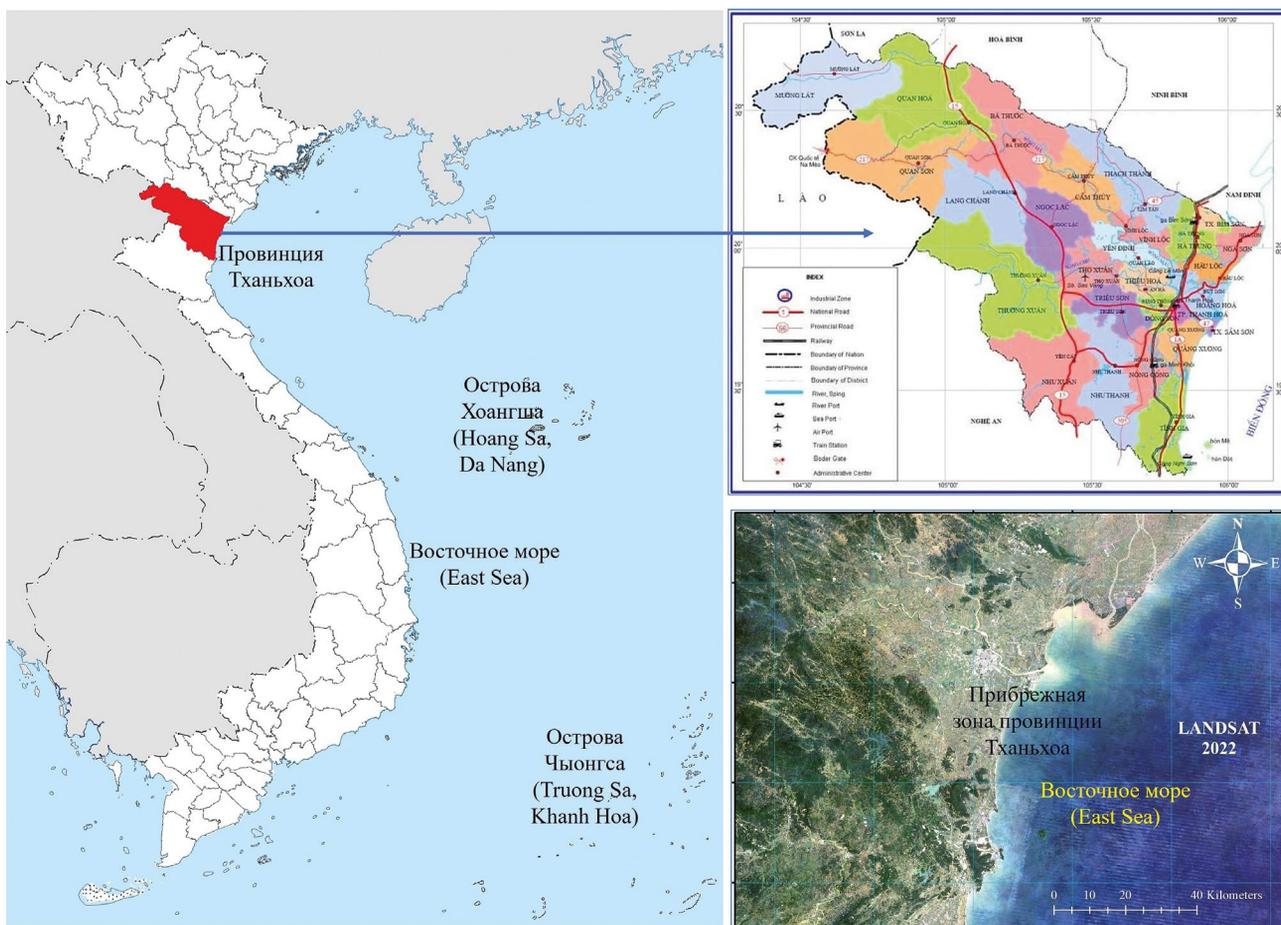


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории. Справа сверху – административная карта, внизу – Landsat изображение провинции Тханьхоа.

Таблица 1. Тип спутника LANDSAT и дата съемки

№	Спутник	Дата съемки
1	Landsat 5 TM	16 марта 1988
2	Landsat 5 TM	20 марта 1992
3	Landsat 5 TM	02 января 1996
4	Landsat 8 OLI_TIRS	01 апреля 2000
5	Landsat 8 OLI_TIRS	20 марта 2004
6	Landsat 8 OLI_TIRS	13 февраля 2009
7	Landsat 8 OLI_TIRS	15 февраля 2014
8	Landsat 8 OLI_TIRS	10 февраля 2018
9	Landsat 8 OLI_TIRS	08 апреля 2022

GEE – облачная платформа для геопространственного анализа, которая позволяет пользователям напрямую обрабатывать данные с помощью инструмента Code Editor без загрузки на персональный компьютер. В базе данных GEE находятся

изображения, собранные за последние 40 лет со спутников дистанционного зондирования Landsat, MODIS, Sentinel. Работа с данными дистанционного зондирования на платформе GEE весьма удобна и позволяет экономить время и усилия при обработке изображений.

Для классификации водной поверхности использовались водные индексы NDWI, MNDWI, ANDWI, AWEI_{sh}, AWEI_{nh} и BandWet. Индекс NDWI рассчитывался в соответствии со следующей формулой (Gao, 1996):

$$NDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{GREEN} + \rho_{SWIR1}}, \quad (1)$$

где ρ_{GREEN} , ρ_{SWIR1} – значения коэффициента отражения в зеленом и коротковолновом инфракрасном (SWIR₁) каналах мультиспектрального изображения Landsat. Для изображения Landsat TM эти спектральные каналы соответствуют каналу 2 (зеленый) и каналу 5 (SWIR₁), а для изображения Landsat 8/9 эти каналы соответствуют каналу 3 (зеленый) и каналу 6 (SWIR₁).

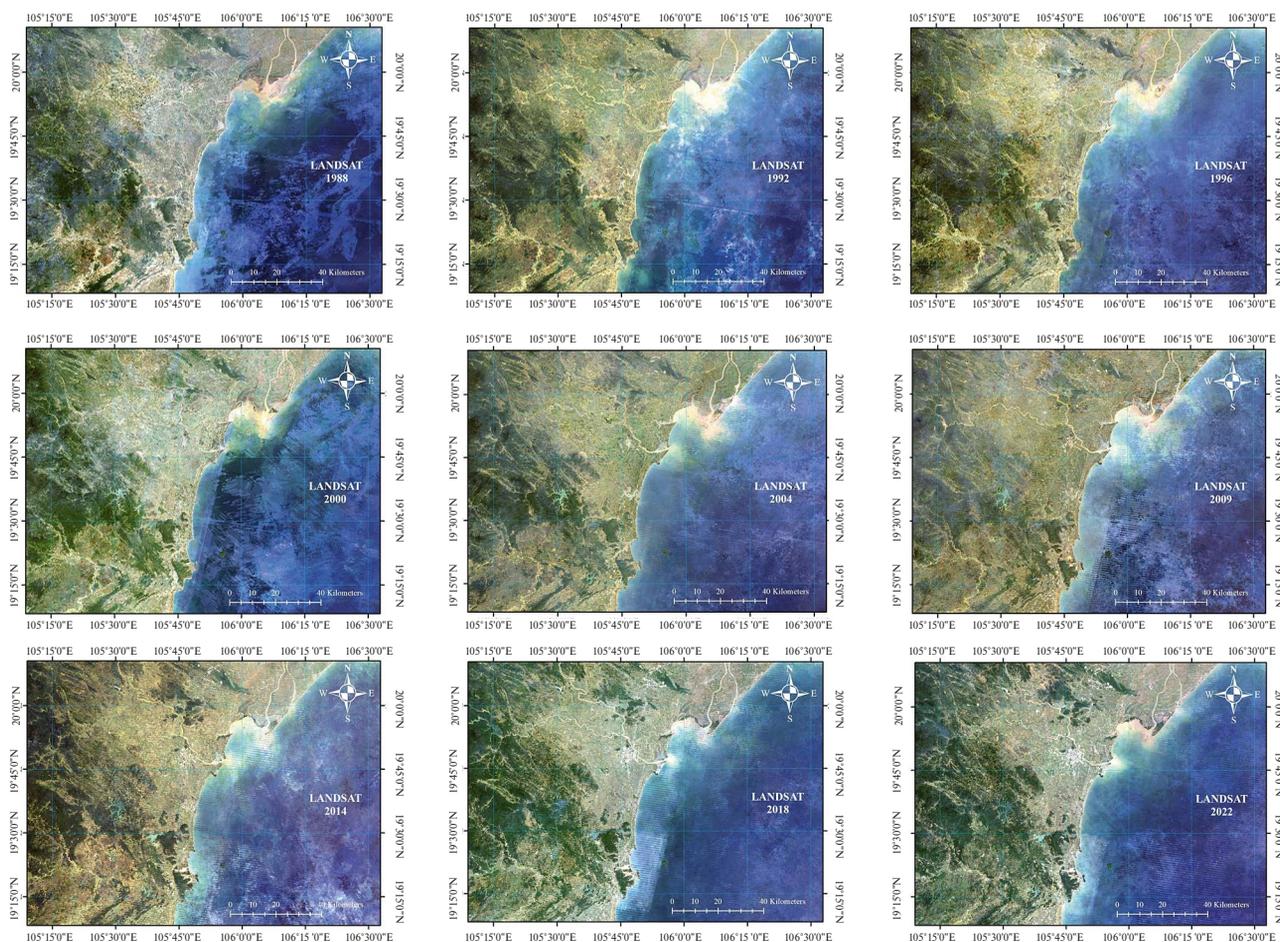


Рис. 2. Мультизональные изображения Landsat исследуемой территории, полученные за период 1988–2022 гг.

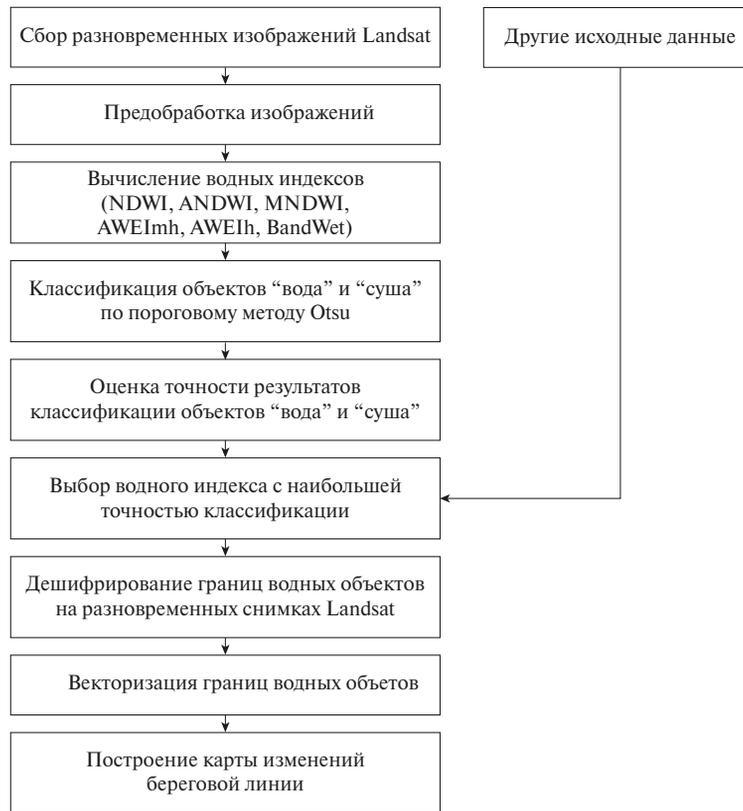


Рис. 3. Блок-схема методики оценки изменений береговой линии по Landsat снимкам.

Модифицированный индекс NDWI (MNDWI) вычислялся по формуле (2), в которой использовалась спектральная отражательная способность в зеленом (GREEN) и коротковолновом инфракрасном (SWIR₁) каналах. Индекс MNDWI определяется по следующей формуле (Xu, 2006):

$$MNDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{GREEN} + \rho_{SWIR1}}. \quad (2)$$

Augmented Normalized Difference Water Index (ANDWI):

$$ANDWI = \frac{\rho_{BLUE} + \rho_{GREEN} + \rho_{RED} - \rho_{NIR} - \rho_{SWIR1} - \rho_{SWIR2}}{\rho_{BLUE} + \rho_{GREEN} + \rho_{RED} + \rho_{NIR} + \rho_{SWIR1} + \rho_{SWIR2}}, \quad (3)$$

Automated Water Extraction Index (AWEI):

$$AWEI_{sh} = \rho_{BLUE} + 2.5\rho_{GREEN} - 1.5(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}) - 0.25\rho_{SWIR2}, \quad (4)$$

$$AWEI_{nsh} = 4(\rho_{BLUE} - \rho_{SWIR1}) - 0.25\rho_{NIR} + 2.75\rho_{SWIR2}, \quad (5)$$

BandWet:

$$BandWet = \begin{cases} 1 & \text{если } MNDWI > NDWI \text{ или } MNDWI > EVI \text{ и } EVI < 0.1 \\ 0 & \text{если наоборот} \end{cases}, \quad (6)$$

где индекс EVI (Enhanced Vegetation Index) рассчитывается по формуле (7) (Huete et al., 2002):

Индексы ANDWI (Rad, 2021), AWEI_{sh}, AWEI_{nsh} (Feyisa, 2014) и BandWet (Zou, 2018) построены на основе использования спектральной отражательной способности в видимых (синий, зеленый, красный) и инфракрасных каналах (NIR, SWIR₁, SWIR₂) для увеличения контраста между водными и другими объектами. Индексы ANDWI, AWEI_{sh}, AWEI_{nsh} и BandWet вычисляются для изображений Landsat по следующим формулам:

$$EVI = \frac{2.5 \times (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + 6 \times \rho_{RED} - 7.5 \times \rho_{BLUE} + 1}. \quad (7)$$

На основе полученных водных индексов выполнялось обнаружение береговой кромки методом автоматического определения порога Otsu. Метод Otsu разделяет пиксели полутонового изображения на два класса – “водная поверхность” и “суша”, таким образом, чтобы внутриклассовая дисперсия была минимальной (Otsu, 1979).

Блок-схема методики оценки изменения береговой линии по Landsat снимкам представлена на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе спутниковых снимков Landsat 1988–2022 гг. были рассчитаны водные индексы NDWI, MNDWI, ANDWI, AWEI_{sh}, AWEI_{nsh} и BandWet, результаты представлены на рис. 4–9. На изображениях с индексам NDWI, MNDWI, ANDWI, AWEI_{sh} и AWEI_{nsh} водная поверхность представлена яркими белыми пикселями, территории суши представлена темным цветом. Наоборот, для водного индекса BandWet пиксели водной поверхности представлены темным цветом, объекты суши – белым цветом.

В табл. 2 показаны минимальные, максимальные и средневзвешенные значения водных ин-

дексов NDWI, MNDWI, ANDWI, AWEI_{sh}, AWEI_{nsh} и BandWet прибрежной зоны изучаемой территории. В табл. 3 показаны значения порога Otsu при дешифрировании водных и неводных объектов на основе разных индексов.

Оценка точности дешифрирования границы водной поверхности по индексам NDWI, MNDWI, ANDWI, AWEI_{sh}, AWEI_{nsh} и BandWet выполнялась на основе статистического индекса Каппа и общей точности классификации, результаты представлены в табл. 4. Для этого 217 пикселей водной поверхности и 190 пикселей суши были выбраны случайным образом. Общая точность классификации и индекс Каппа рассчитывались с помощью программного обеспечения платформы облачных вычислений GEE. Общая точность классификации рассчитывалась как отношение суммарного количества правильно отклассифицированных объектов (сумма диагональных элементов матрицы ошибок) к общему числу объектов выборки. Индекс ANDWI показал наибольшую точность при классификации водной поверхности, выраженную как в максимальном значении коэффициента Каппа (0.961), так и в общей точности классификации (0.921). Поэтому в дальнейшей обработке при картографировании изменения береговой линии использовался только водный индекс ANDWI.

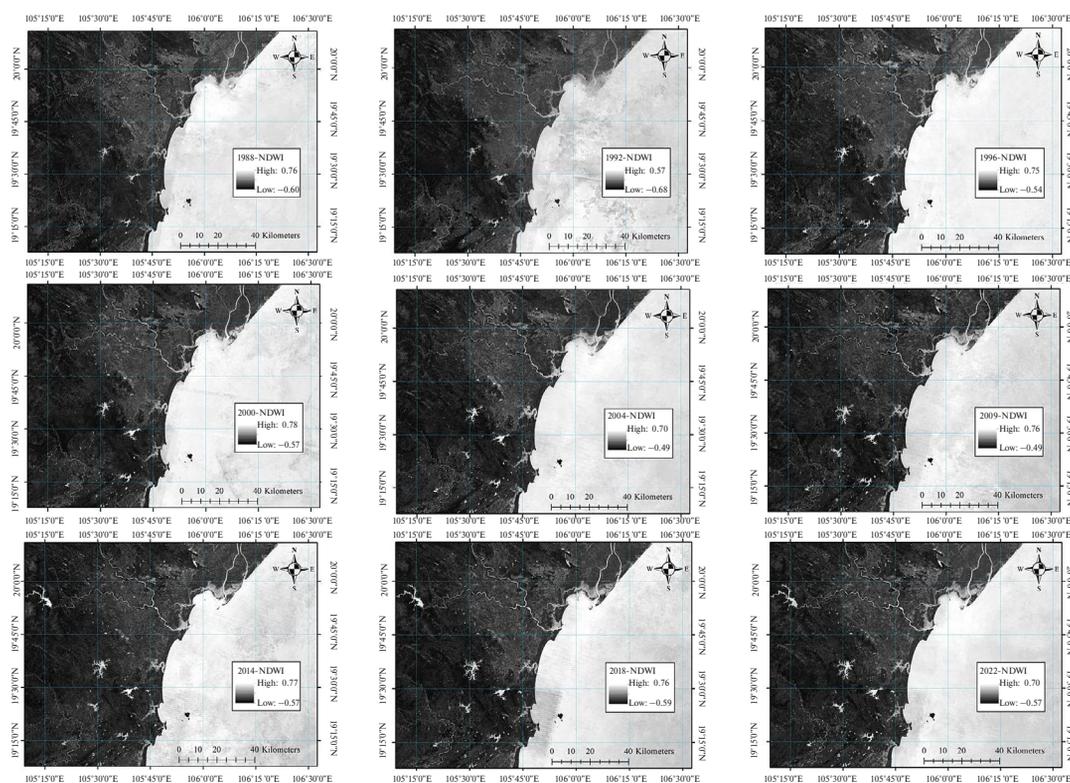


Рис. 4. Пространственное распределение индекса NDWI на исследуемой территории.

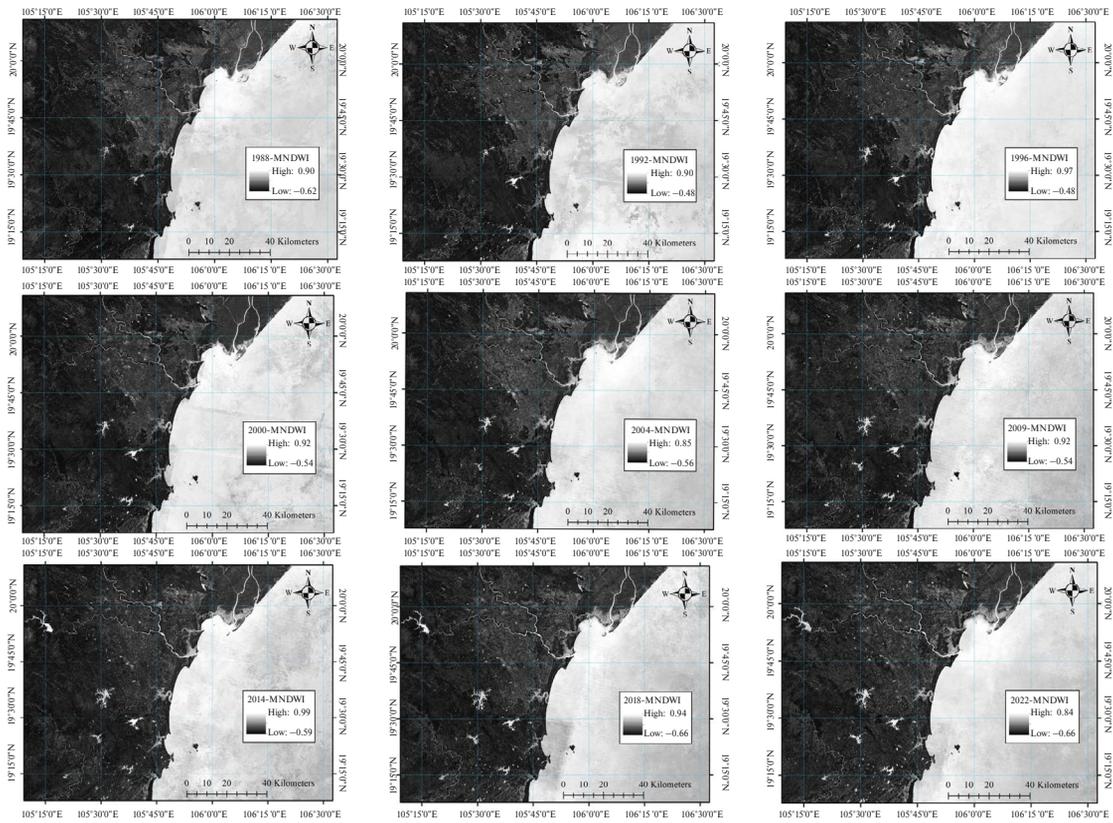


Рис. 5. Пространственное распределение индекса MNDWI на исследуемой территории.

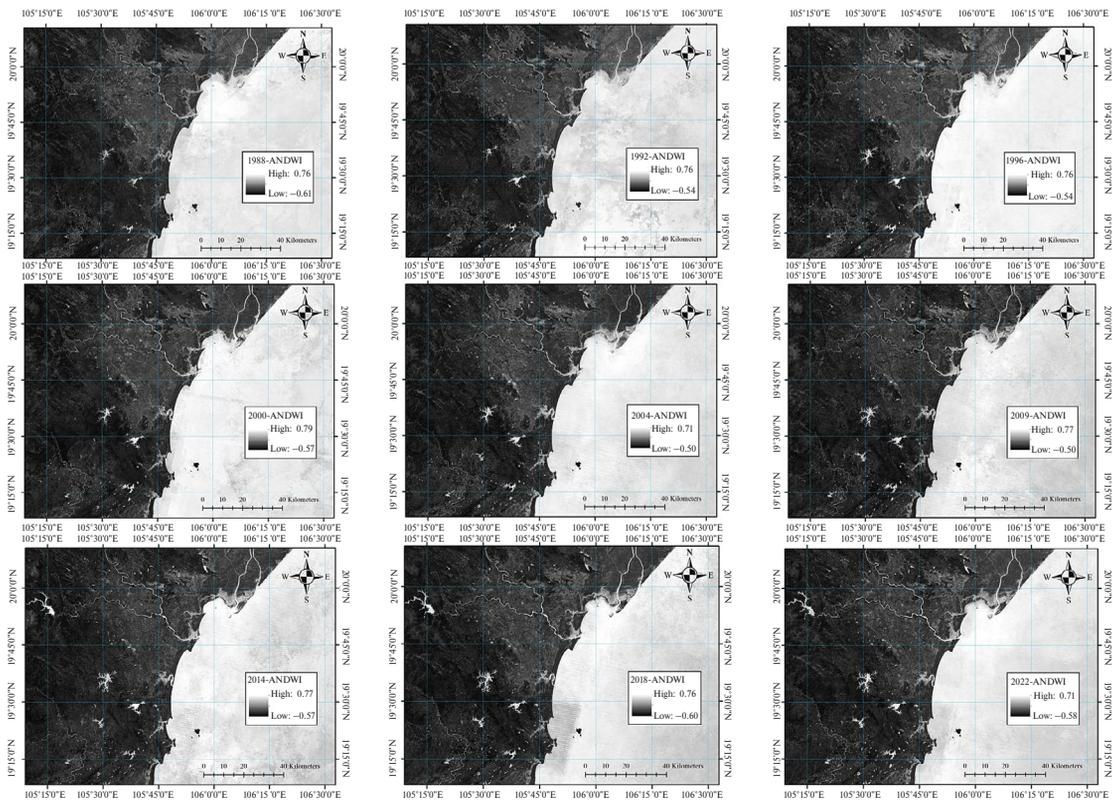


Рис. 6. Пространственное распределение индекса ANDWI на исследуемой территории.

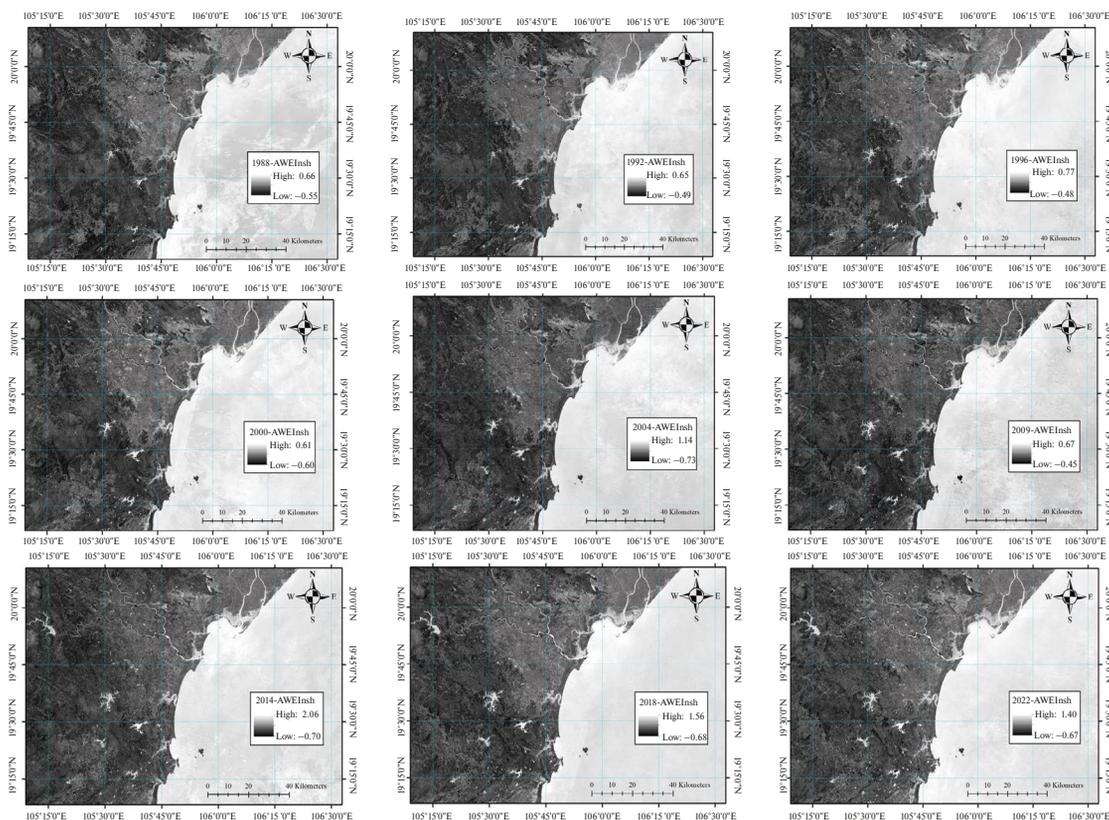


Рис. 7. Пространственное распределение индекса AWEI_{nsh} на исследуемой территории.

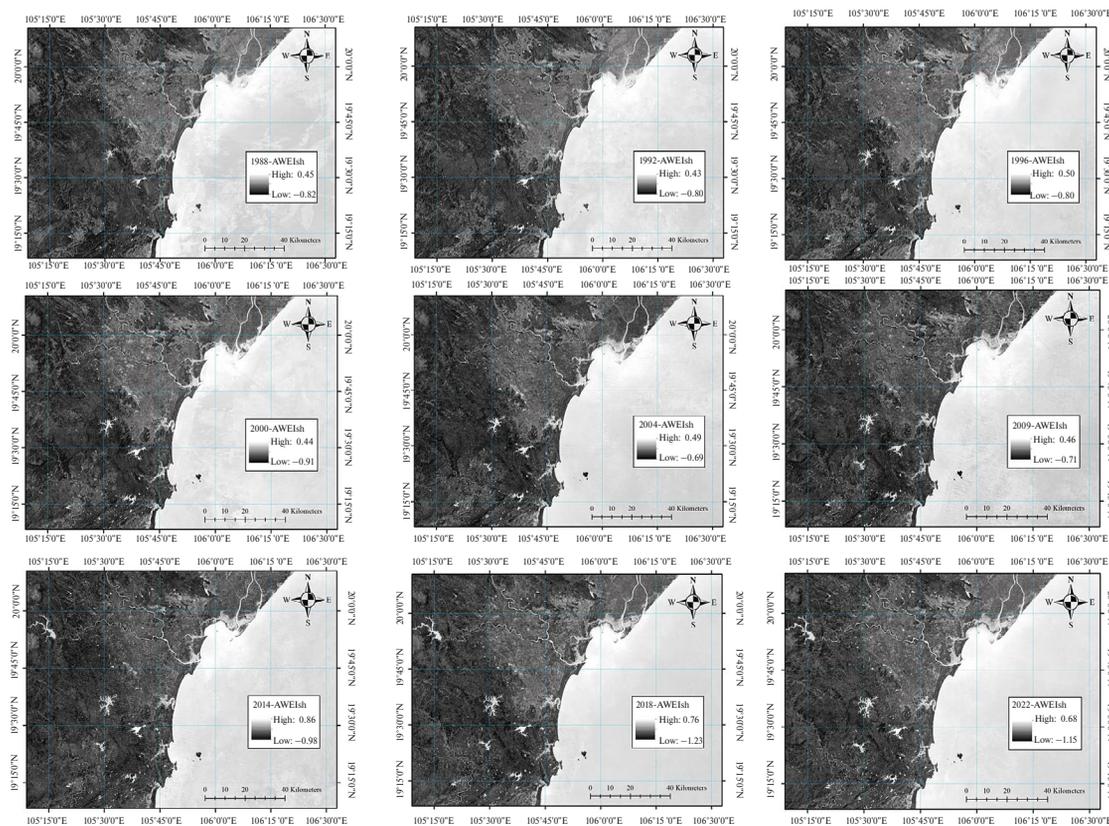


Рис. 8. Пространственное распределение индекса AWEI_{sh} на исследуемой территории.

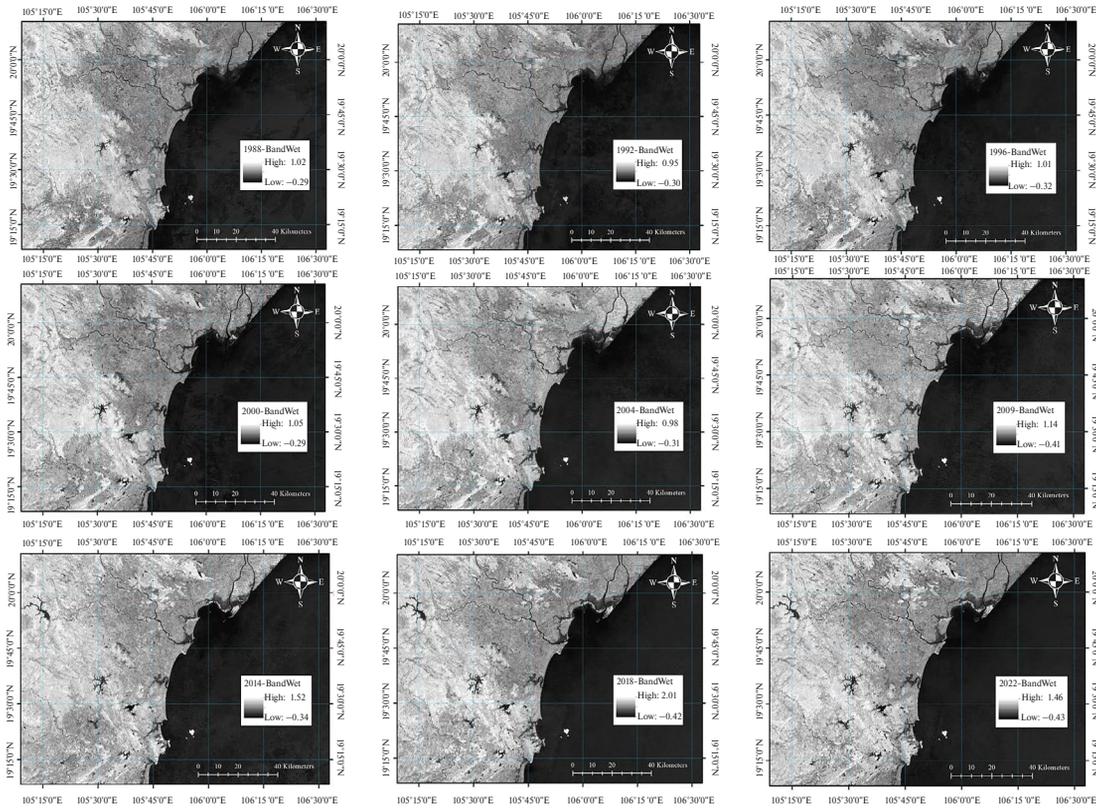


Рис. 9. Пространственное распределение индекса BandWet на исследуемой территории.

Таблица 2. Максимальные, минимальные и средневзвешенные значения водных индексов

Значение	Водный индекс					
	NDWI	MNDWI	ANDWI	AWEI _{sh}	AWEI _{nsh}	BandWet
Минимальное	-0.57	-0.42	-0.57	-1.14	-0.67	-0.42
Максимальное	0.70	0.81	0.70	0.67	1.39	6.46
Средневзвешенное	0.08	0.27	0.08	-0.07	0.18	0.28

Таблица 3. Пороговые значения Otsu для разных водных индексов

Дата съемки	Водный индекс					
	NDWI	MNDWI	ANDWI	AWEI _{sh}	AWEI _{nsh}	BandWet
16 марта 1988	-0.02	0.24	0.18	-0.02	0.20	0.18
20 марта 1992	-0.03	0.23	0.17	-0.01	0.22	0.18
02 января 1996	-0.01	0.26	0.20	0.01	0.22	0.16
01 апреля 2000	-0.01	0.23	0.18	-0.03	0.19	0.19
20 марта 2004	-0.05	0.21	0.17	0.00	0.24	0.19
13 февраля 2009	-0.04	0.21	0.17	0.00	0.24	0.20
15 февраля 2014	-0.07	0.16	0.13	-0.03	0.21	0.20
10 февраля 2018	-0.05	0.17	0.13	-0.05	0.18	0.23
08 апреля 2022	-0.08	0.15	0.11	-0.07	0.18	0.24

Таблица 4. Точность классификации водной поверхности по разным водным индексам

Водный индекс	NDWI	MNDWI	ANDWI	AWEI _{sh}	AWEI _{ns}	BandWet
Коэффициент Каппа	0.943	0.951	0.961	0.946	0.944	0.946
Общая точность	0.886	0.901	0.921	0.891	0.887	0.892

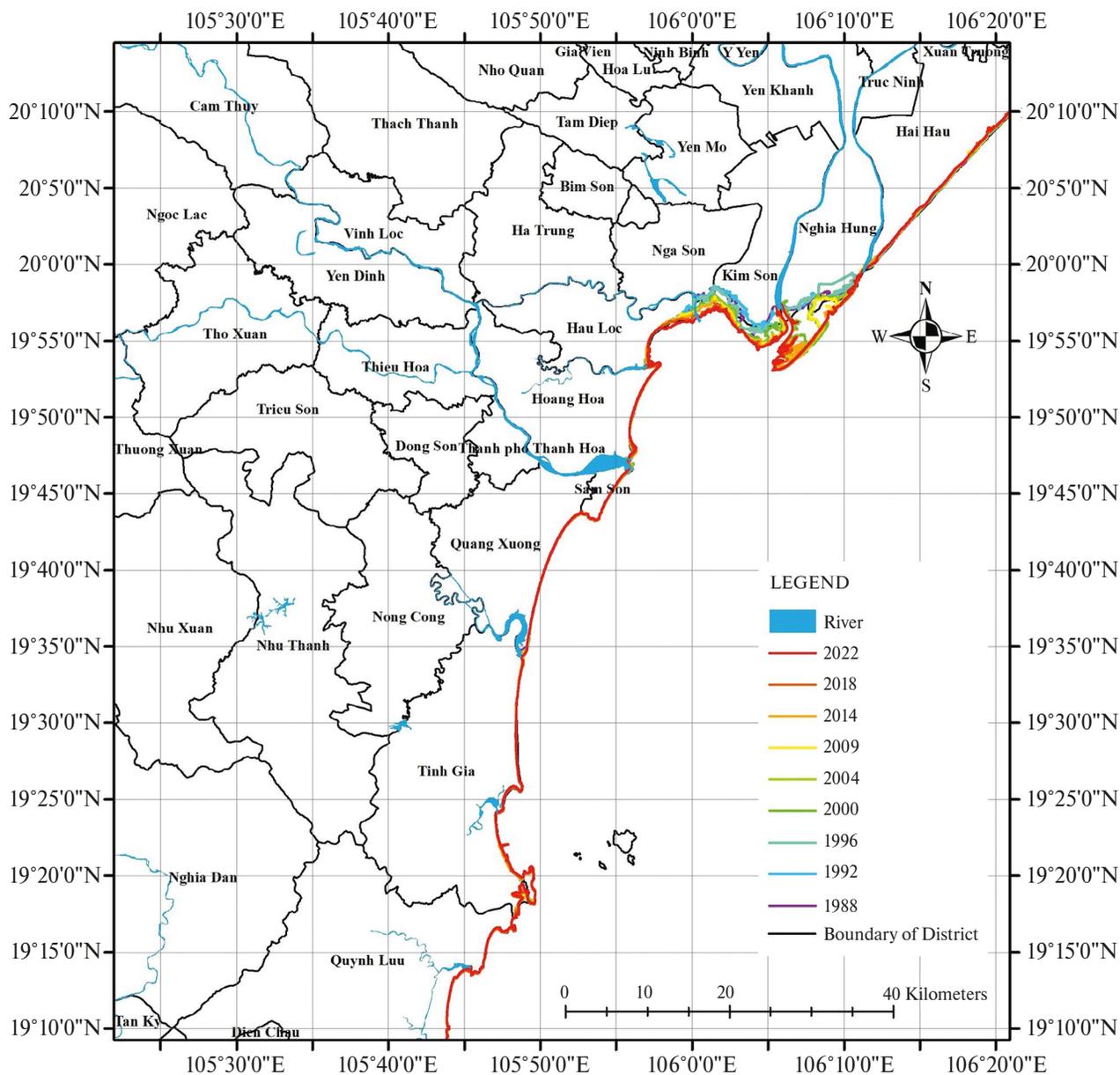


Рис. 10. Обзорная карта динамики береговой линии провинции Тханьхоа.

После разделения полутоновых изображений с индексом ANDWI по порогу Otsu выполнялась векторизация бинарных изображений с выделением береговых линий. На заключительном этапе обработки векторные изображения накладывались друг на друга для отображения динамики береговой линии. На рис. 10 показано изменение берего-

вой линии провинции Тханьхоа в разные годы в течение промежутка времени, начиная с 1988 г. по 2022 г. Как следует из рисунка, береговая линия на севере изучаемой провинции Тханьхоа претерпела большие изменения. На этой территории преобладающим фактором изменения береговой кромки была аккреция. В тоже время, в южной части про-

винции береговая линия подверглась значительно меньшим изменениям в виде эрозии, за исключением некоторых участков устья реки.

Детальная динамика береговой линии северной части провинции Тханьхоа

Прибрежная часть территории, граничащая с провинциями Ниньбинь и Намдинь, претерпела существенные изменения за рассматриваемый период. Общая протяженность поля аккреции составила 5.24 км, что соответствует площади 32.34 км². Наибольшая скорость прироста суши отмечена за

период с 1996 г. по 2000 г. и составляла 457.5 м/год. Средняя скорость аккреции составляла 150 м/год. Начиная с 2000 г. и по настоящее время береговая линия района Нгиа Хунг подвергается незначительной эрозии. Однако, в целом, на северной части побережья провинции Тханьхоа продолжается значительное накопление речных отложений, хотя скорость аккреции стала ниже, по сравнению с периодом 1988–2000 гг. (рис. 11). Значительная динамика береговой линии этой территории связана с тем, что здесь находится устье крупнейшей реки северного Вьетнама – реки Дэй.

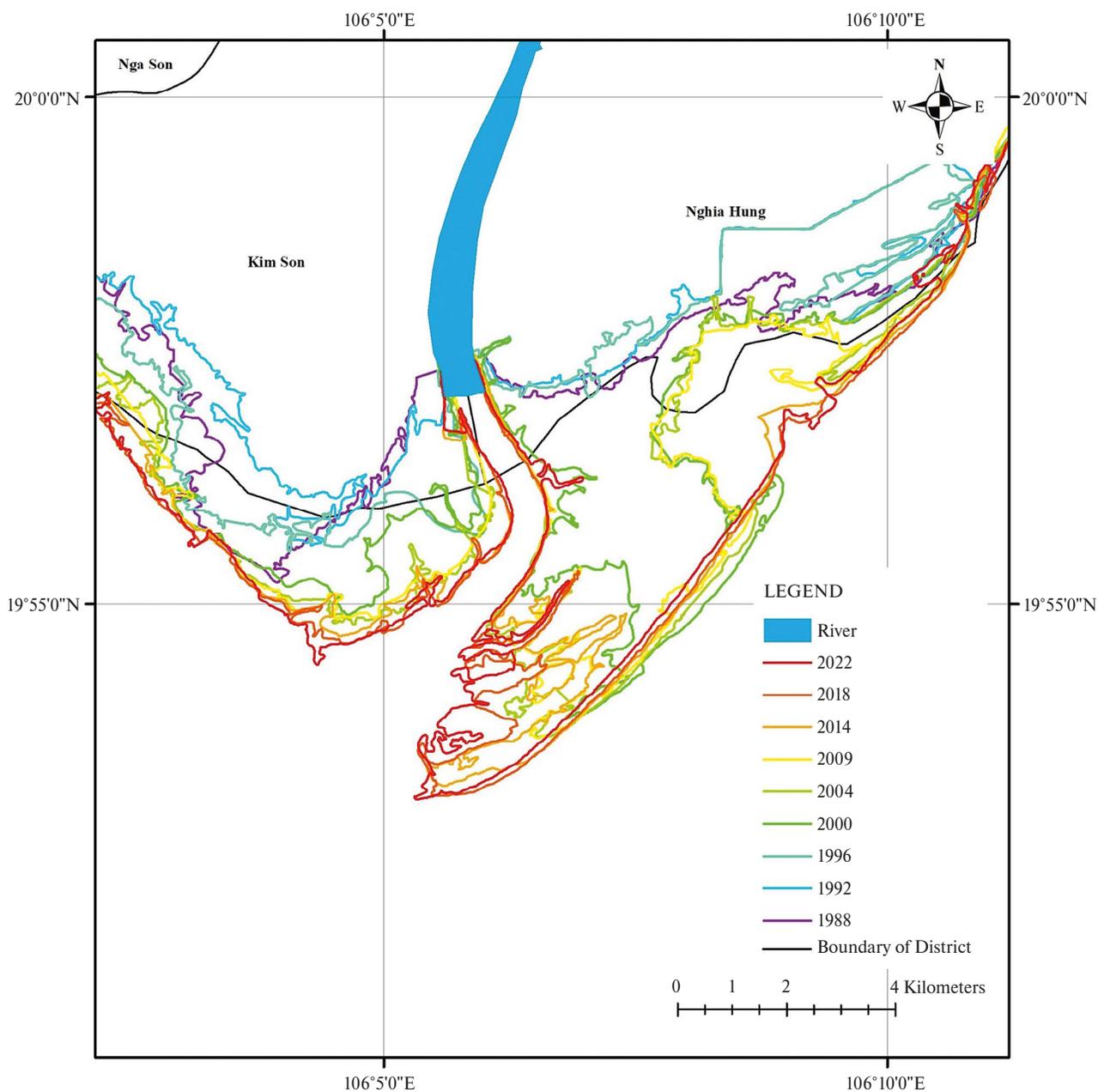


Рис. 11. Детальная карта изменения береговой линии северной части провинции Тханьхоа.

Детальная динамика береговой линии центральной части провинции Тханьхоа

Общая протяженность аккреционного побережья в районе Хоанг Хоа (Hoang Hoa) составляла 0.56 км, что дает среднюю за период с 1988 по 2022 г. скорость аккреции 16.5 м/год. В периоды 1992–1996 гг. и 2014–2018 гг. максимальная скорость аккреции достигала 120 м/год, средняя скорость аккреции равна 30 м/год (рис. 12).

Береговая линия в пределах черты города Сам Сон (Sam Son) в течение 1988–1996 гг. менялась медленно, в основном за счет приращения территории, а затем в период 1996–2022 гг. преобладала эрозия побережья со средней скоростью около 10 м/год.

Детальная динамика береговой линии южной части провинции Тханьхоа

В районе Куанг Сюонг (Quang Xuong) береговая линия увеличивалась в течение периода 1988–2004 гг. со скоростью 21.3 м/год и достигла общей

протяженности 0.34 км. Далее с 2004 г. по 2009 г. прибрежная зона подвергалась медленной эрозии. Затем, с 2009 по 2022 г., снова береговая линия в этом районе начала захватывать морскую территорию со средней скоростью 7.7 м/год (рис. 13).

В сельскохозяйственной коммуне Куанг Хай процесс эрозии береговой линии сменялись процессом аккреции и снова эрозии береговой кромки. Так, в период с 1988 г. по 1992 г., береговая линия размывалась со средней скоростью 7.5 м/год. Начиная с 1992 г. по 1995 г. имела место аккреция и протяженность береговой линии увеличилась до 110 м (что в среднем составляет 27.5 м/год). Далее, в течение периода 1996–2000 гг. вновь происходила эрозия со средней скоростью 20 м/год. За период с 2000 г. по 2009 г. протяженность поля аккреции достигла 0.32 км, что соответствует средней скорости более чем 35 м/год. Однако начиная с 2009 г. по настоящее время в этом районе наблюдается максимальная эрозия со средней скоростью более 30 м/год.

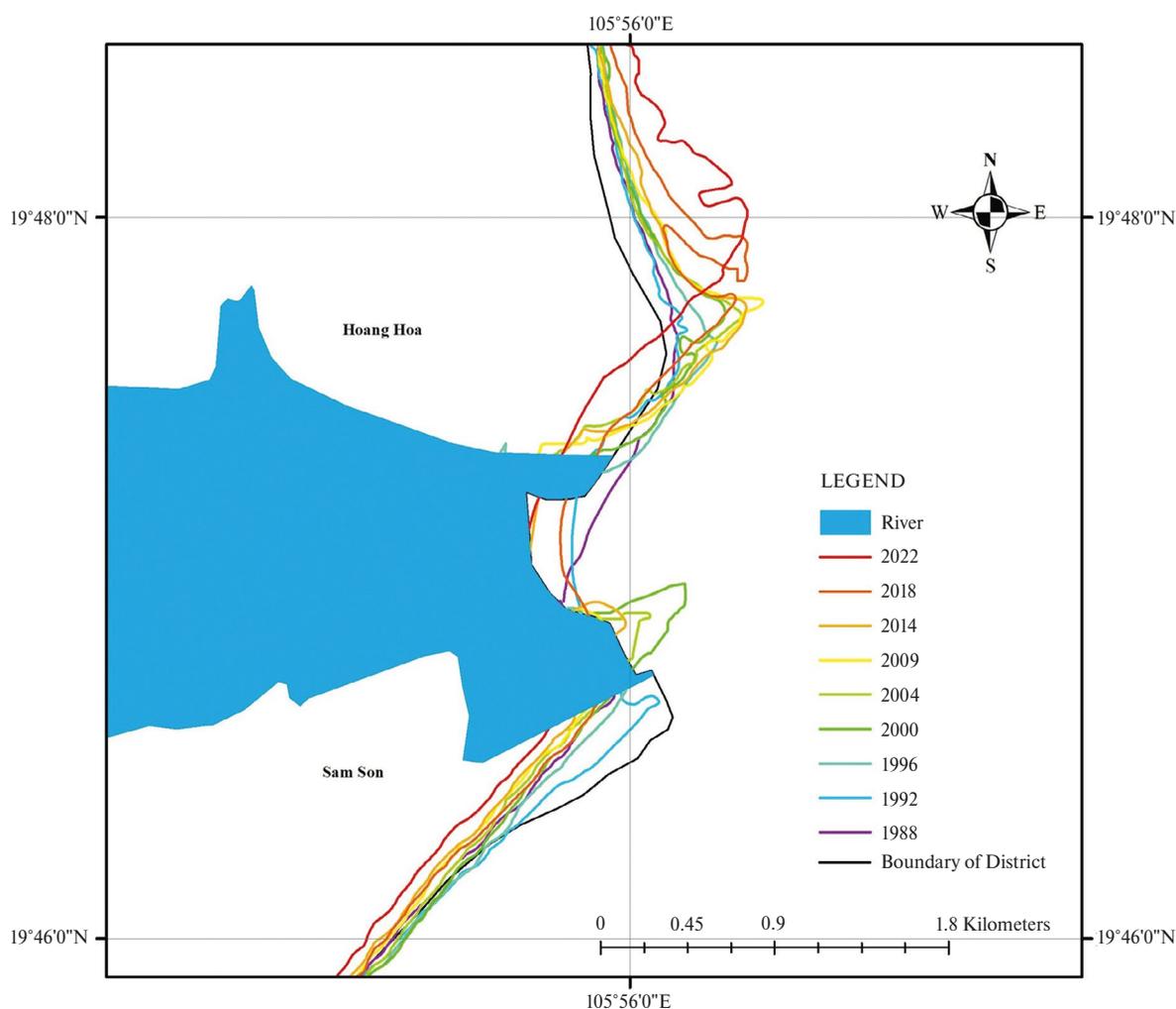


Рис. 12. Детальная карта изменения береговой линии центральной части провинции Тханьхоа.

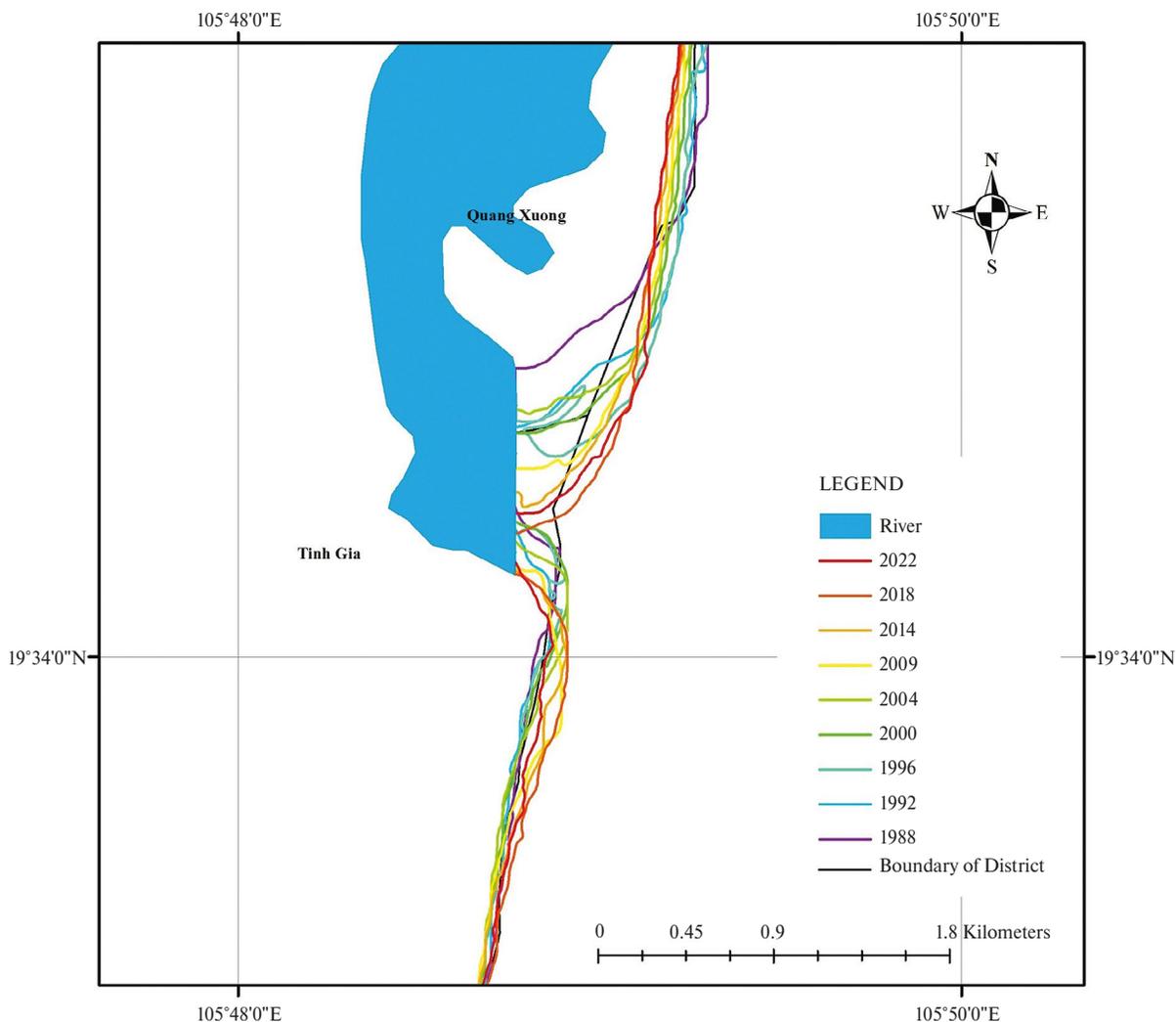


Рис. 13. Детальная карта изменения береговой линии южной части провинции Тханьхоа.

В целом на южном побережье провинции Тханьхоа за исследуемый период преобладала эрозия береговой линии с максимальной скоростью 38 м/год и средней скоростью около 10 м/год.

ВЫВОДЫ

Получена динамика изменения береговой линии провинции Тханьхоа (северо-центральный Вьетнам) за более чем тридцатилетний период (1988 – 2022 гг.) с помощью спутниковых снимков Landsat 5 TM и Landsat 8 OLI_TIRS. Шесть водных индексов, включая NDWI, MNDWI, ANDWI, AWEI_{sh}, AWEI_{nsh} и BandWet, сравнивались для оценки возможности дешифрирования береговой линии на основе метода порога Otsu. Точность классификации водной поверхности по индексам оценивалась с помощью коэффициента Каппа и общей точности классификации, что позволило выбрать индекс ANDWI, как имеющий наибольшую точность.

Выполнена векторизация береговых линий на бинаризованных по порогу Otsu изображениях ANDWI. Границы береговых линий накладывались друг на друга, в результате получены обзорная и детальные карты динамики береговой линии провинции Тханьхоа. Анализ полученных результатов показал, что береговая линия претерпела сильное изменение за период 1988-2022 гг., в ходе развития таких процессов, как аккреция и эрозия. Аккреция береговой линии активно происходила в северной прибрежной зоне провинции, особенно в тех участках, где река Дэй впадает в Восточное море. Максимальная скорость аккреции на этом участке и достигала 457 м/год. С другой стороны, южный прибрежный район провинции подвергается эрозии с максимальной скоростью 38 м/год и средней скоростью около 10 м/год.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что дистанционное зондирование из космоса дает возможность на детальном уровне отслеживать

динамику береговой линии в течение многолетних промежутков времени, анализировать тренды развития приморских территорий и, как следствие этого, минимизировать ущерб, вызываемый изменениями береговой линии.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках научного проекта: “Применение дистанционного зондирования и ГИС-технологий в изучении изменения береговой линии провинции Тханьхоа за период 2000–2023 гг.”, код: T2023-03-04TD. Авторы благодарят Вьетнамскую сельскохозяйственную академию (VNUA – Vietnam National University of Agriculture) за финансирование проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 21–35. DOI: 10.7868/S0205961415060032.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линейного анализа космических изображений // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Acar U., Bayram B., Sanli B., Abdikan S., Sunar F., Cetin H.* An algorithm for coastline detection using SAR images // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. Vol. XXXIX-B3. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- Acharya T., Subedi A., Lee D.* Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal // Sensors. 2018a. 18(8):2580. DOI:10.3390/s18082580.
- Acharya T., Subedi A., Yang I., Lee D.* Combining water indices for water and background threshold in Landsat image // Proceedings. 2018b. V. 2(3). P. 143. <https://doi.org/10.3390/ecs4-4-04902>.
- Alesheikh A., Ghorbanali A., Nouri A.* Coastline change detection using remote sensing // International Journal of Environmental Science and Technology. 2007. V. 4(1). P. 61–66.
- Baghermanesh S.S., Jabari S., McGrath H.* Urban flood detection using TerraSAR-X and SAR simulated reflectivity maps // Remote Sensing. 2022. V. 14. 6154. <https://doi.org/10.3390/rs14236154>.
- Cuong N.Q., Cu N.V.* Intergrated coastal management in Vietnam: current situation and orientation // Journal of Marine Science and Technology. 2014. V. 1491. P. 89–96.
- Ding J., Cuo L., Zhang Y., Zhu F.* Monthly and annual temperature extremes and their changes on the Tibetan Plateau and its surroundings during 1963–2015 // Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 1–23.
- Duong T.L., Dang V.K., Dao N.H., Nguyen T.D., Dinh X.V., Weber C.* Monitoring of coastline change using Sentinel-2A and Landsat 8 data, a case study of Cam Pha city - Quang Ninh province // Vietnam Journal of Earth Sciences. 2021. V. 43(3). P. 249–272. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16066>.
- Feyisa G., Meiby H., Fensholt R., Proud S.* Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 140. P. 23–35.
- Frazier P.S., Page K.J.* Water body detection and delineation with Landsat TM data // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2000. V. 66. P. 1461–1467.
- Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. P. 257–266.
- Hassani M., Chabou M.C., Hamoudi M., Guettouche M.S.* Index of extraction of water surfaces from Landsat 7 ETM+ images // Arabian Journal of Geosciences. 2015. V. 8. P. 3381–3389.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E., Gao X., Ferreira L.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. P. 195–213. DOI:10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- Laonamsai J., Julphunthong P., Saprathet T., Kimmany B., Ganchanasuragit T., Chomcheawchan P., Tomun N.* Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for estimating erosion and deposition in Ping River in Thailand // Hydrology. 2023. 10(3):70. <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>.
- Liu H., Hu H., Liu X., Jiang H., Liu W., Yin X.* A comparison of different water indices and band downscaling methods for water bodies mapping from Sentinel-2 imagery at 10m resolution // Water. 2022. V. 14. 2696. <https://doi.org/10.3390/w14172696>.
- 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. V. 17(7). P. 1425–1432. DOI:10.1080/01431169608948714.
- Mustafa M., Hassoon K., Hussain H., Modher H. Abd.* Using water indices (NDWI, MNDWI, WRI and AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and GIS techniques // International Journal of Research – Granthalayah. 2017. V. 5(10). P. 117–128.
- Nguyen C.Q., Pham V.H.* Characteristics of dynamic geomorphology of coastal-river mouth zones of Ma river, Thanh Hoa province // Vietnam Journal of Earth Sciences. 2016. V. 38(1). P. 59–65.
- Otsu N.* A threshold selection method from gray level histogram // IEEE Trans. systems, Man, and Cybernetics. 1979. V. 9. P. 62–66.
- Paz-Delgado M.V., Payo A., Gómez-Pazo A., Beck A.L., Savastano S.* Shoreline change from optical and Sar satellite imagery at Macro-Tidal estuarine, Clifed open-coast and Gravel Pocket-beach // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. V. 10. P. 561. <https://doi.org/10.3390/jmse10050561>.
- Rad A.M., Kreitler J., Sadegh M.* Augmented Normalized Difference Water Index for improved surface water monitoring // Environmental Modelling and Software. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105030>.
- Sarp G., Ozcelik M.* Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey // Journal of Taibah University for Science. 2017. V. 11(3). P. 381–391.
- Serban C., Maftai C., Dobrica G.* Surface water change detection via water indices and predictive modeling using remote sensing imagery: A case study of Nuntasi-Tuzla Lake, Romania // Water. 2022. V. 14. 556. <https://doi.org/10.3390/w14040556>.
- Shen L., Li C.* Water Body Extraction from Landsat ETM+ imagery using adaboost algorithm // In Proceedings of the 18th International Conference on Geoinformatics. 2010. Beijing, China, 18–20 June 2010. P. 1–4.
- Tran V.T., Doan H.P.* Applying remote sensing and GIS for study change in coastal areas of Ca Mau cape // Vietnam Hydrometeorology Journal. 2017. V. 12. P. 35–40. (In Vietnamese).

- Trinh L.H., Le T.G., Kieu V.H., Tran T.M.L., Nguyen T.T.N.* Application of remote sensing technique for shoreline change detection in Ninh Binh and Nam Dinh provinces (Vietnam) during the period 1988 to 2018 based on water indices // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. V. 20(2). ES2004. P. 15. DOI: 10.2205/2020ES000686.
- Trinh L.H., Andrade E.R.M., Pham T.A.* Application of remote sensing to extract flood areas using ENVISAT ASAR data // *Вестник ОрелГАУ*. 2015. № 1(52). С. 36–42.
- Trung N.V., Khanh N.V.* Monitoring coastline changes using Landsat multi-temporal data in the Cua Dai estuary, Thu Bon River, Quang Nam // *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2016. V. 57. P. 81–89. (In Vietnamese).
- Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. V. 27(14). P. 3025–3033.
- Wang X., Xie S., Zhang X., Chen C., Guo H., Du J., Duan Z.* A robust multi-band water index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. V. 68. P. 73–91.
- Winasro G., Budhiman S.* The potential application of remote sensing data for coastal study // *Proc. 22nd, Asian Conference on Remote sensing*. 2001. Singapore. P. 5.
- Wu H., Song H., Huang J., Zhong H., Zhan R., Teng X., Qiu Z., He M., Cao J.* Flood detection in dual-polarization SAR images based on multi-scale deeplab model // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. 5181. <https://doi.org/10.3390/rs14205181>.
- Yan P., Zhang Y.* A study on information extraction of water system in semi-arid regions with the Enhanced Water Index (EWI) and GIS based noise remove techniques // *Remote Sensing Information*. 2007. V. 6. P. 62–67.
- Yang Y., Liu Y., Zhou M., Zhang S., Zhan W., Sun C., Duan Y.* Landsat 8 OLI image based terrestrial water extraction from heterogeneous backgrounds using a reflectance homogenization approach // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 171. P. 14–32. DOI:10.1016/j.rse.2015.10.005.
- Zou Z., Xiao X., Dong J., Qin Y., Doughty R.B., Menarguez M.A., Wang J.* Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016 // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. V. 115(15). P. 3810–3815. <https://doi.org/10.1073/pnas.1719275115>.

Long-term Coastline Monitoring in the Thanh Hoa Province (Vietnam) Using Landsat 5 and Landsat 8 Data

Thi Giang Le¹, Le Hung Trinh², V. R. Zablotskii³, Quoc Vinh Tran¹, Xuan Bien Tran⁴, Thi Phuong To⁵, Van Phu Le², Van Tho Le⁶

¹*Vietnam National University of Agriculture, Gia Lam, Hanoi, Vietnam*

²*Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam*

³*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia*

⁴*Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam*

⁵*Thanh Dong University, Hai Duong province, Vietnam*

⁶*Thai Nguyen University of Agriculture and Forestry, Thai Nguyen, Vietnam*

In recent years, extensive human activities have had a profound impact on the estuaries and coastal areas of Vietnam, most notably in coastal erosion and accretion. This paper used the Landsat multi-temporal data for the period 1988–2022 to assess coastline change in Thanh Hoa province (North Central Vietnam). Water indices calculated from Landsat imagery data, including NDWI, ANDWI, MNDWI, AWEInsh, AWEIsh, and BandWet, are used to extract surface water areas and then vectorize and overlay to estimate shoreline variability. The Otsu thresholding method is used to classify “water surface” and “land objects” and then evaluate the accuracy using the Kappa coefficient. The obtained results show that the ANDWI index has the highest accuracy in extracting the water body of the study area, in which the value of the Kappa coefficient reaches 0.95 compared to 0.91, 0.92, 0.93, 0.92 and 0.92 at using NDWI, MNDWI, AWEInsh, AWEIsh and BandWet indices. Boundary vectorization and vector image overlays were performed to assess shoreline variability and map shoreline dynamics. The results obtained show that in the northern part of the coastal zone of Thanh Hoa province there is active accretion (increment) of the coastline. The average accretion rate was 150 m/year, the maximum rate was 457 m/year. In contrast, on the southern coast of Thanh Hoa province, coastline erosion predominates with a maximum rate of 38 m/year and an average rate of about 10 m/year.

Keywords: coastal changes, remote sensing, Landsat, water index, Thanh Hoa province

REFERENCES

- Bondur V.G.* Kosmicheskij monitoring emissij malyh gazovyh komponent i aerozolej pri prirodnyh pozharah v Rossii // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2015. № 6. P. 21–35. DOI: 10.7868/S0205961415060032.
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Metod prognozirovaniya zemletryasenij na osnove lineamentnogo analiza kosmicheskikh izobrazhenij // *Doklady Akademii nauk*. 2005. V. 402. № 1. P. 98–105.
- Acar U., Bayram B., Sanli B., Abdikan S., Sunar F., Cetin H.* An algorithm for coastline detection using SAR images // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. Vol. XXXIX-B3. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- Acharya T., Subedi A., Lee D.* Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal // *Sensors*. 2018a. 18(8):2580. DOI:10.3390/s18082580.
- Acharya T., Subedi A., Yang I., Lee D.* Combining water indices for water and background threshold in Landsat image // *Proceedings*. 2018b. V. 2(3). P.143. <https://doi.org/10.3390/ecs-a-4-04902>.
- Alesheikh A., Ghorbanali A., Nouri A.* Coastline change detection using remote sensing // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2007. V. 4(1). P. 61–66.
- Baghermanesh S.S., Jabari S., McGrath H.* Urban flood detection using TerraSAR-X and SAR simulated reflectivity maps // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. 6154. <https://doi.org/10.3390/rs14236154>.
- Cuong N.Q., Cu N.V.* Intergrated coastal management in Vietnam: current situation and orientation // *Journal of Marine Science and Technology*. 2014. V. 1491. P. 89–96.
- Ding J., Cuo L., Zhang Y., Zhu F.* Monthly and annual temperature extremes and their changes on the Tibetan Plateau and its surroundings during 1963–2015 // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. P. 1–23.
- Duong T.L., Dang V.K., Dao N.H., Nguyen T.D., Dinh X.V., Weber C.* Monitoring of coastline change using Sentinel-2A and Landsat 8 data, a case study of Cam Pha city – Quang Ninh province // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 2021. V. 43(3). P. 249–272. <https://doi.org/10.15625/2615-9783/16066>.
- Feyisa G., Meiby H., Fensholt R., Proud S.* Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 140. P. 23–35.
- Frazier P.S., Page K.J.* Water body detection and delineation with Landsat TM data // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2000. V. 66. P. 1461–1467.
- Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 58. P. 257–266.
- Hassani M., Chabou M.C., Hamoudi M., Guettouche M.S.* Index of extraction of water surfaces from Landsat 7 ETM+ images // *Arabian Journal of Geosciences*. 2015. V. 8. P. 3381–3389.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E., Gao X., Ferreira L.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. P. 195–213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- Laonamsai J., Julphunthong P., Sapratthet T., Kimmany B., Ganchanasuragit T., Chomcheawchan P., Tomun N.* Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for estimating erosion and deposition in Ping River in Thailand // *Hydrology*. 2023. 10(3):70. <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>.
- Liu H., Hu H., Liu X., Jiang H., Liu W., Yin X.* A comparison of different water indices and band downscaling methods for water bodies mapping from Sentinel-2 imagery at 10m resolution // *Water*. 2022. V. 14. 2696. <https://doi.org/10.3390/w14172696>.
- 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. V. 17(7). P. 1425–1432. DOI:10.1080/01431169608948714.
- Mustafa M., Hassoon K., Hussain H., Modher H. Abd.* Using water indices (NDWI, MNDWI, WRI and AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and GIS techniques // *International Journal of Research – Granthalayah*. 2017. V. 5(10). P. 117–128.
- Nguyen C.Q., Pham V.H.* Characteristics of dynamic geomorphology of coastal-river mouth zones of Ma river, Thanh Hoa province // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. 2016. V. 38(1). P. 59–65.
- Otsu N.* A threshold selection method from gray level histogram // *IEEE Trans. systems. Man. and Cybernetics*. 1979. V. 9. P. 62–66.
- Paz-Delgado M.V., Payo A., Gómez-Pazo A., Beck A.L., Savastano S.* Shoreline change from optical and Sar satellite imagery at Macro-Tidal estuarine, Clifed open-coast and Gravel Pocket-beach // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. V. 10. P. 561. <https://doi.org/10.3390/jmse10050561>.
- Rad A.M., Kreitler J., Sadegh M.* Augmented Normalized Difference Water Index for improved surface water monitoring // *Environmental Modelling and Software*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105030>.
- Sarp G., Ozelcik M.* Water body extraction and change detection using time series: A case study of Lake Burdur, Turkey // *Journal of Taibah University for Science*. 2017. V. 11(3). P. 381–391.
- Serban C., Maftei C., Dobrica G.* Surface water change detection via water indices and predictive modeling using remote sensing imagery: A case study of Nuntasi-Tuzla Lake, Romania // *Water*. 2022. V. 14. 556. <https://doi.org/10.3390/w14040556>.
- Shen L., Li C.* Water Body Extraction from Landsat ETM+ imagery using adaboost algorithm // *In Proceedings of the 18th International Conference on Geoinformatics*. 2010. Beijing, China, 18–20 June 2010. P. 1–4.
- Tran V.T., Doan H.P.* Applying remote sensing and GIS for study change in coastal areas of Ca Mau cape // *Vietnam Hydrometeorology Journal*. 2017. V. 12. P. 35–40. (In Vietnamese).
- Trinh L.H., Le T.G., Kieu V.H., Tran T.M.L., Nguyen T.T.N.* Application of remote sensing technique for shoreline change detection in Ninh Binh and Nam Dinh provinces (Vietnam) during the period 1988 to 2018 based on water indices // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2020. V. 20(2). ES2004. P. 15. DOI: 10.2205/2020ES000686.

- Trinh L.H., Andrade E.R.M., Pham T.A.* Application of remote sensing to extract flood areas using ENVISAT ASAR data // Journal of Sciences, Orel State Agrarian University. 2015. V. 1(52). P. 36–42.
- Trung N.V., Khanh N.V.* Monitoring coastline changes using Landsat multi-temporal data in the Cua Dai estuary, Thu Bon River, Quang Nam // Journal of Mining and Earth Sciences. 2016. V. 57. P. 81–89. (In Vietnamese).
- Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. V. 27(14). P. 3025–3033.
- Wang X., Xie S., Zhang X., Chen C., Guo H., Du J., Duan Z.* A robust multi-band water index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. V. 68. P. 73–91.
- Winasro G., Budhiman S.* The potential application of remote sensing data for coastal study // Proc. 22nd, Asian Conference on Remote sensing. 2001. Singapore. P. 5.
- Wu H., Song H., Huang J., Zhong H., Zhan R., Teng X., Qiu Z., He M., Cao J.* Flood detection in dual-polarization SAR images based on multi-scale deeplab model // Remote Sensing. 2022. V. 14. 5181. <https://doi.org/10.3390/rs14205181>.
- Yan P., Zhang Y.* A study on information extraction of water system in semi-arid regions with the Enhanced Water Index (EWI) and GIS based noise remove techniques // Remote Sensing Information. 2007. V. 6. P. 62–67.
- Yang Y., Liu Y., Zhou M., Zhang S., Zhan W., Sun C., Duan Y.* Landsat 8 OLI image based terrestrial water extraction from heterogeneous backgrounds using a reflectance homogenization approach // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 171. P. 14–32. DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.005.
- Zou Z., Xiao X., Dong J., Qin Y., Doughty R.B., Menarguez M.A., Wang J.* Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016 // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. V. 115(15). P. 3810–3815. <https://doi.org/10.1073/pnas.1719275115>.