

УДК 551.43

DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t

Оригинальная статья

Моделирование отвесной стенки активного клифа по данным лидарной съемки (на примере Краснодарского водохранилища)

А.А. Лагута ^{1,2}

¹ Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, e-mail: a-y-l@mail.ru;

² АГМ Системы, 350063, Россия, г. Краснодар, ул. им. Фрунзе 22/1, e-mail: a-y-l@mail.ru

Статья поступила: 01.07.2024, доработана: 15.08.2024, принята к публикации: 29.08.2024

Резюме: Актуальность работы. Берега Краснодарского водохранилища на отдельных участках продолжают активное формирование с разрушением уступа II надпойменной террасы долины р. Кубани. В береговой зоне водохранилища на данной террасе расположены многочисленные объекты застройки, относящиеся к различным функциональным зонам (жилой, рекреационной и др.) МО город Краснодар. **Цель работы.** Разработка методики создания и анализа цифровой модели рельефа активного клифа, ориентированной на отвесный обрыв с отрицательными уклонами, с оценкой формы и размеров волноприбойных ниш. **Методы.** В результате лидарной съемки получено облако точек лазерных отражений (ТЛО) в пределах тестового участка активного клифа протяженностью 458 м и выполнена классификация ТЛО с выделением класса «земля». В целях исключения из модели отрицательных уклонов выполнено преобразование системы координат ТЛО, выраженное в замещении координат по оси X на расстояние вдоль бровки клифа и повороте массива точек вокруг новой оси абсцисс на минус 90°. После преобразования системы координат построена цифровая модель рельефа стенки откоса с выделением волноприбойных ниш на основе индекса TPI. **Результаты.** Разработана методика моделирования форм рельефа с отрицательным уклоном. Определены форма, размеры и пространственное положение волноприбойных ниш. Всего в пределах участка выделено 14 отдельных ниш при общей длине 394,72 м. Средняя глубина ниш – 0,51 м, максимальная – 1,79 м; средняя длина – 28,82 м, максимальная – 84,16 м. Средняя величина уклона поверхности откоса по участку составляет 57,97°; средний положительный уклон – 52,12°, средний отрицательный уклон – 72,58°. Обнаружена значительная вариабельность высотного положения волноприбойных ниш на откосе (от 33,89 до 37,82 м БС). Общий объем массы грунта, заключенный над волноприбойной нишей между поверхностью откоса и вертикальной плоскостью, касательной к самой глубокой точке ниши, в пределах участка работ составляет 743,88 м³.

Ключевые слова: Краснодарское водохранилище, цифровая модель рельефа, формирование берегов, абразия, мобильное лазерное сканирование, индекс превышения (TPI).

Благодарности: 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. Моделирование отвесной стенки активного клифа по данным лидарной съемки (на примере Краснодарского водохранилища). *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(3): 230-242. DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t

DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t

Original paper

Modeling of a steep wall of an active cliff using LiDAR survey data (case study of the Krasnodar Reservoir)

A.A. Laguta ^{1,2}

¹ Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar 350040, Russian Federation, e-mail: a-y-l@mail.ru;

² AGM Systems LLC, 22/1 Frunze Str., Krasnodar 350063, Russian Federation, e-mail: a-y-l@mail.ru

Received: 01.07.2024, revised: 15.08.2024, accepted: 29.08.2024

Abstract: Relevance. The banks of the Krasnodar Reservoir in some areas continue to actively form with the destruction of the ledge of the II floodplain terrace of the Kuban River valley. In the coastal zone of the reservoir on this terrace there are numerous development objects belonging to various functional zones (residential, recreational, etc.) of the municipal formation of the city of Krasnodar. **Aim.** The aim of the research is the development of a methodology for creating and analyzing a digital relief model of an active cliff, focused on a steep cliff with negative slopes, with an assessment of the shape and size of wave-cut notches. **Methods.** As a result of the LiDAR survey, a point cloud was obtained within a test section of the active cliff with a length of 458 m and a classification of the point cloud was performed, highlighting the “ground” class. In order to exclude negative slopes from the model, a transformation of the point cloud coordinate system was performed, expressed in replacing the coordinates along the X axis by a distance along the edge of the cliff and rotating the array of points around the new abscissa axis by minus 90°. After transforming the coordinate system, a digital model of the steep wall was built with the identification of wave-cut notches based on the TPI index. **Results.** A technique has been developed for modeling landforms with a negative slope. The shape, dimensions and spatial position of the wave-cut notches have been determined. In total, 14 separate notches were identified within the site with a total length of 394.72 m. The average depth of the notches is 0.51 m, the maximum is 1.79 m; the average length is 28.82 m, the maximum is 84.16 m. The average slope ratio of the surface along the site is 57.97°; the average positive slope is 52.12°, the average negative slope is 72.58°. Significant variability in the altitudinal position of wave-cut notches on the slope was discovered (from 33.89 to 37.82 m (Baltic Vertical Datum)). The total volume of soil mass contained above the wave-cut notch between the surface of the slope and the horizontal plane tangent to the deepest point of the notch within the study site is 743.88 m³.

Keywords: Krasnodar Reservoir, digital elevation model, coast formation, abrasion, mobile laser scanning, Topographic Position Index (TPI).

Acknowledgments: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-27-20005 and with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project No. 24-27-20005.

For citation: Laguta A.A. Modeling of a steep wall of an active cliff using LiDAR survey data (case study of the Krasnodar Reservoir). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(3): 230-242. DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t

Введение

Интенсивность и характер переработки берегов определяются главным образом геолого-геоморфологическими и гидрологическими факторами [Иванов, Тржцинский, 2001]. В их взаимодействии рождаются различные динамические обстановки

рельефообразования и осадконакопления, под которыми традиционно понимаются пространственные геоморфологические единицы со свойственными им условиями накопления осадков или абразии [Pettijohn, 1957; Reineck, Singh, 1957; Долотов, 1989; Хабидов и др., 1999], формирующиеся как в результате преимущественного воздействия какого-либо отдельного фактора, так и вследствие совокупного влияния разнообразных комбинаций факторов.

Запуск в эксплуатацию Краснодарского водохранилища в 1975 г. вызвал нарушение вещественного баланса, влекущее за собой несоответствие существовавших до начала эксплуатации отдельных форм рельефа актуальным условиям среды рельефообразования и обусловленное возникновением новых факторов морфолитогенеза (создание динамического подпора), либо перераспределением вкладов предшествовавших. Для водохранилищ, сходных по генетическому типу с Краснодарским, по однородности комбинаций указанных факторов выделяются три области, одна из которых – область волнового морфолитогенеза – занимает около 7,5 км длины правого берега (рис. 1). Здесь доминирующим фактором рельефообразования является вновь созданный, а именно – воздействие прибойного потока.

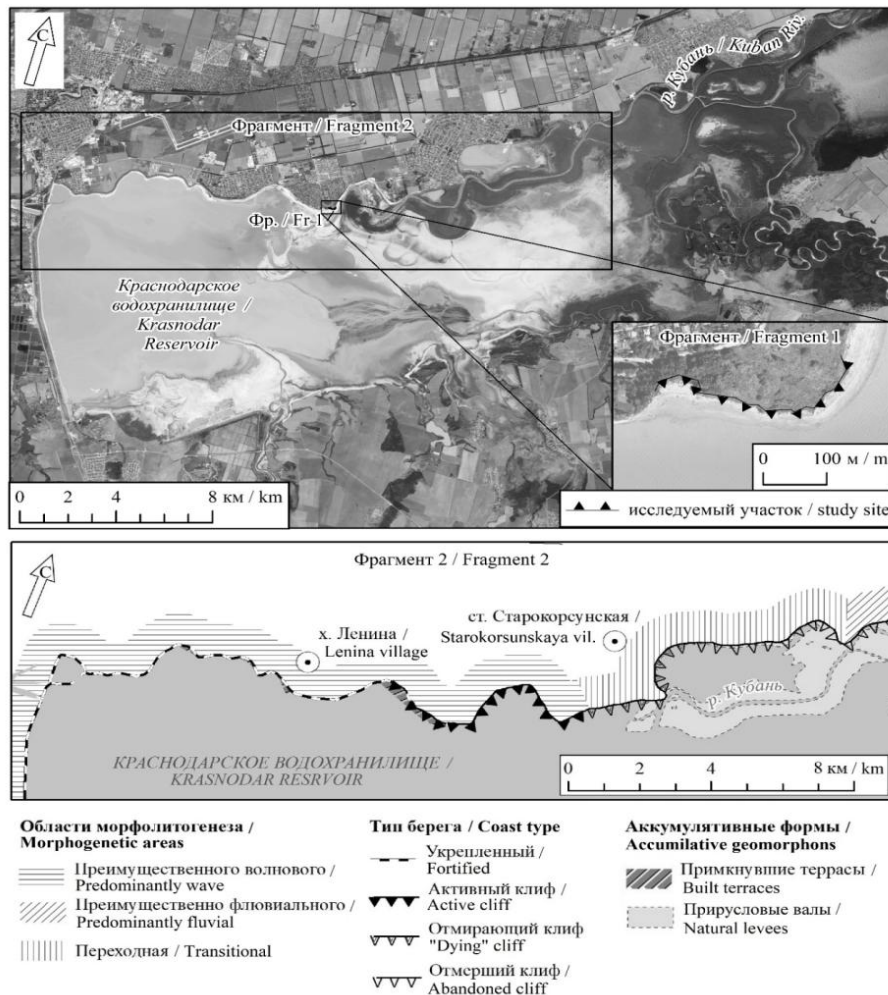


Рис. 1. Положение исследуемого участка и специфических областей морфолитогенеза на правом берегу Краснодарского водохранилища /

Fig. 1. Position of the study site and specific morphogenetic areas on the right bank of the Krasnodar Reservoir

Для формирующейся в пределах рассматриваемой области береговой линии упомянутое выше несоответствие спустя полвека эксплуатации объекта продолжает проявляться в активном разрушении уступа II надпойменной террасы долины р. Кубани, характерном для лессовидных суглинков – наиболее слабых по сопротивляемости размыву грунтов, с сопутствующим образованием трещин, заколов в клифе, останцов.

Стремление нарушенной созданием подпора системы к равновесному состоянию непрерывно, и, следовательно, до достижения профиля равновесия непрерывен и процесс разрушения берегов, препятствующих волнам. Уместно заметить, что согласно [Гаврюхова, 1998] расчетные проектные сроки самовыполживания для анализируемого объекта не оправдались уже по итогам 90-х гг. XX в.

Целью исследования является разработка методики создания и анализа цифровой модели рельефа стенки берегового откоса с оценкой формы и размеров волноприбойных ниш, играющих важную роль в разрушении участков берегов, сложенных лессовидными суглинками [Назаров, Гаврюхова, 2005].

Актуальность разработки предлагаемой методики в совокупности с методикой оценки линейного смещения берегового уступа [Лагута, Погорелов, 2023], помимо важности водоема как хозяйственного объекта, обусловлена нахождением в береговой зоне водохранилища многочисленных объектов застройки, относящихся к различным функциональным зонам (жилой, рекреационной и др.) муниципального образования город Краснодар, и необходимостью принятия управленческих решений по защите берегов. Методика основана на морфометрическом анализе цифровой модели рельефа, полученной по материалам лидарной съемки (мобильного лазерного сканирования) – динамично развивающейся технологии, имеющей широкое применение [Антоненко и др., 2014; Ossowski, Tysiac, 2018; Ossowski et al., 2019; Погорелов и др., 2023а, 2023б].

Методы исследования

Режим эксплуатации водохранилища, вследствие которого уровни, достигающие отметки НПУ, наблюдаются в среднем не более 5 месяцев в году, открывает возможности для съемки стенки откоса с осушенной поверхности пляжа в межженный период года. Лидарная съемка исследуемого участка проведена 9 сентября 2023 г. при уровне 25,95 м БС (<http://www.kbvufgu.ru/>). Технология мобильного лазерного сканирования заключается в пространственной привязке облака точек лазерных отражений (ТЛО), что осуществляется с использованием данных основных компонентов системы сканирования: сенсора (LiDAR) с функцией дальномера; ГНСС-приемника с функцией регистрации данных спутниковых наблюдений для последующего расчета пространственного положения и инерциального блока с функцией записи угловых и линейных ускорений для измерения пространственной ориентации. Такой набор исходных данных позволяет однозначно определить координаты ТЛО путем решения прямой геодезической задачи. Для проведения мобильного лазерного сканирования использована система АГМ-МС1, основные характеристики которой приведены в таблице 1.

Таблица 1/ Table 1

**Система лазерного сканирования АГМ-МС1. Основные характеристики /
Laser scanning system AGM-MS1. Main characteristics**

Характеристика / Characteristic	Значение / Value	Единица измерения / Measuring unit
Частота сканирования / Scanning frequency	600	кГц / kHz
Максимальная дальность измерения / Maximum measuring range	200	м / m
Угол поля зрения / Field of view	360	°
Частота вращения сканирующего зеркала / Rotation frequency	20	Гц / Hz
Точность определения дальности / Range accuracy	3	см / cm
Точность определения координат / Position accuracy	до 5	см / cm
Температура использования / Usage temperature	-10...+50	°C

На первом этапе полевых работ проведена рекогносцировка для оценки возможности общей проходимости маршрута и проложения траекторий без препятствий для сигнала ГНСС. Траектория обрабатывалась как в прямом, так и в обратном направлениях. Следующий этап представлен комбинированным решением траектории – реализацией последовательности точек с рассчитанными координатами и углами ориентации, полученными после обработки данных инерциального блока. Дискретность траектории определяется частотой записи инерциальной навигационной системы (для АГМ-МС1 – 500 Гц). Расчет траектории выполнен в ПО AGM PosWorks Web. Финальный этап комплекса действий с сырыми данными лазерного сканирования – получение облака точек лазерных отражений с координатами. В программно-аппаратном комплексе АГМ-МС1 эту задачу выполняет ПО AGM ScanWorks [Лагута, Погорелов, 2023]. Установленная система координат – UTMN37, система высот – Балтийская 1977 г. (БС). Длина участка – 458 м, средняя плотность облака ТЛО – более 1500 м⁻¹.

Активный клиф формирующихся берегов Краснодарского водохранилища на исследуемом участке изобилует формами рельефа с отрицательным уклоном (рис. 2, рис. 5б), что создает очевидные препятствия для применения классического итерационного метода классификации точек истинной поверхности («земля»). Физически наличие отрицательного уклона означает наличие у модели поверхности более одной отметки высот в точке с одними плановыми координатами. Сущность предлагаемого метода заключается в итерационном включении в исходную TIN-модель, построенную по минимальным отметкам в пределах пользовательской ячейки регулярной сетки, новых точек по настраиваемым параметрам (итерационные угол и дистанция) [Axelsson, 2000]. Метод обеспечивает корректный результат классификации ТЛО, полученных от поверхностей, для которых применимо следующее правило: нормаль к поверхности имеет с ней одну и только одну точку пересечения. В целях выполнения обозначенного условия перед локальной дополнительной классификацией точек «земли» в пределах участков поверхностей с отри-

цательным уклоном применена пространственная трансформация, заключающаяся в повороте массива ТЛО вокруг длинной горизонтальной оси каждого участка на необходимую величину с последующим возвратом в систему координат UTMN37. Результатом этапа классификации стало облако ТЛО класса «земля», ограниченное сверху бровкой клифа и снизу – его подошвой (рис. 3, рис. 4в). На рисунке 3, представлен репрезентативный для всего участка исследования пример поперечного сечения шириной 0,2 м, образованного плоскостью, перпендикулярной линии бровки. Классификация осуществлена в ПО TerraSolid.



Рис. 2. Типичные для исследуемого участка клифы абразионных обвально-просадочных берегов на фото (а) и виде точек лазерных отражений (б). Дата съемки – 09.09.2023 /

Fig. 2. Cliffs of abrasive landslide-subsidence banks typical for the study area in the photo (a) and the view of point clouds (b). Date of shooting and surveying – 09.09.2023

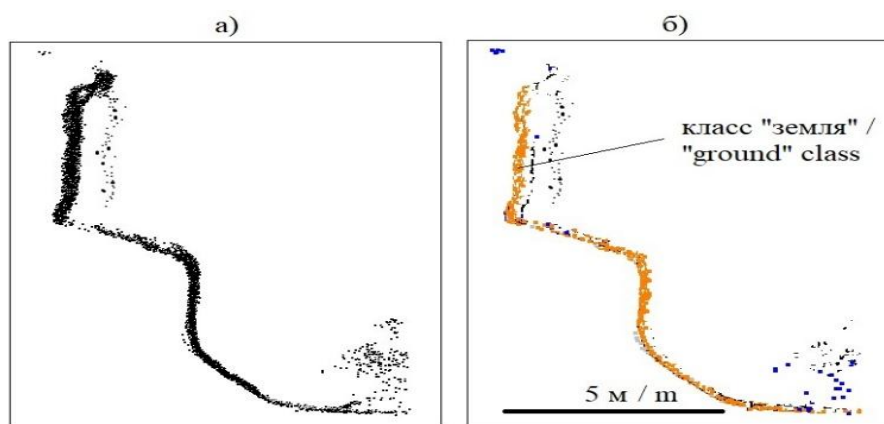


Рис. 3. Поперечный профиль берегового откоса по неклассифицированному (а) и классифицированному (б) облаку ТЛО. Глубина (ширина сечения) профиля – 0,2 м. Вертикальный масштаб равен горизонтальному /

Fig. 3. Transverse profile of the coastal slope for unclassified (a) and classified (b) point clouds. The depth (section width) of the profile is 0.2 m. The vertical scale is equal to the horizontal scale

Дальнейшие этапы работы – создание цифровой модели рельефа и пространственный анализ – требуют исключения из набора данных форм рельефа с отрицательным уклоном по тем же причинам, что и при классификации ТЛО, а именно, наличие в точке с одними координатами двух и более отметок высот. Для решения задачи выполнено преобразование массива ТЛО класса «земля» из исходной системы координат в новую с использованием ПО ArcGIS Desktop. Порядок и описание преобразования приведены ниже.

Векторизация бровки активного клифа. Этап заключается в оцифровке бровки откоса – границы между поверхностью II надпойменной террасы и поверхностью клифа. Оцифровка может быть выполнена как вручную (для относительно небольших по длине участков), так и автоматически: посредством расчета горизонтальной (тангенциальной) кривизны (k_h) – морфометрической величины, построенной по цифровой модели рельефа. В геоморфологическом отношении на моделях горизонтальной кривизны выделяются отроги хребтов ($k_h > 0$) и долин ($k_h < 0$) [Florinsky, 2016], что позволяет представить линию бровки как последовательность точек, соединяющих локальные максимумы k_h .

Создание пикетажной привязки вдоль бровки, выполненное после ее векторизации, служит для определения пространственного положения элементов, расположенных вдоль линейного объекта. Пикетаж представлен восстановленными через равное расстояние (0,05 м) вдоль бровки точками с атрибутом, содержащим расстояние от начала участка.

Создание растровой модели расстояний вдоль бровки. Для решения задачи интерполяции между равноудаленными точками выбран кригинг – геостатистический метод, основанный на статистических моделях, включающих автокорреляцию, и предполагающий, что расстояния между точками отражают пространственную корреляцию [Oliver, Webster, 1990; Калинин и др., 2017]. Методом ординарного кригинга со сферической моделью эмпирической вариограммы построена модель расстояний вдоль бровки с пространственным разрешением равным 0,05 м (рис. 4а).

Следующий этап преобразования – *создание растровой модели расстояний от бровки* – выполняет задачу определения для каждой из точек класса «земля» горизонтального расстояния до соответствующей отметки пикетажа. С помощью инструмента «Euclidean distance» ПО ArcGIS построена растровая модель расстояний от бровки с пространственным разрешением 0,05 м (рис. 4б).

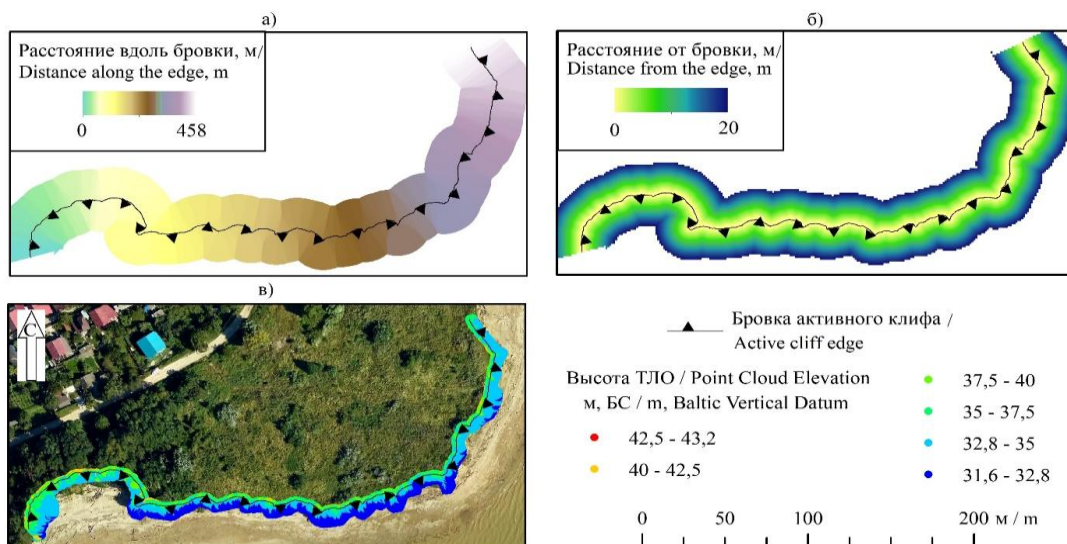


Рис. 4. Растровые модели расстояний вдоль (а) и от (б) бровки активного клифа исследуемого участка. Облако ТЛО класса «земля» активного клифа от бровки до подножия (в) /

Fig. 4. Raster models of distances along (a) and from (b) the edge of the active cliff of the study site. Point cloud of “ground” class of the active cliff from the edge to the base (c)

После построения растровых моделей расстояний необходимо массив ТЛО класса «земля» дополнить атрибутами «расстояние вдоль бровки» и «расстояние от бровки». Задача решена с помощью инструмента «Extract Values to Points» в ПО ArcGIS.

Заключительный этап преобразования – представление ТЛО в системе координат с параметрами, указанными в таблице 2. Это позволяет трансформировать полученную пикетажную привязку ТЛО в координату X и повернуть массив точек вокруг оси абсцисс на минус 90°, тем самым, исключив из ЦМР поверхности с отрицательным уклоном.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры системы координат, созданной для исключения
отрицательных уклонов /
Parameters of the coordinate system created to exclude negative slopes**

Ось / Axis	Семантика / Semantics	Единица измерения / Measuring unis
X	Расстояние вдоль бровки / Distance along the edge	м погонные / linear m
Y	Исходная высотная отметка (Z_{UTMN37})	м, БС / m, Baltic Vertical Datum
Z	Расстояние от бровки / Distance from the edge	м / m

После трансформации системы координат построена цифровая модель рельефа методом «Nearest Neighbor» с разрешением 0,05 м. Выделение волноприбойных ниш осуществлено на основе индекса превышения (TPI – Topographic Positions Index) [Weiss, 2006; Jenness, 2006]. Индекс широко используется как индикатор положительных и отрицательных форм рельефа в топографии [Черниковский, 2017] и батиметрии [Wilson et al., 2007; Rogorelov et al., 2023]. Для отдельной ячейки TPI определяется как разность между высотой данной ячейки и средним значением высот окружающих ячеек. Размер плавающего окна, ограничивающего используемые для вычисления среднего значения ячейки при вычислении индекса, принят равным 2 м. Расчет уклонов произведен с учетом предшествующего преобразования системы координат и экспозиции формы рельефа.

Результаты работы и обсуждение

В результате моделирования выбранного участка активного клифа правого берега Краснодарского водохранилища определены форма, размеры и пространственное положение волноприбойных ниш. Всего в пределах участка выделено 14 отдельных волноприбойных ниш при общей длине 394,72 м. Такая форма присутствует на 86% общей длины исследуемого участка. Статистические показатели пространственных характеристик выделенных форм рельефа приведены в таблице 3. На рисунке 5 представлен результат моделирования рельефа фрагмента стенки активного клифа.

Таблица 3 / Table 3

**Статистические показатели глубины и высотного положения
волноприбойных ниш /
Statistical indicators of the depth and altitude position of wave-cut notches**

Величина / Value	Глубина ниши (TPI) / Notch depth (TPI)	Длина ниши (3D) / Notch length (3D)	Высотная отметка самой глубокой точки ниши / Elevation of the deepest point of the notch	Единица измерения / Measuring unit
Максимальная / Maximum	1,79	84,16	37,82	м / m
Минимальная / Minimum	0,01	3,01	33,89	
Средняя / Average	0,51	28,82	35,64	
Медиана / Median	0,48	21,18	35,71	
Общая / Total	-	403,72	-	
Стандартное отклонение / Standard deviation	0,23	-	0,80	-

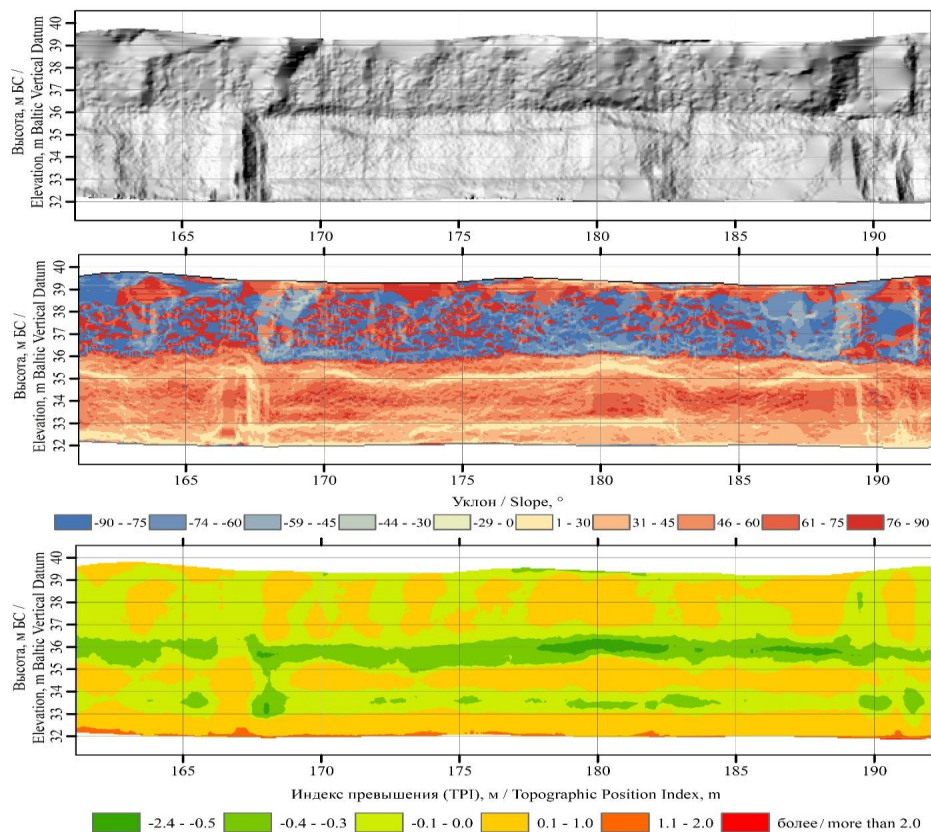


Рис. 5. Моделирование отвесной поверхности активного клифа с использованием светотеневой отмывки (а), уклонов поверхности (б) и индекса TPI (в). По горизонтальной оси – расстояние от начала участка в погонных метрах /

Fig. 5. Modeling the vertical surface of an active cliff using a hillshade (a), model of surface slopes (b) and topographic position index (TPI) (c). On the horizontal axis – the distance from the beginning of the section in linear meters

Получена модель уклонов поверхности откоса (рис. 5б). Средняя величина уклона откоса на участке составляет $57,97^\circ$; средняя положительная равна $52,12^\circ$, средняя отрицательная – $72,58^\circ$. Площадь трехмерных поверхностей с отрицательным уклоном составляет 40% от общей площади поверхности клифа.

Обращает на себя внимание значительная вариабельность высотного положения волноприбойных ниш на откосе (от 33,89 до 37,82 м при средней отметке 35,64 м БС). Наивысший уровень воды в водохранилище в период половодья 2022 г. составлял 34,08 м, в 2023 г. – не превышал 33,50 м (<http://www.kbvufgu.ru/>). Согласно [Правила ..., 2008] максимальная расчетная высота волны на водохранилище при длине разгона 29 км и расчетной скорости восточного ветра 2% обеспеченности, равной 38,2 м/с, составляет 3,0 м, а наибольшая зарегистрированная по состоянию на 2007 г. высота волны равна 1,95 м. За период наблюдений над волнением скоростей ветра более 20 м/с не отмечено. Об измерениях интенсивности волнения после 2007 г. не известно. Принимая во внимание двукратное сокращение в результате трансформации водоема возможной величины разгона, следует считать достижение проектной высоты волнения 2% обеспеченности крайне маловероятным. При повторении максимальной зарегистрированной высоты волнения наивысшую отметку воздействия прибоя следует ожидать близкой к 36,03 м, что приближается к средней отметке дна волноприбойных ниш на исследуемом участке, однако значительно ниже максимальных отметок. Высотное положение волноприбойных ниш требует отдельного исследования с учетом всех факторов, влияющих на силу волнового воздействия на участке. Локальные вертикальные смещения самых глубоких частей волноприбойных ниш могут быть вызваны локальными процессами (гравитационными, эрозионными), действующими одновременно с абразией.

Известно, что наиболее опасные с точки зрения нарушения прочностных характеристик грунта напряжения расположены над нишей в плоскости ее самой глубокой точки [Гаврюхова, 1998]. Общий объем массы грунта, заключенный над волноприбойной нишей между поверхностью откоса и вертикальной плоскостью, проходящей через самую глубокую точку ниши, в пределах участка работ, составляет $743,88 \text{ м}^3$ – это минимальный объем подлежащего разрушению массива в «сухом» состоянии без волнового воздействия.

По всему откосу в структуре обнажения наблюдаются вертикальные столбчатые отдельности (блоки) (рис. 2а, 5а, 5в). Согласно [Назаров, Гаврюхова, 2005] наличие таких форм является следствием лессовидности слагающих откос суглинков, резко ослабляющих противозрозийную устойчивость берега.

Выводы

1. Разработана методика цифрового моделирования поверхности активного клифа с отрицательными уклонами на основе данных мобильного лазерного сканирования.
2. Показана применимость разработанной методики к задаче выделения в отвесном абразионном обрыве волноприбойных ниш и расчета их геометрии.
3. В пределах исследуемого участка берега Краснодарского водохранилища выделено 14 волноприбойных ниш при общей длине 394,72 м. Волноприбойная ниша как форма рельефа присутствует на 86% общей длины участка. Средняя глубина ниш – 0,51 м, максимальная – 1,79 м; средняя длина ниш – 28,82 м, максимальная –

ная – 84,16 м. Глубины ниш определяют наиболее ожидаемое положение плоскости отрыва (средних и максимальных линейных смещений бровки клифа) вне зависимости от уровня воды и наличия волнового воздействия.

4. Средняя абсолютная величина уклона поверхности по участку составляет 57,97°; средний положительный уклон – 52,12°, средний отрицательный уклон – 72,58°. Площадь «нависающих» поверхностей составляет 40,05% от общей площади поверхности абразионного обрыва. Высотное положение волноприбойных ниш на тестовом участке обнаруживает значительную вариабельность: от 33,89 до 37,82 м при средней отметке – 35,64 м БС.

5. Полученные модели позволяют рассчитать объем пород, подверженных вероятному обрушению в процессе абразии. Недолговечность клифообразных форм рельефа, сложенных дисперсными грунтами, очевидна. Оперативность получения данных лидарной съемки открывает возможность организации мониторинга переработки берегов водохранилища и накопления базы данных разновременных ЦМР с последующим анализом взаимосвязей темпов переработки, количества и морфологии волноприбойных ниш с гидрологическим режимом водоема, интенсивностью волнения и рельефом береговой полосы.

Совокупность полученных результатов свидетельствует о продолжающемся активном формировании берегов в пределах исследуемого участка берега Краснодарского водохранилища и разрушении прибрежной части II надпойменной террасы долины р. Кубани.

Литература

1. Антоненко М.В., Зименко Д.Н., Погорелов А.В. Применение данных воздушного лазерного сканирования при проведении инженерных изысканий. // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 6–11.
2. Гаврюхова Л.Н. Механизм разрушения лессовых берегов водохранилища (на примере Краснодарского водохранилища): автореф. дис. ... канд. географ. наук: 11.00.07 / Гаврюхова Лариса Николаевна. – СПб.: КубГАУ, 1998. – 22 с.
3. Долотов Ю.С. Динамические обстановки прибрежно-морского рельефообразования и осадконакопления. М.: Наука, 1989. – 296 с.
4. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. СПб: Наука, 2001. – 416 с.
5. Калинин В.Г., Суманеева К.И., Русаков В.С. Анализ методов интерполяции пространственного распределения метеорологических характеристик при расчетах весеннего снеготаяния. // Географический вестник. – 2017. – Т. 41. № 2. – С. 126–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-126-137.
6. Лагута А.А., Погорелов А.В. Исследование динамики берегов Краснодарского водохранилища методом лидарной съемки. // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». М.: ИИЕТ РАН, 2023. – С. 539–546. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.93.99.071.
7. Назаров Н.Н., Гаврюхова Л.Н. Морфология и морфодинамика суглинистых берегов водохранилищ. Эрозионные и русловые процессы. / Под редакцией Р.С. Чалова. Вып. 4. М.: МГУ, 2005. – С. 130–141.
8. Погорелов А.В., Бойко Е.С., Вертлиб Э.М. Использование технологий лидарной съемки для создания высокоточной 3D модели города: опыт моделирования города Краснодара, Россия. // Известия Ошского технологического университета. – 2023а. – № 2-1. – С. 70–76.
9. Погорелов А.В., Вертлиб Э.М., Бойко Е.С. 3D-модель древесных насаждений города по данным лидарной съемки. Разработка и анализ. // Сборник материалов VI Кавказского

Международного экологического форума «Комплексное изучение экосистем горных территорий»/ Грозный: ЧГУ, 2023б. – С. 290–297. DOI: 10.36684/102-1-2023-290-297.

10. Правила использования водных ресурсов Краснодарского водохранилища. Краснодар: ПИИ «Кубаньводпроект», 2008. – 158 с.

11. Хабидов А.Ш., Кусковский В.С., Жиндарев Л.А., Хейнс Д.М. и др. Берега морей и внутренних водоемов: Актуальные проблемы геологии, геоморфологии и динамики. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1999. – 272 с.

12. 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.

13. 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. – pp. 110–117.

14. Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Academic Press, 2016. – 486 p.

15. Jenness J. Topographic Position Index (TPI). – 2006. – Vol. 1.2. – 42 p.

16. Oliver M.A., Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. // International Journal of Geographical Information Systems. – 1990. – Vol. 4. Issue 3. – pp. 313–332. DOI: 10.1080/02693799008941549.

17. Ossowski R., Przyborski M., Tysiac P. Stability assessment of coastal cliffs incorporating laser scanning technology and a numerical analysis. // Remote Sensing. – 2019. Vol. 11. Issue 16. Art. No. 1951. DOI: 10.3390/rs11161951.

18. Ossowski R., Tysiac P. A new approach of coastal cliff monitoring using mobile laser scanning. // Polish Maritime Research. – 2018. – Vol. 25. Issue 2. – pp. 140–147. DOI: 10.2478/pomr-2018-0065.

19. Pettijohn F.J. Sedimentary rocks. New York: Harper & Row, 1957. – 718 p.

20. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Ntrebin P.B., Lipilin D.A. Analysis of the bottom topography of the reservoir due to sediment trapping (according to the Krasnodar Reservoir, Russia). // Geography, Environment, Sustainability. – 2023. – Vol. 16. No. 3. – pp. 102–112. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-290.

21. Reineck H.E., Singh I.B. Depositional sedimentary environments with reference to terrigenous clastics. Berlin; Heidelberg; New-York: Springer-Verlag, 1957. – 428 p.

22. Weiss A.D. Topographic Positions and Landforms Analysis (Conference Poster). 21st Annual ESRI. International User Conference. San Diego, CA, July 9-13, 2001.

23. 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. – Issue 30. – pp. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.

References

1. Antonenko M.V., Zimenko D.N., Pogorelov A.V. Application data of airborne laser scanning during engineering surveys. Oil industry. 2014. No. 11. pp. 6–11. (In Russ.)

2. Gavryukhova L.N. The mechanism of destruction of loess banks of a reservoir (case study of the Krasnodar Reservoir). The abstract of the dissertation of cand. geograph. science. 11.00.07. Saint Petersburg. KubSAU. 1998. 22 p. (In Russ.)

3. Dolotov Yu.S. Dynamic settings of coastal-marine relief formation and sedimentation. Moscow. Nauka. 1989. 296 p. (In Russ.)

4. Ivanov I.P., Trzhtsinsky Yu. B. Engineering geodynamics. Saint Petersburg. Nauka. 2001. 416 p. (In Russ.)

5. Kalinin V.G., Sumaneeva K.I., Rusakov V.S. Interpolation of meteorological characteristics spatial distribution for spring snowmelt: analysis of methods. Geographical bulletin. 2017. Vol. 41. No. 2. pp. 126–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-2-126-137. (In Russ.)

6. Laguta A.A., Pogorelov A.V. Study of the dynamics of the banks of the Krasnodar reservoir using the LiDAR survey method. In: Proceedings of the XIII All-Russian scientific and technical conference with international participation “Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus”. Moscow. IIET RAS. 2023. pp. 539–546. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.93.99.071. (In Russ.)

7. Nazarov N.N., Gavryukhova L.N. Morphology and morphodynamics of loamy banks of reservoirs. Erosion and channel processes. Ed. R.S. Chalov. Issue 4. Moscow. MSU. 2005. pp. 130–141. (In Russ.)

8. Pogorelov A.V., Boyko E.S., Vertlib E.M. Using LiDAR surveying technologies to create a high-precision 3D model of the city: experience in modeling the city of Krasnodar, Russia. In: Proceedings of the Osh Technological University. 2023. Nos. 2-1. pp. 70–76. (In Russ.)

9. Pogorelov A.V., Vertlib E.M., Boyko E.S. 3D model of city tree plantations based on LiDAR survey data. Development and analysis. In: Proceedings of VI Caucasian International Environmental Forum “Comprehensive study of ecosystems in mountain areas”. Grozny. CSU. 2023. pp. 290–297. DOI: 10.36684/102-1-2023-290-297. (In Russ.)

10. Rules for the use of water resources of the Krasnodar Reservoir. Krasnodar. “Kubanvodproekt”. 2008. 158 p. (In Russ.)

11. Khabidov A.Sh., Kuskovsky V.S., Zhindarev L. A., Haynes D.M. et al. Coasts of seas and inland reservoirs: Current problems of geology, geomorphology and dynamics. Novosibirsk. Publishing House SB RAS. 1999. 272 p. (In Russ.)

12. Chernikhovskiy D.M. Assessment of the relationships between morphometric characteristics of relief with quantitative and qualitative characteristics of forests using ASTER and SRTM digital terrain models. Siberian Journal of Forest Science. 2017. No. 3. pp. 28–39. DOI: 10.15372/SJFS20170303. (In Russ.)

13. 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. pp. 110–117.

14. Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. Amsterdam: Academic Press. 2016. 486 p.

15. Jenness J. Topographic Position Index (TPI). 2006. Vol. 1.2. 42 p.

16. Oliver M.A., Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems. 1990. Vol. 4. Issue 3. pp. 313–332. DOI: 10.1080/02693799008941549.

17. Ossowski R., Przyborski M., Tysiac P. Stability assessment of coastal cliffs incorporating laser scanning technology and a numerical analysis. Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Issue 16. Art. No. 1951. DOI: 10.3390/rs11161951.

18. Ossowski R., Tysiac P. A new approach of coastal cliff monitoring using mobile laser scanning. Polish Maritime Research. 2018. Vol. 25. Issue 2. pp. 140–147. DOI: 10.2478/pomr-2018-0065.

19. Pettijohn F.J. Sedimentary rocks. New York: Harper & Row. 1957. 718 p.

20. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Netrobin P.B., Lipilin D.A. Analysis of the bottom topography of the reservoir due to sediment trapping (according to the Krasnodar Reservoir, Russia). Geography, Environment, Sustainability. 2023. Vol. 16. No. 3. pp. 102–112. DOI: 10.24057/2071-9388-2023-290.

21. Reineck H.E., Singh I.B. Depositional sedimentary environments with reference to terrigenous clastics. Berlin; Heidelberg; New-York: Springer-Verlag. 1957. 428 p.

22. Weiss A.D. Topographic Positions and Landforms Analysis (Conference Poster). 21st Annual ESRI. International User Conference. San Diego, CA, July 9-13, 2001.

23. 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. Issue 30. pp. 3–35. DOI: 10.1080/01490410701295962.