

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.43

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-4-271-290

Применение лидарной съемки для создания высокоточной 3D-модели низконапорной земляной плотины при выполнении диагностики технического состояния инженерной защиты Нижней Кубани

Михаил Александрович Бандурин¹, Анна Сергеевна Романова²,
Ян Александрович Полторак³, Данил Викторович Муха⁴

^{1, 2, 3, 4}Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
Краснодар, Российская Федерация

¹cherura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0986-8848>

²any30082002@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9035-917X>

³yanpoltorak@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4335-7906>

⁴danilmyxa2018@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-1458-2361>

Аннотация. Цель: проведение дистанционного зондирования низконапорной земляной плотины с помощью лидарной съемки, на основании полученных данных создание ее высокоточной 3D-модели для выполнения диагностики технического состояния инженерной защиты Нижней Кубани. **Материалы и методы.** Материалами исследования послужили данные лидарной съемки, которая осуществляется путем излучения лазерных импульсов и фиксации момента их возвращения. В настоящей работе описано и рассмотрено применение лидарной съемки для построения точной топографической модели низконапорной земляной плотины инженерной защиты Нижней Кубани. Для анализа технической инженерной защиты р. Кубань применялось мобильное лазерное сканирование в 2023 и 2025 гг., общая протяженность тестовых участков составила 15,7 км с разными типами морфолитогенеза, по материалам выполненной лидарной съемки построены профили и цифровые модели низконапорной земляной плотины. **Результаты.** За период наблюдений осадка гребня на проблемных участках составила более 25 мм в первом измерении и более 40 мм во втором измерении. Установлено линейное смещение гребня плотины за 2023–2025 гг. по данным 27 измерений. По данным многолетних измерений полученная цифровая модель наглядно отображает мельчайшие изменения рельефа и позволяет обнаружить скрытые деформации и трещинообразования, не видимые при обычном подходе. Представлен подробный обзор метода, этапы подготовки и обработки полученных данных, а также примеры практического применения в целях мониторинга и оценки состояния плотины. **Выводы.** Полученные модели позволяют проводить комплексный анализ морфометрического состояния плотин, установлены размеры площади образования оползней от 1,55 до 12,45 м², а динамика развития составила от 1,55 м² в первом измерении и до 2,24 м² уже при втором измерении. Была выполнена визуализация опасных сочетаний гидродинамических нагрузок при различных расходах сбрасываемых вод при расходах 620 и 850 м³/с.

Ключевые слова: диагностика, инженерная защита, лидарная съемка, 3D-модель, низконапорная земляная плотина, прочность, надежность, Нижняя Кубань

Источник финансирования: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Кубанского научного фонда № 24-26-20003.

Для цитирования: Применение лидарной съемки для создания высокоточной

3D-модели низконапорной земляной плотины при выполнении диагностики технического состояния инженерной защиты Нижней Кубани / М. А. Бандурин, А. С. Романова, Я. А. Полторак, Д. В. Муха // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 4. С. 271–290. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-4-271-290>.

HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

The use of lidar survey for creating a high-precision 3D-model of a low-head earth dam when performing the technical state diagnostics of the engineering protection of the Lower Kuban

**Mikhail A. Bandurin¹, Anna S. Romanova², Yan A. Poltorak³,
Danil V. Mukha⁴**

^{1, 2, 3, 4}Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

¹chepura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0986-8848>

²any30082002@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9035-917X>

³yanpoltorak@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4335-7906>

⁴danilmyxa2018@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-1458-2361>

Abstract. Purpose: to conduct remote sensing of a low-head earth dam using LIDAR survey, and to create a high-precision 3D-model based on the obtained data for diagnostics of the technical state of the engineering protection of the Lower Kuban. **Materials and methods.** The study was based on lidar survey data, which is carried out by emitting laser pulses and recording the moment of their return. The use of lidar survey for constructing an accurate topographic model of a low-head earth dam for the engineering protection of the Lower Kuban is described and discussed. To analyze the technical engineering protection of the Kuban River, mobile laser scanning was used in 2023 and 2025, the total length of the test sections was 15.7 km with different types of morpholithogenesis, profiles and digital models of the low-head earth dam were constructed on the lidar survey data basis. **Results.** During the observation period, crest settlement in problematic areas amounted to more than 25 mm in the first measurement and more than 40 mm in the second measurement. A linear displacement of the dam crest was determined for 2023–2025 based on 27 measurements. Based on long-term measurements, the resulting digital model clearly displays the smallest changes in the relief and allows for the detection of hidden deformations and cracks that are not visible with a conventional approach. A detailed overview of the method, the stages of preparation and processing the obtained data, and examples of practical application for the purposes of monitoring and assessing the state of the dam are presented. **Conclusions.** The resulting models enable a comprehensive analysis of the morphometric state of dams. The sizes of landslide formation areas were determined from 1.55 to 12.45 m², and the development dynamics ranged from 1.55 m² in the first measurement to 2.24 m² in the second measurement. A visualization of hazardous combinations of hydrodynamic loads was performed at various discharge rates of 620 and 850 m³/s.

Keywords: diagnostics, engineering protection, lidar survey, 3D-model, low-head earth dam, strength, reliability, the Lower Kuban

Funding source: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation No. 24-26-20003.

For citation: Bandurin M. A., Romanova A. S., Poltorak Ya. A., Mukha D. V. The use of lidar survey for creating a high-precision 3D-model of a low-head earth dam when per-

forming the technical state diag. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(4): 271–290. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-4-271-290>.

Введение. Диагностика технического состояния таких гидротехнических сооружений, как низконапорные земляные плотины, является важным этапом для обеспечения безопасности эксплуатации и предупреждения аварийных ситуаций. Диагностика технического состояния низконапорных земляных плотин направлена на предупреждение аварийных ситуаций путем раннего обнаружения отклонений от норм проектирования и последующего планирования ремонтных мероприятий [1].

Диагностика выполняется методами геодезических измерений, визуально-инструментальным контролем и оценкой физического износа материала. Тем не менее традиционные подходы ограничиваются двумя измерительными плоскостями (например, планами и профилями), что затрудняет получение полной картины деформации и положения плотины в пространстве [2, 3]. Новые возможности открывает технология лидарной съемки, которая позволяет создавать точные трехмерные модели сооружений и получать подробную картину рельефа местности и состояния плотины¹.

Лидарная съемка основана на использовании лазеров для точного измерения расстояний и отражения световых импульсов обратно к датчику [4, 5]. Получаемые данные используются для создания облака точек, представляющего точную цифровую копию реального объекта. Эта технология благодаря своей точности и универсальности широко применяется в таких разных отраслях, как картография, градостроительство, лесничество и археология. Метод дает возможность выявить малейшие отклонения от исходного проекта, определить места возможного возникновения оползней и оценить фактическое положение плотины относительно первоначальной модели [6].

¹Ольгаренко В. И., Ольгаренко Г. В., Рыбкин В. Н. Эксплуатация и мониторинг мелиоративных систем: учеб. пособие. Коломна, 2006. 391 с. ISBN 5-91040-002-9. EDN: SFVMAX.

Цель исследований – проведение дистанционного зондирования низконапорной земляной плотины с помощью лидарной съемки, на основании полученных данных создание ее высокоточной 3D-модели для выполнения диагностики технического состояния инженерной защиты Нижней Кубани. Совершенствование методов диагностики технического состояния инженерной защиты Нижней Кубани предоставляют возможность создания высокоточных 3D-моделей низконапорных земляных плотин, что позволяет оперативно выявлять деформации и возможные дефекты инженерной защиты.

Материалы и методы. Лидарная съемка осуществляется путем излучения лазерных импульсов и фиксации момента их возвращения обратно к прибору. Расстояние вычисляется на основе времени полета сигнала и скорости света. Полученные данные объединяются в облако точек, каждая точка которого обладает координатами XYZ и дополнительными параметрами: интенсивность отраженного сигнала и углы сканирования. Важными характеристиками лидарных снимков являются разрешение (расстояние между отдельными точками), точность позиционирования и диапазон дальности. Высококачественные приборы обеспечивают сантиметровый уровень точности, что делает метод пригодным для решения широкого спектра задач, включая диагностику гидротехнических сооружений [7, 8].

Преимущества лидарной съемки перед традиционными методами включают: высокую точность и быстроту получения данных; возможность бесконтактного измерения труднодоступных участков; минимальное вмешательство в работу низконапорной земляной плотины; способность детально исследовать поверхность и внутренний состав плотины (при использовании специальных методов сканирования).

Процесс обработки данных состоит из нескольких этапов: преобразование сырых данных (лазерных сигналов) в облака точек; редактирование облака точек (очистка от шума, фильтрация, объединение различных облаков); создание цифровой модели рельефа (DEM) и поверхности плотины (DTM); выделение и классификация деталей (определение границ тел

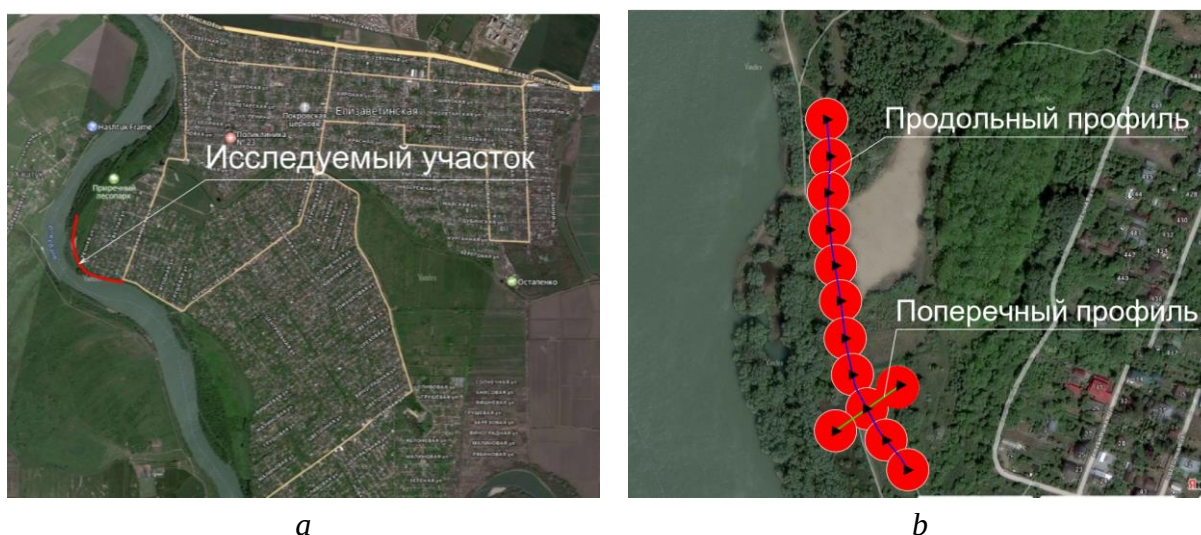
плотины, очертаний сооружений и деформаций); интеграция дополнительной информации (например, фотограмметрических изображений, результатов бурения и анализов образцов грунта) [9].

Рассмотрим применение лидарной съемки для диагностики технического состояния низконапорной земляной плотины инженерной защиты Нижней Кубани. Этапы проведения лидарной съемки [10, 11]: предварительная подготовка, определение зон съемки и выбора наземных позиций для установки стационарных приборов; проверка оборудования и калибровка сенсоров; согласование графика работ с ответственными лицами; сбор данных, запись данных с использованием наземного лидара; контроль соблюдения заданных параметров съемки (точность, покрытие, угол обзора).

Эффективным современным инструментом для анализа геометрии и устойчивости тела низконапорных грунтовых плотин является программный комплекс «Топоматик Robur». Этот комплекс успешно интегрирует результаты полевых измерений и геофизического мониторинга, предоставляя надежные данные для объективной оценки технического состояния гидротехнических сооружений. Алгоритм автоматизированной обработки массива координатных данных обеспечивает устранение погрешностей и шумящих сигналов, а также эффективную классификацию объектов. Благодаря этому достигается высокая точность и детализация формируемой цифровой модели, что крайне важно для оперативного выявления таких малейших изменений рельефа, как микроскопические просадки, сдвиги или поперечные деформации [12, 13].

Результаты и обсуждение. На первом этапе исследования проведена рекогносцировка участка исследования ПК 0+00 – ПК 2+50: участок приямка к естественному склону в районе ст. Елизаветинской. Характеризуется сложными условиями сопряжения насыпного сооружения с коренным берегом. Траектория сигнала регистрации данных спутниковых наблюдений обрабатывалась как в прямом, так и обратном направлениях, что позволяет определить координаты точек лазерных отражений путем

решения прямой геодезической задачи. Пример использования технологии показан на рисунке 1, где на рисунке 1а показан общий вид района ст. Елизаветинской, где на инженерной защите р. Кубань проводились исследования. На рисунке 1b показано место проведения исследования с пикетажной привязкой для определения пространственного положения длительно эксплуатируемых конструктивных элементов низконапорной земляной плотины для построения продольного и поперечного профилей с выделением дефектов и повреждений, а именно: места образования оползней, просадки гребня и потеря устойчивости низового откоса.



a – общий вид исследуемого участка; *b* – пикетажная привязка для построения продольного и поперечного профилей
a – general view of the studied area; *b* – stationing for constructing longitudinal and transverse profiles

Рисунок 1 – Положение исследуемого участка низконапорной земляной плотины инженерной защиты р. Кубань
Figure 1 – Location of the studied area of the low-head earth dam for engineering protection of the Kuban River

На рисунке 2 представлен фрагмент исследуемого участка низконапорной земляной плотины виде точек лазерных отражений. Использовалась система лазерного сканирования АГМ-МС1, где основные характеристики составляли: частота сканирования 600 кГц; максимальная дальность измерения 200 м; угол поля зрения 360°; частота вращения сканирующего зеркала

20 Гц; точность определения дальности 3 см и определения координат 10 см. Расчет траектории выполнен в ПО AGM PosWorks Web. Результатом расчета является высокоточная траектория в формате SBET, которая используется для геопозиционирования точек лазерных отражений и центров фотографирования в требуемой системе координат. Установленная система координат – UTMN37, система высот – Балтийская 1977 г. Длина участка – 15,7 км, средняя плотность облака точек лазерных отражений – более 1500 м⁻¹.

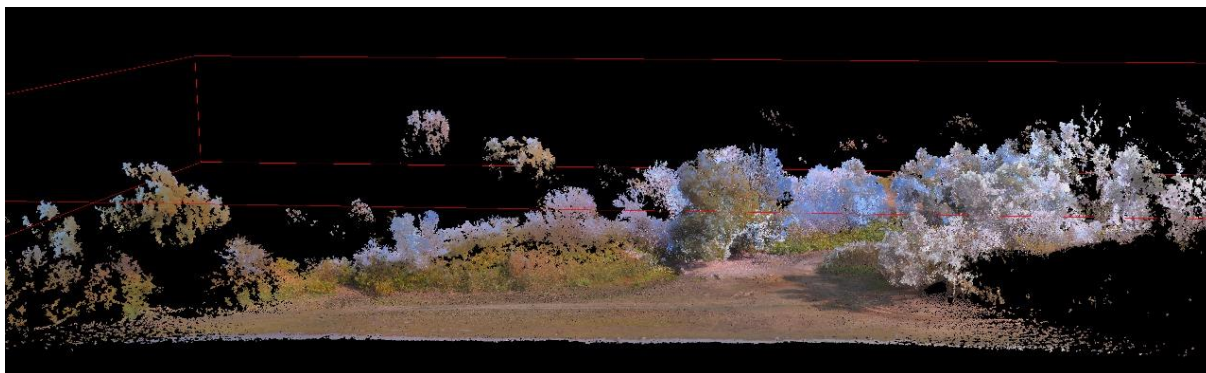


Рисунок 2 – Исследуемый участок низконапорной земляной плотины инженерной защиты р. Кубань в виде точек лазерных отражений
Figure 2 – The studied area of the low-head earth dam for engineering protection of the Kuban River in the form of laser reflection points

Для количественной иллюстрации динамики деформаций в таблице 1 представлены данные лидарной съемки по ключевым пикетам в пределах проблемного участка, показанного на рисунке 3. Абсолютные отметки и величина осадки рассчитаны относительно условного репера.

Таблица 1 – Результаты лидарной съемки вертикальных деформаций гребня плотины на проблемном участке
Table 1 – Results of lidar survey of vertical deformations of the dam crest in the problem area

Пикет	Отметка гребня, м (2023 г.)	Отметка гребня, м (2025 г.)	Величина осадки за период, мм	Примечание
1	2	3	4	5
ПК 0+00	145,25	145,22	3	–
ПК 0+25	145,18	145,13	5	Начало проблемного участка
ПК 0+50	144,95	144,90	50	Зона максимальной осадки (1)

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

1	2	3	4	5
ПК 0+75	144,10	144,05	50	–
ПК 1+00	141,85	141,80	50	Зона максимальной осадки (2)
ПК 1+25	142,20	142,15	5	–
ПК 1+50	142,50	142,48	2	Конец проблемного участка

Полученный продольный профиль, представленный на рисунке 3, наглядно отображает мельчайшие изменения рельефа и позволяет выявить размер просадки гребня, а также его границы. Перепад высот с 15 до 19 м (почти 4 м) по гребню плотины обусловлен совокупным воздействием природных и техногенных факторов, на исследуемом участке имеют место следы неоднократных локальных ремонтов и наращиваний, выполненных в разные периоды эксплуатации, что привело к формированию неоднородной геометрии гребня с участками различной абсолютной отметки.

Представленный на рисунке 4 поперечный профиль низконапорной земляной плотины инженерной защиты р. Кубань построен на основе данных наземной лидарной съемки и отражает современное морфометрическое состояние сооружения с высокой степенью детализации, а именно: количественную характеристику геометрии сооружения, которая используется для оценки его состояния. Цель морфометрических исследований – получить данные, необходимые для эксплуатации или мониторинга состояния объекта исследования, что позволяет провести точную оценку геометрических параметров тела плотины, включая ширину гребня, крутизну и протяженность откосов, а также выявить локальные деформации. Выявлен перепад высот в местах образования. Показано преимущество трехмерного цифрового моделирования перед традиционными геодезическими методами. Оно обеспечивает комплексное пространственное представление о состоянии гидротехнического сооружения в долгосрочной диагностике и прогнозировании его эксплуатационной надежности [14].

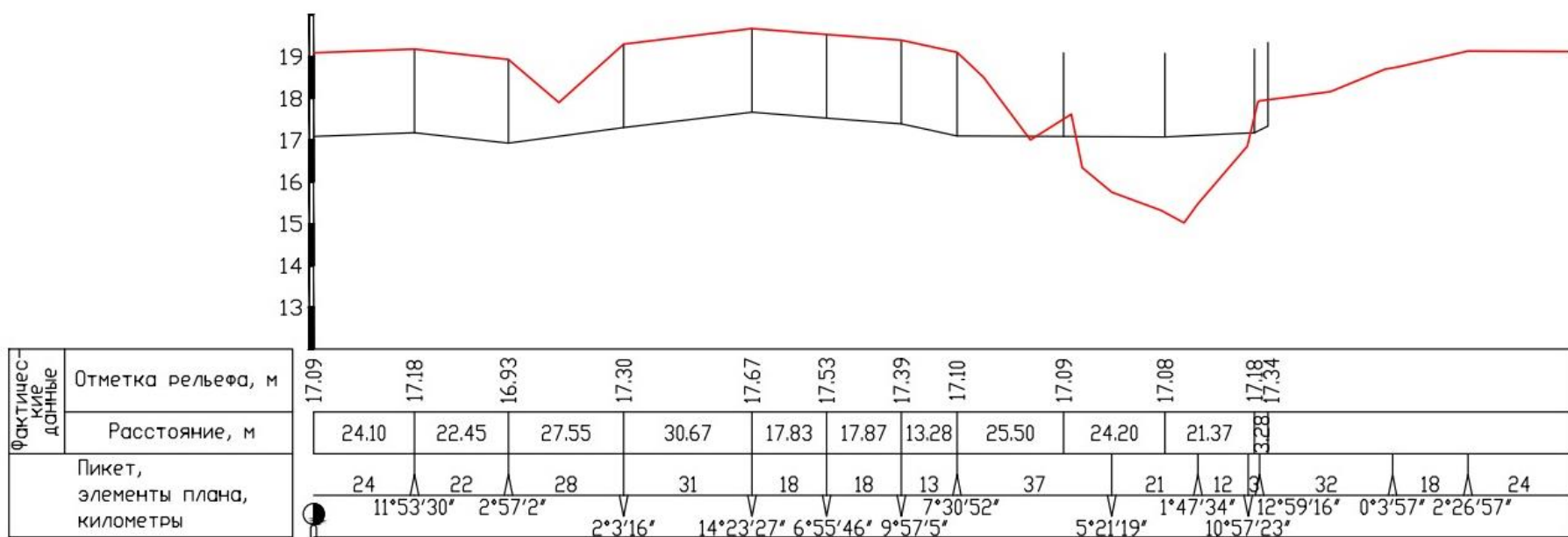


Рисунок 3 – Фрагмент продольного профиля низконапорной земляной плотины инженерной защиты р. Кубань
Figure 3 – Fragment of the longitudinal profile of the low-head earth dam for engineering protection of the Kuban River

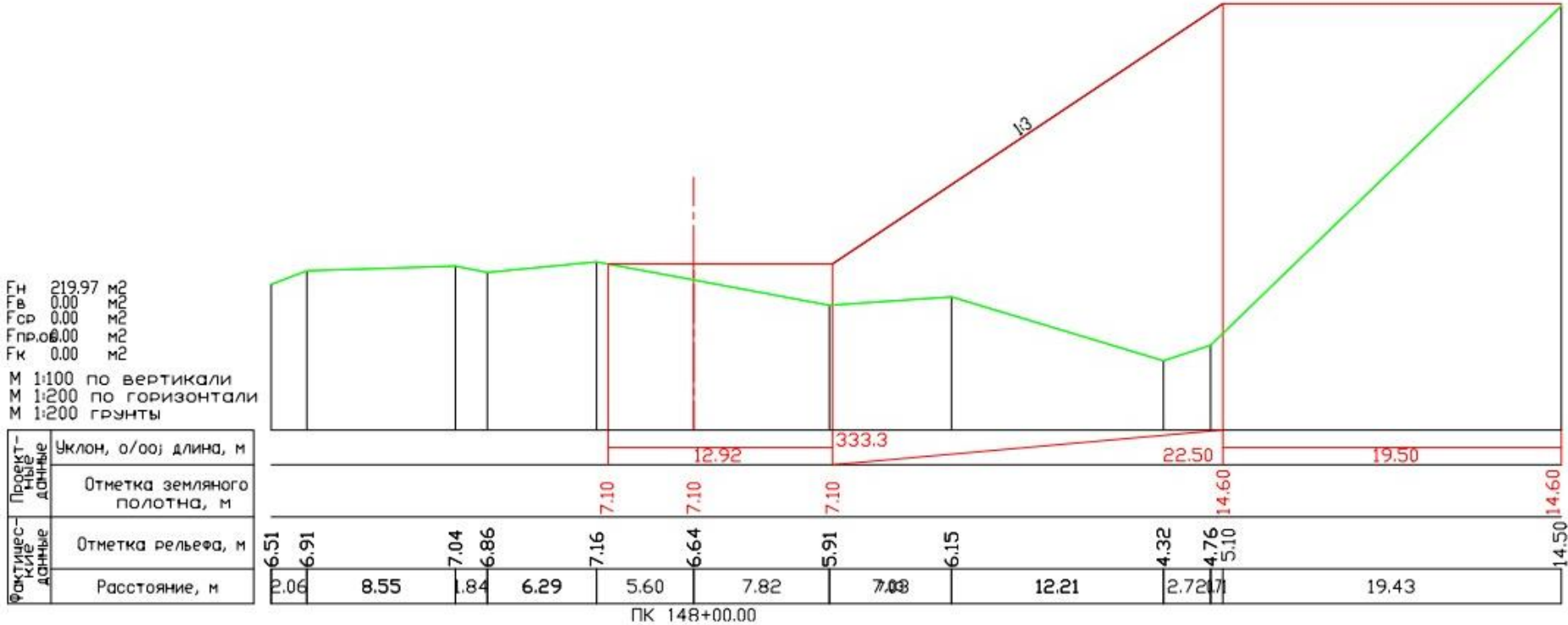


Рисунок 4 – Фрагмент поперечного профиля низконапорной земляной плотины инженерной защиты р. Кубань
Figure 4 – Fragment of the cross-section of the low-head earth dam for engineering protection of the Kuban River

Анализ поперечного профиля (рисунок 4) свидетельствует о наличии асимметрии на боковых откосах, что может быть обусловлено как особенностями инженерно-геологических условий основания, так и неравномерным уплотнением грунтов в процессе строительства. Сооружения первой очереди защищают правобережную (преимущественно) часть поймы Нижней Кубани. Система берет начало в районе ст. Елизаветинской, где осуществляется сопряжение с существующей берегоукрепляющей инфраструктурой, и протягивается вниз по течению на 15,7 км.

На отдельных участках откосов зафиксированы признаки начальных стадий деформационных процессов, проявляющихся в виде микропросадок и локальных изменений угла наклона. Эти аномалии могут указывать на развитие зон разуплотнения грунта или формирование потенциально опасных поверхностей скольжения, что требует дальнейшего геофизического мониторинга [15].

Использование лидарных данных обеспечивает не только высокоточное позиционирование элементов сооружения в трехмерном пространстве, но и возможность сравнения текущего состояния низконапорной земляной плотины с проектной моделью или с результатами предыдущих обследований.

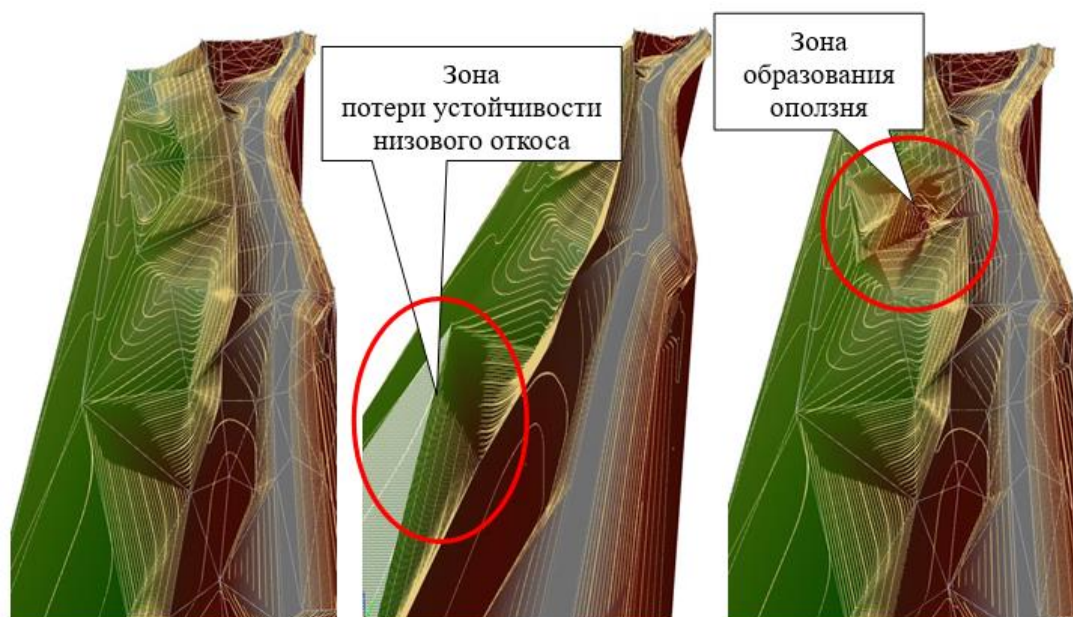
На втором этапе проведения исследований применялся программный комплекс «Топоматик Robur», где результаты полевых измерений, выполненные лидарной съемкой, были обработаны и получены 3D-модели низконапорной грунтовой плотины инженерной защиты Нижней Кубани для моделирования возможного разрушения при катастрофическом паводке на р. Кубань. Фрагменты 3D-модели показаны на рисунке 5.

На рисунке 5а представлено комплексное отражение таких геологических процессов, как суффозионные деформации, которые выступают ключевыми признаками устойчивости низконапорных земляных плотин и требуют тщательного подхода к диагностике и прогнозированию технического состояния инженерной защиты Нижней Кубани. С позиции инже-

нерно-геологических исследований, суффозия принадлежит к категории наиболее частых и опасных деструктивных явлений, возникающих внутри тела плотин и их фундаментов. Они требуют регулярного мониторинга и немедленного проведения профилактических мероприятий для укрепления склонов и борьбы с суффозией. Особенно важна такая работа в условиях глобальных климатических изменений, сопровождающихся учащением экстремальных паводков, повышением антропогенной нагрузки и естественным износом гидротехнических сооружений. Потеря устойчивости низового откоса представляет собой поверхностные смещения слоев грунта под действием собственной тяжести, подобные деформации характерны для наклонных участков плотин. Причины таких нарушений могут включать влияние сезонных паводков, атмосферные осадки, подъем уровня грунтовых вод и нарушение естественных путей дренажа. Они сигнализируют о начальном этапе потери устойчивости низового откоса плотины, и это может привести к появлению трещин, углублению просадок и последующей деформации грунтового основания (рисунок 5b) [16, 17].

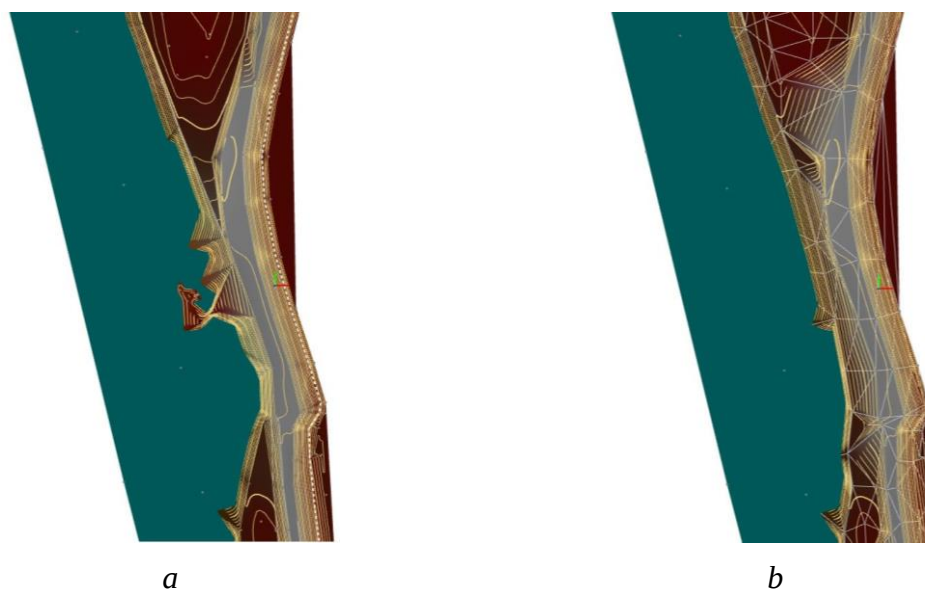
Оползневые процессы на низконапорных земляных плотинах представляют собой сложное явление, связанное с механическими нарушениями устойчивости грунтового массива плотины и ее основания (рисунок 5c). Оползневые процессы возникают тогда, когда силы тяжести начинают преобладать над силами сцепления и внутренним сопротивлением грунтов. Основной причиной может служить повышенное увлажнение грунтов. Переувлажнение грунтов происходит вследствие проникновения влаги внутрь плотины, например, из-за фильтрационных течений, подъема уровня грунтовых вод или атмосферных осадков [18].

На рисунке 6 представлен фрагмент 3D-модели низконапорной грунтовой плотины, полученной на основе данных наземной лидарной съемки. 3D-модель визуализирует опасное сочетание гидродинамических нагрузок при различных расходах сбрасываемых вод: 6a – при расходе 620 м³/с; 6b – при расходе 850 м³/с.



a – без оползня; *b* – зона потери устойчивости низового откоса;
c – зона образования оползня
a – no landslide; *b* – downstream slope stability loss zone;
c – landslide formation zone

Рисунок 5 – Фрагмент 3D-модели низконапорной грунтовой плотины инженерной защиты р. Кубани
Figure 5 – Fragment of a 3D-model of a low-head earth dam for engineering protection of the Kuban River



a – при 620 м³/с; *b* – при 850 м³/с / *a* – at 620 м³/s; *b* – at 850 м³/s

Рисунок 6 – Фрагмент 3D-модели низконапорной грунтовой плотины при имитации водосброса Краснодарского водохранилища в р. Кубань
Figure 6 – Fragment of a 3D-model of a low-head earth dam when simulating the spillway of the Krasnodar reservoir in the Kuban River

Для объективной оценки преимуществ современных методов дистанционного зондирования проведено количественное сопоставление ключевых технологических и экономических параметров традиционной тахеометрической съемки и мобильного лазерного сканирования (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные технико-экономические показатели методов геодезического контроля и лидарной съемки при диагностике земляных плотин

Table 2 – Comparative technical and economic indicators of geodetic control and lidar survey methods in the earth dam diagnosis

Критерий сравнения	Тахеометрическая съемка	Лидарная съемка	Примечание
Временные затраты на полевой этап, чел.-дн.	14–20 (бригада 2 чел. в течение 7–10 раб. дн.)	1–2 (бригада 1–2 чел.)	Сокращение продолжительности полевых работ на порядок (в 7–15 раз) за счет непрерывного сбора данных в движении со скоростью до 2–3 км/ч
Плотность пространственных данных, точек/м ²	< 1 (дискретные пикеты, задаваемые сеткой 2 × 2 м – 5 × 5 м)	> 500 (сплошное облако точек с частотой до 160000 изм./с)	Переход от выборочного к сплошному контролю поверхности, что исключает вероятность пропуска локальных деформаций между пикетами
Капитальные затраты на оборудование, тыс. руб.	1200–2500 (за электронный тахеометр)	6000–12000 (стоимость SLAM-сканера)	Высокие первоначальные инвестиции компенсируются более высокой производительностью
Ориентировочная себестоимость работ на участке 10000 м ² , тыс. руб.	Принята за 100 % (базовый уровень)	65–80 % от стоимости традиционного метода	Снижение себестоимости за счет сокращения затрат в поле, несмотря на амортизацию более дорогостоящего оборудования

Представленная визуализация позволяет провести детальный сравнительный анализ геометрической устойчивости плотины при различных гидрологических сценариях и оценить потенциальные зоны риска. Особенно значимо то, что 3D-модель выявляет не только внешние проявления деформаций, но и пространственные закономерности их развития, недоступные для фиксации традиционными геодезическими методами. Анализ пространственной модели демонстрирует увеличение расхода воды, уси-

ление гидравлического воздействия на откосы сооружения, что проявляется в локальных деформациях поверхности, микропросадках и начальных признаках размыва грунта в зонах концентрации потока. Эти изменения пространственно коррелируют с участками пониженной устойчивости, выявленными ранее в результате геофизического мониторинга.

Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о высокой степени уязвимости низконапорных земляных плотин, составляющих основу инженерной защиты Нижней Кубани, к развитию оползневых процессов, обусловленных как природными, так и техногенными факторами. Установлено линейное смещение гребня плотины за 2023–2025 гг. по данным 27 измерений. Оползни на низконапорных земляных плотинах представляют собой одну из наиболее опасных форм нарушения устойчивости, возникающих вследствие превышения силами тяжести сопротивления грунтового массива, обусловленного сцеплением и внутренним трением, установлены размеры площади образования оползней от 1,55 до 12,45 м², а динамика развития составила от 1,55 м² в первом измерении и до 2,24 м² уже при втором измерении. Ключевыми факторами, инициирующими оползневые процессы, является переувлажнение грунтов, вызванное фильтрацией воды через тело плотины, подъемом уровня грунтовых вод, атмосферными осадками и паводковыми расходами. Установлено, что применение лидарной съемки для диагностики технического состояния низконапорных земляных плотин инженерной защиты Нижней Кубани представляет собой высокоточный и эффективный метод неразрушающего контроля, позволяющий оперативно выявлять пространственные деформации и скрытые дефекты гидротехнических сооружений, а именно: за период наблюдений осадка гребня на проблемных участках составила более 25 мм в первом измерении и более 40 мм во втором измерении. Создание детализированной трехмерной цифровой модели на основе данных наземного лазерного сканирования обеспечивает беспрецедентную степень простран-

ственной точности и метрологической достоверности, что существенно превосходит возможности традиционных геодезических методов, ограниченных одномерными и двухмерными измерениями. Была выполнена визуализация опасных сочетаний гидродинамических нагрузок при различных расходах сбрасываемых вод при расходах 620 и 850 м³/с. Программный комплекс «Топоматик Robur» показал высокую эффективность в автоматизированной обработке массивов координатных данных, обеспечивая очистку от шумов, коррекцию позиционирования и формирование цифровых двойников гидротехнических сооружений, пригодных для инженерного анализа и принятия управленческих решений.

Список источников

1. Бандурин М. А., Романова А. С. Применение методов инженерной геофизики при оценке технического состояния сооружений инженерной защиты Шапсугского водохранилища // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 3. С. 243–260. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-3-243-260. EDN: CАНNFN.
2. Семененко С. Я., Новиков А. Е. Мониторинг технического состояния объектов берегоукрепления Волгоградского водохранилища // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 1. С. 196–215. DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-1-196-215. EDN: ZZWLUF.
3. Актуальные вопросы практических исследований гидротехнических сооружений: монография / А. А. Ткачев [и др.]. Новочеркасск: Лик, 2023. 190 с. ISBN 978-5-907708-14-3. EDN: YWMTJU.
4. Shanshan Xu. Lake detection algorithm in point clouds of the lidar image based on three-dimensional convolutional neural network // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 1. Р. 9–11. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-1-9-11. EDN: FGWLYY.
5. Detection by space-borne and ground-based lidar observations of air pollution on the example of the Hefei area / Ya. Hao, Zh. Fang, X. Deng Y. Cao, Ch. Xie // Zurnal Prikladnoj Spektroskopii. 2021. Vol. 88, no. 6. P. 978(1)–979(11). EDN: KUICNB.
6. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V., Olgarenko V. I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 698, no. 2. Article number: 022060. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060. EDN: ABGPCU.
7. Shaheen L., Rasheed B., Mazzara M. Tree species detection using hyperspectral and Lidar data: A novel self-supervised learning approach // Computer Research and Modeling. 2024. Vol. 16, no. 7. P. 1747–1763. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-7-1747-1763. EDN: LKBGCN.
8. Диагностика мостовых переходов на малых реках и мелиоративных системах с учетом угрозы внезапного паводка на юге России / М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, И. А. Приходько, А. А. Руденко // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 1. С. 200–218. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-200-218. EDN: EURSRG.
9. Абдразаков Ф. К., Дегтярев В. Г., Дегтярев Г. В. Цифровое моделирование и анализ подпорных плотин для аккумуляции осадков // Научная жизнь. 2021. Т. 16, № 8(120). С. 1005–1015. DOI: 10.35679/1991-9476-2021-16-8-1005-1015. EDN: MDELPD.

10. 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. 2023. № 2-1. С. 70–76. EDN: LTIZJU.

11. Лагута А. А. Моделирование отвесной стенки активного клифа по данным лидарной съемки (на примере Краснодарского водохранилища) // Геология и геофизика Юга России. 2024. Т. 14, № 3. С. 230–242. DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t. EDN: JTWBKV.

12. Овчинников М. А., Вершков А. А. Проектирование развязок в программном комплексе «Топоматик Robur» // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 94–98. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.14. EDN: ULNWTT.

13. Analysis of the stress-strain state of travel pipes with the use of hardware and software complex / V. G. Solonenko, N. M. Makhmetova, V. A. Nikolaev, M. Ya. Kvashnin, S. E. Bekzhanova, I. S. Bondar, S. A. Mirzabaev // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2020. Vol. 1, no. 439. P. 181–188. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.22. EDN: PKLUVZ.

14. Цифровые двойники напряжённо-деформированного состояния для автоматизированного мониторинга гидротехнических сооружений / А. Н. Симутин, И. Д. Арсеньев, Е. А. Хотеев, А. В. Дейнеко // Гидротехническое строительство. 2022. № 12. С. 20–31. EDN: RMSPLX.

15. Великин С. А., Снегирев А. М. Локальный геофизический мониторинг состояния правобережного примыкания плотины Виллюйской ГЭС-1 // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2005. № 2(6). С. 77–85. EDN: HRUKUZ.

16. Волосухин В. А., Бондаренко В. Л. Факторы, определяющие безопасность гидротехнических сооружений водохозяйственного назначения // Наука и безопасность. 2014. № 3(12). С. 7–8. EDN: TGLREN.

17. Baev O., Kosichenko Yu., Silchenko V. Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect // Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 111, no. 3. Article No.: 11109. DOI: 10.34910/MCE.111.9. EDN: BBKICT.

18. Амосова Л. Н., Ердаков Е. Е. Инженерная защита урбанизированных территорий от подтопления // Ползуновский альманах. 2017. № 2. С. 46–50. EDN: ZHNQEJ.

References

1. Bandurin M.A., Romanova A.S., 2024. *Primenenye metodov inzhenernoy geofiziki pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya sooruzheniy inzhenernoy zashchity Shapsugskogo vodokhranilishcha* [Application of engineering geophysics methods in assessing the technical condition of engineering protection structures of the Shapsug reservoir], *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 14, no. 3, pp. 243-260, DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-3-243-260, EDN: CAHNFN. (In Russian).

2. Semenenko S.Ya., Novikov A.E., 2025. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya ob'yektov beregoukrepleniya Volgogradskogo vodokhranilishcha* [Monitoring the technical state of bank protection facilities of the Volgograd Reservoir]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 15, no. 1, pp. 196-215, DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-1-196-215, EDN: ZZWLUF. (In Russian).

3. Tkachev A.A. [et al.], 2023. *Aktual'nye voprosy prakticheskikh issledovaniy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: monografiya* [Actual Issues of Practical Research of Hydraulic Structures: Monograph]. Novocherkassk, Lik Publ., 190 p., ISBN 978-5-907708-14-3, EDN: YWMTJU. (In Russian).

4. Shanshan Xu., 2022. Lake detection algorithm in point clouds of the lidar image

based on three-dimensional convolutional neural network. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [System Analysis and Applied Information Science], no. 1, pp. 9-11, DOI: 10.21122/2309-4923-2022-1-9-11, EDN: FGWLYY.

5. Hao Ya., Fang Zh., Deng X., Cao Y., Xie Ch., 2021. Detection by space-borne and ground-based lidar observations of air pollution on the example of the Hefei area. *Zurnal Prikladnoj Spektroskopii*, vol. 88, no. 6, pp. 978(1)-979(11), EDN: KUICNG.

6. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Olgarenko V.I., 2019. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 698, no. 2, article number: 022060, DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060, EDN: ABGPCU.

7. Shaheen L., Rasheed B., Mazzara M., 2024. Tree species detection using hyperspectral and Lidar data: A novel self-supervised learning approach. *Computer Research and Modeling*, vol. 16, no. 7, pp. 1747-1763, DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-7-1747-1763, EDN: LKBGCN.

8. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Rudenko A.A., 2023. *Diagnostika mostovykh pereezdov na malykh rekakh i meliorativnykh sistemakh s uchetom ugrozy vnezapnogo pavodka na yuge Rossii* [Diagnostics of bridge crossings on small rivers and reclamation systems with regard to the threat of flash flood in the south of Russia]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 1, pp. 200-218, DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-200-218, EDN: EURSRG. (In Russian).

9. Abdrazakov F.K., Degtyarev V.G., Degtyarev G.V., 2021. *Tsifrovoe modelirovanie i analiz podpornykh plotin dlya akkumulyatsii osadkov* [Digital modeling and analysis of retaining dams for sediment accumulation]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific Life], vol. 16, no. 8(120), pp. 1005-1015, DOI: 10.35679/1991-9476-2021-16-8-1005-1015, EDN: MDELPD. (In Russian).

10. Pogorelov A.V., Boyko E.S., Vertlib E.M., 2023. *Ispol'zovanie tekhnologiy lidarnoy s"yemki dlya sozdaniya vysokotochnoy 3D modeli goroda: opyt modelirovaniya goroda Krasnodara, Rossiya* [Using lidar survey technologies to create a high-accuracy 3D city model: experience of modeling the city of Krasnodar, Russia]. *Izvestiya Oshskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Osh Technological University], no. 2-1, pp. 70-76, EDN: LTIZJU. (In Russian).

11. Laguta A.A., 2024. *Modelirovanie otvesnoy stenki aktivnogo klifa po dannym lidarnoy s"yemki (na primere Krasnodarskogo vodokhranilishcha)* [Modeling of steep wall of an active cliff using Lidar data survey (case study of the Krasnodar reservoir)]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii* [Geology and Geophysics of Russian South], vol. 14, no 3, pp. 230-242, DOI: 10.46698/s6092-8254-1638-t, EDN: JTWBKV. (In Russian).

12. Ovchinnikov M.A., Vershkov A.A., 2015. *Proektirovanie razvyazok v programmnom komplekse «Topomatik Robur»* [Design of interchanges by means of Topomatic Robur software]. *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog* [CAD & GIS for Roads], no. 2(5), pp. 94-98, DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.14, EDN: ULNWTT. (In Russian).

13. Solonenko V.G., Makhmetova N.M., Nikolaev V.A., Kvashnin M.Ya., Bekzhanova S.E., Bondar I.S., Mirzabaev S.A., 2020. Analysis of the stress-strain state of travel pipes with the use of hardware and software complex. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, vol. 1, no. 439, pp. 181-188, DOI: 10.32014/2020.2518-170X.22, EDN: PKLUVZ.

14. Simutin A.N., Arsenyev I.D., Khoteyev E.A., Deineko A.V., 2022. *Tsifrovye dvoyniki napryazhonno-deformirovannogo sostoyaniya dlya avtomatizirovannogo monitoringa gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Digital twins of the stress-strain state for automated monitoring of hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 12, pp. 20-31, EDN: RMSPLX. (In Russian).

15. Velikin S.A., Snegirev A.M., 2005. *Lokal'nyy geofizicheskiy monitoring sostoyaniya pravoberezhnogo primykaniya plotiny Vilyuyskoy GES-1* [Local geophysical monitoring of the state of the right-bank continuity of the dam at the Vilyui hydroelectric power plant]. *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii Uchebno-nauchnyy tsentr. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin of Kamchatka Regional Association Educational and Scientific Center. Series: Earth Sciences], no. 2(6), pp. 77-85, EDN: HRUKUZ. (In Russian).

16. Volosukhin V.A., Bondarenko V.L., 2014. *Faktory, opredelyayushchie bezopasnost' gidrotekhnicheskikh sooruzheniy vodokhozyaystvennogo naznacheniya* [The factors defining safety of hydraulic engineering constructions of water management purposes]. *Nauka i bezopasnost'* [Science and Safety], no. 3(12), pp. 7-8, EDN: TGLREH. (In Russian).

17. Baev O., Kosichenko Yu., Silchenko V., 2022. Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect. *Magazine of Civil Engineering*, vol. 111, no. 3, article no. 11109, DOI: 10.34910/MCE.111.9, EDN: BBKICT.

18. Amosova L.N., Erdakov E.E., 2017. *Inzhenernaya zashchita urbanizatsionnykh territoriy ot podtopleniya* [Engineering protection of urbanized territories from flooding]. *Polzunovskiy Almanach* [Polzunov Almanac], no. 2, pp. 46-50, EDN: ZHNQEJ. (In Russian).

Информация об авторах

М. А. Бандурин – декан факультета гидромелиорации, доктор технических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), chepura@mail.ru, SPIN-код: 6451-2467, AuthorID: 518464, ORCID: 0000-0002-0986-8848;

А. С. Романова – аспирант, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), any30082002@mail.ru, SPIN-код: 7540-6975, AuthorID: 1159646, ORCID: 0000-0001-9035-917X;

Я. А. Полторак – доцент кафедры гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения, кандидат технических наук, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), yanpoltorak@gmail.com, SPIN-код: 2304-1472, AuthorID: 1056971, ORCID: 0009-0007-4335-7906;

Д. В. Муха – студент, Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. им. Калинина, д. 13), danilmyxa2018@gmail.com, ORCID: 0009-0000-1458-2361.

Information about the authors

M. A. Bandurin – Dean of the Faculty of Hydoreclamation, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Kalinin, 13), chepura@mail.ru, SPIN-code: 6451-2467, AuthorID: 518464, ORCID: 0000-0002-0986-8848;

A. S. Romanova – Postgraduate Student, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Kalinin, 13), any30082002@mail.ru, SPIN-code: 7540-6975, AuthorID: 1159646, ORCID: 0000-0001-9035-917X;

Ya. A. Poltorak – Associate Professor of the Department of Hydraulics and Agricultural Water Supply, Candidate of Technical Sciences, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Kalinin, 13), yanpoltorak@gmail.com, SPIN-code: 2304-1472, AuthorID: 1056971, ORCID: 0009-0007-4335-7906;

D. V. Mukha – Student, Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin (350044, Krasnodar Territory, Krasnodar, st. Kalinin, 13), danilmyxa2018@gmail.com, ORCID: 0009-0000-1458-2361.

Вклад авторов: М. А. Бандурин – формирование целей и задач исследований, обработка полученных результатов лидарной съемки, формирование выводов статьи и ее написание; А. С. Романова – проведение натурных исследований, обработка полученных результатов лидарной съемки, создания высокоточной 3D-модели низконапорной земляной плотины, формирование выводов статьи и ее написание; Я. А. Полторак – обработка полученных результатов лидарной съемки и написание статьи; Д. В. Муха – проведение натурных исследований.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: M. A. Bandurin – formulated research purposes and objectives, processed lidar survey results, made the article's conclusions; A. S. Romanova – conducted field studies, processed lidar survey results, created a high-precision 3D-model of a low-head earth dam, wrote the article's conclusions; Ya. A. Poltorak – processed lidar survey results and wrote the article; D. V. Mukha – conducted field studies.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.10.2025; одобрена после рецензирования 17.12.2025; принята к публикации 18.12.2025.

The article was submitted 14.10.2025; approved after reviewing 17.12.2025; accepted for publication 18.12.2025.