

УДК 551.435.32:528.8:556.55(470.6)

DOI: 10.46698/VNC.2026.99.53.001

Оригинальная статья

Оценка эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России по данным лидарной съемки и цифрового моделирования рельефа

О.С. Ермолаева¹, В.С. Тынченко², С.И. Горбачев¹,
Е.А. Рожков³, В.В. Герасиди⁴

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА
им. К.А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49,
e-mail: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru, gor-sergey1@yandex.ru;

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия,
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, e-mail: vadimond@mail.ru;

³ Кубанский государственный аграрный университет, Россия, 350044,
г. Краснодар, ул. им. Калинина, 13, e-mail: zhenyacool31@yandex.ru;

⁴ Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, Россия, 353918,
г. Новороссийск, пр. Ленина, 93, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Статья поступила: 11.08.2026, доработана: 15.09.2026, принята к публикации: ...2026

Резюме: Актуальность работы. Береговые склоны водохранилищ Юга России испытывают воздействие колебаний уровня воды, поверхностного стока, абразионного подмыва, атмосферного увлажнения и хозяйственной нагрузки. В таких условиях эрозионное разрушение развивается неравномерно, а маршрутные обследования не всегда выявляют малые формы рельефа, особенно на участках с растительностью. **Цель исследования.** Разработать подход к оценке эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России на основе лидарной съемки и цифрового моделирования рельефа. **Методы исследования.** Использованы материалы наземного обследования и беспилотной лидарной съемки береговых склонов. На основе плотного облака точек построена цифровая модель рельефа, по которой рассчитаны крутизна склонов, профильная и плановая кривизна, расчлененность рельефа, плотность линейных форм стока, положение участков относительно уреза воды и признаки нарушения растительного покрова. Устойчивость оценивалась по совокупности морфометрических и геоэкологических признаков. **Результаты.** Наиболее информативными показателями оказались крутизна поверхности, профильная и плановая кривизна, плотность линейных форм стока, расчлененность рельефа и положение участка относительно уреза воды. Опасные зоны формируются при сочетании высокой крутизны, подмыва основания склона, нарушения растительности, развития промоин и накопления осыпного материала. Выделены устойчивые, условно устойчивые, неустойчивые и активно разрушающиеся участки. Лидарная съемка позволяет выявлять формы глубиной 0,12–0,15 м и использовать результаты для мониторинга береговых процессов.

Ключевые слова: лидарная съемка, береговые склоны, водохранилища, эрозионная устойчивость, цифровая модель рельефа, геоэкологический мониторинг, Юг России, склоновые процессы.

Для цитирования: Ермолаева О.С., Тынченко В.С., Горбачев С.И., Рожков Е.А., Герасиди В.В. Оценка эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России по данным лидарной съемки и цифрового моделирования рельефа. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.99.53.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.99.53.001

Original paper

Assessment of erosion resistance of bank slopes of reservoirs in the South of Russia based on LiDAR survey data and digital terrain modeling

O.S. Ermolaeva¹, V.S. Tynchenko², S.I. Gorbachev¹,
E.A. Rozhkov³, V.V. Gerasidi⁴

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation, e-mail: ol_ermolaeva@rgau-msha.ru, gor-sergey1@yandex.ru;

² Bauman Moscow State Technical University, 5, 2nd Baumanskaya Str., Moscow 105005, Russian Federation, e-mail: vadimond@mail.ru;

³ Kuban State Agrarian University, 13 Kalinin Str., Krasnodar 350044, Russian Federation, e-mail: zhenyacool31@yandex.ru;

⁴ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 93 Lenin Ave., Novorossiysk 353918, Russian Federation, e-mail: gerasidi@rambler.ru

Received: 11.08.2025, revised: 15.09.2026, accepted:2026

Abstract: Relevance. Reservoir bank slopes in Southern Russia are affected by water level fluctuations, surface runoff, abrasion undercutting, atmospheric wetting, and anthropogenic pressure. Under such conditions, erosion develops unevenly, while field surveys do not always detect small terrain forms, especially in vegetated areas. **Aim.** The study aims to develop an approach for assessing the erosion resistance of reservoir bank slopes in Southern Russia using LiDAR survey data and digital terrain modeling. **Methods.** Field survey materials and UAV-based LiDAR data of bank slopes were used. A digital terrain model was constructed from a dense point cloud, and slope steepness, profile and plan curvature, terrain dissection, density of linear runoff forms, position relative to the water edge, and signs of vegetation disturbance were calculated. Stability was assessed using a set of morphometric and geoecological indicators. **Results.** The most informative indicators were slope steepness, profile and plan curvature, density of linear runoff forms, terrain dissection, and position relative to the water edge. Hazardous zones form where high slope steepness, undercutting at the slope base, disturbed vegetation, gully development, and talus accumulation coincide. Stable, conditionally stable, unstable, and actively eroding parts of the bank zone were identified. LiDAR surveying detects erosion forms 0.12–0.15 m deep and provides data for monitoring bank processes.

Keywords: LiDAR survey, bank slopes, reservoirs, erosion resistance, digital terrain model, geoecological monitoring, Southern Russia, slope processes.

For citation: Ermolaeva O.S., Tynchenko V.S., Gorbachev S.I., Rozhkov E.A., Gerasidi V.V. Assessment of erosion resistance of bank slopes of reservoirs in the South of Russia based on LiDAR survey data and digital terrain modeling. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): DOI: 10.46698/VNC.2026.99.53.001

Введение

Береговые склоны водохранилищ Юга России являются сложными природно-техническими объектами, состояние которых определяется геологическим строением, уровенным режимом, литологией, увлажнением, растительным покровом и хозяйственным использованием прибрежных зон [Яицкая и др., 2024]. Значимость их изучения

возрастает, поскольку водохранилища используются для водоснабжения, энергетики, орошения и рекреации [Sazzad et al., 2025], а береговые зоны постоянно перестраиваются под влиянием абразионного подмыва, промоин, осыпей и склоновых деформаций [Fomina et al., 2016]. Поэтому оценка эрозионной устойчивости является важной частью геоэкологического мониторинга [Pospehov, Savon-Vaciano, 2024].

Природные условия региона неоднородны: склоны могут быть сложены коренными породами, рыхлыми аллювиальными и делювиальными отложениями, лессовидными суглинками, песчано-глинистыми толщами и техногенно нарушенными грунтами [Parviz et al., 2024]. Поэтому внешне сходные участки по-разному реагируют на колебания уровня воды, осадки и поверхностный сток [Yelemessov et al., 2026], а маршрутные обследования дают важную, но фрагментарную информацию [Орлова и др., 2025].

Традиционные методы оценки включают полевые наблюдения, карты, геологические разрезы, аэрофотосъемку и спутниковые изображения [Karanski et al., 2025]. Однако спутниковые данные плохо выявляют мелкие эрозионные формы под растительностью [Татаринцев и др., 2026], а полевые работы не всегда дают непрерывную картину берега [Азаров и др., 2024]. Поэтому возрастает роль высокоточных дистанционных методов, прежде всего лидарной съемки [Reang et al., 2025].

Лидарные данные позволяют строить цифровые модели рельефа по плотному облаку точек [Karshyga et al., 2022] и фиксировать малые формы разрушения: уступы, промоины, борозды стока, бровки осыпей, просадки и слабые трещины [Скоробогатько и др., 2024]. После отделения растительности и техногенных объектов такие модели становятся основой морфометрического анализа [Ospanova et al., 2025] и количественной оценки устойчивости береговой зоны [Chamanpira et al., 2025].

Эрозионная устойчивость определяется не только крутизной склона [Бахаева, Ананенко, 2025], но и его длиной, экспозицией, формой профиля, расчлененностью, ложбинами стока, высотой уступа, растительностью, составом и влажностью грунтов [Толеубекова и др., 2025]. Важен также подмыв основания и изменение положения уреза воды [Malozyomov et al., 2024], поскольку они провоцируют осыпание, оползание и образование промоин [Parasar, Krishna, 2025].

Цель работы — разработать подход к оценке эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России по данным лидарной съемки и цифровой модели рельефа. Такой подход позволяет выделять участки разной устойчивости по совокупности морфометрических признаков и использовать результаты для мониторинга, первоочередного обследования и обоснования берегоукрепительных мероприятий [Ramakrishnan et al., 2024].

Методы и материалы

Материалом исследования стали данные наземного обследования и дистанционной съемки береговых склонов водохранилищ Юга России с разной степенью переработки береговой линии. Выбирались участки с выраженными признаками эрозионного нарушения: промоинами, бровками обрушения, подмывом основания склона, осыпными накоплениями и нарушенным растительным покровом. Высота склонов составляла 4–28 м, крутизна изменялась от 7–10° до 38–45°, что позволило сопоставить устойчивые и активно разрушающиеся формы рельефа.

Пространственные данные получали с помощью беспилотной лидарной съемки. Использовались БПЛА квадрокоптерного типа с лазерным сканирующим модулем, а координатная привязка выполнялась двухчастотным GNSS-приемником в режиме RTK/PPK. На отдельных участках закладывались опорные точки с точностью 1,5–2,5 см в плане и 2–4 см по высоте. Съемка проводилась с высоты 70–110 м при скорости полета 5–8 м/с, поперечном перекрытии 40–50% и продольном перекрытии фотосъемки не менее 75%. Полученные облака имели плотность 120–450 точек/м².

Полевые работы выполнялись в сухой период, без осадков и сильного ветра. На участок береговой линии длиной 800–1200 м приходилось 2–4 полетных задания, охватывающих верхнюю, прибрежную и приустьевую зоны склона.

Обработка данных включала корректировку траектории по GNSS/IMU, удаление шумовых точек, объединение маршрутов и классификацию облака на классы «земля», «растительность», «постройки», «водная поверхность» и прочие объекты. После фильтрации строилась цифровая модель рельефа с шагом 0,25 м для детальных участков и 0,5 м для всей береговой полосы. Среднеквадратическая ошибка по высоте обычно составляла 3–7 см.

По цифровой модели рассчитывались крутизна, экспозиция, профильная и плановая кривизна, относительная высота, вертикальная расчлененность, плотность ложбин стока и длина склоновых водосборов. Дополнительно выделялись свежие промоины глубиной более 0,15–0,20 м, линейные понижения, уступы, ниши подмыва и зоны аккумуляции осыпного материала. Для полосы шириной 20–50 м от уреза воды рассчитывался интегральный показатель эрозионной устойчивости, по которому участки группировались на устойчивые, условно устойчивые, неустойчивые и активно разрушающиеся. Такой подход дает пространственную основу для выбора мест детального обследования и мониторинга береговых склонов.

Результаты и обсуждение

В результате лидарной съемки была получена детальная цифровая модель рельефа береговых склонов водохранилищ Юга России. Она показала, что береговая зона имеет более сложное строение, чем фиксируется при визуальном обследовании или по обычным космическим снимкам. На участках, внешне воспринимаемых как ровные склоны, выявлены мелкие промоины, бровки, уступы, локальные просадки и зоны аккумуляции смытого материала. После фильтрации растительности лидарные данные позволили анализировать именно поверхность земли, что важно для количественной оценки эрозионной устойчивости.

Средняя плотность итогового облака точек составляла 170–310 точек/м² на открытых участках и 75–130 точек/м² на участках с кустарниковой растительностью. Цифровая модель рельефа с шагом 0,25 м позволила выделить формы микрорельефа глубиной от 0,12–0,15 м. Линейные формы стока на пологих участках имели глубину 0,10–0,25 м и ширину 0,4–0,8 м, а при уклонах более 25° их глубина возрастала до 0,6–1,2 м.

Из рисунка 1 видно, что эрозионная расчлененность проявляется фрагментарно и часто совпадает с нарушенными участками верхней части склона: дорогами, тропами, технологическими проездами и зонами разреженной растительности. Промоины обычно ориентированы по линии наибольшего падения склона, а у подножия могут веерообразно расширяться. Поэтому верхняя часть склона выступает зоной зарождения стока, средняя – зоной максимального размыва, а нижняя – зоной выноса и частичного накопления материала.

При анализе карты уклонов было установлено, что устойчивые и условно устойчивые участки чаще всего соответствовали поверхностям с крутизной до 12–15° (рис. 1). На таких склонах отсутствовали глубокие промоины, а рельеф имел сглаженный характер. Даже при наличии поверхностного стока разрушение здесь проявлялось в виде слабого смыва, без формирования развитой эрозионной сети. Участки с крутизной 15–25° занимали промежуточное положение. На них уже появлялись отдельные борозды и неглубокие промоины, но их развитие сильно зависело от растительного покрова. Если склон был хорошо задернован, то даже при уклоне около 20° признаки разрушения были выражены слабо. Если же растительный покров был нарушен, то при такой же крутизне формировались достаточно четкие линейные понижения. Наиболее

неустойчивыми оказались участки с крутизной более 25–30°, особенно если они располагались в зоне подмыва или имели выпуклый профиль, при котором поверхностный сток быстро концентрируется в отдельных направлениях (табл. 1).

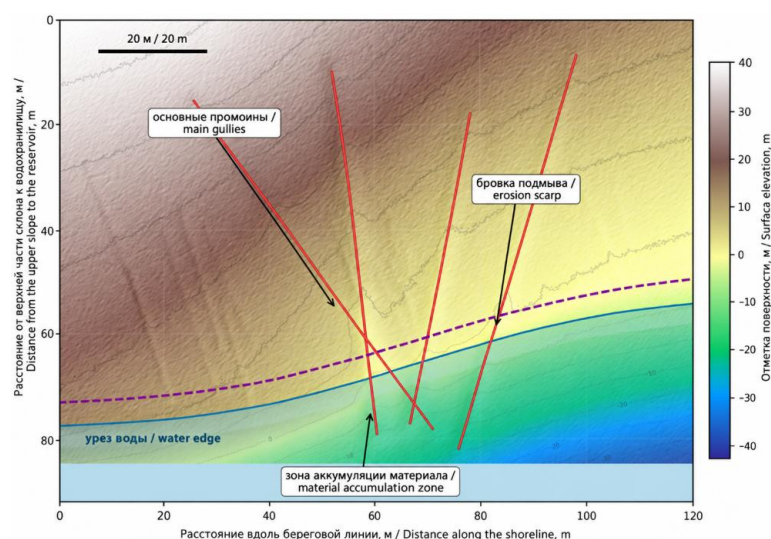


Рис. 1. Фрагмент цифровой модели рельефа берегового склона с выделенными эрозионными формами/

Fig. 1. Fragment of a digital relief model of a coastal slope with highlighted erosion forms

Таблица 1 / Table 1

Морфометрические признаки береговых склонов, выделенные по данным лидарной съемки / Morphometric features of coastal slopes identified from lidar survey data

Тип участка берегового склона / Type of coastal slope section	Крутизна поверхности, град. / Surface steepness, degrees	Высота склона, м / Slope height, m	Глубина промоин, м / Gully depth, m	Ширина промоин, м / Gully width, m	Плотность эрозионных форм, ед./100 м / Density of erosional forms, units/100 m	Основные признаки состояния поверхности / Main indicators of surface condition
Пологий задернованный склон / Gentle grass-covered slope	7–12	4–8	0.05–0.15	0.2–0.5	1–2	Поверхность сглаженная, растительный покров практически сплошной, признаки свежего размыва выражены слабо / The surface is smoothed, vegetation cover is almost continuous, and signs of recent erosion are weakly expressed
Умеренно крутой склон с отдельными промоинами / Moderately steep slope with separate gullies	12–20	6–14	0.15–0.45	0.4–1.0	3–5	Наблюдаются отдельные линейные формы стока, местами нарушен дерновый слой / Separate linear runoff forms are observed, and the turf layer is locally disturbed
Крутой склон с развитой эрозионной сетью / Steep slope with a developed erosion network	20–30	8–22	0.45–1.20	0.8–2.0	6–9	Промоины хорошо выражены, имеются локальные уступы и зоны выноса материала у основания / Gullies are clearly expressed, with local scarps and material removal zones at the base

Тип участка берегового склона / Type of coastal slope section	Крутизна поверхности, град. / Surface steepness, degrees	Высота склона, м / Slope height, m	Глубина промоин, м / Gully depth, m	Ширина промоин, м / Gully width, m	Плотность эрозионных форм, ед./100 м / Density of erosional forms, units/100 m	Основные признаки состояния поверхности / Main indicators of surface condition
Подмываемый береговой уступ / Undercut coastal scarp	25–38	6–18	0.30–0.90	0.6–1.5	5–8	В нижней части фиксируются ниши подмыва, свежие осыпи и резкое изменение профиля склона / Undercutting niches, fresh talus, and a sharp change in the slope profile are recorded in the lower part
Активно разрушающийся склон / Actively degrading slope	30–45	10–28	0.80–1.50	1.2–2.4	8–12	Поверхность расчленена, растительность разрежена, имеются свежие бровки обрушения и аккумуляция материала у подножия / The surface is dissected, vegetation is sparse, and fresh collapse edges and material accumulation at the foot are present

Крутизна склона не является единственным показателем эрозионной опасности. Отмечены участки с высоким уклоном, но устойчивой поверхностью за счет плотного дернового слоя и отсутствия подмыва. Напротив, склоны средней крутизны могли быть сильно нарушены из-за слабой связности грунтов, рыхлых прослоев и техногенного воздействия.

Поэтому устойчивость оценивалась по совокупности морфометрических признаков, а не только по карте уклонов. Активная эрозия чаще приурочена к вогнутым участкам, где концентрируется поверхностный сток; выпуклые формы чаще связаны с осыпанием и мелким обрушением. По данным ЦМР ширина линейных понижений составляла 0,7–2,4 м, глубина – 0,3–1,5 м. Свежие стенки размыва с перепадами 0,25–0,40 м (рис. 2) указывают на недавнюю активизацию процесса.

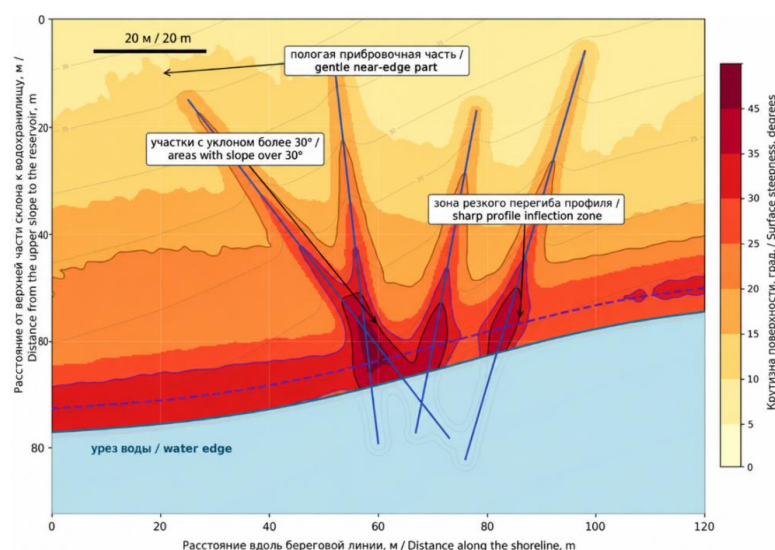


Рис. 2. Карта уклонов исследуемого участка береговой зоны водохранилища /
Fig. 2. Map of slopes of the studied section of the coastal zone of the reservoir

Большое значение имело положение участка относительно уреза воды. В нижней части береговых склонов, в пределах полосы шириной 3–8 м от уреза воды, были выделены зоны абразионного подмыва. В цифровой модели они проявлялись в виде резкого изменения профиля склона и небольших ниш, расположенных почти параллельно береговой линии. На участках с рыхлыми грунтами такие ниши сопровождалась осыпанием верхнего материала, из-за чего склон приобретал ступенчатый профиль. При повторном визуальном сопоставлении с полевыми фотографиями было видно, что свежий материал у основания склона имеет более светлую окраску и слабое закрепление растительностью. Это подтверждает, что данные лидарной съемки достаточно хорошо отражают не только геометрию поверхности, но и позволяют косвенно судить о современной активности процесса.

В результате классификации береговой зоны по интегральному показателю эрозионной устойчивости были выделены четыре основные группы участков. Устойчивые участки занимали около 31% изученной береговой линии. Они характеризовались небольшой крутизной, сглаженной формой профиля, отсутствием развитых промоин и хорошим растительным покровом. Условно устойчивые участки составили около 27%. На них были отмечены отдельные мелкие формы смыва, но они не образовывали единой эрозионной сети и не имели признаков быстрого развития. Неустойчивые участки занимали около 26% береговой линии. Для них были характерны уклоны более 20°, наличие промоин, локальных уступов, слабое закрепление поверхности растительностью и признаки периодического подмыва нижней части. Наиболее опасная группа, то есть активно разрушающиеся участки, составила около 16% (табл. 2). Здесь одновременно проявлялись несколько неблагоприятных факторов: высокая крутизна склона, вогнутый профиль, нарушение растительного покрова, свежие промоины и абразионное воздействие у основания.

Таблица 2 / Table 2

**Классификация береговой зоны по степени эрозионной устойчивости /
Classification of the coastal zone according to the degree of erosion resistance**

Класс устойчивости берегового склона / Stability class of the coastal slope	Доля от общей длины исследованной береговой линии, % / Share of the total length of the studied shoreline, %	Типичные значения уклона, град. / Typical slope values, degrees	Характер эрозионных проявлений / Nature of erosional manifestations	Геоэкологическая оценка состояния / Geoecological assessment of condition
Устойчивые участки / Stable sections	31	До 12–15 / Up to 12–15	Глубокие промоины отсутствуют, возможен слабый поверхностный смыв / Deep gullies are absent; weak surface wash may occur	Состояние относительно стабильное, регулярного вмешательства не требуется / The condition is relatively stable, and regular intervention is not required
Условно устойчивые участки / Conditionally stable sections	27	12–20	Отмечаются отдельные мелкие борозды стока и локальные нарушения дернового слоя / Separate shallow runoff rills and local disturbances of the turf layer are observed	Необходим периодический контроль, особенно после сильных осадков и колебаний уровня воды / Periodic control is required, especially after heavy precipitation and water-level fluctuations

Класс устойчивости берегового склона / Stability class of the coastal slope	Доля от общей длины исследованной береговой линии, % / Share of the total length of the studied shoreline, %	Типичные значения уклона, град. / Typical slope values, degrees	Характер эрозионных проявлений / Nature of erosional manifestations	Геоэкологическая оценка состояния / Geoeological assessment of condition
Неустойчивые участки / Unstable sections	26	20–30	Развиты промоины, локальные уступы, местами наблюдается подмыв основания склона / Gullies and local scarps are developed; undercutting of the slope base is observed in places	Требуется детальное обследование и включение в программу мониторинга / Detailed investigation and inclusion in the monitoring program are required
Активно разрушающиеся участки / Actively degrading sections	16	Более 30 / More than 30	Имеются свежие промоины, осыпи, бровки обрушения и зоны аккумуляции материала / Fresh gullies, talus, collapse edges, and material accumulation zones are present	Участки повышенной опасности, нуждаются в первоочередном инженерно-геологическом изучении / High-hazard sections requiring priority engineering-geological investigation

Полученное соотношение показывает, что большая часть береговой зоны не находится в состоянии катастрофического разрушения, но значительная доля участков уже имеет признаки снижения устойчивости. Особенно важно, что активно разрушающиеся участки не всегда занимают большую площадь, но именно они определяют общий риск дальнейшего развития опасных процессов. В пределах таких фрагментов даже небольшое изменение условий, например повышение уровня воды, длительное переувлажнение или механическое нарушение поверхности, может привести к расширению зоны разрушения. В этом смысле лидарная съемка хорошо подходит не только для фиксации текущего состояния, но и для создания исходной базы последующего мониторинга. Если повторить съемку через один или два сезона, можно будет уже количественно определить скорость смещения бровки, объем вынесенного материала и изменение формы склонов.

Интересным результатом стало то, что наиболее опасные зоны часто располагались не на самых высоких склонах, а на участках средней высоты, где сочетаются подмыв основания и слабая устойчивость грунтов (рис. 3). Высокие склоны, сложенные более плотными породами и покрытые растительностью, в ряде случаев сохраняли устойчивость, несмотря на значительную крутизну. Напротив, склоны высотой 6–12 м, сложенные рыхлыми суглинками и супесями, разрушались быстрее, особенно если верхняя часть была нарушена тропами или временными подъездными путями. Это показывает, что высота склона является важным, но не решающим фактором. Более существенное значение имеет сочетание геометрии поверхности, литологического состава и режима увлажнения. Полученные данные хорошо согласуются с общими представлениями о развитии береговых процессов, но дают более детальную пространственную картину.

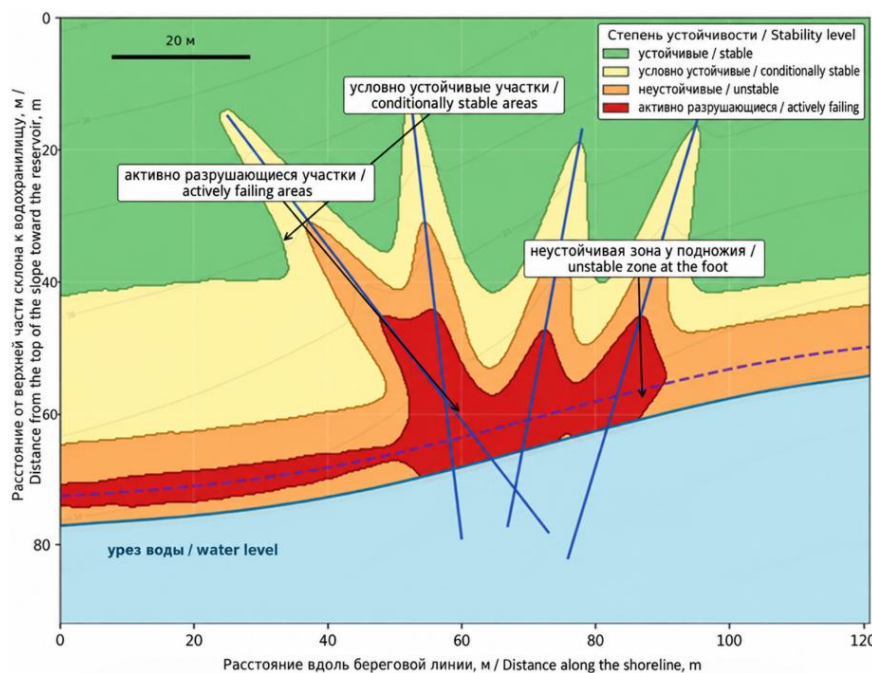


Рис. 3. Схема районирования берегового склона по степени эрозионной устойчивости /
Fig. 3. Scheme for zoning the coastal slope according to the degree of erosion resistance

Следует отметить и ограничения выполненной оценки. Лидарная съемка позволяет очень точно описать поверхность рельефа, но она не дает прямой информации о прочностных характеристиках грунтов, их влажности, сцеплении, угле внутреннего трения и степени трещиноватости. Поэтому полученная карта устойчивости должна рассматриваться как геоморфологическая и геоэкологическая оценка, а не как полный инженерно-геологический расчет устойчивости откоса. Для участков, отнесенных к активно разрушающимся, в дальнейшем необходимы бурение, отбор проб, лабораторные испытания грунтов и расчет устойчивости склонов по предельному равновесию. Однако даже без этих данных лидарная модель дает возможность существенно сузить зону детального обследования и направить инженерно-геологические работы именно туда, где они действительно необходимы.

Таким образом, результаты исследования показывают, что применение лидарной съемки для оценки эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России является достаточно эффективным методом. Его преимущество состоит в высокой детализации рельефа, возможности выделять слабовыраженные формы разрушения и выполнять количественное сравнение разных участков береговой зоны. В отличие от обычного описания берегов, такой подход позволяет получить пространственно непрерывную картину состояния склонов и выделить зоны различной степени опасности. Наиболее информативными признаками оказались крутизна поверхности, профильная кривизна, плотность линейных форм стока, наличие подмыва у основания и степень нарушения растительного покрова. При совместном использовании эти показатели позволяют достаточно уверенно определить, какие участки находятся в устойчивом состоянии, а какие уже переходят в стадию активного разрушения. Для практики мониторинга водохранилищ это имеет большое значение, так как дает возможность не только фиксировать последствия эрозии, но и заранее выделять те фрагменты береговой линии, где риск дальнейшего разрушения наиболее высок.

Выводы

В результате исследования установлено, что лидарная съемка является эффективным способом оценки эрозионной устойчивости береговых склонов водохранилищ Юга России. Цифровая модель рельефа, построенная по плотному облаку точек, позволяет выявлять мелкие промоины, бровки подмыва, локальные уступы, зоны накопления смытого материала и участки слабого проседания, которые при обычном маршрутном обследовании фиксируются хуже.

Наиболее информативными показателями эрозионной устойчивости являются крутизна поверхности, профильная и плановая кривизна, плотность линейных форм стока, степень расчлененности рельефа и положение участка относительно уреза воды. При этом устойчивость береговой зоны нельзя оценивать только по одному признаку, например по крутизне склона. Более обоснованной является комплексная оценка с учетом геометрии поверхности, состояния растительного покрова и проявлений современных эрозионных процессов.

По результатам обработки цифровой модели рельефа выделены устойчивые, условно устойчивые, неустойчивые и активно разрушающиеся участки береговых склонов. Наиболее опасные зоны приурочены к местам, где одновременно наблюдаются подмыв основания склона, развитие линейной эрозии и накопление осыпного материала у подножия.

Эрозионная активность имеет выраженную пространственную неоднородность и развивается не сплошной полосой, а отдельными фрагментами. Поэтому при мониторинге важно учитывать не только протяженность опасных участков, но и их внутреннее строение. Предложенный подход может использоваться для геоэкологического мониторинга, выбора зон детального инженерно-геологического изучения и повторной оценки берегов после паводков, сильных осадков или резких изменений уровня воды.

Литература

1. Азаров А.В., Сердюков А.С., Сказка В.В. Теоретические исследования возможности использования туннельных волн для мониторинга состояния массива горных пород вблизи подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155.
2. Бахаева С.П., Ананенко Е.В. Обоснование критериев прогноза устойчивости природно-технической системы «отвал – основание» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 5–20. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_5.
3. Орлова Н.С., Волик М.В., Бесаева З.В., Валиева Т.Р. Исследование устойчивости склонов горной породы с использованием программы SiO 2D // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 3. – С. 1409–1421. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1409-1421.
4. Скоробогатко М.Р., Батугин А.С., Беляев Е.Н. Картирование трещиноватости бортов карьера с использованием возможностей нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11. – С. 75–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_75.
5. Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Лебедева Л.В. Оценка экологической реакции пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) на воздействие разных факторов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94.
6. Толубекова Ж.З., Тиреуов К.М., Курмангалиева З.Н., Татаринцев В.Л. Экологическая реакция сельскохозяйственных культур на условия выращивания как основа управления устойчивостью агроландшафтов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 2. – С. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712.
7. Яицкая Н.А., Халиева А.А., Бригида В.С., Плиева М.Т. Геоэкологические методы оценки динамики береговой линии на Черноморском побережье Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. № 2. – С. 720–732. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-720-732.
8. Chamanpira R., Dehghani R., Veyskarami I. Evaluation of groundwater level using hybrid models: case study: Khorramabad plain // Water and Soil Management and Modeling. – 2025. – Vol. 5. No. 2. – pp. 124–137. DOI: 10.22098/mmws.2024.15077.1459.

9. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 86. – Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
10. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Demin A.Y., Martyushev N.V. Geospatial clustering in smart city resource management: an initial step in the optimisation of complex technical supply systems // Smart Cities. – 2025. – Vol. 8. No. 1. – Art. No. 14. DOI: 10.3390/smartcities8010014.
11. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica // Metals. – 2022. – Vol. 12. No. 12. – Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.
12. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks // Mathematics. – 2024. – Vol. 12. No. 3. – Art. No. 480. DOI: 10.3390/math12030480.
13. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2025. – Vol. 17. No. 4. – pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
14. Parasar P., Krishna A.P. Explainable AI-driven assessment of hydro climatic interactions shaping river discharge dynamics in a monsoonal basin // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. No. 1. – Art. No. 27302. DOI: 10.1038/s41598-025-13221-x.
15. Parviz L., Azizi N., Kafili-Golgasem M. Spectral analysis-artificial intelligence model with spatial variables for some soil chemical properties estimation // Water and Soil Management and Modeling. – 2024. – Vol. 4. No. 3. – pp. 321–338. DOI: 10.22098/mmws.2023.13308.1321.
16. Posphehov G.B., Savon-Vaciano Yumira. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2024. – No. 12-1. – pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178.
17. Ramakrishnan J., John R., Mavaluru D., Ravali R.S., Srinivasan K. Transforming groundwater sustainability, management and development through deep learning // Groundwater for Sustainable Development. – 2024. – Vol. 27. – Art. No. 101366. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101366.
18. Reang D., Tume S.J.P., Vats P., Choudhury M., Rai H.M. Forecasting the future: predictive modeling for water resource management // Advances in Hydrology: Spatial Intelligence, Climate Change, and Sustainable Water Resource Management. – 2025. – pp. 95–122. DOI: 10.1016/B978-0-443-26777-2.00006-5.
19. Sazzad M.M., Ahmed T., Kibria G., Khan I. IoT based soil moisture measurement and type prediction using advanced regression and machine learning models // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. No. 1. – Art. No. 35730. DOI: 10.1038/s41598-025-19444-2.
20. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2026. – Vol. 2026. No. 3. – pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.

References

1. Azarov A.V., Serdyukov A.S., Skazka V.V. Theoretical investigation of usability of tunnel waves in rock mass monitoring near underground structures. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2024. No. 4. pp. 155–167. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_155. (In Russ.)
2. Bakhaeva S.P., Ananenko E.V. Substantiation of stability criteria for waste dump–foundation natural–technical system. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2025. No. 12-2. pp. 5–20. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_5. (In Russ.)
3. Orlova N.S., Volik M.V., Besaeva Z.V., Valieva T.R. Study of rock slopes stability using SiO 2D program. Sustainable Development of Mountain Territories. 2025. Vol. 17. No. 3. pp. 1409–1421. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-3-1409-1421. (In Russ.)
4. Skorobogatko M.R., Batugin A.S., Belyaev E.N. Pit wall jointing mapping using neural network capacities. MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2024. No. 11. pp. 75–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_11_0_75. (In Russ.)

5. Tatarintsev V.L., Tatarintsev L.M., Lebedeva L.V. Assessment of the ecological reaction of soft spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to the effects of various factors. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2026. Vol. 18. No. 1. pp. 81–94. DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-81-94. (In Russ.)
6. Toleubekova Z.Z., Tireuov K.M., Kurmangalieva Z.N., Tatarintsev V.L. Ecological response of agricultural crops to growing conditions as a basis for managing the sustainability of agricultural landscapes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 2. pp. 701–712. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-701-712. (In Russ.)
7. Yaitskaya N.A., Khalieva A.A., Brigida V.S., Plieva M.T. Geoecological methods for assessing the coastline dynamics on the Caucasus Black Sea coast. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 720–732. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-720-732. (In Russ.)
8. Chamanpira R., Dehghani R., Veyskarami I. Evaluation of groundwater level using hybrid models: case study: Khorramabad plain. *Water and Soil Management and Modeling*. 2025. Vol. 5. No. 2. pp. 124–137. DOI: 10.22098/mmws.2024.15077.1459.
9. Fomina E.V., Voitovich E.V., Brukhanov O. Some aspects on improvement of water resistant performance of gypsum binders. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. Art. No. 04065. DOI: 10.1051/mateconf/20168604065.
10. Kapanski A.A., Klyuev R.V., Boltrushevich A.E., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Demin A.Y., Martyushev N.V. Geospatial clustering in smart city resource management: an initial step in the optimisation of complex technical supply systems. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8. No. 1. Art. No. 14. DOI: 10.3390/smartcities8010014.
11. Karshyga Z.B., Ultarakova A.A., Lokhova N.G., Kassymzhanov K.K., Myrzakulov M. Technology for complex processing of electric smelting dusts of ilmenite concentrates to produce titanium dioxide and amorphous silica. *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 12. Art. No. 2129. DOI: 10.3390/met12122129.
12. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov E.A., Valuev D.V., Qi M. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks. *Mathematics*. 2024. Vol. 12. No. 3. Art. No. 480. DOI: 10.3390/math12030480.
13. Ospanova A.A., Ozeranskaya N.L., Tatarintsev V.L., Shakenova Z.K. Modeling of environmentally sustainable agricultural land use in the Pavlodar region of Kazakhstan. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 4. pp. 1969–1976. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-4-1969-1976.
14. Parasar P., Krishna A.P. Explainable AI-driven assessment of hydro climatic interactions shaping river discharge dynamics in a monsoonal basin. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 1. Art. No. 27302. DOI: 10.1038/s41598-025-13221-x.
15. Parviz L., Azizi N., Kafili-Golgasem M. Spectral analysis-artificial intelligence model with spatial variables for some soil chemical properties estimation. *Water and Soil Management and Modeling*. 2024. Vol. 4. No. 3. pp. 321–338. DOI: 10.22098/mmws.2023.13308.1321.
16. Pospehov G.B., Savon-Vaciano Yusmira. Landslide hazard assessment in preliminary exploration of mineral deposits in north-eastern Cuba. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 12-1. pp. 178–192. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_178.
17. Ramakrishnan J., John R., Mavaluru D., Ravali R.S., Srinivasan K. Transforming groundwater sustainability, management and development through deep learning. *Groundwater for Sustainable Development*. 2024. Vol. 27. Art. No. 101366. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101366.
18. Reang D., Tume S.J.P., Vats P., Choudhury M., Rai H.M. Forecasting the future: predictive modeling for water resource management. *Advances in Hydrology: Spatial Intelligence, Climate Change, and Sustainable Water Resource Management*. 2025. pp. 95–122. DOI: 10.1016/B978-0-443-26777-2.00006-5.
19. Sazzad M.M., Ahmed T., Kibria G., Khan I. IoT based soil moisture measurement and type prediction using advanced regression and machine learning models. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 1. Art. No. 35730. DOI: 10.1038/s41598-025-19444-2.
20. Yelemessov K.K., Myrzakulov M., Yerezhep D.E., Tkachenko D.E., Kuldeyev N.Y. Analytical assessment of rotor profiles on three-screw compressor performance for gas field operations: circular-arc versus cycloidal. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2026. Vol. 2026. No. 3. pp. 377–391. DOI: 10.32014/2026.2518-170X.659.