

УДК 528.942:528.88:551.35.054
 DOI 10.17513/use.38450

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ КЛИФА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА)

Мисиров С.А. ORCID ID 0000-0002-1973-8748

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

*«Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»,
 Ростов-на-Дону, Российская Федерация, e-mail: sam.misirov@gmail.com*

Целью исследования является оценка динамики береговых клифов Таганрогского залива с использованием разновременных данных дистанционного зондирования Земли и пространственно-временного анализа в геоинформационных системах. В статье представлен комплексный подход к мониторингу изменений бровки береговых клифов, основанный на сравнительном анализе разновременных спутниковых снимков в геоинформационной среде. Для анализа использовались изображения, полученные с сенсоров «CORONA», «SPOT 1–5», «Sentinel -2», «Ресурс-П» за период с 1964 по 2022 год. На основе этих данных были оцифрованы линии бровок клифов и построены разрезы, перпендикулярные береговой линии, для расчета скоростей динамики береговых уступов. Пространственно-временной анализ спутниковых данных за период с 1964 по 2022 год позволил определить линейные среднемноголетние скорости размыва берегов. Установлено, что для 57% береговой линии характерна слабая интенсивность размыва, для 13% – средняя, и для 23% – сильная. Помимо линейных скоростей, на основе детальных схем геологического строения, цифровой модели рельефа «Forest And Buildings removed Copernicus DEM» и собственных полевых данных о морфометрии и современном состоянии клифов была проведена оценка объемных скоростей размыва ($\text{m}^3/\text{год}$).

Ключевые слова: береговая зона, откос береговой, мониторинг, ДЗЗ, ГИС, Таганрогский залив

ASSESSMENT OF SPATIAL AND TEMPORAL DYNAMICS OF SEA CLIFFS BASED ON REMOTE SENSING DATA AND GEOINFORMATION SYSTEMS (ON THE EXAMPLE OF THE COASTAL ZONE OF THE TAGANROG BAY)

Misirov S.A. ORCID ID 0000-0002-1973-8748

*Federal State Budget Institution of Science «Federal Research Centre
 the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences»,
 Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: sam.misirov@gmail.com*

The purpose of this work was to evaluate the dynamics of sea cliffs in the coastal zone of the Taganrog Bay, based on multi-time data from remote sensing of the Earth from space and using spatial and spatio-temporal analysis in geoinformation systems. The article proposes a comprehensive approach to monitoring spatiotemporal changes in the edge of sea cliffs, based on a comparative analysis of multi-time satellite images in a geoinformation environment. Images obtained from CORONA, SPOT 1–5, Sentinel -2, Resource-P sensors for the period from 1964 to 2022 were used for analysis. Based on these data, the lines of cliff edges were digitized and perpendicular to the coastline, the cuts were constructed to calculate the dynamics velocities of the sea cliff. The spatio-temporal analysis of satellite data for the period from 1964 to 2022 allowed to determine the linear average annual rates of coastal erosion. It was found that 57% of the coastline is characterized by a low intensity of erosion, for 13% – an average, and for 23% has a high rate. In addition to linear rates, based on detailed geological structures, the «Forest And Buildings removed Copernicus DEM» digital elevation model, and our own field data on the morphometry and current state of the cliffs, we estimated the volumetric erosion rates (m^3/year).

Keywords: coastal zone, scarp, monitoring, remote sensing, geoinformation system, Taganrog Bay

Введение

Таганрогский залив расположен в северо-восточной части Азовского моря и вытянут на 120 км в субширотном направлении, ширина его составляет 20-40 км, что делает его крупнейшим заливом моря. Побережье Таганрогского залива характеризуется высокой степенью урбанизации и промышленной концентрации. Здесь расположены такие крупные портовые города, как Мариуполь, Таганрог и Ейск, а также многочис-

ленные населенные пункты. Промышленная деятельность и высокая плотность населения создают значительную антропогенную нагрузку на прибрежные экосистемы.

Береговая линия залива сформирована легкоразмываемыми лёссовидными суглинками, что делает ее подверженной эрозионным процессам. Отвесные абразионные уступы, характерные для данного региона, находятся в зоне повышенного риска разрушения под воздействием неблагоприятных

природных факторов, таких как штормовая активность, а также антропогенных факторов, включая хозяйственную деятельность человека.

Для береговой зоны Азовского моря, и в особенности Таганрогского залива, характерно развитие опасных экзогенных геологических процессов (ОЭГП): абразии, оползней, формирование оврагов и балок. Наиболее масштабными опасными процессами следует признать абразионные и абразионно-оползневые разрушения береговых обрывов; эти процессы охватывают 80% морского побережья Азовского моря [1]. Кроме природных процессов, происходящих в береговой зоне Таганрогского залива, в последнее время усиливается освоение береговой зоны – строительство автодорог, портовой инфраструктуры, развитие объектов рекреации, сельскохозяйственная деятельность, урбанизация, что в свою очередь дополнительно создает нагрузку на устойчивость склонов. Все эти факторы в целом обуславливают необходимость изучения ОЭГП для минимизации возможного ущерба.

Проявление опасных экзогенных геологических процессов в пределах побережья Таганрогского залива нередко приводит к разрушению объектов капитального строительства, промышленной инфраструктуры и потере ценных сельскохозяйственных земель, а также снижает рекреационную привлекательность побережья, все эти факторы в целом обуславливают необходимость постоянного мониторинга и изучения ОЭГП в пределах исследуемого региона для минимизации возможного ущерба [1-3].

Страна отметить, что систематическое изучение береговой зоны Азовского моря началось с середины XX века и продолжается в настоящее время [4-6]. Эти исследования основаны на инструментальном методе измерений [7, с. 121-122; 8; 9], который позволяет с высокой точностью определить размыв берегов и провести оценку изменений в численном выражении. Но такой подход не лишен недостатков, главным из которых является точечный характер наблюдений, зачастую он не отражает изменений бровки клифа на всем протяжении береговой линии. Вместе с тем протяженность зоны мониторинга в пределах берегов Азовского моря составляет более 1000 км [10, с. 270-271], а применительно к Таганрогскому заливу более 300 км. Исходя из этого значительные участки берега между опорными точками не всегда могут быть полностью охвачены процессом мониторинга.

Анализ существующей практики изучения динамики береговой зоны морей и водохранилищ показывает, что наилучший результат мониторинга может быть достигнут при комбинации классических инструментальных методов, применения данных ДЗЗ, картографических и фотограмметрических методов, а также современных ГИС-технологий. Из подобных работ можно выделить исследования побережий: Индии [11]; Италии [12]; северных морей России [13].

Цель исследования заключалась в оценке пространственно-временной динамики клифа в береговой зоне Таганрогского залива на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса и пространственно-временного анализа в геоинформационной среде.

Материалы и методы исследования

В большинстве работ, проведённых выше, объектом для оценки динамики выступает, как правило, именно береговая линия, которая определяется как:

- среднемноголетнее положение уреза воды;

- граница, по которой водная поверхность пересекается с сушей, или некоторое среднее положение между морем и сушей в данный период [14]. Исходя из этого оценка направлена на получение значений скорости размыва или аккумуляции в зоне пляжа.

В настоящей работе для оценки динамики скоростей абразии использован подход, при котором объектом исследования выступает линия бровки берегового уступа, что позволяет, зная положение этой бровки в различные периоды времени, рассчитать скорости отступания клифа в абразионной береговой зоне.

На первом этапе для анализа динамики берегов были отобраны данные дистанционного зондирования Земли, представленные в таблице. Далее все снимки проходили процедуру предварительной обработки и пространственной привязки.

В качестве программной платформы была использована полнофункциональная геоинформационная система (ГИС) ArcGIS v. 10., с инструментом Digital Shoreline Analysis System (DSAS) [15], который является надстройкой и предоставляется на бесплатной основе. DSAS позволяет пользователю вычислить статистику скорости изменений из нескольких исторических позиций береговой линии на основе построенных разрезов (трансектов) по нормали к берегу с заданным шагом.

Данные дистанционного зондирования Земли, использованные для построения
серии разновременных линий бровки берегового уступа

| № | Дата снимка | Космический аппарат | Разрешение, м | Побережье |
|----|-------------|---------------------|---------------|-----------|
| 1 | 14.07.1964 | CORONA J-1 (KH-4A) | 2,5 | северное |
| 2 | 01.07.1975 | Hexagon (KH-9-10) | 4 | то же |
| 3 | 12.08.1988 | Spot 1 | 10 | < |
| 4 | 31.05.1988 | Spot 1 | 10 | < |
| 5 | 21.08.2006 | Spot 5 | 5 | < |
| 6 | 01.05.2017 | Ресурс-П №2 | 0,6 | < |
| 7 | 03.10.2017 | Ресурс-П №2 | 0,6 | < |
| 8 | 05.10.2017 | Ресурс-П №1 | 0,6 | < |
| 9 | 19.01.2020 | Sentinel-2 | 10 | < |
| 10 | 12.07.2022 | Sentinel-2 | 10 | < |
| 11 | 19.09.1971 | Corona (KH-4B) | 2 | южное |
| 12 | 01.07.1975 | Hexagon (KH-9-10) | 4 | то же |
| 13 | 12.08.1988 | Spot 1 | 10 | < |
| 14 | 31.05.1988 | Spot 1 | 10 | < |
| 15 | 21.08.2006 | Spot 5 | 5 | < |
| 16 | 26.07.2016 | Ресурс-П №2 | 0,6 | < |
| 17 | 19.01.2020 | Sentinel-2 | 10 | < |
| 18 | 12.07.2022 | Sentinel-2 | 10 | < |

Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Следующим шагом была оцифровка бровки клифа, на масштабах 1:500, 1:1500, 1:2000. Полученные береговые линии использовались для расчета скоростей абразии для северного побережья за временной период с 1964 по 2022 г., а для южного побережья с 1971 по 2022 г. Контроль качества полученных линий бровки (E_p) производился путем расчета неопределенностей (ошибок оцифровки/картографирования), как сумма среднеквадратических погрешностей всех источников ошибок.

В оценке учитывались три составляющие, которые могут вносить погрешности:

1. E_r [м] – разрешение данных ДЗЗ из космоса (табл.);

2. E_g [м] – неопределенность географической привязки, которая была рассчитана как среднее значение среднеквадратичных ошибок всех точек привязки (общее значение RMSE в ArcGIS);

3. E_c [м] – точность оцифровки линии при помощи стандартных инструментов ГИС.

Для масштаба 1:2000 и стандартного пера 0,35 мм соответствует линия шириной 0,7 м на местности. Для масштаба 1:5000 ширина равна 1,75 м [15; 16].

Для изучаемого периода с 1964 по 2022 г. погрешность линейной скорости движения бровки составила ± 0.3 м/год.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате пространственно-временного анализа данных ДЗЗ за период с 1964 по 2022 г. были получены линейные среднемноголетние скорости размыва берегов (рис. 1) и установлено, что 57% береговой линии соответствуют слабой (<1 м/год) интенсивности размыва берегов, 13% – средней, 23% – сильной.

Наибольшие темпы размыва характерны для участков х. Весело-Вознесенка (средняя скорость по участку составила 1,87 м/год) и участка между ст. Должанской и с. Воронцовка (2,4 м/год). Основным фактором интенсивного размыва на этих участках является геологическое строение. Берег на этих участках сложен легкоразмываемыми суглинистыми отложениями.

Вторым фактором, влияющим на интенсивное разрушение этих участков, является отсутствие так называемой природной защиты, т.е. наличие широкого пляжа в основании. Как правило, этим участкам свойственны узкие (2-10 м), прислоненные к клифу, маломощные пляжи, как в случае с х. Весело-Вознесенкой, или вовсе его отсутствие, как на участке от х. Воронцовка до ст. Должанской.

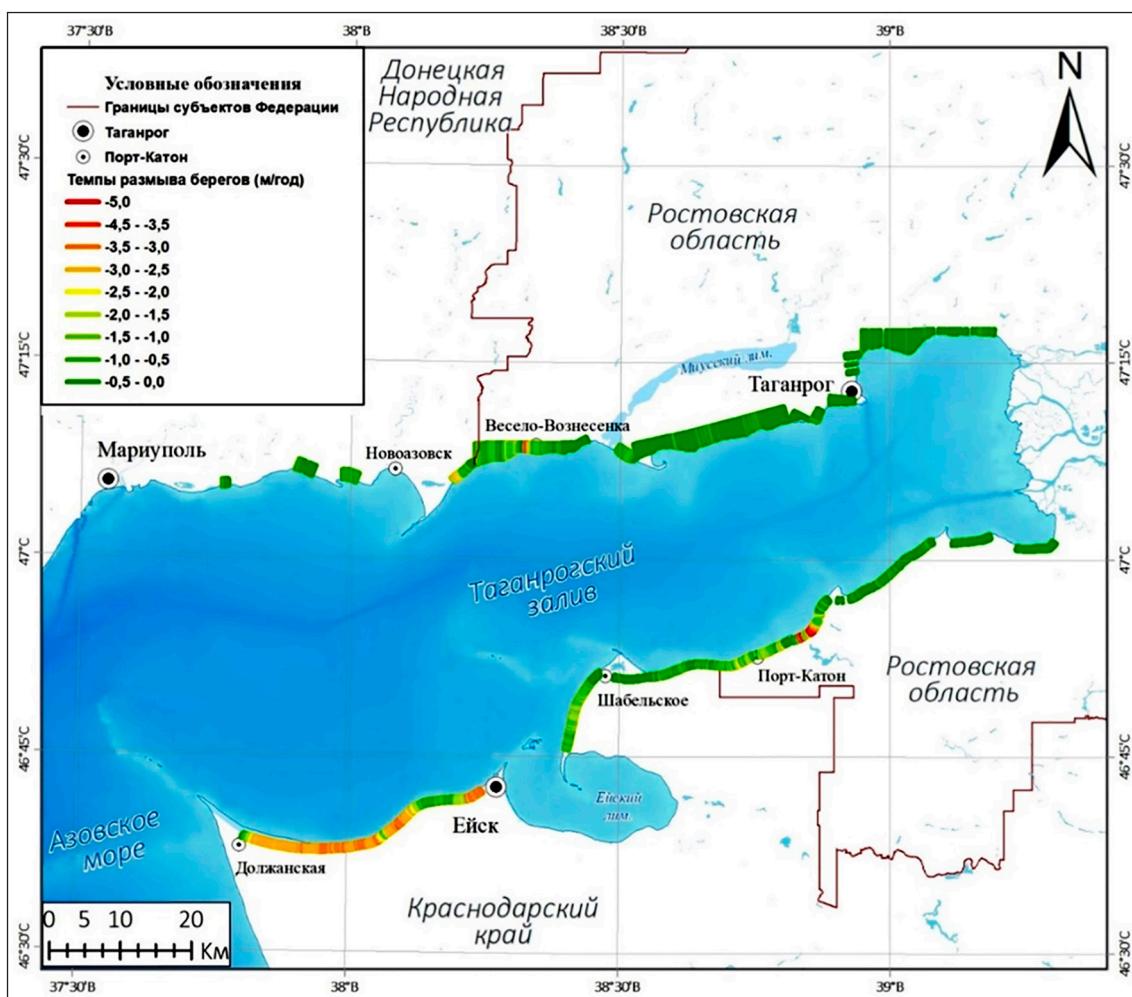


Рис. 1. Среднемноголетние темпы отступания берегов за 1964–2022 гг.
Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования

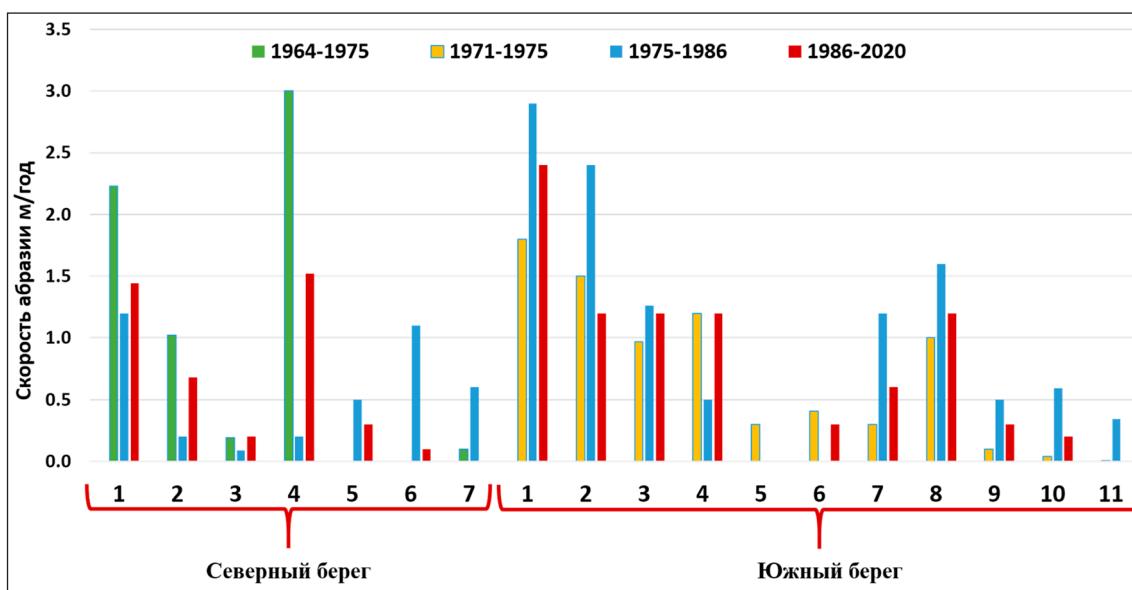


Рис. 2. Линейные скорости отступания берегов по участкам, рассчитанные для различных периодов
Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования

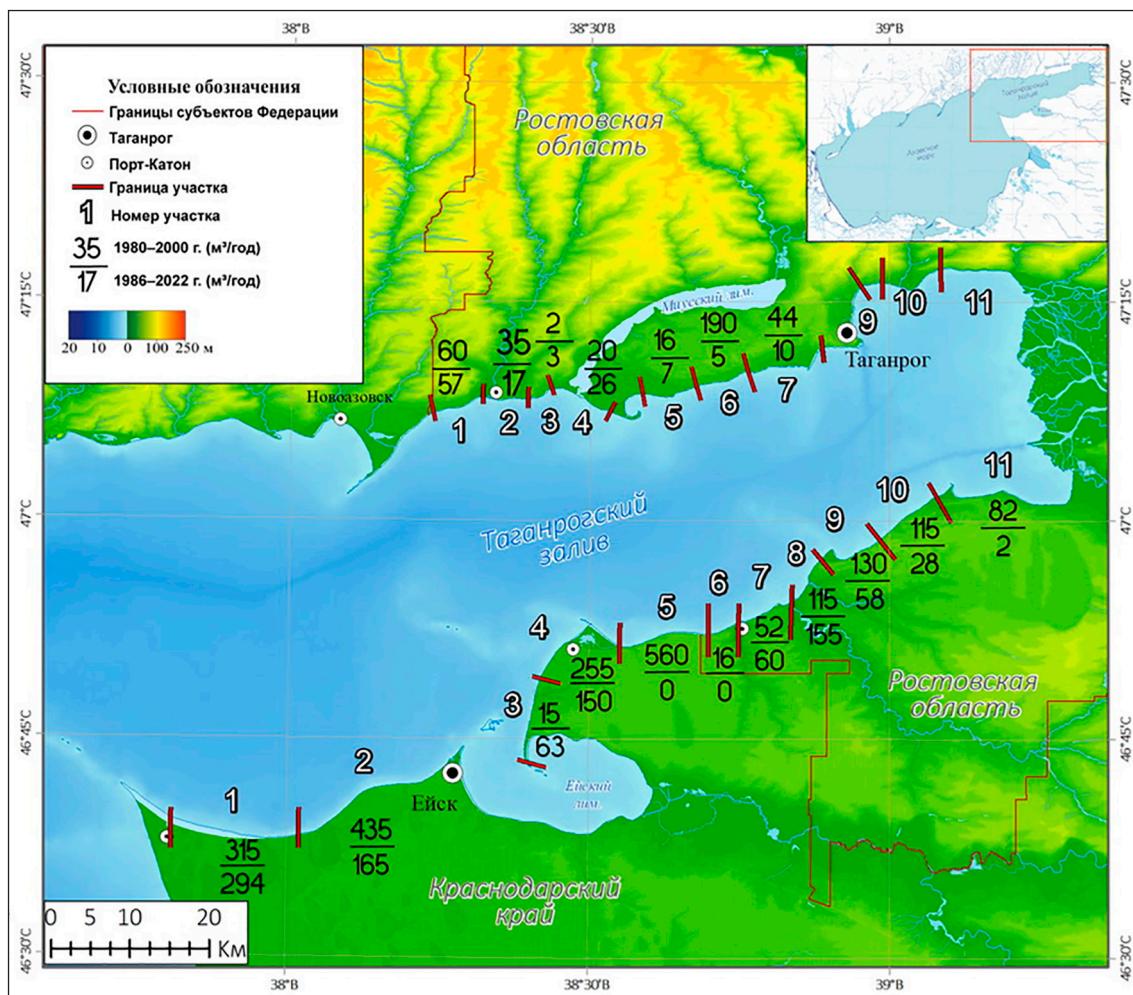


Рис. 3. Схема абразионных участков Таганрогского залива с оценками объемов терригенного материала, поступающего в прибрежную зону (м³/год).

Северный берег: 1 – Весело-Вознесенский; 2 – Приазовский (Боковский); 3 – Рожковский; 4 – Беглицкий; 6 – Новолакедемоновский; 7 – Русскослободской.

Южный берег: 1 – Кругловский; 2 – Павло-Очаковский; 3 – Семибалковский; 4 – Чумбурский; 5 – Маргаритовский; 6 – Порт-Катоновский; 7 – Молчановский; 8 – Шабельский; 9 – Глафировский; 10 – Воронцовский; 11 – Должанский

Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Далее для каждого участка береговой зоны, согласно районированию [8, с. 8; 11, с. 270], были рассчитаны линейные скорости по трем периодам: с 1964 по 1975 г., с 1975 по 1986 г. и с 1986 по 2020 г. (рис. 2).

На следующем этапе исследования, с применением детальных схем геологического строения [9; 10, с. 92–115], данных о морфометрии на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) – «FABDEM» (Forest And Buildings Removed Copernicus DEM) [17], собственных данных о морфометрии склонов и их состоянии, полученных в ходе полевых исследований 2020–2023 гг. [18], линейные скорости абразии были пересчитаны в объемные показатели отступания морских берегов (м³/год).

Полученные результаты подверглись сравнительной оценке с данными предыдущих исследований (рис. 3).

Согласно сделанным ранее оценкам [9], за период с 1980 по 2000 г. наибольшее количество материала поступало от размыва участков 1–4 на северном побережье и 1–4 на южном побережье, это согласуется и с литературными данными. На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что число участков, наиболее интенсивно отступающих, сохраняется. Однако ежегодное поступление материала береговой абразии с южного берега Таганрогского залива в 1990–2020 гг. примерно в 2 раза меньше по сравнению с ранее сде-

ланными оценками. Это обусловлено тем, что темпы размыва берегов в современный период плавно понижаются с продвижением к вершине Таганрогского залива и практически затухают на 10-11 участке. Это же подтверждается натурными наблюдениями на мониторинговых участках, зачастую клифы здесь невысокие и имеют высоту 8-12 м, часть клифов задернована вместе с тыловой частью пляжа.

Ежегодное поступление терригенного материала с северного берега залива существенно не изменилось, т. к. на основных участках скорость размыва сохраняется и для современного периода.

Участки 10-11 характеризуются оползневым типом берега, здесь сосредоточены сложные по своей структуре многоступенчатые оползни, ступени сильно задернованы, из-за чего дешифрировать однозначно бровку клифа не представляется возможным.

В целом, анализ показал, что ежегодное поступление терригенного материала при размыве берегов с южного берега Таганрогского залива в 1990-2020 гг. примерно в 2 раза меньше по сравнению с ранее сделанными оценками. Это обусловлено тем, что темпы размыва берегов в современный период плавно понижаются с продвижением к вершине Таганрогского залива и практически затухают на 10-11 участке.

Ежегодное поступление терригенного материала с северного берега залива существенно не изменилось.

Заключение

Проведенные исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли и ГИС позволили провести мониторинг отступания бровки береговых клифов за длительный период. Установлено, что 57% береговой линии соответствуют слабой (<1 м/год) интенсивности размыва берегов, средней – 13%, сильной – 23%. Наибольшие темпы размыва характерны для участков х. Весело-Вознесенка (Неклиновский район Ростовской области) (средняя скорость по участку составила 1,87 м/год) и участка у ст. Должанской (Ейский район Краснодарского края) (2,4 м/год). В целом охарактеризовать общее распределение скоростей можно так: 57% береговой линии соответствуют слабой (<1 м/год) интенсивности размыва берегов, средней – 13%, сильной – 23%.

Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего мониторинга динамики и развития береговой зоны Таганрогского залива в условиях продолжающих-

ся климатических изменений и возрастающего антропогенного давления. Проведенные исследования могут быть полезны при пространственном планировании, разработке рекомендаций и рациональном управлении прибрежной зоной Таганрогского залива. Кроме того, результаты могут использоваться при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений и берегозащитных мероприятий. На основании концепции развития Приазовья до 2040 г. и ряда постановлений о развитии прибрежных регионов Азовского моря (Краснодарский край, Ростовская область, Донецкая Народная Республика и т.д.) до 2030-2040 гг. результаты могут применяться при рекреационном освоении исследуемой прибрежной зоны.

Список литературы

1. Матищов Г.Г., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Кропянко Л.В. Эколого-географический анализ морского побережья Ростовской области // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460. № 1. С. 88–92. DOI: 10.7868/S0869565215010181.
2. Мисиров С.А., Магаева А. А., Хорошев О. А., Кулыгин В.В. Прогноз ущерба социально-экономическим объектам от разрушения берегов Таганрогского залива в пределах Ростовской области // Вестник СГУГИТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. Т. 29, № 1. С. 127–138. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-1-127-138.
3. Архипова О.Е. Мисиров С.А. Оценка рекреационной привлекательности Восточного Приазовья // Геология и геофизика Юга России. 2025. Т. 15, № 1. С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2025.89.22.014.
4. Аксенов А.А. Морфология и динамика северного берега Азовского моря // Труды ГОИН. 1955. Т. 41, Вып. 29. С. 107–143. URL: <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB7/A35A1B15-44A4-4976-AE8B-B3A5A77C4055/> (дата обращения: 15.09.2025).
5. Аксенов А.А. Некоторые особенности абразии берегов Азовского моря // Труды ГОИН. 1957. Т. 43, Вып. 31. С. 122–145. URL: <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB7/A898EAD8-FFB1-4420-9DB3-6CEF4DBCFC20/> (дата обращения: 15.09.2025).
6. Мамыкина В.А. Интенсивность современных процессов в береговой зоне Азовского моря // Известия ВГО. 1978. Т. 110. Вып. 4. С. 351–355. URL: <http://elib.vniro.ru/lib/document/DB7/8FB3E2CD-ECD3-44C3-8535-F90A0D0A5E75/> (дата обращения: 15.09.2025).
7. Мамыкина В.А., Хрусталев Ю.П. Береговая зона Азовского моря. Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 1980. 176 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001034445> (дата обращения: 15.09.2025).
8. Артиухин Ю.В. Волновое разрушение обвальных берегов Азовского моря // Геоморфология. 1982. № 4. С. 51–58. URL: <https://geomorphology.igras.ru/jour/article/view/2370> (дата обращения: 15.09.2025).
9. Ивлиева О.В., Бердников С.В. Современные скорости разрушения берегов российского побережья Азовского моря // Геоморфология. 2005. № 4. С. 74–83. DOI: 10.15356/0435-4281-2005-4-74-83.
10. Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Цыганкова А.Е. Берега Азовского моря: 100 лет наблюдений / Науч. ред. акад. РАН Матищов Г.Г.; отв. ред. Бердников С.В. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2023. 384 с. URL: https://www.ssc-ras.ru/editorial/berega_azovskogo_morja_100_let_nablyudenii_monografija_la_besp/ (дата обращения: 15.09.2025). ISBN 978-5-4358-0255-9.

11. Jayanthi M., Thirumurthy S., Samynathan M., Duraisamy M., Muralidhar M., Ashokkumar J., Vijayan K.K. Shoreline change and potential sea level rise impacts in a climate hazardous location in southeast coast of India // Environmental Monitoring and Assessment. 2017. Vol. 190, No. 1. P. 51. DOI: 10.1007/s10661-017-6426-0.
12. Zachopoulos K., Kokkos N., Dal Barco MK., Furlan E., Pham HV., Torresan S., Critto A. and Sylaios G. A harmonized framework to assess coastal erosion blending copernicus marine data products and satellite imagery along Greek and Italian shorelines // Front. Environ. Sci. 2025. № 13. P. 1602740. DOI: 10.3389/fenvs.2025.1602740.
13. Novikova A.V., Vergun A.P., Zelenin E.A., Baranskaia A.V., Ogorodov S.A. Determining dynamics of the Kara sea coasts using remote sensing and UAV data: A case study // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21. № 3. P. ES3004. DOI: 10.2205/2020ES000743.
14. Гогоберидзе Г.Г., Жамойда В.А., Нестерова Е.Н., Рябчук Д.В., Спиридовон М.А. Глоссарий по Кадастру береговой (прибрежной) зоны. СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. 95 с. ISBN 978-5-86813-214-8.
15. Himmelstoss E.A., Henderson R.E., Kratzmann M.G., Farris A.S. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179. 2018. 110 p. DOI: 10.3133/ofr20181179.
16. Basset M., Anthony E.J., Bouchette F. Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply: An assessment and review // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 193. P. 199-219. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.018.
17. Uhe P., Hawker L., Paulo L., Sosa J., Sampson C., Neal J. FABDEM – A 30m global map of elevation with forests and buildings removed // EGU General Assembly. 2022. Vienna, Austria, 23–27 May 2022. EGU22-8994. DOI: 10.5194/egusphere-egu22-8994.
18. Мисиров С.А. Современные морфометрические данные береговой зоны Таганрогского залива в пределах Ростовской области (по материалам экспедиционных исследований ЮНЦ РАН) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2023. Т. 2. № 8. С. 56–62. DOI: 10.23885/2500-123X-2023-2-8-56-62.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-528 от 24.04.2024 на реализацию КНП по приоритетным направлениям научно-технологического развития). Анализ объемных скоростей отступания береговых клифов Таганрогского залива проведен в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 125011200143-4.

Financing: This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science (Agreement No. 075-15-2024-528 dated April 24, 2024, for the implementation of the KNP in priority areas of scientific and technological development). The analysis of the volumetric rates of coastal cliff retreat in Taganrog Bay was conducted as part of the State Project of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, project no. 125011200143-4.