

На правах рукописи



САФИТРИ ДИКА АЮ

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ
ПОБЕРЕЖЬЯ СУРАБАИ (ИНДОНЕЗИЯ)**

Специальность – 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Ростов-на-Дону – 2025

Работа выполнена на кафедре океанологии Института наук о Земле
Южного федерального университета

Научный руководитель:	Беспалова Людмила Александровна, доктор географических наук, доцент, профессор кафедры океанологии, Южный федеральный университет
Официальные оппоненты:	Макаров Константин Николаевич, доктор технических наук, профессор, Сочинский государственный университет, профессор Епринцев Сергей Александрович, кандидат географических наук, доцент, Воронежский государственный университет, доцент

Защита диссертации состоится «**19**» июня **2025** года в **15:00** на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.01.11 по географическим наукам на базе Института наук о Земле Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40, к. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1338057/>

Автореферат разослан «__» апреля 2025 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием полностью ФИО, учёной степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail, даты) с заверенной подписью рецензента и печатью организации просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40, на имя и.о. ученого секретаря диссертационного совета ЮФУ801.01.11 О.В. Ивлиевой, а также в формате pdf на e-mail: olgare1@mail.ru (до отправки по почте).

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Ивлиева Ольга Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Сурабая – второй по значению после Джакарты индустриальный и деловой центр Индонезии. Здесь расположены крупные предприятия машиностроительной, текстильной, химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Экологическими проблемами региона являются в первую очередь промышленное загрязнение воздуха и воды в городских районах, вырубка мангровых лесов, эрозия почв, разрушение берегов. Актуальность проведения настоящего исследования связана с высокой социальной и экологической значимостью решения проблемы обеспечения приемлемого уровня экологической безопасности на урбанизированных территориях, расположенных в прибрежной зоне.

Цель исследования – геоэкологический анализ состояния побережья Сурабая, Индонезия на основе данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) с использованием анализа географической информационной системы (ГИС).

Задачи исследования

- проанализировать природные условия г. Сурабая и его прибрежной зоны;
- дать экономико-географическую характеристику г. Сурабая;
- выполнить анализ методических решений к задаче пространственного анализа изменения береговой линии Сурабая и классов землепользования с использованием одновременных космоснимков и ГИС-технологий и разработать этапы проведения исследования;
- выполнить мониторинг прибрежной зоны г. Сурабая на основе анализа изменения классов землепользования под воздействием природных и антропогенных факторов, и с учетом состояния мангровых лесов с использованием; дистанционного зондирования земли (ДЗЗ и ГИС-технологий);
- провести интегральную геоэкологическую оценку прибрежной зоны Сурабая по степени проявления природно-техногенных процессов (ПТП).

Объект исследования – прибрежная зона Сурабаи.

Предмет исследования – продвижение береговой линии, включая прогноз, под воздействием природных и антропогенных процессов; классы земной поверхности побережья Сурабаи; геоэкологическая оценка побережья.

Соответствие диссертационного исследования паспорту специальности. Тема научной работы соответствует паспорту специальности 1.6.21. Геоэкология.

В связи с изучением и оценкой состояния процессов, происходящих на объекте исследования, а также применением современных методов картирования, исследование по данной тематике полностью отвечает следующим пунктам паспорта специальности:

1.13. Динамика, механизм, факторы и закономерности развития опасных природных и техноприродных процессов, прогноз их развития, оценка опасности и

риска, управление риском, превентивные мероприятия по снижению последствий катастрофических процессов, инженерная защита территорий, зданий и сооружений.

1.17. Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в том, что впервые для Сурабаи выполнена комплексная геоэкологическая оценка прибрежной зоны с применением данных космического мониторинга и ГИС-технологий:

- выявлены зоны интенсивного размыва и аккумуляции на побережье Сурабаи;
- получены скорости продвижения береговой линии за многолетний период и дан прогноз изменения береговой линии Сурабаи;
- проведен анализ изменений классов земной поверхности побережья Сурабаи под влиянием природных и антропогенных факторов;
- установлен ареал распространения мангровых зарослей на побережье Сурабаи и выполнена оценка количества их биомассы и запасов углерода в прибрежной зоне;
- выполнена интегральная геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабаи по степени проявления природно-техногенных процессов (ПТП).

Практическая значимость

Результаты исследования могут быть положены в основу мониторинга изменений береговой линии, ландшафтов побережья, а также мониторинга состояния мангровых зарослей на побережье Сурабаи. Результаты интегральной геоэкологической оценки могут быть использованы при пространственном планировании прибрежных территорий с учетом антропогенного воздействия и при эффективном управлении землепользованием и развитием инфраструктуры для снижения рисков и укрепления экологической устойчивости. Материалы диссертации могут быть использованы при разработке курса лекций по комплексной геоэкологической оценке сложных социально-экономических систем для студентов университета Сурабаи и Южного федерального университета.

Достоверность результатов. Автором с помощью данных дистанционного зондирования (снимки Landsat и Sentinel за 24 года исследований) в программе ENVI 4.6 выполнена оценка продвижения береговой линии под воздействием природных и антропогенных факторов, выделены типы поверхностей, выполнена классификация рода мангровых зарослей и оценка общей биомассы с использованием машинного обучения SmileRandomForest в программном обеспечении Google Earth Engine; выполнен анализ картографических данных с использованием технологии ГИС в программном обеспечении ArcGIS 10.3.

Исходный материал и личный вклад автора. Объем выполненных исследований представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Общий объем исследований

№	Виды работ	Количество
1	Расчет скорости прибрежной аккумуляции с помощью программного обеспечения ArcGIS.	Расстояние между трансектами – 50 м., длина трансекты – 3000 м.
	Расчет скорости размыва береговой линии с помощью программного обеспечения ArcGIS.	Расстояние между трансектами – 50 м., длина трансекты – 3000 м.
	Обследование побережья Сурабаи (Западная Сурабая, Северная Сурабая и Восточная Сурабая) (подспутниковые наблюдения).	Вдоль побережья Сурабаи 47 км.
2	Создание карт:	
	1. Комбинированная карта побережья Сурабая 1994–2018 гг.	1 шт.
	2. Типы береговой линии и величины скорости изменения береговой линии Сурабая.	1 шт.
	3. Карта зон аккумуляции береговой линии Сурабая	4 шт.
	4. Карта размыва береговой линии и значение скорости изменения	4 шт.
	5. Карта растительного покрова Сурабаи в 1994, 2003 и 2018 гг. (Landsat).	3 шт.
	6. Карты растительного покрова Прибрежной Сурабаи за 1994, 2003, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 и 2018 гг. (Landsat).	10 шт.
	7. Карты распространения прибрежных мангровых зарослей Сурабаи в 1994, 2003 и 2018 гг. (с использованием машинного обучения SmileRandomForest в программном обеспечении Google Earth Engine (GEE)).	3 шт.
	Карта Антропогенного давления;	1 шт.
	Карта Антропогенной нагрузки;	1 шт.
Карта интенсивности проявления ОБП;	1 шт.	
Карта Интегральной геоэкологической оценки	1 шт.	

В этом исследовании используются данные спутниковых изображений Landsat и Sentinel, которые были получены из фондов Геологической службы США; местоположение Сурабаи для Landsat: широта 118, долгота 65; для Sentinel: T49MFN.

Комплексный характер исследований определил необходимость применения методов, используемых в геоэкологии, геоморфологии морских берегов (экспедиционных, картографических, расчетных), статистических методов обработки информации, сравнительно-географического метода, ГИС технологии и методов

дистанционного зондирования Земли, с использованием машинного обучения SmileRandomForest в программном обеспечении Google Earth Engine (GEE). Все исследования основаны на данных ДЗЗ, технологии ГИС, классификации рода мангровых зарослей и оценки общей биомассы с использованием машинного обучения Smile Random Forest в программном обеспечении Google Earth Engine (GEE). Для верификации данных ДЗЗ проводились полевые подспутниковые наблюдения.

Апробация работы и публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них в ведущих рецензируемых изданиях, соответствующих перечню ВАК и Scopus – 3 работы.

Основные положения и результаты исследований докладывались на: XV Ежегодной научной конференции молодых ученых «Вклад молодых ученых Южного макрорегиона в реализацию Стратегии развития Российской Федерации: цели, задачи, результаты» (г. Ростов-на-Дону, 15-26 апреля 2019 г.), ЮНЦ РАН; международном молодежном научном форуме «ЛОМОНОСОВ-2019», (г. Москва, 2019 г.), МГУ; научно-практической конференции «Системный подход к рациональному природопользованию регионов России» (г. Туапсе, 10–13 декабря 2019 г.); XVI Ежегодной молодежной научной конференции «Юг России: вызовы времени, открытия, перспективы» (г. Ростов-на-Дону, 13 - 28 апреля 2020 г.). – ЮНЦ РАН; Virtual International conference on tackling coastal erosion «Adapting to the Coastal Zone Challenges and Risks: Innovative Approaches and Solutions for Local and Regional Authorities in the Balkans-Mediterranean Region» (Greece Online, 18-19 June 2020г.); IX International Scientific and Practical Conference «Environmental Problems. Looking Into The Future» (Rostov-on-Don. October 22-23, 2020); XVIII Ежегодной молодежной научной конференции «Наука Юга России: достижения и перспективы» (г. Ростов-на-Дону, 18-29 апреля 2022 г.), ЮНЦРАН; XXIX Coastal Conference «Field-Based and Theoretical Research In Shore Use Practice» (Kaliningrad, April 18–24, 2022); Международная научно-практическая конференция «Экология. Экономика. Информатика. Проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования посвященная 20-летию кафедры океанологии ЮФУ» (базовой кафедры ЮНЦ РАН) и памяти первого заведующего кафедрой, члена-корреспондента РАН Дмитрия Геннадьевича Матишова (09-13 сентября 2024 года, г. Новороссийск, п.Абрау-Дюрсо).

Защищаемые положения:

1. Антропогенные и природные факторы определили существенные преобразования как положения береговой линии в результате процессов размыва и аккумуляции, так и прибрежных ландшафтов, в основном классов городских территорий и прудов, которые стали доминирующими на побережье Сурабая.

2. Выявлена тенденция увеличения площади мангровых лесов, их биомассы и запасов углерода на побережье в результате выполнения государственной программы

г. Сурабаи, связанной с пересадкой мангровых лесов (в основном с использованием рода *Rhizophorasp*).

3. Интегральной геоэкологической оценкой, выполненной по комплексу показателей (антропогенное давление, антропогенная нагрузки и интенсивность проявления опасных береговых процессов) установлено, что на долю с высокой степенью проявления природно-антропогенных процессов приходится 35 % площади прибрежной зоны, средней – 25%, низкой – 40 %.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 163 страницы. Текст сопровождается 48 рисунками и 53 таблицами. Список использованной литературы включает 106 наименований.

Благодарности. Автор выражает глубочайшую благодарность своему научному руководителю Л.А. Беспаловой за помощь в работе, советы и рекомендации. Автор выражает благодарность директору Института наук о Земле ЮФУ А. Н. Кузнецову за советы, данные им в процессе исследования. Автор благодарит и выражает признательность Ф. Биоресите, Р.Т. Нугрохо, Н. Рамаданингтиасу, Ф.А. Собарману, Вишну и Алдеа, которые помогли автору на всех этапах подготовки диссертации, а также Доре Лизе за помощь в сборе данных в период подспутниковых наблюдений на побережье Сурабаи.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена актуальность темы, представлены цели и задачи диссертационного исследования, раскрывается научная новизна, практическая значимость работы, ее апробация и положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы были рассмотрены природные условия в районе Сурабаи, географическое положение, геология и рельеф городских территорий, климат региона, а также гидрологические условия.

Во второй главе отражена экономико-географическая характеристика города Сурабаи: демографические особенности, отрасли промышленности, отрасли сельского хозяйства (растениеводство, животноводство, рыболовство). Описана региональная транспортная система, рекреационные условия.

В третьей главе диссертации представлены этапы исследования:

1. *Обработка данных геоморфологических изменений береговой линии.* В работе использованы изображения Landsat 5 TM (8 июля 1994 г.) и Landsat 8 OLI (17 мая 2018 г.). Этот процесс осуществлялся на основе применения программного обеспечения ENVI 4.6 и метода Грама–Шмидта, используемого для повышения разрешения изображения (для Landsat 8). Обработанное изображение было вырезано в соответствии с местоположением области исследования, а именно прибрежной частью

Сурабаи, которая включает 20 подрайонов. Затем береговая линия на изображении была оцифрована с помощью программного обеспечения ArcGIS 10.3. Результаты оцифровки изображений береговой линии в Landsat TM 5 (1994 г.) и Landsat 8 OLI (2018 г.) были наложены друг на друга того, чтобы оценить интенсивность проявления береговых процессов.

2. *Обработка скорости и прогноз изменений береговой линии.* В этом исследовании с DSAS использовался статистический расчет EPR. Согласно Тилеру (Thieler et al., 2017), уравнение расчета конечной скорости (ECI) выглядит следующим образом:

$$ECI = \pm \frac{\sqrt{E_{tA}^2 + E_{tB}^2}}{\text{Date}(A) - \text{Date}(B)} \quad (1)$$

где E_{tA} – неопределенность положения береговой линии A; E_{tB} – неопределенность положения береговой линии B; Date (A) и (B) – время или дата береговой линии A и B.

Исследователи установили расстояние 50 м. (между линиями), потому что данные представляли собой в основном спутниковые изображения, основанные на пикселях, и считались достаточно подробными, чтобы их можно было применить к береговой линии Сурабаи длиной ± 47 км, которая имела неправильную форму. Необходимо было доработать трансекту так, чтобы определить скорость изменения береговой линии в Сурабае за 24 года.

Расчет изменения береговой линии был выполнен с помощью модуля DSAS в программном обеспечении ArcGIS 10.3 для автоматического расчета изменения береговой линии.

После получения значения скорости изменения береговой линии следующим шагом являлось прогнозирование изменений береговой линии на следующие несколько лет (2020-2030 гг.). Данные за 3 года береговой линии (1994, 2003 и 2018), полученные из DSAS, анализировались с помощью простой линейной регрессии, а затем в табличном редакторе Excel вычислялось прогнозируемое значение береговой линии, подвергающейся эрозии и аккумуляции в течение следующих 11 лет (Amarrohman, 2016).

3. *Анализ изменения поверхностного покрова.* Мониторинг поверхностного покрова проводился с использованием спутниковых снимков Landsat (1994, 2003 и 2018 гг.) и контролируемого метода классификации. В процессе классификации изображений покров подразделялся на несколько классов: городские районы, мангровые заросли, пустые (заброшенные) земли, пруды, сельхозугодия и водоемы. В качестве контролируемого метода классификации использовался метод максимального правдоподобия (Maximal Likelihood Method).

4. *Обработка влияния изменений береговой линии и растительного покрова на социально-экономические процессы.* Этап обработки данных является следующим этапом после анализа изменений покрова, но дополнен некоторыми новыми данными изображения. На этапе обработки социально-экономического воздействия были добавлены данные снимков Landsat за 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 и 2017 годы для побережья Сурабаи. Кроме того, в 1994, 2003 и 2018 годах был добавлен процесс классификации класса земного покрова Сурабаи. Прибрежная зона является частью района Сурабаи, поэтому каждый год требуется более подробный анализ с использованием непространственных данных. Эти данные включают данные о населении, его занятости по отраслям, данные о производстве рыбы, данные о валовом региональном внутреннем продукте (ВРП) города Сурабаи и другие. Комбинация пространственных и непространственных данных дает возможность анализа социально-экономических последствий изменений береговой линии и покрова (прибрежных ландшафтов) и их функций.

5. *Классификация родов мангровых зарослей и оценка общей биомассы и запасов углерода.* Этот этап представляет собой усовершенствованную классификацию классов мангрового покрова на побережье Сурабаи на основании следующих данных: USGS Landsat 5 Surface Reflectance (1994 г.), USGS Landsat 7 Surface Reflectance (в 2003 г.) и USGS Landsat OLI 8 Surface Reflectance (2018 г.). Чтобы помочь классифицировать род мангровых зарослей, на этом этапе используется алгоритм классификации Smile Random Forest в программном обеспечении Google Earth Engine (GEE). Классификация рода мангровых зарослей основана на определенном значении NDVI, так что определены 3 класса рода мангровых зарослей, а именно диапазон значений NDVI 0-0,32 соответствует роду мангровых зарослей *Sonnerati* sp., диапазон значений NDVI 0,32-0,42 – роду мангровых зарослей *Avicennia* sp., диапазон значений NDVI 0,42-1,00 – роду мангровых зарослей *Rhizophora* sp.

Для расчета значения запасов углерода используется уравнение [3] путем продолжения расчетов на основе данных о *GroundBiomass* и классификации мангровых лесов. Величину биомассы оценивали по формуле Steininger (2000) (Wijaya and Huda, 2018) следующим образом:

$$AGB = 50,77 - 287,62 \cdot X, \quad (2)$$

AGB = надземная биомасса (кг·м²); *X* – коэффициент отражения Landsat TM с поправкой на атмосферу. Затем из полученной оценки биомассы можно оценить величину запаса углерода следующим образом (Pemerintah Kota Surabaya, 2016; Shaghude et al., 2010; Nooret al., 2006): Запас углерода = 0,5 x биомассы.

В четвертой главе «Использование географических информационных систем (ГИС) для мониторинга береговой линии и земельного покрова» дан обзор состояния исследований береговой линии и мангровых лесов Сурабая. Представлены результаты

динамики береговой линии, полученные на основе данных дистанционного зондирования и анализа средствами ГИС, за период более 24 лет. На побережье Сурабаи в исследуемый период наблюдались как абразионные процессы, так и аккумуляция. На значительной площади появились новые антропогенные объекты (рис.1, табл. 2).



Рисунок 1 – Карта совмещенной береговой линии Сурабаи за 1994–2018 гг. (Safitrietal., 2020)

Площади размыва на побережье Сурабаи были определены для 11 подрайонов, сильнее всего пострадавших от этого процесса. Согласно оцифрованным данным Landsat, за 1994–2018 гг. площадь размыва составила 229645,5 м². Аккумуляция может происходить из-за процесса перемещения пляжеобразующего материала вдоль побережья и его переотложения с формированием аккумулятивных форм. На рисунке 1 видно, что процесс аккумуляции в Восточной Сурабае более распространен в районе Суколило в подрайоне Кепутих (4401201,3 м²). Интенсивное освоение береговой зоны происходит в районе Северной Сурабаи, где находится порт Танджунг Перак.

В 2013 г. в районе Беново (в подрайоне ТамбакОсовилангун) был построен новый порт Телук Ламонг, в результате чего площадь антропогенно-трансформированных берегов увеличилась на 916068,3 м² (Safitrietal., 2019, Safitrietal., 2020). Для районов с активной береговой линией выполнен анализ данных изменения берегов с помощью DSAS. Это позволило определить скорости размыва, аккумуляции и антропогенные преобразования берегов на конкретных участках более детально. Статистический расчет был выполнен в *End Point Rate (EPR)* в DSAS.

Таблица 2 – Состояние береговой линии в прибрежных подрайонах Сурабаи в 1994-2018 гг. (Safitrietal, 2020)

	Район	Подрайон	Размыв	Площадь (м ²)	Аккумуляция	Площадь (м ²)	Антропогенный	Площадь (м ²)
Западная Сурабая	Беново (Benowo)	РомоКалисари (RomoKalisari)	–	0.0	+	81589.2	–	0.0
		ТамбакОсовилангун (TambakOsowilangun)	+	2857.9	+	168095.5	+	916068.3
	Асемрово (Asemrowo)	ТамбакЛангон (TambakLangon)	+	2518.0	+	89025.3	–	0.0
		Грегес (Greges)	+	8667.2	+	58699.5	–	0.0
		Калианак (Kalianak)	+	17755.0	+	110755.0	–	0.0
Северная Сурабая	Крембанган (Krempangan)	Моро Крембанган (MoroKrempangan)	+	4528.5	+	173881.0	–	0.0
		Западный Перак (PerakBarat)	–	0.0	–	0.0	+	270686
	ПабеанЧантикан (PabeanCantikan)	Северный Перак (PerakUtara)	–	0.0	–	0.0	+	338830.2
	Семампир (Semampir)	Уджунг (Ujung)	+	0.0	+	12760.1	+	237334.1
	Кенджеран (Kenjeran)	Булак Бантенг (BulakBanteng)	+	16.5	+	42891.0	–	0.0
		Тамбак Веди (TambakWedi)	–	862.3	+	89701.0	–	0.0
		КедункЧовек (KedungCowek)	+	4831.9	+	41059.0	–	0.0
		Кенджеран (Kenjeran)	–	0.0	+	151723.8	–	0.0
		Суколило (Sukolilo)	–	0.0	+	694828.1	–	0.0
	Восточная Сурабая	Мулиореджо (Mulyorejo)	ДукухСутореджо (DukuhSutorejo)	–	0.0	+	678409.1	–
Калисари (Kalisari)			–	0.0	+	1012228.2	–	0.0
Суколило (Sukolilo)		Кепутих (Keputih)	+	40184.6	+	4401201.3	–	0.0
Рунькуть (Rungkut)		Вонореджо (Wonorejo)	+	141637.1	+	18103.0	–	0.0
		Медокан Аю (MedokanAyu)	+	5786.5	+	320949.3	–	0.0
ГунунгАньяр (GunungAnyar)		ГунунгАньярТамбак (GunungAnyarTambak)	–	0.0	+	280430.3	–	0.0
Сумма площадей (м ²)			Размыв= 229645.5 (11 подрайонов)	Аккумуляция = 8426330 (18 подрайонов)	Антропогенный = 1762919 (4 подрайона)			

В течение 24 лет (1994–2018 гг.) стабильные берега с самой низкой скоростью размыва (– 0,03 м/г) зафиксированы в подрайонах Булак Бантенг, в районе Кенджеран. Берега с самой высокой скоростью эрозии (–3,4 м/г) – в подрайоне Вонореджо, в районе Рунгкут. Прибрежные районы Восточной Сурабаи представляли собой мангровую зону, раскинувшуюся на территории Кепутиха, Вонореджо и в подрайоне Медокан Аю. Большая часть размыва берега была вызвана незаконной вырубкой мангровых зарослей, особенно в подрайоне Вонореджо. Аккумуляция произошла в 9 районах (18 подрайонах), которые входили в район Беново и Асемрово на западе, Крембанган, Семампир и район Кенджеран на севере, а также Мулёреджо, Суколило, Рунгкут и ГунунгАньяр на востоке (табл. 3).

Величина скорости аккумуляции в береговой линии Сурабаи ранжирована по следующим критериям: слабая: 0.079 – 8.057 м/г; средняя: 8.057 – 34.758 м/г; сильная: 34.758 – 77.312 м/год (табл. 4). Данные показывают, что самая низкая скорость аккумуляции составила 0.81 м/г в подрайоне Уджунг, в районе Семампир, а самая высокая – 75.75 м/г в подрайоне Калисари, в районе Суколило (рис. 2).

Таблица 3 – Скорость размыва в прибрежных районах Сурабаи, м/год (1994-2018 гг.)

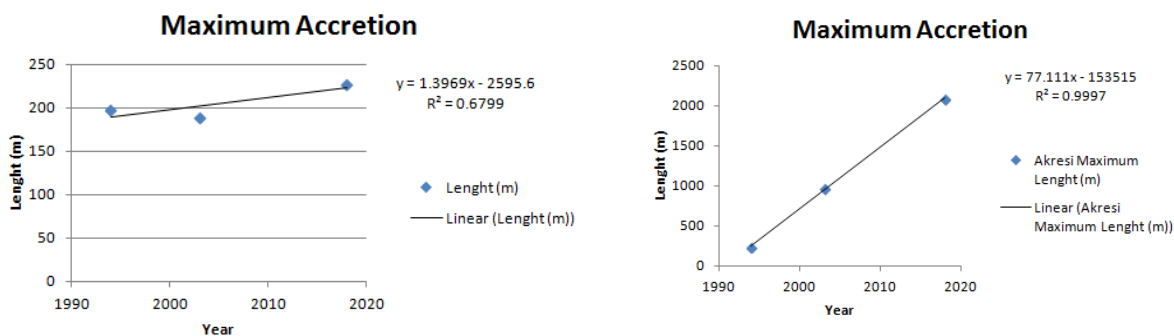
	Район	Подрайон	Средняя скорость	Максимальная	Интенсивность
Западная Сурабая	Беново	Тамбак Осовилангун	–0.67	–1.29	Слабая
	Асемрово	Грегес	–3.36	–4.15	Средняя
		Калианак	–1.52	–2.68	Средняя
Северная Сурабая	Крембанган	Моро Крембанган	–1.21	–2.06	Слабая
	Кенджеран	Булак Бантенг	–0.03 мин.	–0.03	Слабая
		Тамбак Веди	–0.70	–0.7 0	Слабая
		КедунгСовек	–0.62	–2.04	Слабая
Восточная Сурабая	Суколило	Кепутих	–1.82	–3.91	Средняя
	Рунгкут	Вонореджо	–3.4	–7.24	Сильная
		Медокан Аю	–1.09	–1.80	Слабая

Для прогноза развития береговой линии Сурабаи на ближайшие годы использован линейный регрессионный анализ. Для этого определено максимальное значение разницы расстояния по разрезам на береговой линии 1994 года и береговой линии 2018 года. Исходя из этой разницы было определено изменение положения береговой линии, которое может произойти на этих участках и вызвано как аккумуляцией, так и размыва (2020–2030 гг.). Данные представлены на рисунках 2 и 3.

Таблица 4 – Скорость аккумуляции в прибрежных районах Сурабаи, (м/год)

Скорсть аккумуляции (1994-2018 гг.)	Район	Подрайон	Средняя	Максимальная	Интенсивность
Западная Сурабая	Беново	Ромо Калисари	4.84	9.81	Средняя
		Тамбак Осовилангун	1.32	9.86	Средняя
	Асемрово	Тамбак Лангон	4.77	9.78	Средняя
		Грегес	2.44	4.23	Слабая
		Калианак	2.40	6.86	Слабая
Северная Сурабая	Крембанган	Моро Крембанган	5.26	14.91	Средняя
	Семампир	Уджунг	0.81	1.26	Слабая
	Кенджеран	Буак Бантенг	1.06	2.15	Слабая
		Тамбак Веди	2.85	7.22	Слабая
		КедунгСовек	1.11	3.18	Слабая
		Кенджеран	3.77	7.12	Слабая
		Суколило	5.93	40.59	Сильная
Восточная Сурабая	Мулёреджо	Дуку Сутореджо	64.18	69.70	Сильная
		Калисари	75.76	77.33	Сильная
	Суколило	Кепутих	33.81	71.75	Сильная
	Рунгкут	Вонореджо	2.94	3.94	Слабая
		Медокан Аю	8.60	16.67	Средняя
Гунунг Аньяр	Гунунг Аньяр Тамбак	11.46	17.51	Средняя	

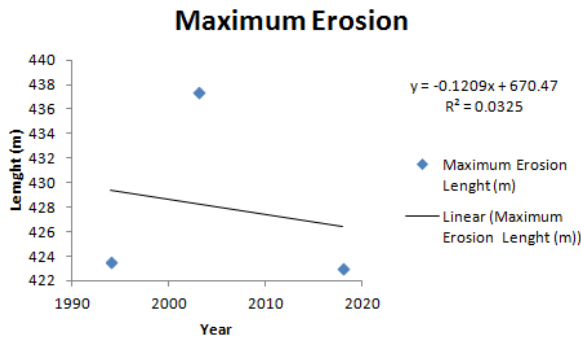
Следующим этапом анализа был прогноз изменения береговой линии в прибрежных районах (рис. 2, 3)



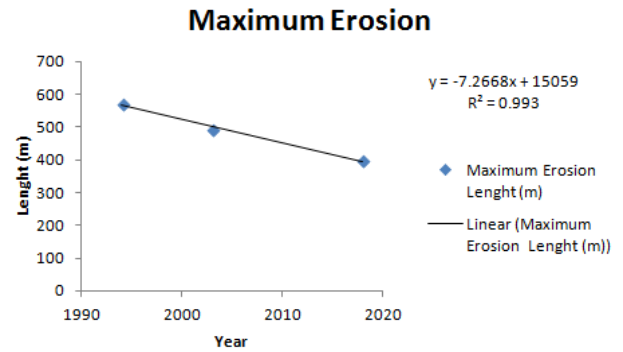
А) Подрайон Уджунга, район Семампир, Северная Сурабая (минимальное значение)

Б) Подрайон Калисари, район Мулёреджо, Восточная Сурабая (максимальное значение)

Рисунок 2 – График изменения береговой линии Сурабаи из-за процессов аккумуляции



А) Подрайон Булак Бантенга, район Кенджерана, Северная Сурабая (минимальное значение)



Б) Подрайон Вонореджо, район Рунгкута, Восточная Сурабая (максимальное значение)

Рисунок 3 – Графики изменения береговой линии из-за процессов размыва

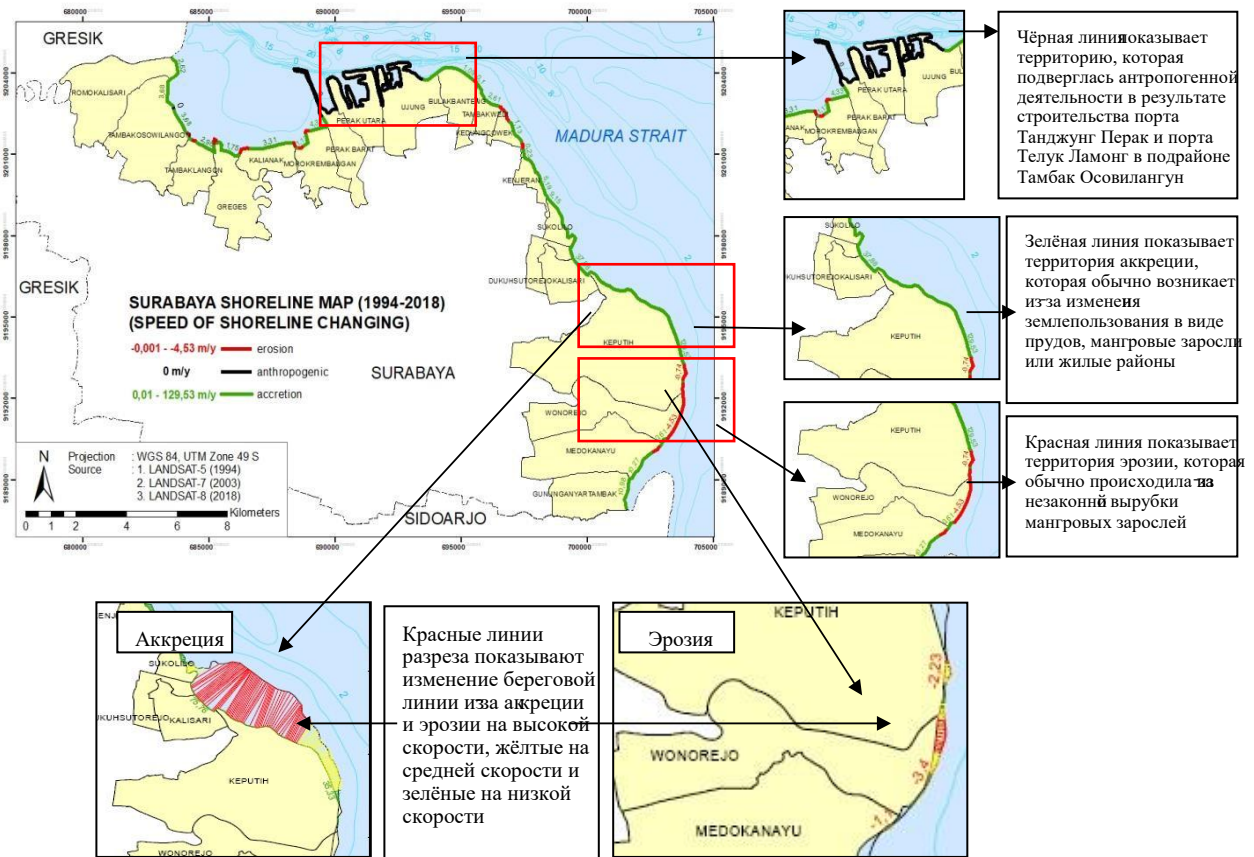


Рисунок 4 – Карта скорости изменения береговой линии Сурабаи

Изменение береговой линии в Сурабе может вызвать *изменение земельного покрова* в прибрежных районах. Учитывая значительную протяженность побережья Сурабая, высокую динамичность береговых процессов требуется системный мониторинг как береговой линии, так и земельного покрова (прибрежных

ландшафтов). Это, как показали проведенные исследования, можно успешно осуществлять с помощью дистанционного зондирования и ГИС-технологий.

В этом исследовании прибрежные территории (покрова) были разделены на 6 классов: городские районы, мангровые заросли, брошенные земли, пруды, сельхоз угодья (растительность), водоемы. Спутниковые снимки Landsat по классификации земного покрова в 1994, 2003, и 2018 гг. показаны на рисунке 5 и результаты классификации приведены в таблице 5. За последние 24 года площадь застройки увеличилась на 2,8 км² из-за экономического роста, который привел к развитию промышленных зон в Западной и Северной Сурабае. Кроме того, в Восточной Сурабае были построены жилые районы из-за миграции людей в поисках работы в Сурабае (рис. 5, табл. 5) (Safitrietal., 2021).

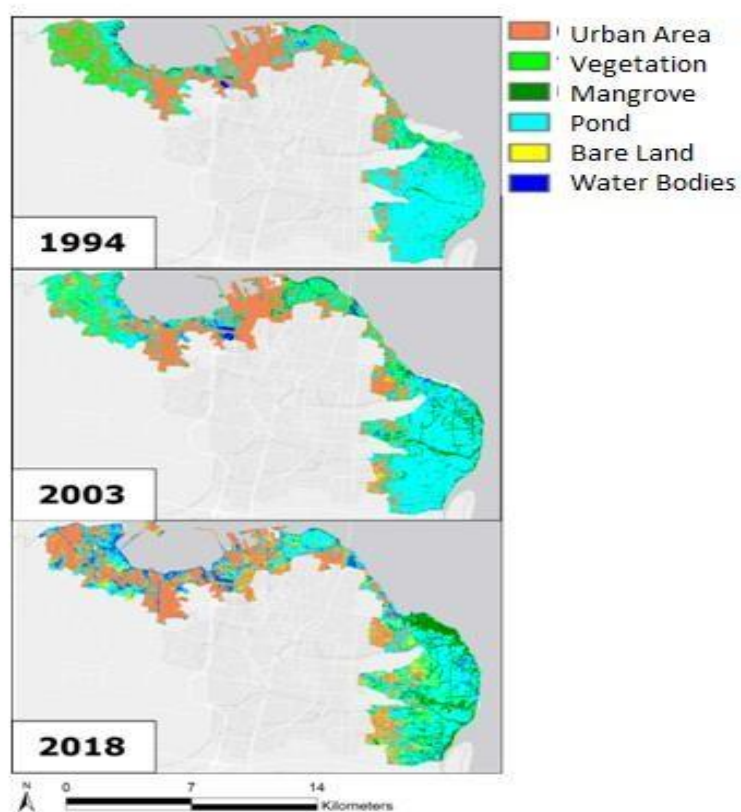


Рисунок 5 – Спутниковые снимки Landsat по классификации земного покрова в 1994, 2003, и 2018 гг. (Safitrietal., 2021)

Класс городских районов – это совокупность населенных пунктов, промышленных зон и зон общественной деятельности (школы, туристические и общественные объекты и т.д.). Данные снимков показывают, что площадь городских районов на побережье составляет более 28,6 км² (20% городских районов Сурабая (табл. 5).

Таблица 5 – Классы земельного покрова прибрежных районов Сурабаи в 1994, 2003, и 2018 гг. (Safitri and Bepalova, 2020; Safitriet al., 2021)

Класс	1994 (км ²)	2003 (км ²)	2018 (км ²)	Изменение за 24 года (1994-2018) (км ²)
Городской р-н	28,60 (31%)	25,89 (27%)	31,49 (31%)	2,89
Растительность	11,93 (13%)	10,42 (11%)	5,22 (5%)	-6,71
Мангровые	4,56 (5%)	7,40 (7%)	8,63 (8%)	4,07
Пруд	45,46 (49%)	49,65 (51%)	39,09 (38%)	-6,37
Пустая Земля	1,56 (1%)	1,95 (2%)	9,35 (9%)	7,79
Водоемы	0,73 (1%)	2,04 (2%)	8,65 (9%)	7,91

В 2003 году площадь городского района Сурабаив прибрежных зоне составляла 25 км² (19 %). К 2018 году наблюдается значительное увеличение класса городских районов до и 31 км² (18 %) соответственно (рис. 6). Это связано с увеличением численности населения (рождаемость и миграционный приток) на 65,894 чел. и появлением новых промышленные и транспортные зоны на побережье Западной и Северной Сурабаи, предприятия текстильной промышленности и ряд других промышленных объектов. Произошла также уменьшение территории прудов и мангровых зарослей (большинство из них произошло в подрайонах Кепутиха, Вонореджо, Тамбак ГененГАньяр), которые стали городскими районами (табл. 7).

Таблица 7 – Площадь городских районов и население Сурабая

Год	Общая площадь прибрежной зоны (км ²)	Общий городской район Сурабаи на побережной Сурабаи (км ²)	Население на побережной Сурабае, тыс. чел.
2011	99,43	22,13 (22%)	275,24
2012	99,92	24,42 (24%)	256,02
2013	101,06	25,84 (26%)	298,50
2014	102,44	37,19 (36%)	321,47
2015	102,02	37,17 (36%)	321,03
2016	99,76	44,31 (44%)	378,87
2017	103,01	39,69 (39%)	332,63
2018	102,42	31,49 (18%)	341,13
Итого изменения 2011–2018		9,36	65,90

Для оценки состояния мангровых лесов. проведен анализ количества родов мангровых и их распределения с использовались спутниковые снимки Landsat 5 за 1994 г., Landsat 7 за 2003 г. и Landsat 8 за 2018. Классификация рода мангровых зарослей проводилась на *Machine Learning SmileRandomForest* в программном обеспечении *Google Earth Engine (GEE)*. Классификация рода мангровых зарослей основывалась на определенном значении NDVI (табл. 8).

Таблица 8 – Результаты классификации рода мангровых деревьев в Сурабае

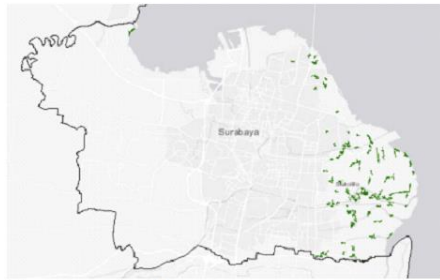
№	Диапазон NDVI	Род мангровых деревьев	год		
			1994	2003	2018
1	0-0,32	<i>Sonnerati</i> asp.	391,29	508,98	82,26
2	0,32-0,42	<i>Avicennia</i> asp.	14,90	129,72	179,75
3	0,42-1	<i>Rhizophora</i> asp.	337,66	614,59	911,79
Всего			743,84	1253,29	1173,80

В результате были определены 3 класса рода мангровых зарослей: диапазон значений NDVI 0–0,32 соответствует роду мангровых зарослей *Sonnerati*asp, диапазон значений NDVI 0,32-0,42– роду мангровых зарослей *Avicennia*asp, диапазон значений NDVI 0,42-1,00 – роду мангровых зарослей *Rhizophora*asp (рис.6).

Результаты классификации показывают, что с 1994 г. общая площадь мангровых зарослей в Сурабае увеличилась на 429,95 га. В отдельные периоды наблюдалось сокращение площадей отдельных видов мангровых, особенно *Avicennia*asp., так как территория мангровых зарослей превратилась в жилой район (предназначенный для жилья) или в зону прудов. С 2012 года правительство Сурабаи приступило к разработке стратегии превращения мангровых зарослей в заповедные зоны и в зоны образовательного и экономического туризма в подрайонах Вонореджо и ГунунгАньяр, что привело к увеличению площади мангровых лесов.

Проведённые исследования по расчету количества биомассы и запасов углерода на побережье Сурабаи показывают, что расчетное количество биомассы мангровых в прибрежной зоне Сурабаи увеличилось в 2 раза. Так, в 1994 г. биомасса мангровых составляла 42,90 кг/м², а в 2018 г. она увеличилась до 86, 16 кг/м². Расчетное количество запаса углерода в 1994 г. составило 21,50 кг/м², в 2018 г. увеличилось до 43,08 кг/м². Данные расчетов биомассы и количества накопления углерода имеют хорошую корреляцию (0,89 и 0,89 соответственно) с данными отчета экологической службы Сурабаи за 2018.

1994

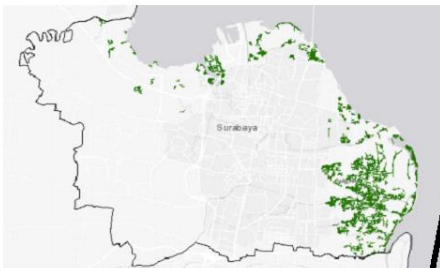


Снимок А. Карта распространения рода мангровых зарослей в 1994 году в Сурабае



Снимок Г. Состояние мангровых зарослей у пруда в деревне Кеputих

2003

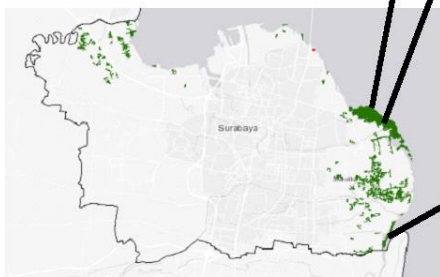


Снимок Б. Карта распространения рода мангровых зарослей в 2003 г. в Сурабае



Снимок Д. Мангровый лес в районе Вонореджо

2018



Снимок В. Карта распространения рода мангровых зарослей в 2018 г. в Сурабае



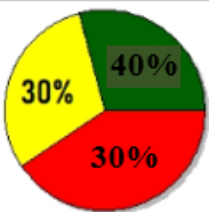

Снимок Е. Состояние мангрового туризма на реке Джагир в районе Гунунг Аньяp

Рисунок 6 – Карта распространения мангровых зарослей в Сурабае и фото полевых наблюдений

В Главе 5. «Геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая по степени проявления природно-техногенных процессов (ПТП)». Геоэкологическая оценка проводилась по таким показателям, как оценка антропогенного давления (по Дмитриев, Фрумин 2004), оценка антропогенной нагрузки на естественные

ландшафты (по Кочурову, 2003), оценка интенсивности проявления опасных береговых процессов (ОБП). Геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая по степени проявления природно-техногенных процессов выполнялась с использованием бальных оценок и классификаций (табл. 9)

Таблица 9 – Результаты геоэкологической оценки прибрежной зоне Сурабая

Факторы	Оценка антропогенного давления на прибрежные районы Сурабая	Классификация земель прибрежной зоны Сурабая по степени антропогенной нагрузки	Интенсивность проявления ОБП баллы	Интегральная геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая по степени проявления
доля				

В результате интегральной оценки определены прибрежные зоны с высоким, средним и низким проявлением природно-техногенных процессов. Результатом исследования является карта «Интегральная геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая по степени проявления ПТП» (рис. 7). На долю с высоким проявлением природно-антропогенных процессов приходится 35 % площади прибрежной зоны, средним – 25%, низким – 40 %.

Наиболее проблемная зона с высокой степенью проявления природно-техногенных процессов расположена на Севере Сурабая -это подрайоны Моро Крембанган, Западная Перак, Северная Перак, Уджунг, Булак Бантенг, Тамбак Веди и в Восточной Сурабайе подрайон Дукух Сутореджо. Высокая степень проявления ПАП связана с высокой плотностью населения (антропогенного давления) и преобладанием городской застройки территории районов на площади от 56%. до 97% (высокой антропогенной нагрузкой).

Средняя степень проявления ПТП характерна для 5 интенсивно развивающихся прибрежных районов именно в подрайонах Тамбак Осовилангон, Калисари, Кепутих, Кенджеран и Кедунг Ковек. Здесь постоянно увеличивается площадь городской застройки и в землепользовании преобладает портовое хозяйство. В подрайоне Дукух Сутореджо и Суколило - жилой район и он находится там, где когда-то были мангровые леса. Возможен переход в зону с высокой степенью проявления ПТП.

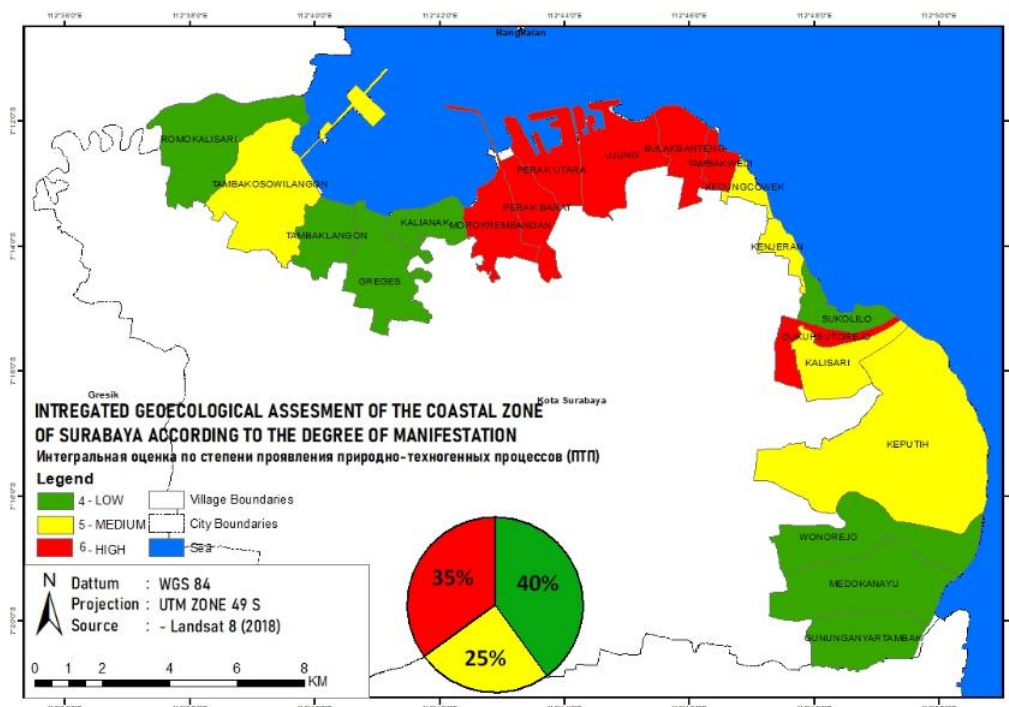


Рисунок 7 – Геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая по степени проявления ПТП

Зона с низким ПТП установлена для 8 подрайонов площадью 66 км² (40%), а именно в подрайонах Калянак, Грегес, Тамбак Лангон, Ромо Калисари, Гунунг Аняр Тамбак, Медокан Айю, Вонореджо, Кенджеран, Морокрембанган, Кедунг Ковек, Перак Барат, Тамбак Веди и подрайон Перак Барат, Суколило. Эти подрайоны расположены в основном в западной Сурабае. Низкая степень проявления ПТП связана с низкой плотностью населения, преобладанием в землепользовании земель сельхозназначения и рыбоводных прудов и процессов аккумуляции над размывом берегов, за исключением подрайона Вонореджо. Тем не менее это район, где размещаются военные базы Индонезии (Сафитри, Беспалова, Глушко, 2024).

Полученные в ходе исследования результаты позволили сформулировать следующие **выводы**.

Динамика береговой линии Сурабаи за 24 года обусловлена процессами размыва и аккумуляции в береговой зоне. По данным снимков Landsat (1994, 2003 и 2018 гг.) зоны эрозии на побережье Сурабаи были выявлены в 11 подрайонах. Общая площадь размыва составила 229645,5 м². Среди всех подрайонов именно подрайон Вонореджо имеет самую высокую площадь абразии (141637,1 м²). Зоны аккумуляции на побережье Сурабаи были выявлены в 18 подрайонах общей площадью 8426330 м². Среди всех подрайонов именно подрайон Кепутих имеет самую высокую площадь накопления (4401201,3 м²). Произошли существенные антропогенные изменения в прибрежной зоне Сурабаи. Особенно это характерно для 4-х подрайонов на общей

площади 1762919 м². В 2013 году был построен новый порт Телук Ламонг в районе Беново (в подрайоне Тамбак Осовилангун), в результате чего площадь антропогенного берега увеличилась примерно на 916068,3 м².

В прибрежную зону входят 4 прибрежных района, в которых отмечается очень интенсивный процесс аккумуляции, а именно подрайон Суколило, подрайон Дукух Сутореджо, подрайон Калисари и подрайон Кепутих. Наибольшее значение средней скорости изменения береговой линии находится в подрайоне Калисари и составляет 75,75 м/год, при максимуме 77,33 м/год. Интенсивный размыв берега зафиксирован в подрайоне Вонореджо. Средняя скорость размыва 3,4 м/год, на отдельных участках она достигала более 70 м/год.

Значение прогноза изменения береговой линии, вызванного как аккумуляцией, так и размывом берегов, на следующие 11 лет (2020-2030 годы) выполнен методом линейного регрессионного анализа. Прогнозируемое значение для береговой линии, испытывающей наибольший размыв, находится в подрайоне Вонореджо (район Рунгкуть) с общим изменением – 72,67 м, а для береговой линии, испытывающей наибольшее приростание берега – в Калисари (район Мулиореджо) – на 771,11 м.

Изменения береговой линии влияют на изменения прибрежного поверхностного покрова Сурабаи. Существует 6 функциональных классов: пруды, городские районы, сельхозугодья (растительность), мангровые заросли, водоемы и пустые земли. Земельный покров Сурабаи изменился за последние 24 года из-за прироста населения на 65894 человек, поэтому некоторые классы изменили свои функции. Класс прудов и мангровых зарослей изменился на класс городской территории, особенно в Восточном Сурабае. В зонах аккумуляции в подрайоне Дукух Сутореджо, Калисари и Суколило произошло расширение прибрежных территорий, что привело к появлению мангровых зарослей. Увеличение площади мангровых зарослей явилось результатом тесного сотрудничества между правительством и местным сообществом по защите мангровых лесов в Сурабае, которые были задуманы как туристическая и образовательная зона. Уменьшение класса прудов произошло из-за неэффективности их производства.

Выполнена классификация мангровых зарослей с использованием *Machine Learning SmileRandomForest* в программном обеспечении *Google Earth Engine (GEE)* на основе определения *NormalizedDifferenceVegetation Index (NDVI)*. Определены 3 класса рода мангровых зарослей: диапазон значений NDVI 0-0,32 соответствует роду мангровых зарослей *Sonneratiasp*, диапазон значений NDVI 0,32-0,42 – роду мангровых зарослей *Avicenniasp*, диапазон значений NDVI 0,42-1,00 – роду мангровых зарослей *Rhizophorasp*. Выявлено увеличение общей площади мангровых зарослей с 1994 по 2018 гг. на 429,95 га. За 20 лет предполагаемое изменение биомассы, производимой мангровыми зарослями в Сурабае, увеличилось в 2 раза. Накопления углерода в 1994 г. составило 21,5 кг/м², тогда как в 2018 до 43,08 кг/м². Эти данные

имеют хорошую корреляцию с данными отчета экологической службы за 2018 г. Сурабаи.

По результатам интегральной геоэкологической оценки прибрежной зоны Сурабая выполненной по комплексу показателей (антропогенное давление, зависящее от плотности населения; антропогенная нагрузка на земли прибрежных территорий по степени их преобразования под влиянием хозяйственной деятельности; интенсивность проявления опасных береговых процессов (ОБП)) выявлены 3 зоны с высокой, средней и низкой степенью проявления природно-техногенных процессов. На долю с высоким проявлением природно-техногенных процессов приходится 35 % площади прибрежной зоны, средним – 25 %, низким – 40 %.

Предложены рекомендации по снижению негативных природно-техногенных воздействий на прибрежную зону Сурабая: восстановление экосистем, таких как мангровые леса, создание берегоукреплений в зонах размыва, корректировка землепользование, проведение реновации и переселения людей в зонах с высоким антропогенным давлением, рекультивация прибрежной зоны с интенсивной аккумуляции наносов, создание искусственных территорий, островов, расширение зоны пляжей, пространственное планирование с учетом полученных результатов геоэкологической оценки.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Всего по теме диссертации опубликовано 15 научных работ. Ниже перечислены основные наиболее значимые работы.

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. **Сафитри, Д. А.** Геоэкологическая оценка степени проявления природно-техногенных процессов (на примере прибрежной зоны Сурабая в Индонезии) / Д. А. Сафитри, Л. А. Беспалова, А. Е. Глушко // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 12. – С. 63-69. – DOI 10.17513/use.38350. K2.

2. **Сафитри, Д. А.** Исследование геоморфологических изменений береговой линии Сурабаи, Индонезия с использованием данных дистанционного зондирования / Д. А. Сафитри, Л. А. Беспалова, Е. В. Беспалова // Наука Юга России. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 19-25. – DOI 10.7868/S25000640200403. K1.

3. Detecting coastline change in the Surabaya coastal areas (Indonesia) using remote sensing method / **D. A. Safitri**, L. A. Bepalova, F. Bioresita, R. T. Nugroho // Наука Юга России. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 10-17. – DOI 10.7868/S25000640210302. K1

4. Mapping and monitoring of mangrove area in Surabaya (Indonesia) in the period of 1994-2018 using Landsat satellite data and Google Earth Engine / **D. A. Safitri**, F. Bioresita, R. T. Nugroho [et al.] // Наука Юга России. – 2023. – Т. 19, № 1. – С. 51-58. – DOI 10.7868/25000640230106. K1.

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science, RSCI

5. **Safitri, D. A.** Changes in Land Use in Eastern Surabaya, Indonesia, and Their Impact on Coastal Society and Aquaculture / D. A. Safitri, L. A. Beshpalova, W. Febry // R-ECONOMY. – 2019. – Vol. 5, No. 4. – P. 198-207. – DOI 10.15826/recon.2019.5.4.020.

6. Land Cover Amendment in Coastal Areas of Surabaya due to Coastline Change based on Multi-temporal Satellite Imagery / **D. A. Safitri**, L. A. Beshpalova, F. Bioresita, R. T. Nugroho // Review of International Geographical Education Online. – 2021. – Vol. 11, No. 5. – P. 2570-2580. – DOI 10.48047/rigeo.11.05.154.

Публикации в сборниках трудов конференций

7. **Сафитри, Д. А.** Динамика береговой линии Сурабая, Индонезия (1994-2018 гг.) / Д. А. Сафитри, Л. А. Беспалова // Системный подход к рациональному природопользованию регионов России : материалы научно-практической конференции, 10–13 декабря 2019 года, г. Туапсе / Филиал Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего образования "Российский государственный гидрометеорологический университет" в г. Туапсе, Абхазский государственный университет, г. Сухум, Республика Абхазия [и др.] ; редакционная коллегия: Цай С. Н. [и др.]. – Краснодар : Издательский Дом - Юг, 2019. – С. 93-97.

8. **Safitri, D. A.** Land cover changes in coastal Surabaya with remote sensing data (1994-2018) / D. A. Safitri, L. A. Beshpalova // Экологические проблемы. Взгляд в будущее : сборник трудов IX Международной научно-практической конференции (БП и СОТ "Витязь - БП и СОТ "Лиманчик", 22-23 октября 2020 г.) : посвящается 105-летнему юбилею Южного федерального университета и кафедры физической географии, экологии и охраны природы / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", Институт наук о Земле, Кафедра физической географии, экологии и охраны природы [и др.] ; редакционная коллегия: Ю. А. Федоров (ответственный редактор) [и др.]. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2020. – С. 766-770.

9. Study of coastline amendment prediction in coastal areas of Surabaya based on multi-temporal satellite imagery / **D. A. Safitri**, L. A. Beshpalova, N. Ramadaningtyas, F. A. Sobarman // XXIX Береговая конференция: натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования: сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием, Калининград 18-24 апреля 2022 года / Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Музей Мирового океана, Рабочая группа «Морские берега» ; редакционная коллегия Б. В. Чубаренко (главный

редактор) [и др.]. – Калининград : Издательство Балтийского федерального университета им. И. Канта, 2022. – P. 328-330.

10. **Safitri, D. A.** Land Cover Change Analysis on The Coast of Surabaya Indonesia (Case Study: Eastern Part of Surabaya, 1994 – 2022) / D. A. Safitri, R. T. Nugroho, L. A. Bepalova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2023. – Vol. 1276, No. 1. – P. 012038. – DOI 10.1088/1755-1315/1276/1/012038.

11. Temporal Mapping of Coastal Areas Using Landsat Satellite Imagery / **D. A. Safitri**, F. Saves, L. E. Fatmawati [et al.] // 2023 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2023), Surabaya, Indonesia, October 3–8, 2023 : Abstracts & Schedule / Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology ; I. A. Parinov, E. P. Putri, S.-H. Chang (Eds.). – Rostov-on-Don ; Taganrog: Southern Federal University, 2023. – P. 96

12. **Safitri, D. A.** Dinamika garis pantai Surabaya tahun 1994 – 2023 / D. A. Safitri, F. Saves, T.W.S. Panjaitan // Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS) : [Ke-17, Balikpapan, 16–17 November 2023]. – 2024. – Vol. 1, No. 2. – DOI 10.62603/konteks.v1i2.24.