

УДК 528.88  
DOI 10.17513/use.38350

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ СУРАБАЯ В ИНДОНЕЗИИ)

<sup>1</sup>Сафитри Д.А., <sup>2</sup>Беспалова Л.А., <sup>2</sup>Глушко А.Е.

<sup>1</sup>Университет 17 Августа 1945 Сурабая, Сурабая, Индонезия,  
e-mail: dika-ayu@untag-sby.ac.id;

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону,  
e-mail: bespalowaliudmila@yandex.ru, arinaglushko01@gmail.com

Цель исследования – интегральная геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая по степени проявления природно-техногенных процессов. Авторами 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 земной поверхности, выполнена классификация рода мангровых зарослей с использованием машинного обучения Smile Random Forest в программном обеспечении Google Earth Engine; выполнен анализ картографических данных с использованием технологий геоинформационных систем в программном обеспечении ArcGIS 10.3. Для верификации полученных данных с помощью космоснимков проводились полевые подспутниковые наблюдения. 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), выявлены 3 зоны – с высокой, средней и низкой степенью проявления природно-техногенных процессов. На долю с высоким проявлением приходится 35% площади прибрежной зоны, средним – 25%, низким – 40%. Даны рекомендации по снижению негативных последствий проявления техно-природных процессов для каждой зоны.

**Ключевые слова:** данные дистанционного зондирования, геоэкологическая оценка, антропогенное давление, антропогенная нагрузка, опасные береговые процессы, классы землепользования, Индонезия, Сурабая

## GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE LEVEL OF MANIFESTATION OF NATURAL-TECHNOGENIC PROCESSES (BASED ON THE EXAMPLE OF THE COASTAL ZONE OF SURABAYA IN INDONESIA)

<sup>1</sup>Safitri D.A., <sup>2</sup>Bespalova L.A., <sup>2</sup>Glushko A.E.

<sup>1</sup>Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Surabaya, Indonesia, e-mail: dika-ayu@untag-sby.ac.id;

<sup>2</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don,  
e-mail: bespalowaliudmila@yandex.ru, arinaglushko01@gmail.com

The aim of the study is to conduct an integrated geoecological assessment of the coastal zone of Surabaya based on the intensity of natural-technogenic processes. Using remote sensing data (Landsat and Sentinel images over 24 years of research) in the ENVI 4.6 software, the authors evaluated the shoreline dynamics under the influence of natural and anthropogenic factors, identified land surface types, and classified mangrove species using the Smile Random Forest machine learning algorithm in Google Earth Engine software. Cartographic data were analyzed using geographic information system technologies in ArcGIS 10.3. To verify the data obtained from satellite images, ground-based field observations were conducted. As a result of the integrated geoecological assessment of the Surabaya coastal zone, based on a set of indicators (anthropogenic pressure related to population density, anthropogenic impact on coastal lands according to their transformation due to economic activities, and the intensity of hazardous coastal processes), three zones with high, medium, and low levels of natural-technogenic processes were identified. The areas with high intensity account for 35% of the coastal zone, medium intensity for 25%, and low intensity for 40%. Recommendations are provided to mitigate the negative effects of technogenic-natural processes for each zone.

**Keywords:** remote sensing data, geoecological assessment, anthropogenic pressure, anthropogenic impact, hazardous coastal processes, land use classes, Indonesia, Surabaya

### Введение

Сурабая – второй по значению после Джакарты индустриальный и деловой центр Индонезии. Здесь расположены крупные предприятия машиностроительной, текстильной, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, крупные торговые порты. Главными экологическими

проблемами региона являются промышленное загрязнение воздуха и воды в городских районах, вырубка мангровых лесов, разрушение берегов, высокие темпы урбанизации приводят к быстрому преобразованию природных ландшафтов.

**Цель исследования** – интегральная геоэкологическая оценка прибрежной зоны

Сурабая по степени проявления природно-техногенных процессов.

Задачи исследования: провести оценку антропогенного давления на основе данных о численности и плотности населения и темпах его роста; провести классификацию земель прибрежной зоны Сурабая по степени антропогенной нагрузки с использованием данных ДЗЗ; ранжировать прибрежную зону Сурабая по интенсивности проявления опасных береговых процессов.

#### Материалы и методы исследования

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 Smile Random Forest в программном обеспечении Google Earth Engine (GEE). Все исследования основаны на данных ДЗЗ, технологии ГИС, классифи-

кации рода мангровых зарослей с использованием машинного обучения Smile Random Forest в программном обеспечении Google Earth Engine (GEE). Для верификации данных ДЗЗ проводились полевые подспутниковые наблюдения.

Геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая проводилась по таким показателям, как оценка антропогенного давления [1, с. 30–34], оценка антропогенной нагрузки на естественные ландшафты [2, с. 20–40], оценка интенсивности проявления опасных береговых процессов (ОБП).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Оценка антропогенного давления на прибрежные районы Сурабая. Основными показателями, по которым можно судить о численности населения, являются плотность населения и темпы его роста. Сурабая характеризуется высокими темпами роста населения. В результате быстрого роста населения возникает дисбаланс между населением и природой, а также доступными объектами жизнедеятельности.

Таблица 1

Показатели антропогенного давления (К) прибрежной зоны Сурабая

Большой район	Район	Подрайон	Площадь (км <sup>2</sup> )	Население	Плотность	Коэффициент	Ранг
Западная Сурабая	Беново	Ромо Калисари	7,58	2714	358,04	1,32	Низкий
		Тамбак Осовиланган	3,61	3902	1080,88	1,76	Низкий
	Асемрово	Тамбак Лангон	6,46	7267	1124,92	1,77	Низкий
		Грегес	6,46	7599	1176,31	1,79	Низкий
		Калианак	4,07	8322	2044,71	2,00	Низкий
Северная Сурабая	Крембанган	Моро Крембанган	3,17	49311	15555,52	2,80	Высокий
		Западная Перак	1,607	16685	10382,70	2,64	Высокий
	Пабеан Чантукан	Северная Перак	1,79	29604	16538,54	2,82	Высокий
	Семампир	Уджунг	1,62	37268	23004,93	2,95	Высокий
	Кенджеран	Булак бантенг	2,67	36517	13676,77	2,75	Высокий
		Тамбак Веди	0,98	17915	18280,61	2,86	Высокий
		Кедунг Човек	1,13	6415	5676,99	2,40	Средний
		Кенджеран	0,93	7125	7661,29	2,52	Средний
		Суколило	3,13	11095	3544,72	2,22	Средний
Восточная Сурабая	Мулиореджо	Дукух Сутореджо	2,14	16910	7901,86	2,53	Средний
		Калисари	2,13	11017	5172,30	2,37	Средний
	Суколило	Кепутих	14,4	18203	1264,09	1,82	Низкий
	Рунькуть	Вонореджо	6,48	18254	2816,97	2,13	Средний
		Медокан Аю	7,23	27980	3869,98	2,25	Средний
	Гунунг Аньяр	Гунунг Аньяр Тамбак	4,41	10408	2360,09	2,06	Средний

Движущим фактором антропогенного давления (К) на окружающую среду является человек. Антропогенное давление представляет собой интегральную величину энергии, используемой на единицу площади территории. Для оценки антропогенного давления на исследуемой территории вводится коэффициент антропогенного давления (К). Рассчитывается он по формуле [1]:

$$\lg K = -0,97 + 0,9 \lg \text{ПН},$$

где ПН – плотность населения чел./км<sup>2</sup>.

В табл. 1 представлены результаты оценки прибрежной зоны Сурабая по показателю коэффициента антропогенного давления (К). Коэффициент определялся на уровне подрайонов.

На основе обработки данных показатель степени антропогенного давления на побережье Сурабая разделен на 3 зоны (рис. 1).

Зона 1 характеризуется самыми высокими показателями антропогенного давления. Сюда входит большая часть Северной Сурабая (6 подрайонов): Моро Крембанган, Западный Перак, Северный Перак, Уджунг, Булак Бантенг, Тамбак Веди. Здесь расположен крупный промышленный центр города, жилые районы с самой плотной застройкой, промышленные зоны, складские

помещения, терминалы, военные объекты. На долю этой зоны приходится 30% прибрежных территорий.

Зона 2 характеризуется средним уровнем антропогенного давления и состоит из 5 подрайонов Восточной Сурабая (Дукх Сутореджо, Калисари, Вонореджо, Медокан Аю, Гунунг Аньяр Тамбак) и трех подрайонов Северной Сурабая (Кедунк Човек, Кенджеран, Суколило). Площади городской застройки не превышают 40%. Большая часть побережья занята рыболовными прудами, рисовыми полями. На долю этого кластера приходится 40% прибрежных территорий.

Зона 3 с низкими показателями антропогенного давления характеризуется низкой плотностью и низкой численностью населения. В данную зону входит вся Западная Сурабая, включая 5 подрайонов. Подрайон Ромо Калисари является подрайоном с самым низким значением коэффициента антропогенного давления на побережье Сурабая. Площадь городской застройки здесь не превышает 57%. Остальная территория занята прудами (34%), растительностью и пустошью. Низкое антропогенное давление характерно для 30% площади прибрежных территорий Сурабая.

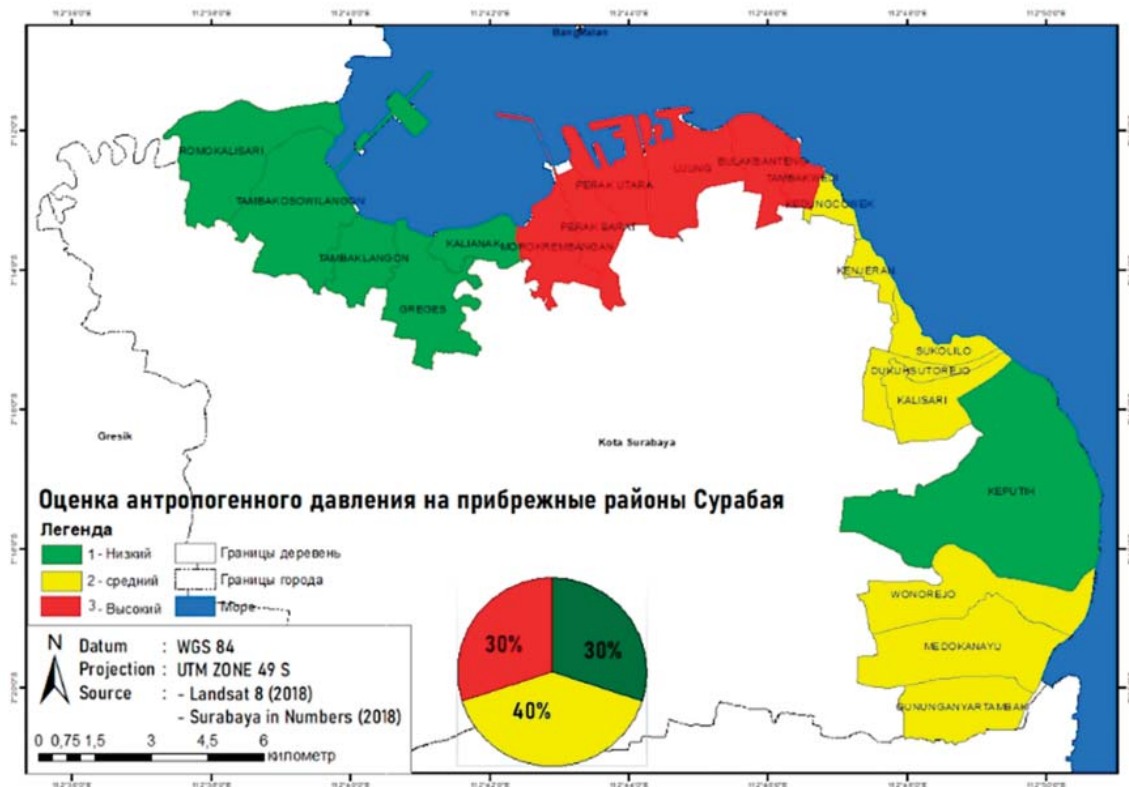


Рис. 1. Ранжирование прибрежной зоны Сурабая по степени антропогенного давления

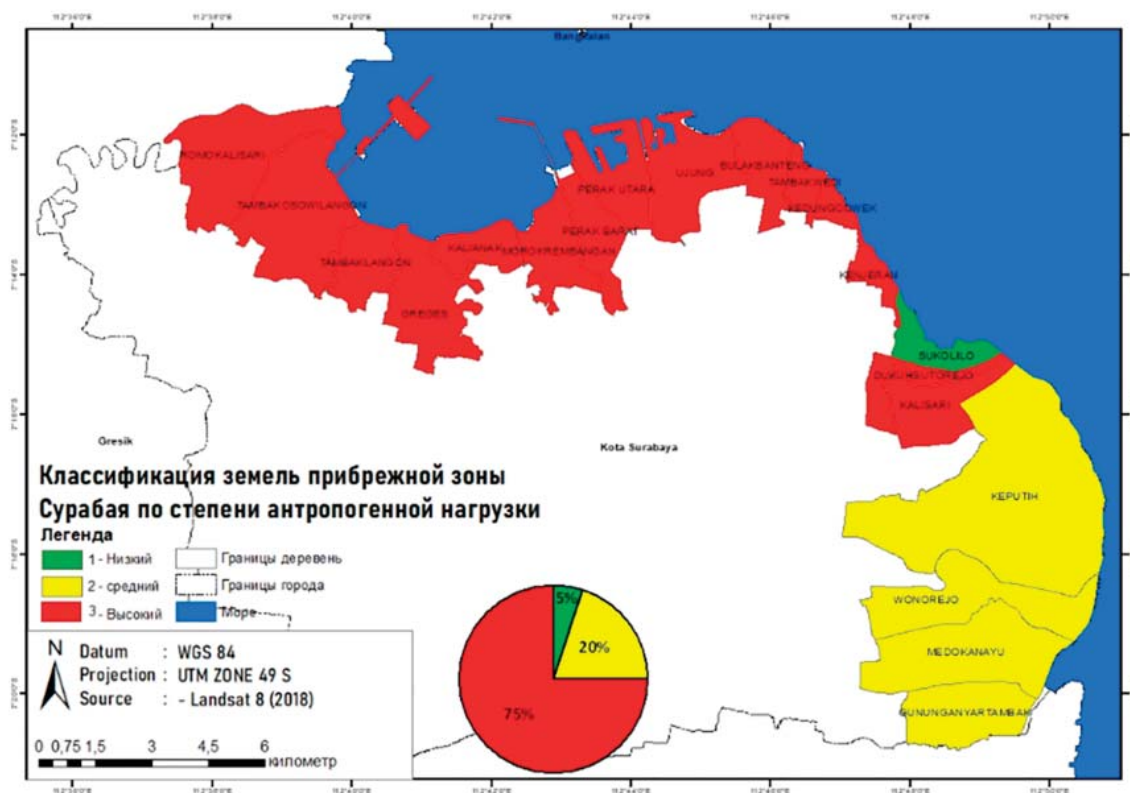


Рис. 2. Прибрежные территории Сурабая по степени антропогенной нагрузки

Классификация земель прибрежной зоны Сурабая по степени антропогенной нагрузки. Деятельность человека может существенно влиять на прибрежные экосистемы. Одним из способов мониторинга антропогенных преобразований в прибрежной зоне является мониторинг земель (почвенно-растительного покрова). Мониторинг изменений в типах почвенно-растительного покрова может быть использован для понимания воздействия природных и антропогенных явлений на территорию, особенно в прибрежных районах [3].

Согласно классификации почвенно-растительного покрова, прибрежная зона Сурабая была сгруппирована в шесть типов, включая голую землю (пустыри), мангровые заросли, пруды, городские территории, растительность и водоёмы.

Анализ почвенно-растительного покрова в прибрежной Сурабае по снимкам Landsat показал, что в 15 подрайонах преобладают городские территории. Вторым по величине доминирующим классом является класс прудов в 4 подрайонах (20%), а третьим – класс мангровых лесов в одном подрайоне (5%). Это свидетельствует о том, что прибрежная территория Сурабая

относится к категории с высокой антропогенной нагрузкой, поскольку на большей ее части преобладают городские районы, где естественные мангровые леса или другая растительность почти полностью сведены. В результате этого в районах от морской активности наблюдается размыв берегов [4].

По результатам ранжирования большая часть прибрежных районов (75%) относится к территории с высокой антропогенной нагрузкой. Средняя антропогенная нагрузка (20% прибрежных территорий) характерна для подрайонов Кепутих, Вонореджо, Медокан Аю, Гунунг Аньяр Тамбак, где развита сельскохозяйственная деятельность (рыбоводные пруды, рисовые поля). Низкая антропогенная нагрузка выявлена только в подрайоне Суколило с мангровыми лесами, занимающими 49% его площади (рис. 2) [5].

Ранжирование прибрежной зоны по интенсивности проявления опасных береговых процессов. За 24 года размыв берегов наблюдался в нескольких прибрежных районах Сурабая, таких как городской район Вонореджо, район Рунгкут площадью 141637,1 м<sup>2</sup>. При этом аккумуляция произошла почти во всех прибрежных районах Су-

рабаи. Аккумуляция в подрайоне Суколило была самой большой, ее площадь составила 4401201,3 м<sup>2</sup>. Наибольшее антропогенное воздействие на данную территорию было связано со строительством в 2013 г. порта Телук Ламонг площадью 916068,3 м<sup>2</sup> [6]. Результаты исследований показали, что 16 подрайонов (75%) имели низкий класс интенсивности проявления со скоростью размыва менее 0,33 м/г, в то время как 3 подрайона (15%) имели средний класс интенсивности проявления.

*Интегральная геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая по степени*

*проявления природно-техногенных процессов (ПТП). Интегральная геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая проводилась по трем показателям:*

- 1) антропогенное давление, зависящее от плотности населения;
- 2) антропогенная нагрузки на земли прибрежных территорий по степени их преобразования под влиянием хозяйственной деятельности;
- 3) интенсивность проявления опасных береговых процессов (ОБП).

Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4.

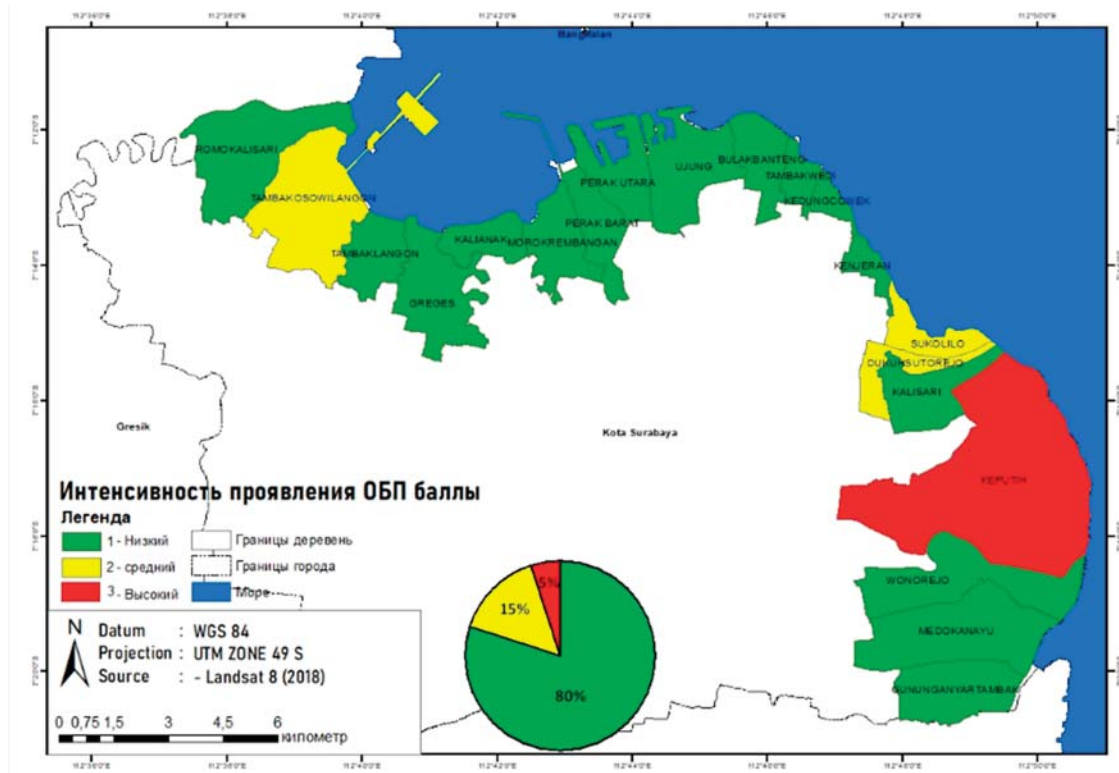


Рис. 3. Интенсивность проявления ОБП в прибрежной зоне Сурабая

Таблица 2

Результаты геоэкологической оценки прибрежной зоны 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
Низкий уровень, %	30	5	80	40
Средний уровень, %	40	20	15	25
Высокий уровень, %	30	75	5	35

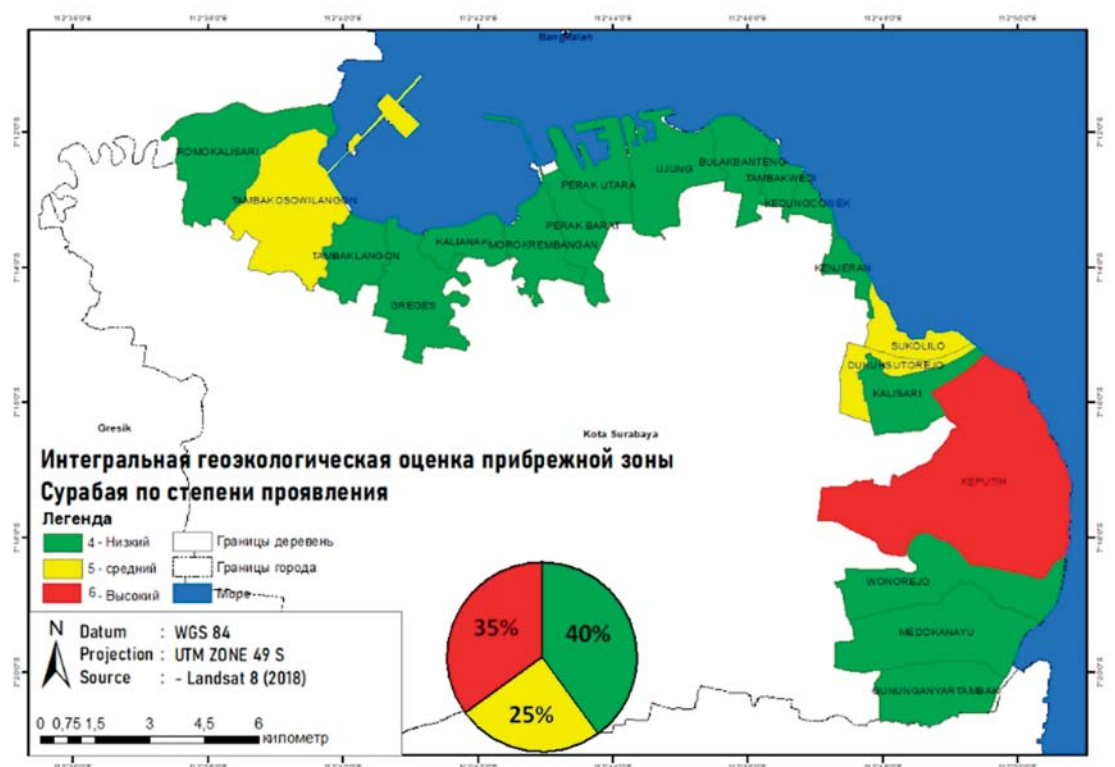


Рис. 4. Интегральная геоэкологическая оценка прибрежной зоны Сурабая

Зона с высокой степенью проявления природных и техногенных процессов. Согласно геоэкологической оценке, в зону с высокой степенью проявления природно-техногенных процессов входит 7 подрайонов (35% площади побережья). На Севере сюда входят подрайоны Моро Крембанган, Западная Перак, Северная Перак, Уджунг, Булак Бантенг, Тамбак Веди и в Восточной Сурабае 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%, а также высокой антропогенной нагрузкой.

Зона со средней степенью проявления природных и техногенных процессов. Средний уровень проявления природно-техногенных процессов установлен для 5 подрайонов площадью 13,8 км<sup>2</sup> (25% площади прибрежной зоны): Тамбак Осовилангон, Калисари, Кепутих, Кенджеран и Кедунг Ковек. Средняя степень обусловлена тем, что здесь менее плотная городская застройка и в землепользовании преобладает портовое хозяйство.

Данные спутниковой съемки Landsat 8 показывают, что площадь подрайона Тамбак Осовилангон увеличилась за счет того,

что в 2013 г. в Телук Ламонге был построен новый порт, площадь которого растет с каждым годом. Кроме того, подрайон Тамбак Осовилангон – это промышленная и складская зона, зона погрузки и разгрузки контейнеров:

Зона с низкой степенью проявления природных и техногенных процессов. Значение геоэкологической оценки с низкой степенью проявления ПТП зафиксировано в 8 подрайонах площадью 66 км<sup>2</sup> (40%): Калянак, Грегес, Тамбак Лангон, Ромо Калисари, Гунунг Аняр Тамбак, Медокан Айю, Вонореджо, Кенджеран, Морокрембанган, Кедунг Ковек, Перак Барат, Тамбак Веди, Перак Барат и 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 преобладанием аккумуляции над размывом берегов.

Анализ состояния геоэкологических зон позволил предложить рекомендации для уменьшения степени проявления негативных ПТП в прибрежных районах Сурабаи, так как все выделенные геоэкологические зоны в целом подвержены процессам дальнейшей урбанизации.

Перечень необходимых мероприятий:

1. Восстановление экосистем (таких как мангровые леса) может быть сделано для усиления защиты прибрежной природы и восстановления экологических функций прибрежных территорий (*Зона 1, Зона 2, Зона 3*).

2. Проведение реновации для районов с плотной застройкой и расселение населения для снижения антропогенного давления (*Зона 1*).

3. Укрепление инфраструктуры для борьбы с размывом берегов: создание подпорных берегозащитных сооружений или восстановление растительности, способной удерживать почву в соответствии с научными исследованиями и долгосрочными экологическими расчетами (*Зона 3, особенно подрайон Вонорехо*).

4. Разработка правительством долгосрочной политики (на ближайшие 100 лет) с привлечением заинтересованных сторон для снижения проявления негативных техно-природных процессов, в особенности для районов с высокой плотностью населения и антропогенной нагрузкой [7] (*Зона 1, Зона 2*).

5. Корректировка землепользования для снижения рисков размыва берегов и изменение землепользования в сторону уменьшения доли антропогенных ландшафтов (пустырей) (*Зона 1, Зона 2, Зона 3*).

6. Рекультивация в прибрежной зоне при избыточной аккумуляции – изъятие осадочного материала и его использование для укрепления прибрежных районов, подверженных размыву (*Зона 1, Зона 2, Зона 3*).

7. Создание новых мест обитания (например, искусственных островов) при необходимости.

8. Пространственное планирование с учетом зон, подверженных аккумуляции, и структурирования землепользования для эффективного развития инфраструктуры и минимизации рисков проявления ПТП.

9. Управление прибрежной зоной, при котором процесс планирования осуществляется путем определения динамики береговой линии и потенциальных рисков и последствий, связанных с решениями, которые порождают различные сценарии будущего (*Зона 1, Зона 2, Зона 3*).

## Заключение

Проведенные исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий позволили провести интегральную геоэкологическую оценку прибрежной зоны Сурабая. Установлено, что главным фактором высокой степени проявления природно-техногенных процессов является высокий уровень урбанизации прибрежной зоны и нерациональное природопользование: вырубка мангровых лесов способствующих размыву берегов, высокая плотность поселения, обеспечивающая высокое антропогенное давление, незапланированная смена землепользования и образование пустошей на территории бывших рыбоводных прудов и др.

Проведенные исследования могут быть использованы при пространственном планировании с учетом антропогенного воздействия и при эффективном управлении землепользованием и развитием инфраструктуры для снижения рисков и укрепления экологической устойчивости прибрежных районов Сурабая.

## Список литературы

1. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. 294 с.
2. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие. М.: Маджента, 2003. 384 с.
3. Suharyo O.S., Hidayah Z. Pemanfaatan Citra Satelit Resolusi Tinggi Untuk Identifikasi Perubahan Garis Pantai Pesisir Utara Surabaya // Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology. 2019. Vol. 12, Is. 1. P. 89–96. DOI: 10.21107/jk.v12i1.5084.
4. Cannicci S., Lee S.Y., Bravo H., Cantera-Kintz J.R., Dahdouh-Guebas F., Fratini S., Diele K. A functional analysis reveals extremely low redundancy in global mangrove invertebrate fauna // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2021. Vol. 118, Is. 32. e2016913118. DOI: 10.1073/pnas.2016913118.
5. Safitri D.A., Bioresita F., Nugroho R.T., Bepalova L.A., Ramadanings N., Sobarman F.A. Mapping and monitoring of mangrove area in Surabaya (Indonesia) in the period of 1994–2018 using landsat satellite data and Google earth engine // Science in the South of Russia. 2023. Vol. 19, Is. 1. P. 51–58. DOI: 10.7868/25000640230106.
6. Сафитри Д.А., Беспалова Л.А., Беспалова Е.В. Исследование геоморфологических изменений береговой линии Сурабай, Индонезия с использованием данных дистанционного зондирования // Наука Юга России. 2020. Т. 16, № 4. С. 19–25. DOI: 10.7868/S25000640200403.
7. Williams A.T., Rangel-Buitrago N., Pranzini E., Anfuso G. The management of coastal erosion // Ocean & Coastal Management. 2018. Vol. 156. P. 4–20. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022.