

УДК 528.88  
DOI: 10.7868/S25000640200403

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ СУРАБАИ, ИНДОНЕЗИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2020 г. Д.А. Сафитри<sup>1,2</sup>, Л.А. Беспалова<sup>2</sup>, Е.В. Беспалова<sup>2</sup>

**Аннотация.** Береговая линия в Сурабае, Индонезия тянется на протяжении 47,4 км в двадцати подрайонах города. Одна из главных проблем побережья – размыв берегов. Этот процесс оказывает негативное влияние на объекты прибрежной инфраструктуры и жилые кварталы города, а также приводит к деградации естественных ландшафтов – мангровых зарослей в районе Сурабаи. Целью исследования являлось изучение современных береговых процессов побережья Сурабаи и анализ геоморфологических изменений побережья за период с 1994 по 2018 г. Использованы данные Landsat TM 5 (8 июля 1994 г.), Landsat 8 OLI (17 мая 2018 г.) и полевые съемки береговой зоны. Методом исследования являлся пространственно-временной анализ положения береговой линии в течение 24 лет путем совмещения космоснимков и проведения подспутниковых наблюдений. В 1994–2018 гг. размыв берега зафиксирован в подрайонах: Тамбак Осовилангун, Тамбак Лангон, Грегес и Калианак (Западная Сурабая), Моро Крембанган, Уджунг, Булак Бантенг, Кедунг Човек (Северная Сурабая), Кепутих, Вонореджо, Медокан Аю (Восточная Сурабая). Наиболее интенсивное отступление берега наблюдалось в подрайоне Вонореджо (141637,1 м<sup>2</sup>). Меры, которые были предприняты сообществом Вонореджо, заключались в проведении посадок мангровых деревьев. Площадь антропогенно трансформированных берегов увеличилась за счет строительства нового порта Телук Ламонг на 916068,3 м<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** береговая линия, дистанционное зондирование, абразия, аккумуляция, береговые процессы, мангровые леса, Сурабая, Индонезия.

### STUDY OF GEOMORPHOLOGICAL CHANGES IN THE COASTLINE OF SURABAYA, INDONESIA USING REMOTE SENSING DATA

D.A. Safitri<sup>1,2</sup>, L.A. Bepalova<sup>2</sup>, E.V. Bepalova<sup>2</sup>

**Abstract.** The coastline in Surabaya, Indonesia is about 47.4 kilometers and lies in twenty city sub-districts. One of the main problems in coastal Surabaya is bank erosion. This process has a negative impact on the coastal infrastructure and residential areas of the city, and leads to the degradation of natural landscapes such as mangroves area in Surabaya. The aim of this research was to study the modern coastal processes of the Surabaya coast and analyze the geomorphological changes for the period from 1994 to 2018. Data used in this research were from Landsat TM 5 1994 (8 July 1994) and Landsat 8 OLI 2018 (17 May 2018) and coastal field surveys. The method was the spatial-temporal analysis of the coastline position for twenty-four years (1994–2018) by combining satellite images and conducting sub-satellite observations. In 1994–2018, coastal erosion was recorded in some sub-districts: Tambak Osowilangun, Tambak Langon, Greges and Kalianak (West Surabaya); Moro Krembangan, Ujung, Bulak Banteng, and Kedung Cowek (North Surabaya); Keputih,

<sup>1</sup> Университет 17 августа 1945 (УНИТАГ) (Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya (UNTAG), Surabaya, Indonesia), Индонезия, 60118, Восточная Ява, Сурабая, Джалан Семоловару, 45, e-mail: dikadede@gmail.com

<sup>2</sup> Институт наук о Земле Южного федерального университета (Institute for Earth Sciences of the Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, e-mail: bepalowaliudmila@yandex.ru

and Wonorejo and Medokan Ayu (East Surabaya). The most intense coastal retreat (erosion) was observed in the Wonorejo sub district (about 141637.1 m<sup>2</sup>). Measures that have been taken by the community of Wonorejo was the planting of mangrove trees. The area of man-made coasts increased due to the construction of the new port of Teluk Lamong by 916068.3 m<sup>2</sup>.

**Keywords:** coastline, remote sensing, abrasion, accumulation, coastal processes, mangrove forests, Surabaya, Indonesia.

## ВВЕДЕНИЕ

Индонезия является морским государством и представляет собой архипелаг площадью 5,8 млн км<sup>2</sup>, окруженный территориальным морем площадью 3,1 млн км<sup>2</sup>, и имеет обширную исключительную экономическую зону в 2,7 млн км<sup>2</sup> [1; 2]. Обширные прибрежные районы обладают значительным потенциалом для развития различных направлений деятельности, таких как рыбоводство, промышленность, прибрежный туризм и другие.

В связи с хозяйственной деятельностью прибрежные районы испытывают антропогенное давление и на суше, и на море. Высокая интенсивность использования и отсутствие природоохранных мер приводят к негативному воздействию на этот регион и делают его уязвимым [3].

Размыв берегов может быть вызван как естественными факторами, так и деятельностью человека. К естественным факторам относятся геологические условия, воздействие волн и течений, повышение уровня моря, приливы. Однако около 70 % песчаных пляжей в мире подвержены размыву, и основной причиной этого является множество прямых и косвенных воздействий человека.

Мониторинг состояния прибрежной зоны очень важен для охраны окружающей среды, а также для развития страны. Информация об изменении береговой линии необходима для управления прибрежными районами, регионализации опасностей, а также при анализе и прогнозе геоморфологии берегов [4; 5]. В работе [2] пояснено, что береговая линия, являясь зоной суши и моря, представляет собой уникальную среду, где воздух, вода и берег взаимосвязаны друг с другом.

Сурабая – город в северной провинции Восточная Ява с общей площадью 374,06 км<sup>2</sup>. Географически Сурабая расположена между 7°9'–7°21' ю.ш. и 112°36'–112°54' в.д. В административном отношении город имеет следующие границы: северная сторона (пролив Мадура), восточная сторона (пролив Мадура), южная сторона (г. Сидоарджо), западная сторона (г. Гресик).

Прибрежные экосистемы в г. Сурабая на восточном (Памурбайя, Pamurbaya) и северном (Пантурбайя, Panturbaya) побережье представлены субилистой экосистемой, эстуариями и мангровыми лесами (Бакау). Прибрежная зона в Сурабае в последние десятилетия активно осваивается как селитебная зона, ведется строительство портов, развита сельскохозяйственная отрасль, создаются марихозяйства и другие объекты прибрежной инфраструктуры. Мангровые леса, которые представляют заповедную зону, уже более 20 лет превращаются в пруды для марихозяйств. Изменения, происходящие в прибрежных районах, нуждаются в регулярном мониторинге.

В этой связи целью исследования является анализ геоморфологических изменений береговой линии Сурабаи с использованием данных дистанционного зондирования.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Областью исследования является береговая зона г. Сурабая, а метод исследования – метод временных рядов с частотой данных более 24 лет (1994–2018 гг.). В результате получены сведения о морфологических изменениях на побережье, произошедших в этот период, и выявлены зоны активной абразии и аккумуляции. Подспутниковые полевые исследования позволили более точно идентифицировать происходящие береговые процессы и установить причины их возникновения. Структура исследования показана на рисунке 1.

В работе использованы изображения Landsat TM 5 (8 июля 1994 г.) и Landsat 8 OLI (17 мая 2018 г.). Проведены также полевые съемки в береговой зоне, полученные материалы были загружены в SHP-файлы Сурабая в качестве ориентира в вырезании изображений Landsat.

Данные Landsat Image были оцифрованы с использованием программного обеспечения ENVI 4.6. В этом программном обеспечении происходит процесс радиометрической коррекции. Радиометрическая коррекция представляет собой процесс ис-

правления пиксельных значений на спутниковых изображениях и радиометрических погрешностей для улучшения визуализации изображения [6; 7]. Повышение резкости пространственных изображений, или так называемое панхроматическое слияние изображения, направлено на улучшение качества изображений, чтобы облегчить пользователю процесс интерпретации [8]. Панхроматические полосы в восьмой полосе, которая имеет разрешение 15 м, выше, чем у других многоспектральных полос с разрешением 30 м. Этот процесс осуществлялся на основе применения программного обеспечения ENVI 4.6 и метода Грама – Шмита, используемого для повышения резкости изображения. Обработанное изображение было вырезано в соответствии с местоположением области исследования, а именно прибрежной частью Сурабаи, которая включает 20 подрайонов: Ромо Калисари, Тамбак Осовилангун, Тамбак Лангон, Грегес и Калианак (Западная Сурабая); Моро Крембанган, Западный Перак, Северный Перак, Уджунг, Тамбак Веди, Булак Бантенг, Тамбак Веди, Кедунк Човек, Кенджеран, Суколило (Северная Сурабая); Дукух Сутореджо, Калисари, Кепутих, Вонореджо, Медокан Аю, Гунунг Аньяр Тамбак (Восточная Сурабая). Далее была оцифрована береговая линия, и изображения Landsat обрабатывались в первую очередь с использованием метода резкого панорамирования. Повышение резкости – это процесс объединения мультиспектральных и панхроматических изображений (band 8), который имеет спектральное и высокое пространственное разрешение. Затем береговая линия на изображении была оцифрована с помощью программного обеспечения ArcGIS 10.1. Результаты оцифровки изображений береговой линии в Landsat TM 5 (1994 г.) и Landsat 8 OLI (2018 г.) были наложены друг на друга. Цель этого наложения состоит в том, чтобы выяснить степень изменения береговой линии Сурабаи за период 1994–2018 гг. Расчет площади размыва и аккумуляции сделан с помощью ArcGIS 10.1 инструментом вычисления геометрии (табл. 1). Линии были преобразованы в многоугольник, результаты оцифровки изображений 1994 и 2018 гг. совпали и показали области абразии и аккумуляции. Область считается абразионной, если результаты оцифровки изображения 1994 г. находятся перед данными 2018 г., тогда как область аккумулятивная, если результаты оцифровки изображения 2018 г. находятся перед данными 1994 г. (рис. 2, 3). Совмещение положения берего-

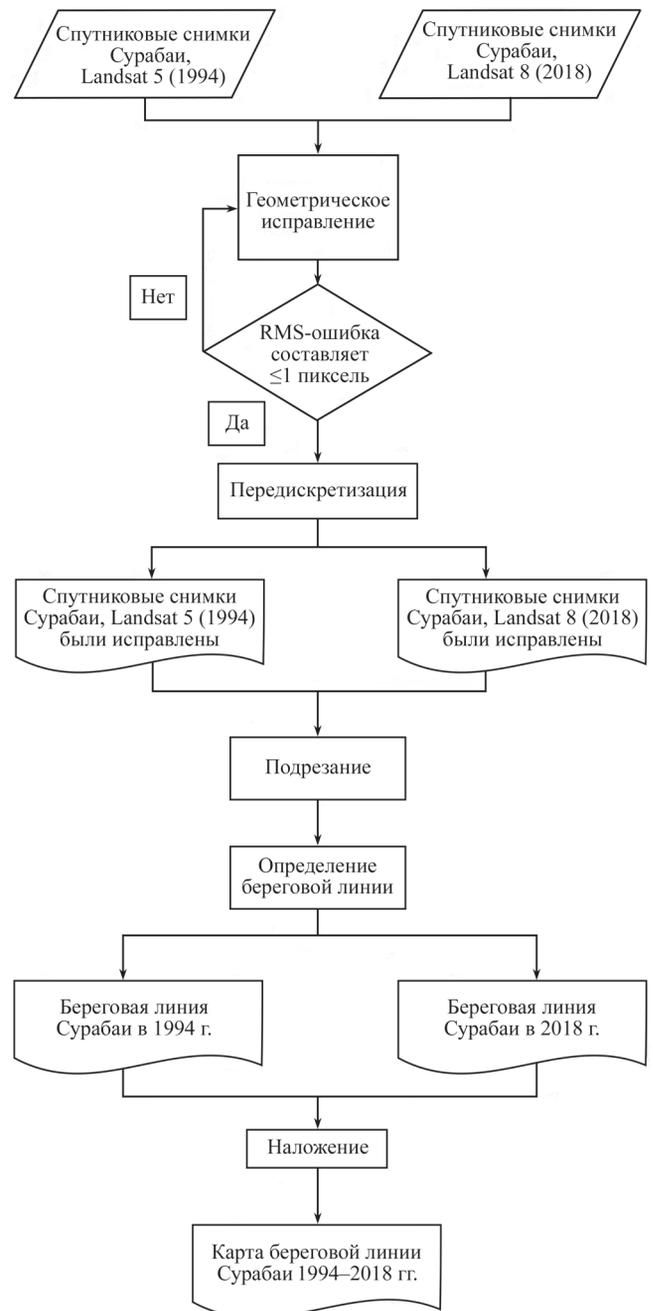


Рис. 1. Структура исследования.

Fig. 1. Research methodology.

вой линии Сурабаи и ее регионов использовалось и для того, чтобы оценить интенсивность проявления береговых процессов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На побережье Сурабаи в исследуемый период наблюдались как абразионные процессы, так и аккумуляция. На значительной площади появились антропогенные объекты.

**Таблица 1.** Состояние береговой линии прибрежной зоны Сурабая за 1994–2018 гг.  
**Table 1.** State of the coastline of the Surabaya coastal zone in 1994–2018

| Район<br>Area  |  | Подрайон<br>Subarea                      | Размыв<br>Erosion                  | Площадь, м <sup>2</sup><br>Area, m <sup>2</sup> | Аккумуляция<br>Accumulation | Площадь, м <sup>2</sup><br>Area, m <sup>2</sup> | Антропогенный берег<br>Anthropogenic coast | Площадь, м <sup>2</sup><br>Area, m <sup>2</sup> |
|--|--|--|------------------------------------|---|-----------------------------|---|--|---|
| Западная Сурабая<br>West Surabaya                            | Беново<br>Benowo                           | Ромо Калисари<br>Romo Kalisari           | -                                  | 0,0   | +                           | 81589,2   | -  | 0,0   |
|  |  | Тамбак Осовилангун<br>Tambak Osowilangun | +                                  | 2857,9  | +                           | 168095,5  | +  | 916068,3  |
|  | Асемрово<br>Asemgowo                       | Тамбак Лангон<br>Tambak Langon           | +                                  | 2518,0  | +                           | 89025,3   | -  | 0,0   |
|  |  | Грегес<br>Greges                         | +                                  | 8667,2  | +                           | 58699,5   | -  | 0,0   |
|  |  | Калианак<br>Kalianak                     | +                                  | 17755,0   | +                           | 110755,0  | -  | 0,0   |
|  |  | Крембанган<br>Krembangan                 | Моро Крембанган<br>Moro Krembangan | +   | 4528,5                      | +   | 173881,0                                   | -   |
|  | Западный Перак<br>Perak Barat              | -  | 0,0                                | -   | 0,0                         | +   | 270686                                     |   |
| Северная Сурабая<br>North Surabaya                           | Пабеан Чанतिकан<br>Pabean Cantikan         | Северный Перак<br>Perak Utara            | -                                  | 0,0   | -                           | 0,0   | +  | 338830,2  |
|  | Семампир<br>Semampir                       | Уджунг<br>Ujung                          | +                                  | 0,0   | +                           | 12760,1   | +  | 237334,1  |
|  | Кенджеран Кенджеран<br>Kenjeran            | Булак Бантенг<br>Bulak Banteng           | +                                  | 16,5  | +                           | 42891,0   | -  | 0,0   |
|  |  | Тамбак Веди<br>Tambak Wedi               | -                                  | 862,3   | +                           | 89701,0   | -  | 0,0   |
|  |  | Кедунк Човек<br>Kedung Cowek             | +                                  | 4831,9  | +                           | 41059,0   | -  | 0,0   |
|  |  | Кенджеран<br>Kenjeran                    | -                                  | 0,0   | +                           | 151723,8  | -  | 0,0   |
|  | Суколило<br>Sukolilo                       | -  | 0,0                                | +   | 694828,1                    | -   | 0,0  |   |
| Восточная Сурабая<br>East Surabaya                           | Мулиорехо<br>Mulyorejo                     | Духух Сутореджо<br>Dukuh Sutorejo        | -                                  | 0,0   | +                           | 678409,1  | -  | 0,0   |
|  |  | Калисари<br>Kalisari                     | -                                  | 0,0   | +                           | 1012228,2                                       | -  | 0,0   |
|  | Суколило Sukolilo                          | Кепутих<br>Keputih                       | +                                  | 40184,6   | +                           | 4401201,3                                       | -  | 0,0   |
|  | Рунькуть Rungkut                           | Вонореджо<br>Wonorejo                    | +                                  | 141637,1  | +                           | 18103,0   | -  | 0,0   |
|  |  | Медокан Аю<br>Medokan Ayu                | +                                  | 5786,5  | +                           | 320949,3  | -  | 0,0   |
| Гунунг Аньяр<br>Gunung Anyar                                 | Гунунг Аньяр Тамбак<br>Gunung Anyar Tambak | -  | 0,0                                | +   | 280430,3                    | -   | 0,0  |   |
| Сумма площадей, м <sup>2</sup><br>Total area, m <sup>2</sup> |  |  |                                    | 229645,5<br>11 подрайонов<br>11 subdistricts    |                             | 8426330<br>18 подрайонов<br>18 subdistricts     |  | 1762919<br>4 подрайона<br>4 subdistricts        |

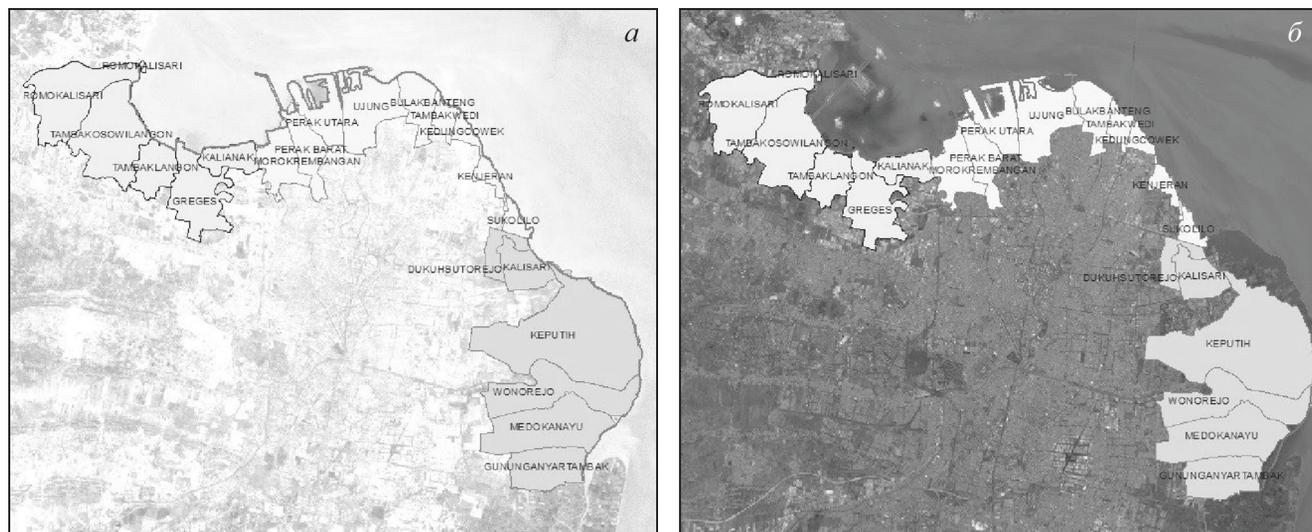


Рис. 2. Карта береговой линии Сурабаи в 1994 г. (а) и в 2018 г. (б).  
Fig. 2. Map of Surabaya shoreline in 1994 (a) and 2018 (b).

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 м<sup>2</sup>. Среди всех подрайонов подрайон Вонореджо характеризуется наибольшими скоростями абразии, между тем подрайон Булак Бантенг является наименее пострадавшим от размыва (16,5 м<sup>2</sup>).

Аккумуляция может происходить из-за процесса перемещения пляжеобразующего материала вдоль побережья и его переотложения с формированием аккумулятивных форм. Процесс аккумуляции зафиксирован в зонах распространения мангровой растительности, которая встречается в нескольких прибрежных районах Сурабаи. Географически контур побережья Восточной Сурабаи обеспечивает затишной режим, а подводный склон представляет собой мелководье со слабой волновой активностью. Большая часть наносов накапливается здесь в течение нескольких лет, это один из факторов формирования аккумулятивного берега. На рисунке 3 видно, что процесс аккумуляции в Восточной Сурабае более распространен в районе Суколило в подрайоне Кепутих (4401201,3 м<sup>2</sup>).

Проведенные исследования показали, что прибрежные земли в Сурабае в основном заняты населенными пунктами и прудами. Большинство новых прудов создано в Восточной Сурабае, в Гунунг Аньяре, в Рункуте и в подрайоне Суколило. Авторы провели выездную проверку водоемов и мангровых зарослей в подрайоне Гунунг Аньяр Тамбак [7; 8].

Деятельность человека является основным фактором в процессе изменения береговой линии Сурабаи. При проведении полевой проверки было установлено, что процесс изменения береговой линии, который произошел в Кепутихе, был вызван сведением мангровой растительности и созданием новой зоны поселений в этом районе. Мангровые заросли вдоль побережья Сурабаи играют важную роль в сдерживании волн и течений, и благодаря этому влияние абразии сводится к минимуму.

В таблице 1 показано, что в Сурабае наиболее пострадавший от абразии подрайон – Вонореджо (141637,1 м<sup>2</sup>), что связано с деятельностью человека, а именно с изменением режима землепользования. Мангровые заросли были сведены, и вместо них созданы сформированы фермы марихозяйств

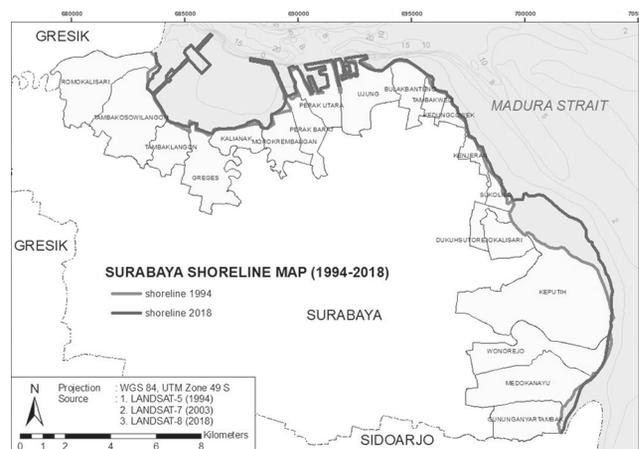


Рис. 3. Карта совмещенной береговой линии Сурабаи за 1994–2018 гг.  
Fig. 3. Map of combined shoreline of Surabaya in 1994–2018.



**Рис. 4.** Состояние прудов (а) и мангровый лес (б) в Сурабае.  
**Fig. 4.** Condition of ponds (a) and mangrove forest (b) in Surabaya.

(рис. 4). Ведется незаконная вырубка мангровых зарослей и в окрестностях Сурабаи, и со временем влияние размыва все больше ощущается на пляжах и наносит ущерб местным жителям – разрушены дома, в которых они жили. К сожалению, общество до сих пор не осознает важность мангровых зарослей в прибрежных районах.

Интенсивное освоение береговой зоны происходит в районе Северной Сурабаи, где находится порт Танджунг Перак. В 2013 г. в районе Беново (в подрайоне Тамбак Осовилангун) был построен новый порт Телук Ламонг, в результате чего площадь антропогенно трансформированных берегов увеличилась на 916068,3 м<sup>2</sup>.

За 24 года размыв, аккумуляция и антропогенное воздействие оказали сильное влияние на геоморфологию прибрежной зоны и береговой линии Сурабаи. Зачастую эти процессы носят негативный характер. Придание огласке этой ситуации, участие правительства и общественности в значительной степени влияют на успешность восстановления прибрежных экосистем, но для этого необходимо более плотное сотрудничество между правительством и местными сообществами.

## ВЫВОДЫ

В период между 1994 и 2018 гг. эффект размыва берега зафиксирован в 11 подрайонах Су-

рабаи. Из-за абразии береговая линия отступила в подрайонах Тамбак Осовилангун, Тамбак Лангон, Грегес, Калианак (Западная Сурабая), Моро Крембанган, Уджунг, Булак Бантенг, Кедунк Човек (Северная Сурабая), Кепутих, Вонореджо, Медокан Аю (Восточная Сурабая). Самая высокая скорость размыва была в подрайоне Вонореджо (141637,1 м<sup>2</sup>). Главным методом борьбы с абразией в Сурабае является посадка мангровых деревьев вдоль береговой линии. Кроме феномена размыва, в береговой зоне Сурабаи были выявлены и зоны аккумуляции, но на значительно меньших площадях.

Интенсивное землепользование в Сурабае зачастую оказывает негативное влияние на геоморфологические формы и береговую линию в целом. В этой связи существует необходимость в защите прибрежных территорий путем восстановления прибрежных экосистем, например повторной посадки мангровых лесов, восстановления функций утраченной земли и, что наиболее важно, снижения чрезмерного антропогенного давления.

Исследования выполнены с использованием методов и подходов, разработанных в рамках научного проекта РФФИ № 18-05-80082 по теме «Закономерности формирования опасных береговых процессов в Азовском море и социально-экономические последствия их проявлений».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Arief M., Winarso G., Prayogo T. Kajian Perubahan Garis Pantai Menggunakan Data Satelit Landsat di Kabupaten Kendal. *Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan Data Citra Digital*. 8: 71–80.
2. Djunarsjah E. 2004. *Hukum Laut*. Bandung, ITB: 136 p.
3. Damaywanti K. 2013. [The impact of coastal erosion on the social environment (a case study in the village Bedono, Sayung, Demak)]. In: [National Seminar on Management of Natural Resources and Environmental Optimization of

- Natural Resources Management and Environment in Realizing Sustainable Development (Semarang, Indonesia, 2013)]. Semarang, Diponegoro University: 363–367. (In Bahasa).
4. Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N. 2007. Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science & Technology*. 4(1): 61–66. doi: 10.1007/BF03325962
  5. Chand P., Acharya P. 2010. Shoreline change and sea level rise along coast of Bhitarkanika wildlife sanctuary, Orissa: An analytical approach of remote sensing and statistical techniques. *International Journal Geomatics and Geoscience*. 1(3): 436–455.
  6. Ardiansyah. 2015. [Remote sensing image processing using ENVI 5.1 and ENVI LiDAR]. Jakarta, PT Labsig Inderaja Islim: 267 p. (In Bahasa).
  7. Hendriyono W., Wibowo M., Al Hakim B., Istiyanto D.C. 2015. Modeling of sediment transport affecting the coastline changes due to infrastructures in Batang – Central Java. *Procedia Earth and Planetary Science*. 14: 166–178. doi: 10.1016/j.proeps.2015.07.098
  8. Safitri D.A., Bepalova L.A., Wijayanti F. 2019. Changes in land use in Eastern Surabaya, Indonesia, and their impact on coastal society and aquaculture. *R-ECONOMY*. 5(4): 198–207. doi: 10.15826/recon.2019.5.4.020

Поступила 22.09.2020