

Картография и геоинформатика
Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Научная статья

УДК 556.555.6

DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-143-152

EDN: YLOHVP

**ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ БЕРЕГОВ КРАСНОДАРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ****Андрей Александрович Лагута¹, Анатолий Валерьевич Погорелов², Евгений Николаевич Киселев³**¹ Компания «АГМ Системы», г. Краснодар, Россия^{2,3} Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Россия¹ alaguta@icloud.com, Scopus Author ID: 57211746312, Researcher ID: Z-1338-2018, РИНЦ Author ID: 1014100, SPIN-код: 2060-5138² pogorelov_av@bk.ru, Scopus Author ID: 55536906800, РИНЦ Author ID: 7124, SPIN-код: 6274-3126³ enkiselev@gmail.com, Scopus Author ID: 57213410193, SPIN-код: 9845-1434 РИНЦ Author ID: 771926

Аннотация. Краснодарское водохранилище, расположенное на реке Кубань, является одним из ключевых элементов мелиоративного комплекса на Юге России. Объем ежегодного забора воды на орошение составляет около 3,35 млрд м³. При введении в эксплуатацию в 1975 г. это долинное водохранилище имело проектную площадь 400 км². За полвека эксплуатации его морфометрические характеристики подверглись значительным изменениям. Самостоятельную научно-практическую проблему представляет трансформация берегов, влияние которой на изменение гидрографических характеристик и общее заиливание водоема остается недостаточно исследованным.

В статье по данным разновременных лидарных съемок (воздушного лазерного сканирования в 2019 г. и мобильного лазерного сканирования в 2023 и 2025 гг.) приведены результаты количественных оценок переработки берегов и анализа береговых процессов. На тестовых участках, характеризующихся различными обстановками рельефообразования, построены высокоточные цифровые модели рельефа. Мониторинг береговой полосы Краснодарского водохранилища за шестилетний период выявил существенные изменения в морфологии берегов. На трех ключевых участках общей протяженностью 3,21 км зафиксированы значительные объемы переработки берегового массива – 54,3 тыс. м³ при их общей площади 8,9 тыс. м². При этом расчетные среднегодовые объемы переработки берегов для всего водоема (20,3 тыс. м³) несравнимо меньше установленных нами объемов заиливания (среднегодовое значение 6,26 млн м³ за 2005–2021 гг.). Наибольшая активность абразионных процессов отмечена на обрывах, подверженных волновому воздействию. Здесь зафиксировано отступление береговой линии на расстояние до 57 м при среднем значении отступления для исследуемых берегов 2,9 м. Формирование дельты выдвигания р. Кубани в водохранилище существенно изменило гидродинамический режим прибрежной зоны, сократив участки с активным волновым воздействием. Изменения коснулись пляжной зоны, где за период 2019–2023 гг. наблюдается постепенное снижение высоты береговых валов, что указывает на ослабление волновой активности.

Ключевые слова: Краснодарское водохранилище, формирование берегов, абразия, лидарная съемка, цифровая модель рельефа, объем переработки

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20005 и при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № 24-27-20005.

Для цитирования: Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н. Оценка деформации берегов Краснодарского водохранилища с применением лазерного сканирования // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 4(75). С. 143–152. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-143-152 EDN YLOHVP

CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2025-4-143-152

EDN: YLOHVP

**ASSESSMENT OF THE DEFORMATION OF THE KRASNODAR RESERVOIR SHORES
USING LASER SCANNING****Andrey A. Laguta¹, Anatoly V. Pogorelov², Evgeny N. Kiselev³**¹ AGM Systems LLC, Krasnodar, Russia² Kuban State University, Krasnodar, Russia

© 2025 Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н. Лицензировано по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, перейдите по ссылке <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Картография и геоинформатика

Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

¹ alaguta@icloud.com, Scopus Author ID: 57211746312, ResearcherID: Z-1338-2018, RINTs Author ID: 1014100, SPIN-code: 2060-5138² pogorelov_av@bk.ru, Scopus Author ID: 55536906800, RINTs Author ID: 7124, SPIN-code: 6274-3126³ enkiselev@gmail.com, Scopus Author ID: 57213410193, SPIN-code: 9845-1434 RINTs Author ID: 771926

Abstract. The Krasnodar Reservoir, located on the Kuban River, is a key element of the melioration complex in the south of Russia. The annual water intake for irrigation is about 3.35 billion m³. When commissioned in 1975, this valley reservoir had the projected area of 400 km². For over half a century of operation, its morphometric characteristics have undergone significant changes. An independent scientific and practical problem is the transformation of the shores, the impact of which on the change in hydrographic characteristics and general siltation of the reservoir remains insufficiently studied. The article presents the results of quantitative assessments of the shoreline abrasion and analysis of littoral processes based on multi-temporal lidar surveys (airborne laser scanning in 2019 and mobile laser scanning in 2023 and 2025). High-precision DEMs were constructed for test sections characterized by different relief formation settings. Monitoring of the Krasnodar Reservoir shoreline over a six-year period revealed considerable changes in the morphology of the shores. Significant volumes of shoreline abrasion were recorded on three key sections with a total length of 3.21 km: 54.3 thousand m³ with a total area of 8.9 thousand m². At the same time, the rated average annual abrasion volumes for the entire reservoir (20.3 thousand m³) are incomparably less than the siltation volumes we have established (the average annual for 2005–2021 is 6.26 million m³). The highest activity of abrasion processes is noted on cliffs exposed to wave action. Here, a retreat of the shoreline by up to 57 m was noted, with the average retreat value for the studied shores equal to 2.9 m. The protruding of the Kuban River delta into the reservoir significantly changed the hydrodynamic regime of the littoral zone, reducing areas with intensive wave action. Changes also affected the beach area, where a gradual decrease in the height of shoreline ridges was observed over the period 2019–2023, this indicating the weakening of wave activity.

Keywords: Krasnodar Reservoir, shore formation, abrasion, lidar survey, digital elevation model, abrasion volume

Funding: the research was carried out under a grant from the Russian Science Foundation (No. 24-27-20005) and with the financial support from the Kuban Science Foundation (scientific project No. 24-27-20005).

For citation: Laguta, A.A., Pogorelov, A.V., Kiselev E. N. (2025). Assessment of the deformation of the Krasnodar Reservoir shores using laser scanning. *Geographical Bulletin*. No. 4(75). Pp. 143–152. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-143-152 EDN: YLOHVP

Введение

Краснодарское водохранилище с проектной площадью 400 км², являясь важнейшим объектом комплексного водопользования в Краснодарском крае, имеет две ключевые функции – защита от паводков территорий в нижнем течении р. Кубани на площади 600 тыс. га и обеспечение водой оросительных систем на площади около 215 тыс. га. Интерес к объективной оценке его состояния и процессам трансформации обусловлен, с одной стороны, его значением для оросительной системы Краснодарского края, с другой – активными процессами преобразования этого природно-технологического объекта. Преобразования охватывают не только процессы заиления долинного водохранилища, но и непрерывную (с начала заполнения в 1973 г.) переработку берегов. Берега сложены преимущественно лессовидными суглинками – наиболее слабыми, как известно, по сопротивляемости размыву дисперсными грунтами, с сопутствующим при абразии формированием трещин, заколов в клифе, останцовых форм.

Опубликованные результаты исследований [4–5, 7–10, 12, 13] достаточно детально освещают вопросы общей трансформации водоема, изменений донного рельефа и процессов заиления, однако процессы перестроения берегов остаются плохо изученными [3, 6] при весьма ограниченных данных полевых измерений. Особого внимания при обоснованном долгосрочном прогнозировании гидроэкологического состояния водохранилища заслуживают два взаимосвязанных процесса: заиление, вызванное поступлением твердого стока рек [8, 12], и переработка берегов, влияющая на морфометрические характеристики и функциональные показатели водохранилища. Деформации берегов абразионных типов сопровождаются поступлением продуктов абразии в чашу водоема и потерями земельного фонда в окрестностях водохранилища.

Наиболее интенсивная переработка в 1973–1992 гг. наблюдалась на правом берегу от х. Ленина до ст. Васьюринской, где максимальное отступление берегового уступа составило 30–60 м в зависимости от участка [14]. Согласно распространенной классификации [7, 15], выделяются типы берегов, различающиеся характером и интенсивностью процессов берегообразования (рис. 1).

Отсутствие данных инструментальных измерений после 1992 г. не позволяет достоверно оценить количественные характеристики текущей динамики берегов и их вклад в трансформацию водоема. Особенно важно по данным геодезических трансформаций берегов определить влияние абразии и других береговых процессов на изменение объема водохранилища. Полученные количественные сведения о переработке берегов могут быть полезны для решения широкого круга прикладных задач, включая моделирование экосистемы водоема и управление водохранилищем.

Картография и геоинформатика
Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

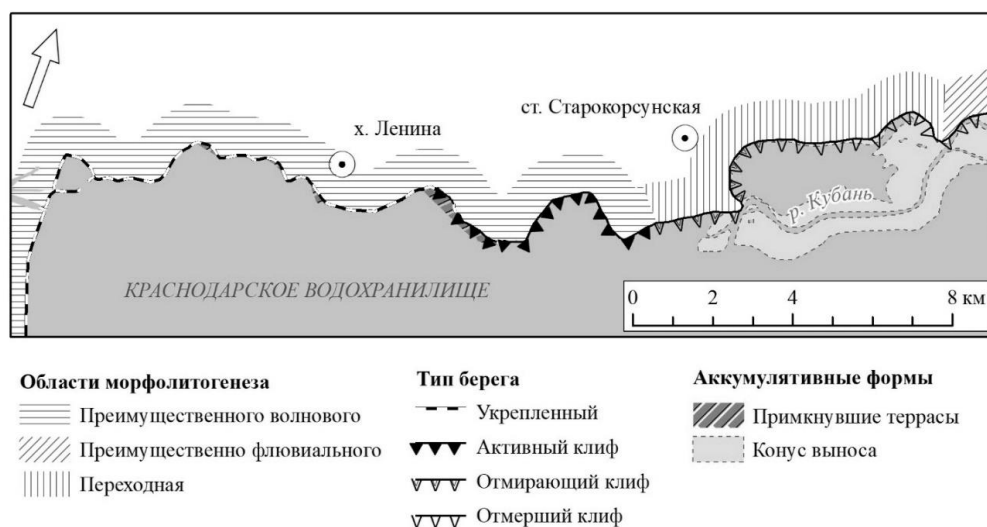


Рис. 1. Области морфолитогенеза и характерные типы берегов Краснодарского водохранилища [7]

Fig. 1. Morpholithogenesis areas and shore types characteristic of the Krasnodar Reservoir [7]

Материалы и методы

Традиционный подход к наблюдению за перемещением берегового уступа и отмели основан на периодическом проведении геодезических работ и установке реперных маркеров. В качестве современного решения задачи контроля берегового уступа предлагается применять технологию лазерного сканирования в двух модификациях: воздушное лазерное сканирование (ВЛС) и мобильное лазерное сканирование (МЛС). Опыт подобных измерений [1, 2, 11, 18–21] свидетельствует, что технологии лазерного сканирования в сочетании с ГИС-моделированием обеспечивают качественный скачок при проведении мониторинга берегов. Среди очевидных достоинств технологии – оперативность съемки, пространственный охват лидарных измерений, высокая точность и пространственное разрешение данных, существенное снижение трудозатрат при проведении полевых работ. Кроме того, изучение рельефа высоких абразионных берегов классическими инструментальными средствами крайне затруднительно и более трудозатратно. Применение метода фотограмметрии для построения высокоточной ЦМР при наличии древесно-кустарниковой растительности нецелесообразно.

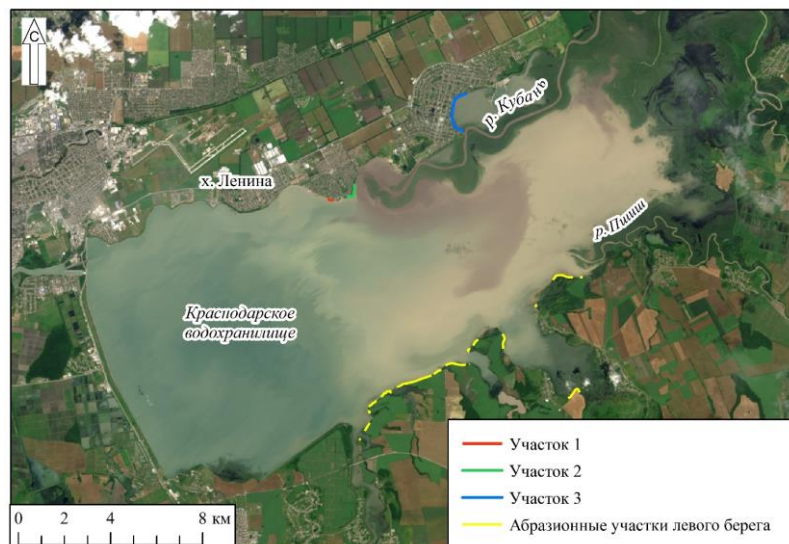


Рис. 2. Участки съемки на берегу Краснодарского водохранилища.

Снимок Landsat 9, 13.07.2025

Fig. 2. Geodetic survey sites on the shore of the Krasnodar Reservoir.

Landsat 9 image, 13 July, 2025

В работе использованы материалы воздушного лазерного сканирования, выполненного 13 августа 2019 г., и мобильного лазерного сканирования, выполненного 9 сентября 2023 г. и 8 февраля 2025 г. Для проведения исследований в 2023 г. определены тестовые участки (рис. 2), критерием выбора которых послужило их расположение в зонах с различными условиями морфолитогенеза, что соответствует разным типам берегов. Участки 1 и 2 представляют собой активный клиф, тогда как участок 3 – отмирающий клиф. Важно отметить, что первые два участка отличаются разной экспозицией берега, что позволяет в дальнейшем оценить влияние волнового воздействия и течение на динамику берегов.

Метод лазерного сканирования основан на пространственной фиксации массива точек лазерных

отражений (ТЛО) с помощью комплекса специализированных устройств. В состав комплекса входят: сенсор для измерения расстояний (LiDAR), ГНСС-приемник для определения координат и инерциальный измерительный блок, регистрирующий параметры пространственной ориентации. Совместная обработка данных этих компонентов обеспечивает точное вычисление координат ТЛО. При выполнении мобильного лазерного сканирования за-

Картография и геоинформатика
Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

действовала система АГМ-МС1 с погрешностью определения пространственного положения ТЛО до 5 см. Полевые исследования включали рекогносцировку местности, направленную на выбор оптимальных маршрутов движения. Основными критериями при этом выступали обеспечение стабильного приема ГНСС-сигнала и полное покрытие коридором съемки участка берегового уступа. Все маршруты отрабатывались в прямом и обратном направлении. Расчеты траектории и ТЛО проведены в программе AGM ScanWorks Pro.

Исследуемый участок береговой линии Краснодарского водохранилища характеризуется наличием активного клифа с соответствующими формами поверхности, которые в некоторых местах (например, в волноприбойных нишах) имеют отрицательный уклон (рис. 3а, б). Такая морфология создает принципиальные сложности для стандартных методов классификации точек истинного рельефа, поскольку приводит к появлению нескольких значений высот в точках с одинаковыми координатами. Для решения проблемы построения цифровой модели рельефа (ЦМР) с отрицательными уклонами поверхности предложен модифицированный подход [6], включающий:

1. Построение триангуляционной (TIN) модели по минимальным высотным отметкам в ячейках регулярной сетки;
2. Итерационное добавление точек (вершин TIN) с настраиваемыми параметрами угла и дистанции в TIN-модель [17];
3. Пространственную трансформацию данных (поворот на 90° с последующим возвратом в исходную систему координат).

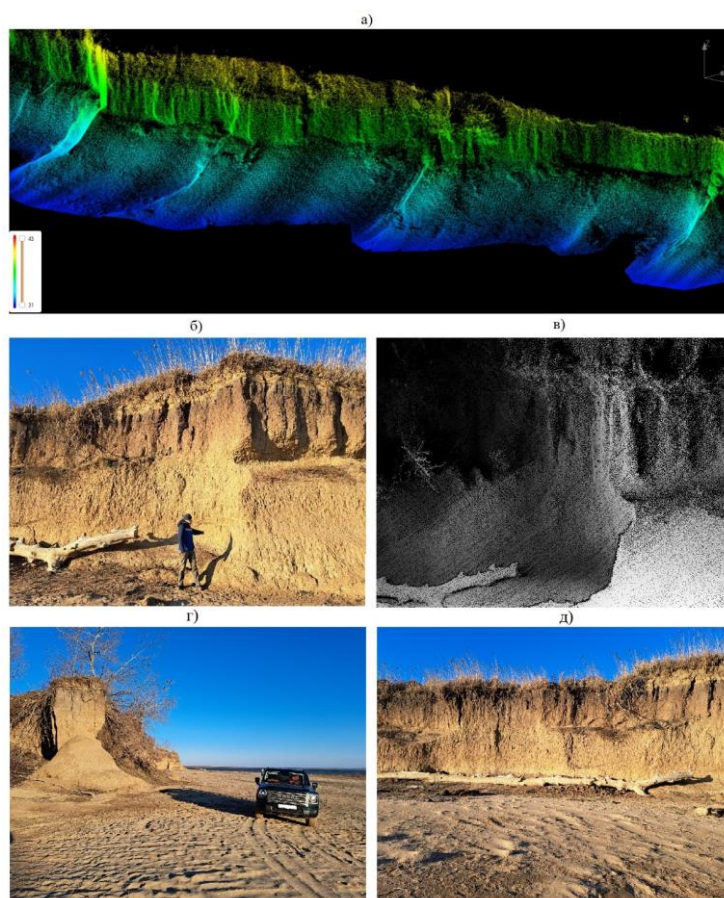


Рис. 3. Примеры ТЛО по данным лидарной съемки тестовых участков берега Краснодарского водохранилища (а, в). Положение волноприбойных ниш на откосе (б, г, д). 8 февраля 2025 г.

Fig. 3. Examples of laser reflection points based on lidar survey data from the test sections of the Krasnodar Reservoir shoreline (a, v). Position of wave-breaking niches on the slope (б, г, д). February 8, 2025.

Результатом обработки является облако точек класса «земля», ограниченное бровкой и подошвой клифа. Для участка 1 (рис. 2) протяженностью 264 м выполнено преобразование координат ТЛО по следующему алгоритму:

1. Произведена замена координат по оси X на значения расстояний вдоль бровки клифа;
2. Осуществлен поворот массива точек на -90° относительно новой оси X.

Предлагаемая методика реализует подходы, представленные в [6], и позволяет трансформировать сложный рельеф откоса в вертикальную плоскость, обеспечивая корректное моделирование поверхностей с отрицательным уклоном и упрощая тем самым последующий анализ расчетных морфологических характеристик.

Картография и геоинформатика

Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

После преобразования системы координат построена ЦМР с разрешением 0,05 м. Выделение волноприбойных ниш проводилось с использованием индекса топографической позиции (Topographic Position Index – TPI) [19, 23]. Этот индекс применяется для идентификации положительных и отрицательных форм рельефа как в топографии [16], так и в батиметрии [22, 25]. Для каждой ячейки TPI рассчитывается как разность между ее высотой и средним значением высот соседних ячеек. При вычислении индекса использовалось скользящее окно размером 2 м.

Для анализа динамики изменения прибрежного рельефа за исследуемый период построены разностные модели высот.

Основные результаты

Построенные по данным лидарной съемки разновременные ЦМР послужили основой последующих количественных расчетов переработки берегов, а также создания разностных моделей высот [24] для анализа морфологических изменений в береговой зоне. В пределах трех тестовых участков по данным разности ЦМР 2019, 2023, 2025 гг. рассчитаны площади, объемы переработки берегов и удельный объем переработки на один погонный метр длины берегового уступа (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Расчетные характеристики переработки берегов на тестовых участках

Estimated characteristics of shoreline abrasion on the test sections

Estimated characteristics of shoreline abrasion on the test sections								
Номер участка	Длина, м	Площадь, м ²	Объем, м ³	Удельный объем переработки, м ³ /м	Площадь, м ²	Объем, м ³	Удельный объем переработки, м ³ /м	Средняя высота откоса, м
		2019–2023 гг.			2019–2025 гг.			
1	264,01	4269,5	26369,6	99,88	4573,85*	28249,35*	107,00*	6,18
2	718,85	1714,07	10784,13	15,91	2435,45	15322,71	22,23	6,29
3	2225,13	1345,47	7694,18	3,46	1886,33	10787,11	4,85	5,72
Всего	3207,99	7329,03	44847,9	13,98	8895,62	54359,16	16,94	5,91

* Примечание. Ко времени проведения мобильного лазерного сканирования (08.02.2025 г.) на участке 1 начаты берегоукрепительные работы: вертикальные откосы срезаны, в зоне пляжа создана искусственная терраса высотой до 2 м.

* Note. By the time of mobile laser scanning (08 February 2025), shoreline protection works had begun on section 1: vertical slopes had been cut, and an artificial terrace up to 2 m high had been created in the beach area.

Как следует из расчетов (табл. 1), участок 1, несмотря на наименьшую протяженность, демонстрирует наибольшую интенсивность переработки, выраженную в абсолютных величинах объема переработки берега за 2019–2025 гг. Здесь к 2025 г. переработке подвергся сплошной, неразделенный массив шириной от 8 до 57 м. В отличие от участка 1, участки 2 и 3 подверглись значительно меньшей переработке. Участки 2 и 3, находясь в переходной зоне морфолитогенеза (рис. 1, 2), отличаются фрагментированностью, что и определяет снижение интенсивности ежегодных деформаций.

Величина удельного объема переработки правого берега Краснодарского водохранилища в целом возрастает с востока на запад и связана с сокращением разгона волны в ходе активного формирования дельты выдвижения р. Кубани (рис. 2). К 2025 г. на участке 2 в процессе берегообразования произошла смена морфолитогенеза – преобладающий волновой морфолитогенез на данном участке перешел в переходную фазу именно вследствие непрерывного выдвижения дельты Кубани. Необходимо отметить значительное снижение удельного объема переработки на участке 1 за период 2023–2025 гг. (табл. 1, рис. 4). Это объясняется тем, что в 2022 г. на данном участке произошло разрушение двух крупных останцов и, как следствие, уменьшение степени расчленения береговой линии (рис. 5а, б). После выравнивания береговой линии величина удельного объема переработки стала сравнима с таковой на участке 2 (рис. 4).

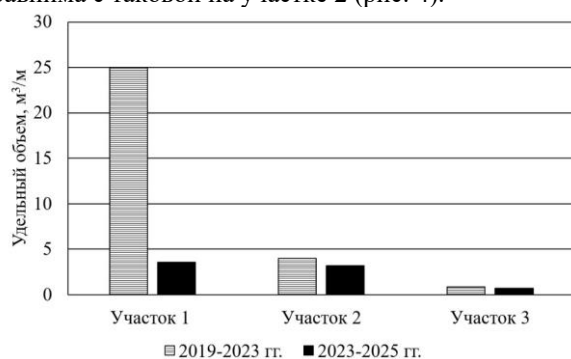


Рис. 4. Среднегодовой удельный объем переработки берегов на участках съемки
Fig. 4. The average annual specific volume of shoreline abrasion at the survey sites

Средняя величина линейного смещения бровки откоса для трех участков за период 2019–2025 гг. составила 2,9 м (или 0,48 м/год).

Средний годовой объем переработки берегов на рассматриваемых участках за 2019–2025 гг. составляет 9,1 тыс. м³. В отличие от правого берега Краснодарского водохранилища, представляющего собой II надпойменную террасу, левый берег расчленен многочисленными левыми притоками Кубани (рис. 2) и является в их дельтах аккумулятивным с преобладающим флювиальным типом морфолитогенеза. Высота ветровых волн здесь в условиях мелководной обстановки в целом невелика. Общая длина левого берега, подверженного абразии, по нашим оценкам, составляет 7,81 км (рис. 2) при высоте откоса до 3 м. Отсюда при средней величине смещения бровки, принятой в размере 0,48 м (на основе результатов измерений для правого берега),

оценочная величина среднего годового объема абразионной переработки для левого берега за период 2019–2025 гг. составляет 11,2 тыс. м³.

Картография и геоинформатика

Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

Построенная для участка 1 разностная модель высот за период 2019–2023 гг. наглядно показывает понижение отметок поверхности до 8 м в местах разрушения останцов (рис. 5).

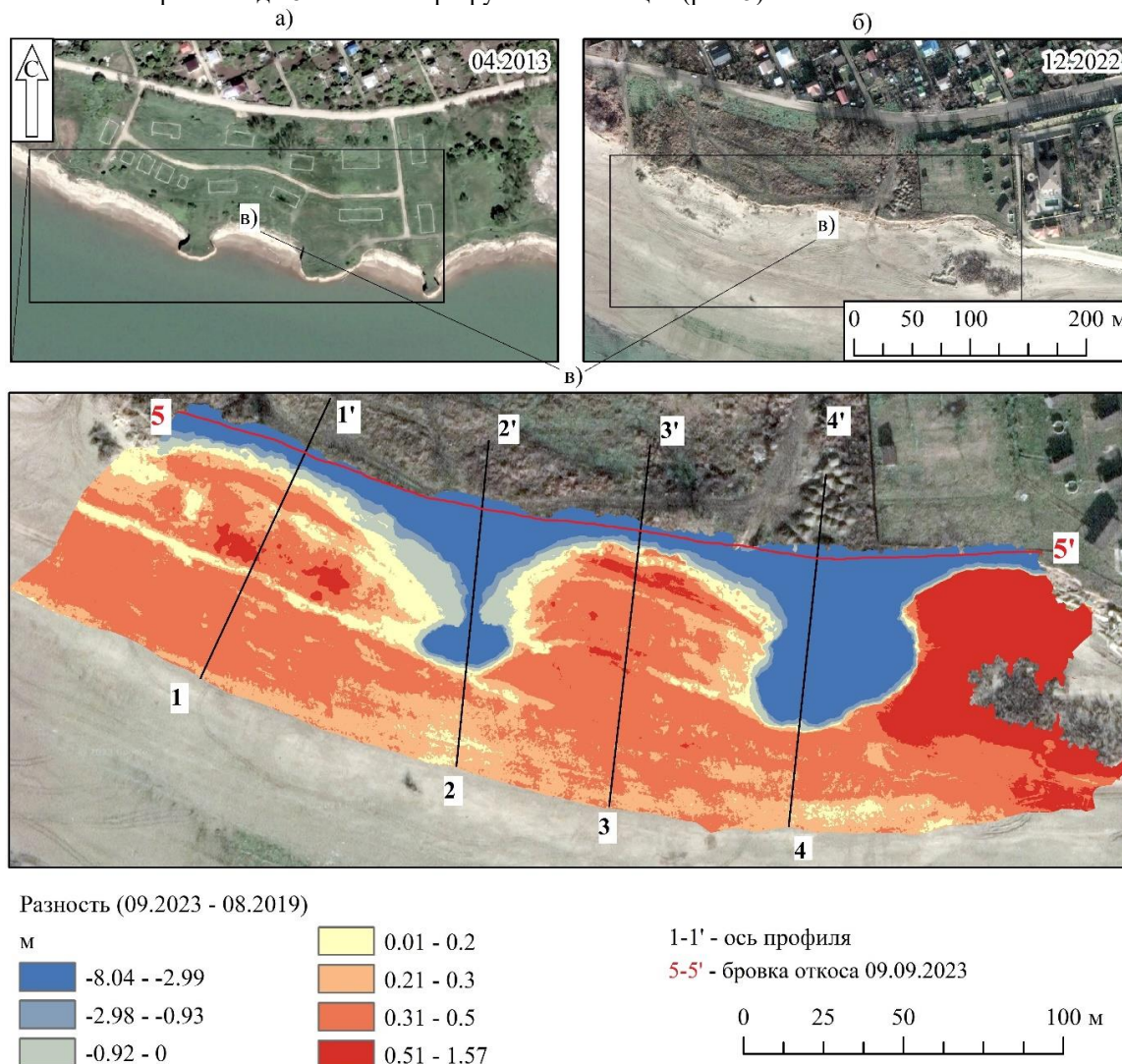


Рис. 5. Деформация береговой линии Краснодарского водохранилища на участках активного клифа (27.04.2013 г. (а), 18.12.2022 г. (б)). (Снимки – Maxar Technologies).

Разностная модель береговой зоны на участке 1 за период 2019–2023 гг. (внизу)

Fig. 5. Deformation of the Krasnodar Reservoir shoreline in active cliff areas

(27 April 2013 (a), 18 December 2022 (b)). (Images – Maxar Technologies).

The difference model of the shoreline zone on section 1 for the period 2019–2023 (below)

Как следует из разностной модели высот, в прилегающей зоне отмелей и пляжей повсеместный рост абсолютных отметок неравномерен; для изменения рельефа пляжа в рассматриваемый период характерно снижение относительной высоты береговых валов и глубины понижений между валами (рис. 5). Это подтверждается также построенными поперечными профилями по разновременным ЦМР (рис. 6). Максимальный рост отметок пляжа на участке 1 составил 1,57 м. Наблюдаемая тенденция нивелирования рельефа пляжа свидетельствует о снижении в течение 2019–2025 гг. интенсивности волноприбойной деятельности на данном участке.

Реализуемый нами метод построения модели рельефа с отрицательными уклонами дает возможность выполнить морфологический анализ поверхности с применением геоморфометрических характеристик. Для анализа использован индекс ТРІ. По данным распределения ТРІ на участке 1 по состоянию на 09.09.2023 г., вдоль стенки откоса четко выделяется волноприбойная ниша длиной 281 м (рис. 7), состоящая, в свою очередь, из локальных ниш, имеющих разные высоты и морфологию в масштабе микрорельефа. Средняя глубина ниши равна 0,34 м, при этом самая глубокая точка ниши находится на отметке 33,64 м (для сравнения, НПУ водохранилища – 32,75 м).

Картография и геоинформатика
Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

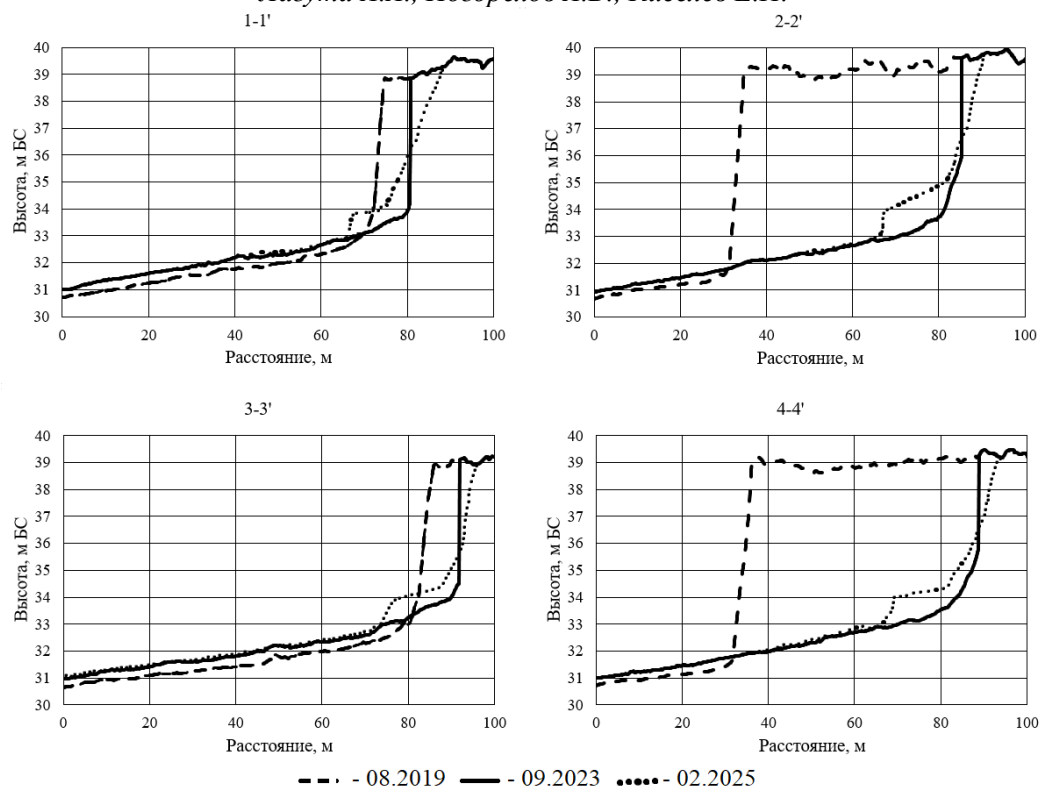


Рис. 6. Поперечные профили по разновременным ЦМР на участке 1.

Положение осей профилей показано на рис. 5

Fig. 6. Transverse profiles for multi-time DEM on section 1.

The profile axes position is shown in Fig. 5

Обобщенные статистические показатели глубины и высотного положения волноприбойных ниш представлены в табл. 2. Понятно, что сведения об этих отрицательных формах рельефа существенным образом дополняют представления о деформации берегов на участках клифообразных форм и могут быть интерпретированы с позиции объема и вероятности локальных обрушений.

Таблица 2

Table 2

Статистические показатели глубины и высотного положения
волноприбойных ниш на участке 1
Statistical indicators of the depth and altitude of the wave-breaking niches on section 1

Величина	Глубина ниши, м	Общая длина ниш, м	Высотная отметка самой глубокой точки ниши, м
Максимальная	0,71	281,0	36,92
Минимальная	0,01		33,64
Средняя	0,34		34,19

Выводы

1. Применяемые методы лидарных съемок и последующего цифрового моделирования берегов дают возможность оценивать деформации берегов и изменения их морфометрических характеристик, а также использовать полученные данные для решения прикладных задач, включая создание информационной основы (база гео-данных, ГИС для поддержки принятия решений) мониторинга водохранилищ.

2. Мониторинг состояния берегов Краснодарского водохранилища на основе регулярных (1 раз в год в период межени) лидарных съемок репрезентативных участков позволяет фиксировать негативные геоморфологические процессы, составлять оперативные, средне- и долгосрочные прогнозы трансформации берегов, а также оценивать вклад переработки берегов в изменение гидрографических показателей водохранилища.

3. На основе повторных лидарных съемок берегов Краснодарского водохранилища, проведенных в различных зонах морфолитогенеза, определены площади и объемы переработки берегов, положение волноприбойных ниш, а также проанализирована динамика изменений в береговой полосе за 2019–2025 гг. Суммарный объем переработки на трех участках общей протяженностью 3,21 км достиг 54,3 тыс. м³. Наибольшая активность абразивной деятельности наблюдается на клифах в зоне волнового морфолитогенеза. За исследуемый период смещение бровки склона вглубь суши варьировалось от 0 до 57 м при среднем значении 2,9 м.

Картография и геоинформатика
Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

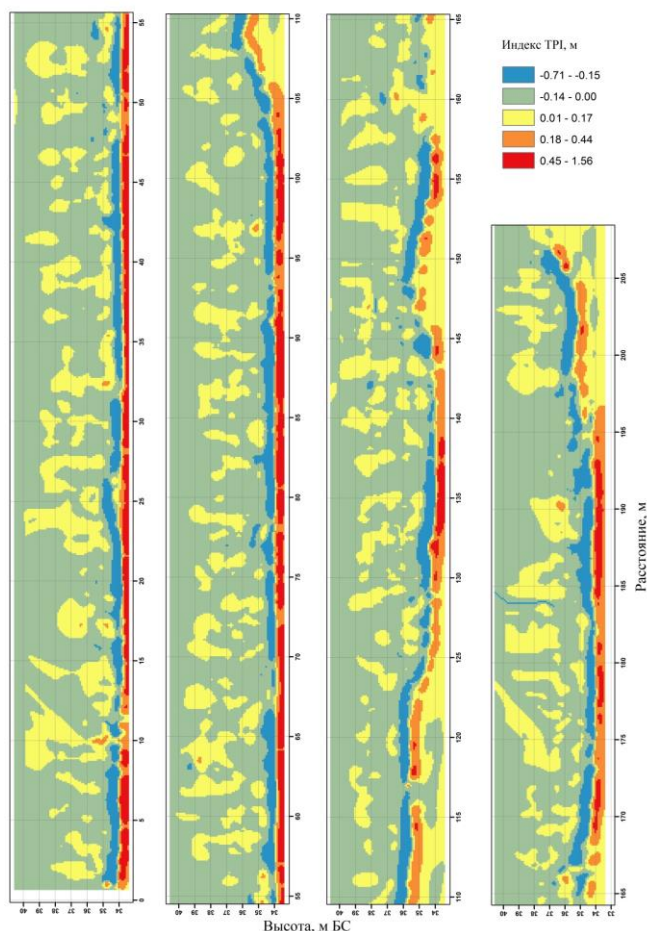


Рис. 7. Распределение индекса ТРІ вдоль вертикальной стенки на участке 1 (сентябрь 2023 г., проекция бровки откоса – 5–5' (рис. 5))

Fig. 7. TPI index distribution along the vertical wall on section 1 (September 2023, projection of the slope edge – 5–5' (Fig. 5))

4. Интенсивное формирование дельты выдвигания Кубани приводит к сокращению области волнового морфолитогенеза. Зафиксированы изменения в морфологии пляжной зоны, включая снижение высоты береговых валов, что свидетельствует об уменьшении волнового воздействия из-за формирующейся в акватории водохранилища дельты Кубани.

5. Наши оценки среднегодового объема переработки берегов Краснодарского водохранилища (20,3 тыс. м³), полученные путем суммирования фактических величин для правого берега и оценочных для левого, свидетельствуют о незначительном вкладе продуктов разрушения берегов в годовые объемы заиления.

Предлагаемые методы съемки и анализа позволяют вывести мониторинг водохранилища на качественно новый уровень. Точные данные о трансформации водоема имеют ключевое значение для эффективного управления водно-ирригационными ресурсами в Краснодарском крае.

Библиографический список

1. Кравцова В.И., Другов М.Д. Типы динамики донного рельефа Анапской пересыпи: исследование по материалам воздушного лазерного сканирования // Геодезия и картография. 2019. Т. 80, № 2. С. 32–45. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-32-45 EDN: DUNIV
2. Крыленко М.В., Крыленко В.В. Особенности выполнения высокоточной съемки рельефа абразионного берега с помощью БПЛА // Бюллетень науки и практики. Науки о Земле. 2020. Т. 6, № 2. С. 10–19. DOI: 10.33619/2414-2948/51/01 EDN: IAEPTR
3. Курбатова И.Е. Космический мониторинг береговой зоны Краснодарского водохранилища // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5, Т. 2. С. 523–528. EDN: NDPWLZ
4. Курбатова И.Е. Мониторинг трансформации Краснодарского водохранилища с использованием спутниковых данных высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 42–53. EDN: THXXYN
5. Курбатова И.Е. Спутниковый мониторинг экологической катастрофы на Краснодарском водохранилище летом 2020 г. и ее природные и антропогенные предпосылки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 328–334. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-328-334 EDN: ERKFDK
6. Лагута А.А. Моделирование отвесной стенки активного клифа по данным лидарной съемки (на примере Краснодарского водохранилища) // Геология и геофизика Юга России. 2024. № 14 (3). С. 230–242. DOI: 10.46698/f5109-1021-3401-u EDN: JTWBKV
7. Лагута А.А., Погорелов А.В. О переработке берегов Краснодарского водохранилища // Региональные географические исследования: сб. науч. трудов. КубГУ, 2019. Вып. 12. С. 23–30.

Картография и геоинформатика

Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

8. Лагута А.А., Погорелов А.В. Особенности дельтоформирования рек, впадающих в долинное водохранилище (на примере Краснодарского водохранилища) // Географический вестник=Geographical bulletin. 2019. № 3 (50). С. 119–134. DOI: 10.17072/2079-7877-2019-3-119-134 EDN: JJSKFB
9. Лагута А.А., Погорелов А.В. Особенности заиления Краснодарского водохранилища. Опыт оценки по данным батиметрических съемок // Географический вестник=Geographical bulletin. 2018. № 4 (47). С. 54–66. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-56 EDN: YTTYKD
10. Литовка Ф.С., Бандурин М.А., Ванжа В.В. Пути решения проблемы заиления Краснодарского водохранилища для рационального использования ресурсов пойменных территорий // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2019. № 7. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_108_7y2019_Litovka.pdf_a0820f4a60.pdf
11. Погорелов А.В., Антоненко М.В., Бойко Е.С., Федорова С.И., Елецкий Ю.Б. Исследование компонентов береговой зоны Азовского моря по данным воздушного лазерного сканирования (район Вербяной косы) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 11. С. 33–39. EDN: SXVQMT
12. Погорелов А.В., Лагута А.А., Киселев Е.Н. Новые сведения о заилении Краснодарского водохранилища по данным батиметрической съемки // Географический вестник=Geographical bulletin. 2022. № 2 (61). С. 166–179. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179 EDN: SSINRA
13. Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносоева А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический вестник=Geographical bulletin. 2017. № 1 (40). С. 130–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137 EDN: YNBUPV
14. Правила использования водных ресурсов Краснодарского водохранилища. ПИИ «Кубаньводпроект». Краснодар, 2008. 158 с.
15. Хабилов А.Ш., Кусковский В.С., Жиндарев Л.А., Хейне Д.М. и др. Берега морей и внутренних водоемов: Актуальные проблемы геологии, геоморфологии и динамики. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. 272 с. ISBN: 5-7692-0241-6 EDN: RXKDZV
16. Черниковский Д.М. Оценка связей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов на основе цифровых моделей рельефа ASTER и SRTM // Сибирский лесной журнал. 2017. № 3. С. 28–39. DOI: 10.15372/SJFS20170303 EDN: ZDPCDV
17. Axelsson P. DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry // Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2000. Vol. 33. P. 110–117.
18. Boyko E., Krylenko V., Krylenko M. LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts // Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015). International Society for Optics and Photonics. 2015. V. 9535. P. 95351Q. DOI: 10.1117/12.2192577 EDN: UFHXAJ
19. Jenness J. Topographic Position Index (TPI). 2006. Vol. 1.2. 42 p. 2020.
20. Ossowski R., Przyborski M., Tysiac P. Stability assessment of coastal cliffs incorporating laser scanning technology and a numerical analysis. Remote Sensing. 2019. Vol. 11, Iss. 16, Art. No. 1951. DOI: 10.3390/rs11161951
21. Ossowski R., Tysiac P. A new approach of coastal cliff monitoring using mobile laser scanning. Polish Maritime Research. 2018. Vol. 25, Iss. 2. P. 140–147. DOI: 10.2478/pomr2018-0065
22. Pogorelov A., Laguta A., Kiselev E., Lipilin D. Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban River, Russia. Journal of Geographical Sciences. 2021. Vol. 31. P. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7
23. Weiss A.D. Topographic Positions and Landforms Analysis (Conference Poster). 21st Annual ESRI. International User Conference. San Diego, CA, July 9–13, 2001.
24. Williams R. DEMs of difference. Geomorphological Techniques. British Society for Geomorphology. 2012. No. 2 (3.2). P. 1–17.
25. Wilson M.F.J., O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J. Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. Marine Geodesy. 2007. Iss. 30. P. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962 EDN: MDYNGL

References

1. Kravtsova, V.I., Drugov, M.D. (2019). Tipy dinamiki dyunnyogo rel'efa Anapskoj peresypy: issledovanie po materialam vozdušnogo lazernogo skanirovaniya (Types of Dynamics of Dune Relief of Anapa Spillway: A Study Based on Airborne Laser Scanning Materials). *Geodesy and Cartography*. Vol. 80. No 2. Pp. 32–45. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-32-45.
2. Krylenko, M.V., Krylenko, V.V. (2020). Osobennosti vypolneniya vysokotochnoj s"yomki rel'efa abraziionnogo berega s pomoshch'yu BPLA (Features of high-precision survey of the abrasion coast relief using UAVs). *Bulletin of Science and Practice. Earth Sciences*. Vol. 6. No 2. Pp. 10–19. DOI: 10.33619/2414-2948/51/01.
3. Kurbatova, I.E. (2008). Kosmicheskij monitoring beregovoj zony Krasnodarskogo vodokhranilishcha (Space monitoring of the coastal zone of the Krasnodar reservoir). *Actual problems of remote sensing of the Earth from space*. Vol 2. Pp. 523–528.
4. Kurbatova, I.E. (2014). Monitoring transformacii Krasnodarskogo vodokhranilishcha s ispol'zovaniem sputnikovykhannykh vysokogo razresheniya (Monitoring of the transformation of the Krasnodar Reservoir using high resolution satellite data). *Actual problems of remote sensing of the Earth from space*. Vol. 11, No. 3. Pp. 42–53.
5. Kurbatova, I.E. (2021). Sputnikovyj monitoring ehkologicheskoy katastrofy na Krasnodarskom vodokhranilishche letom 2020 g. i ee prirodnye i antropogennye predposylki (Satellite monitoring of the environmental disaster on the Krasnodar reservoir in the summer of 2020 and its natural and anthropogenic prerequisites). *Actual problems of remote sensing of the Earth from space*. Vol. 18. No 5. Pp. 328–334.
6. Laguta, A.A. (2024). Modelirovanie otvesnoj stenki aktivnogo klifa po dannym lidarnoj s"emki (na primere Krasnodarskogo vodokhranilishcha) (Modeling of a steep wall of an active cliff using LiDAR survey data (case study of the Krasnodar Reservoir)). *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 14(3). Pp.230–242. DOI: 10.46698/f5109-1021-3401-u
7. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2019). O pererabotke beregov Krasnodarskogo vodokhranilishcha (On the processing of the banks of the Krasnodar reservoir). *Regional Geographical Researches*. Vol. 12. KubSU. Pp. 23–30.
8. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2019). Osobennosti del'toformirovaniya rek, vpadayushchikh v dolinnoe vodokhranilishche (na primere Krasnodarskogo vodokhranilishcha) (Features of delta formation of rivers flowing into a valley reservoir (on the example of the Krasnodar reservoir)). *Geographical Bulletin*, No. 3(50), Pp. 119–134. DOI: 10/17072/2079-7877-2019-3-119-134.
9. Laguta, A.A., Pogorelov, A.V. (2018). Osobennosti zaileniya Krasnodarskogo vodokhranilishcha. Opyt ocenki po dannym bati-metricheskikh s"emok (Features of siltation of the Krasnodar reservoir. Evaluation experience from bathymetric surveys). *Geographical Bulletin*. No. 4(47), Pp. 54–66. DOI: 10.17072/2079-7877-2018-4-54-66.
10. Litovka, F.S., Bandurin, M.A., Vanzha, V.V. (2019). Puti resheniya problemy zaileniya Krasnodarskogo vodokhranilishcha dlya racional'nogo ispol'zovaniya resursov poymennykh territorij (Ways to solve the problem of silting of the Krasnodar reservoir for the rational use of resources of floodplain territories). *Electronic scientific journal Engineering Bulletin of the Don*. No. 7. URL:http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_108_7y2019_Litovka.pdf_a0820f4a60.pdf
11. Pogorelov, A.V., Antonenko M.V., Boyko E.S., Fedorova S.I., Eleckij Ju.B. (2014). Issledovanie komponentov beregovoj zony Azovskogo morya po dannym vozdušnogo lazernogo skanirovaniya (rajon Verbyanoy kosy) (Study of the components of the coastal zone of the Sea of Azov based on airborne laser scanning data (Verbyana Spit area)). *Environmental protection in the oil and gas industry*. No. 11. Pp. 33–39.

Картография и геоинформатика

Лагута А.А., Погорелов А.В., Киселев Е.Н.

12. Pogorelov, A.V., Laguta, A.A., Kiselev, E.N. (2022). Novye svedeniya o zailenii Krasnodarskogo vodokhranilishcha po dannym batimetrichejskoj s"yomki (New data on silting of the Krasnodar Reservoir). *Geographical Bulletin*. No. 2(61). Pp. 166–179. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-166-179.
13. Pogorelov, A.V., Lipilin, D.A., Kurnosova, A.S. (2017). Sputnikovyy monitoring Krasnodarskogo vodokhranilishcha (Satellite monitoring of the Krasnodar reservoir). *Geographical Bulletin*. No. 1(40), Pp. 130–137.
14. Rules for the use of water resources of the Krasnodar reservoir. (2008), "Kuban`vodproekt". Krasnodar, 158 p.
15. Habidov, A.Sh., Kuskovskij, V.S., Zhindarev, L.A., Hejne, D.M. et al. (1999). *Coasts of seas and inland water bodies: Current problems of geology, geomorphology and dynamics*. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 272 p.
16. Chernihovskij, D.M. (2017). Ocenka svyazej morfometricheskikh kharakteristik rel'efa s kolichestvennymi i kachestvennymi kharakteristikami lesov na osnove cifrovyykh modelej rel'efa ASTER i SRTM (Evaluation of the relationships between morphometric characteristics of the relief and quantitative and qualitative characteristics of forests based on digital elevation models ASTER and SRTM). *Siberian Forest Journal*. No 3. Pp. 28–39. DOI: 10.15372/SJFS20170303.
17. Axelsson P. (2000), DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 33. P. 110–117.
18. Boyko E., Krylenko V., Krylenko M. (2015), LIDAR and airphoto technology in the study of the Black Sea accumulative coasts. *Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015)*. *International Society for Optics and Photonics*. V. 9535. P. 95351Q. <https://doi.org/10.1117/12.2192577>
19. Jenness J. *Topographic Position Index (TPI)*. (2006). Vol. 1.2.42 Pp. 2020.
20. Ossowski R., Przyborski M., Tysiac P. (2019), Stability assessment of coastal cliffs incorporating laser scanning technology and a numerical analysis. *Remote Sensing*. Vol. 11. Iss. 16. Art. No. 1951. DOI: 10.3390/rs11161951.
21. Ossowski R., Tysiac P. (2018). A new approach of coastal cliff monitoring using mobile laser scanning. *Polish Maritime Research*. Vol. 25. Iss. 2. Pp. 140–147. DOI: 10.2478/pomr2018-0065.
22. Pogorelov Anatoly, Laguta Andrey, Kiselev Evgeny, Lipilin Dmitry. (2021). Features of the long-term transformation of the Krasnodar reservoir, near the mouth of the Kuban River, Russia. *Journal of Geographical Sciences*. Vol. 31. Pp. 1895–1904. DOI: 10.1007/s11442-021-1928-7.
23. Weiss A.D. (2001). Topographic Positions and Landforms Analysis (Conference Poster). *21st Annual ESRI. International User Conference*. San Diego, CA, July 9-13.
24. Williams R. (2012). DEMs of difference. *Geomorphological Techniques*. *British Society for Geomorphology* 2(3.2). P. 1–17.
25. Wilson M.F.J., O'Connell B., Brown C., Guinan J.C., Grehan A.J. (2007). Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. *Marine Geodesy*. Iss. 30. Pp. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.

Статья поступила в редакцию: 21.06.25, одобрена после рецензирования: 24.07.25, принята к опубликованию: 12.12.25.

The article was submitted: 21 June 2025; approved after review: 24 July 2025; accepted for publication: 12 December 2025.

Информация об авторах

Андрей Александрович Лагута

Ведущий инженер ООО «АГМ Системы»;
350063, Россия, Краснодар, ул. Фрунзе, 22

e-mail: alaguta@icloud.com

Анатолий Валерьевич Погорелов

Доктор географических наук, профессор, Кубанский
государственный университет;
350040, Россия, Краснодар, ул. Ставропольская, 149

e-mail: alaguta@icloud.com

Евгений Николаевич Киселев

Кандидат географических наук, доцент, Кубанский
государственный университет;
350040, Россия, Краснодар, ул. Ставропольская, 149

e-mail: enkiselev@gmail.com

Information about the authors

Andrey A. Laguta

Leading Engineer, AGM Systems LLC;
22, Frunze st., Krasnodar, 350000, Russia

Anatoly V. Pogorelov

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Kuban
State University;
149, Stavropolskaya st., Krasnodar, 350040, Russia;

Evgeny N. Kiselev

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Kuban State University;
149, Stavropolskaya st., Krasnodar, 350040, Russia

Вклад авторов

Погорелов А.В. – идея, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста.

Лагута А.А. – сбор и обработка материала, написание статьи.

Киселев Е.Н. – обработка материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Contribution of the authors

Anatoly V. Pogorelov – the idea; material processing; writing of the article; scientific editing of the text.

Andrey A. Laguta – material collection and processing; writing of the article.

Evgeny N. Kiselev – material processing.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.