

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.8.04:624(470.621)

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-379-397

Моделирование устойчивости откоса на низконапорной плотине Октябрьского водохранилища в процессе климатических изменений гидрологического режима

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

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>

Аннотация. **Цель:** моделирование устойчивости откоса низконапорной плотины на примере длительно эксплуатируемого Октябрьского водохранилища с применением метода конечных элементов. **Материалы и методы.** Основное внимание уделено изучению влияния гидрологического режима на прочность и долговечность конструкции низконапорной плотины. Резкое чередование влажных и сухих периодов создает дополнительное напряжение в теле грунтовой низконапорной плотины Октябрьского водохранилища. Методика исследования основана на сочетании конечно-элементного моделирования и натурных наблюдений. Использовался SCAD Office, который является комплексом приложений для автоматизированного проектирования и конечно-элементного моделирования. Выполнялись расчеты прочности откоса плотины, учитывающие динамическое давление воды, фильтрационные процессы и механические деформации. Дополнительно проводилась оценка долговечности конструкции в условиях изменения гидрологического режима, включая колебания уровня воды, длительность половодий и различные периоды низких расходов. **Результаты.** Предложен комплексный подход к моделированию устойчивости откоса низконапорной плотины в условиях реальных гидрологических изменений. Предложенные методики и модели обладают универсальностью и могут применяться для аналогичных сооружений в других регионах. Получены радиограммы оползневых процессов, возникших в результате аварий и устраненных при реконструкции плотины. **Выводы.** Проведенные исследования, посвященные оценке технического состояния грунтовой низконапорной плотины Октябрьского водохранилища с применением инженерно-геофизических методов. На основании полученных данных о дефектах выполнено конечно-элементное моделирование. Установлены предельные размеры развития оползневых процессов, которые опасны для эксплуатации низконапорной плотины, когда оползень занимает более 17 % тела плотины в поперечном профиле и более 22 % в продольном. Выявлены локальные зоны активного развития оползневых процессов, обусловленных длительной эксплуатацией, неоднородностью грунтового основания и воздействием внешних факторов.

Ключевые слова: оползень, низконапорная плотина, конечно-элементное моделирование, оценка технического состояния, климатические изменения

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

Для цитирования: Моделирование устойчивости откоса на низконапорной плотине Октябрьского водохранилища в процессе климатических изменений гидрологического режима / М. А. Бандурин, А. С. Романова, Я. А. Полторак, Д. В. Муха // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 379–397. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-379-397>.

HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

Modeling the slope stability on the low-head dam of the Oktyabrsky reservoir during climatic changes in the hydrological regime

**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: modeling the slope stability of a low-head dam using the finite element method based on the example of the long-operated Oktyabrsky Reservoir. **Materials and methods.** The main attention is paid to studying the impact of the hydrological regime on strength and durability of the low-head dam structure. Sharp alternation of wet and dry periods creates additional stress in the body of the low-head earth dam of the Oktyabrsky Reservoir. The research methodology is based on a combination of finite element modeling and field studies. SCAD Office, which is a set of applications for computer-aided design and finite element modeling, was used. Calculations of the dam slope strength were performed, taking into account the dynamic water pressure, filtration processes and mechanical deformations. Additionally, an assessment of the durability of the structure was carried out in changing hydrological regime, including water level fluctuations, flood duration and various periods of low flow rates. **Results.** An integrated approach to modeling the slope stability of a low-head dam under real hydrological changes is proposed. The proposed methods and models are universal and can be used for similar structures in other regions. Radiograms of landslide processes that occurred as a result of accidents and were eliminated during the reconstruction of the dam, were obtained. **Conclusions.** The conducted studies are devoted to assessing the technical condition of the earth low-head dam of the Oktyabrsky Reservoir using engineering and geophysical methods. Finite element modeling was performed based on the obtained data on failures. The maximum dimensions of landslide development that are dangerous for the operation of a low-head dam are established, when a landslide occupies more than 17 % of the dam body in the transverse profile and more than 22 % in the longitudinal profile. Local zones of active development of landslide processes caused by long-term operation, heterogeneity of the soil foundation and the impact of external factors are revealed.

Keywords: landslide, low-head dam, finite element modeling, technical condition assessment, climate change

Funding: 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. Modeling the slope stability on the low-head dam of the Oktyabrsky reservoir during climatic

changes in the hydrological regime. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025; 15(3):379–397. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-379-397>.

Введение. Октябрьское водохранилище построено в 1964 г. и служит для регулирования водных ресурсов р. Супс. Площадь зеркала водохранилища 9,4 км². Октябрьский гидроузел расположен на р. Супс у западной окраины аула Тахтамукай Республики Адыгея. Октябрьское водохранилище осуществляет сезонное и многолетнее регулирование стока р. Супс. По гребню низконапорной плотины проложена асфальтированная дорога, заложение верхового откоса – 1:3, откос закреплен железобетонными плитами (размер плит 1,80 × 1,65 × 0,13 м), заложение низового откоса 1:2, задернован, водоток – р. Супс; площадь водосбора – 158 км², среднегодовое количество стока – 19,58 млн м³/г, полный объем водохранилища – 17,4 млн м³ [1].

В состав сооружений Октябрьского водохранилища входят: низконапорная плотина; водовыпуск у левого берега; водовыпуск у правого берега; водохранилище. Водохранилище используется для защиты от паводковых наводнений и орошения и находится в оперативном управлении ФГБУ «Управление «Адыгеемелиоводхоз» (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Состав сооружений Октябрьского водохранилища
(автор фото А. С. Романова)**

**Figure 1 – Structure of the Oktyabrsky Reservoir
(photo by A. S. Romanova)**

Длина Октябрьского водохранилища составляет четыре километра, ширина – три километра, общая площадь водной глади – 9,4 км². Источник питания – речка Супс. Предгорная и равнинная части Закубанья расчленены долинами многочисленных рек и балок, переходящих в плавни. Октябрьское водохранилище расположено между Шенджийским и Шапсугским водохранилищем и регулирует сток р. Супс. Основным источником питания являются атмосферные осадки, поэтому ярко выраженного периода прохождения паводка нет. Паводки могут проходить в течение всего года. Водный режим р. Супс отличается наличием интенсивных паводков преимущественно в осенне-зимнюю пору, а в летний сезон отмечается стабильно низкий уровень воды (межень). Поскольку подземное питание реки незначительно, в летне-осенний период ее сток зачастую близок к минимуму или вовсе прекращается. В последнее время наблюдается изменение графика паводков. Раньше паводковые фазы совпадали с максимумом снеготаяния, теперь высокая фаза паводка смещается ближе к летним месяцам, связанным с обильным выпадением дождя. В отличие от прежних лет, современный гидрологический режим отличается гораздо большей амплитудой годовых колебаний уровня воды. Минимумы межени становятся глубже, а максимумы паводков выше [2].

В геологическом отношении территория находится в пределах Западно-Кубанского краевого прогиба. Региональным водоупором для подземных вод являются верхнеплиоценовые куюльницкие лиманно-морские отложения мощностью свыше 300 м, представленные преимущественно плотными глинами; кровля отложений отмечается на глубине 300–350 м. Выше отложений куюльницкого яруса залегают верхнеплиоценовые аллювиально-лиманные отложения акчагыльского и апшеронского ярусов общей мощностью 250–300 м, представленные сложно переслаивающимися слоями песков и глин [3].

Цель исследований – моделирование устойчивости откоса низконапорной плотины на примере длительно эксплуатируемого Октябрьского

водохранилища с применением метода конечных элементов. Вопрос устойчивости низконапорных плотин имеет особое значение в современном ландшафте, испытывающем существенные изменения климатических условий. Важность изучения данной проблематики обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и надежности гидротехнических сооружений, а также минимизации рисков возникновения аварийных ситуаций на водохранилищах.

Материалы и методы. На Октябрьском водохранилище (рисунок 2а) в ходе планового визуального осмотра была обнаружена деформация тела плотины, образовались оползневые процессы, угрожающие разрушению тела плотины ввиду следующих негативных факторов (рисунок 2б).



a)



b)

a – общий вид; b – оползень

a – general appearance; b – landslide

Рисунок 2 – Оползневые процессы на земляной низконапорной плотине Октябрьского водохранилища (автор фото А. С. Романова)

Figure 2 – Landslide processes on the earth low-head dam of the Oktyabrsky reservoir (photo by A. S. Romanova)

Движение большегрузного транспорта, не предусмотрено проектной документацией, а также конструктивными особенностями земляной низконапорной плотины. За 60 лет ее эксплуатации увеличился тоннаж большегрузного транспорта и изменился гидрологический режим, что отражается на фильтрационных процессах в теле плотины. Дополнительное воздействие оказывают слабые грунты тела и основания плотины (илистые грунты с примесью растительных остатков) и повышенную влажность

грунтов откоса ввиду обильных осадков, приведших к негативным оползневым процессам (рисунок 3а).

Согласно наблюдениям Гидрометцентра России, в Краснодарском крае наблюдается тенденция к резким и непредсказуемым колебаниям уровня воды, так в мае 2025 г. прогнозировался выход рек из берегов из-за аномально высоких осадков, что вызвало тревогу специалистов. Гидрологический режим р. Кубань претерпевает существенные изменения в последние годы, что отражается на уровне воды, частоте и силе паводков, а также вероятности подтоплений. Наблюдаемые изменения гидрологического режима связаны с общим изменением климата. Так осадки чередуются с сухими периодами, что увеличивает риск стремительных паводков и подтоплений.

Грунты основания тела плотины испытывают процесс разуплотнения и находятся в водонасыщенном состоянии. Постоянная динамическая нагрузка от движения транспорта по гребню плотины приводит к увеличению развития оползневых процессов на всем протяжении тела грунтового основания с последующим разрушением напорного фронта сооружения, что может стать причиной гидродинамической аварии с затоплением прилегающей территории и жертвами среди местного населения (рисунок 3б).



a)



b)

a – сползание дорожного покрытия; b – разрушение грунтового основания
a – road surface slippage; b – soil foundation destruction

Рисунок 3 – Разрушение грунтового основания низконапорной плотины Октябрьского водохранилища (автор фото А. С. Романова)

Figure 3 – Destruction of the earth foundation of the low-head dam of the Oktyabrsky reservoir (photo by A. S. Romanova)

Для предотвращения возникновения гидродинамической аварии необходимо выполнить мероприятия [4] по ликвидации развития поползневых процессов в теле плотины: запретить движение транспортных средств по всей длине плотины до проведения работ по полной реконструкции тела плотины; выполнить первоочередные экстренные работы по ликвидации последствий оползневых процессов на плотине; вести постоянный геодезический мониторинг и визуальный контроль за состоянием плотины; выполнить работы по реконструкции тела плотины на всей протяженности.

Результаты и обсуждение. Выполнены визуальные исследования проблемных участков на низконапорной плотине, установлены конкретные дефекты и повреждения, произведен детальный осмотр и составлена рабочая схема размещения дефектов и повреждений, необходимая для дальнейших восстановительных мероприятий. На современном программном комплексе SCAD Office было выполнено конечно-элементное моделирование грунтового основания низконапорной плотины, позволяющее определить точные зоны возникновения смещения грунтового основания. Оно объединяет в себе инструментарий для моделирования, расчетов и оформления чертежей, предлагая удобные и функциональные инструменты для выполнения профессиональных задач. Полученные результаты были проверены на соответствие нормативным документам. Программа выдает рекомендации по выбору оптимальных классов материалов и секций элементов. Выполнено моделирование образования оползня вследствие повышенной фильтрации через тело низконапорной плотины (рисунок 4).

На рисунке 4 представлена эпюра вертикальных перемещений (по оси Z), полученная в результате конечно-элементного моделирования. Наблюдается выраженная зона максимальных оседаний в области контакта между грунтовым массивом и телом низконапорной плотины [5]. Это связано с длительной эксплуатацией сооружения, высокой степенью водонасыщения грунтов и действием динамических нагрузок от движения транс-

порта по гребню плотины [6]. Выявленные локальные концентрации вертикальных деформаций свидетельствуют о снижении несущей способности основания и необходимости его усиления в ходе реконструкции [7].

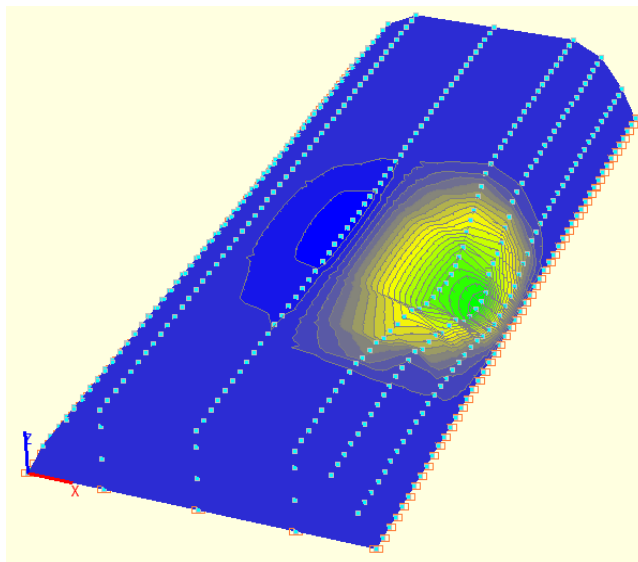


Рисунок 4 – Эпюра перемещений по оси Z
Figure 4 – Z-axis displacement diagram

Эпюра горизонтальных перемещений вдоль поперечной оси плотины (ось X) демонстрирует распределение продольных смещений в теле низконапорной плотины. Наибольшие значения отмечаются в зоне оползневых процессов, что обусловлено сочетанием следующих факторов: слабыми физико-механическими свойствами грунтов, повышенной влажностью и динамическим воздействием внешних нагрузок. Полученная эпюра перемещений по оси X позволяют оценить развитие деформаций вдоль плотины и выделить участки с критическими уровнями деформирования, требующие ремонта (рисунок 5).

Рисунок 6 отражает распределение поперечных горизонтальных перемещений (ось Y). Анализ эпюры показывает наличие критических смещений в призме обрушения и вблизи границы раздела между различными грунтовыми слоями. Такая картина указывает на активное развитие поперечных деформаций, которые могут привести к потере устойчивости отдельных участков плотины [8, 9]. Локализация максимальных значений

соответствует зонам, где ранее были зафиксированы видимые дефекты – трещины и разуплотнения грунта.

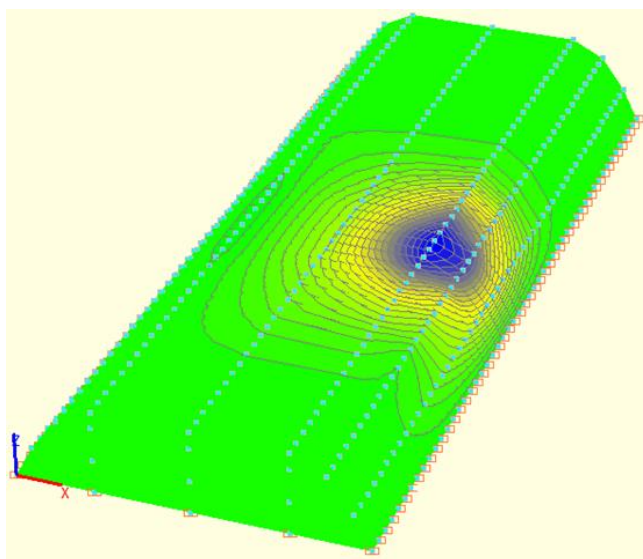


Рисунок 5 – Эпюра перемещений по оси X
Figure 5 – X axis displacement diagram

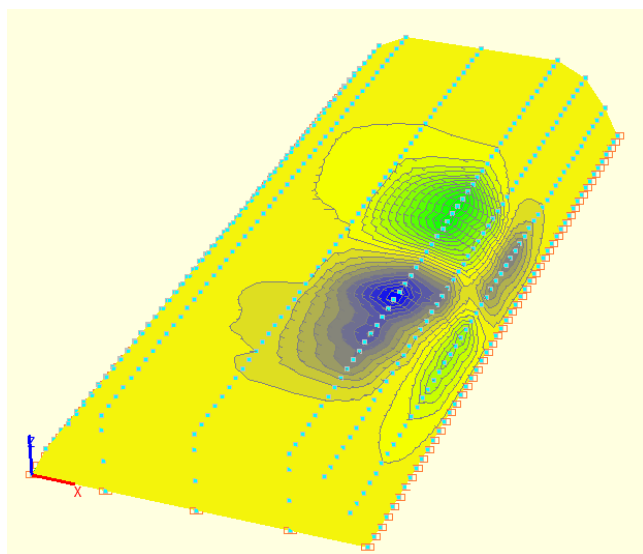


Рисунок 6 – Эпюра перемещений по оси Y
Figure 6 – Y axis displacement diagram

Представленная эпюра суммарных перемещений позволяет визуализировать общую картину деформационного состояния тела плотины. Зоны наибольших смещений совпадают с участками, подверженными оползневым процессам. Интегральный характер деформаций демонстрирует комплексное влияние всех компонентов внешнего воздействия, как статиче-

ских, так и динамических [10, 11]. С помощью эпюры суммарных перемещений выделим наиболее уязвимые и требующие первоочередной оценки технического состояния участки при проведении противооползневых мероприятий (рисунок 7).

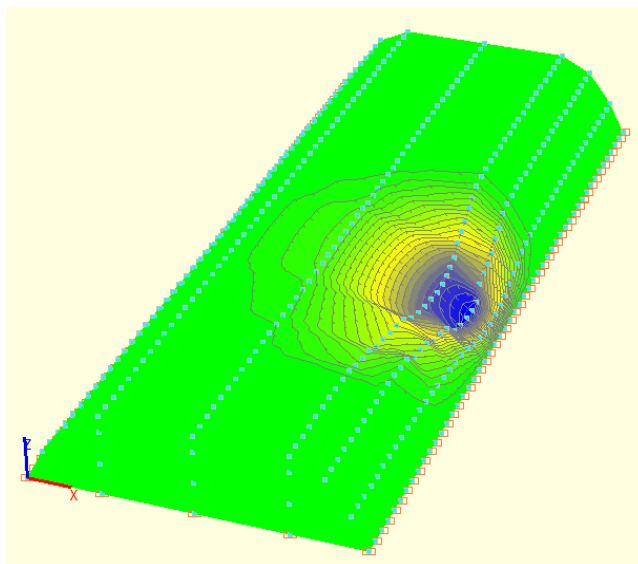


Рисунок 7 – Эпюра суммарных перемещений
Figure 7 – Total shift diagram

Эпюра вертикальных нормальных напряжений по оси Z (G_Z) показывает распределение сжимающих усилий в теле плотины. Максимальные значения напряжений наблюдаются в нижних слоях грунтового массива, где происходит наибольшее уплотнение грунта под действием собственного веса и внешних нагрузок. При этом в зоне активного оползня отмечены незначительные значения напряжений, что может быть связано с разуплотнением и разрушением структуры грунта [12–14]. Полученные данные важны для оценки прочности основания и прогнозирования дальнейшего развития деформаций (рисунок 8).

Рисунок 9 отражает распределение поперечных нормальных напряжений G_Y , возникающих вследствие бокового давления грунта и дополнительных внешних воздействий. Визуализируются локальные зоны концентрации интенсивности напряжений вблизи температурно-осадочных швов и контактных поверхностей между грунтом и бетонными конструкциями.

Такие концентрации могут спровоцировать образование трещин и повреждение примыкающих элементов сооружения, что требует усиления данных участков при реконструкции [15].

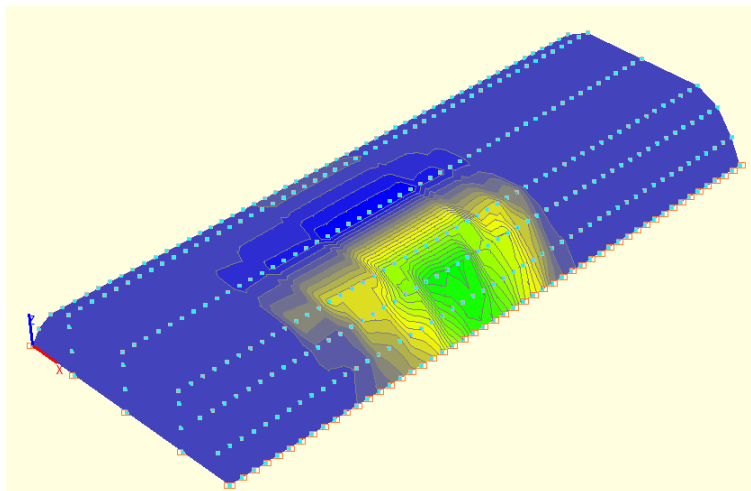


Рисунок 8 – Эпюра нормальных напряжений по оси Z (G_z)
Figure 8 – The Z axis (G_z) normal stress diagram

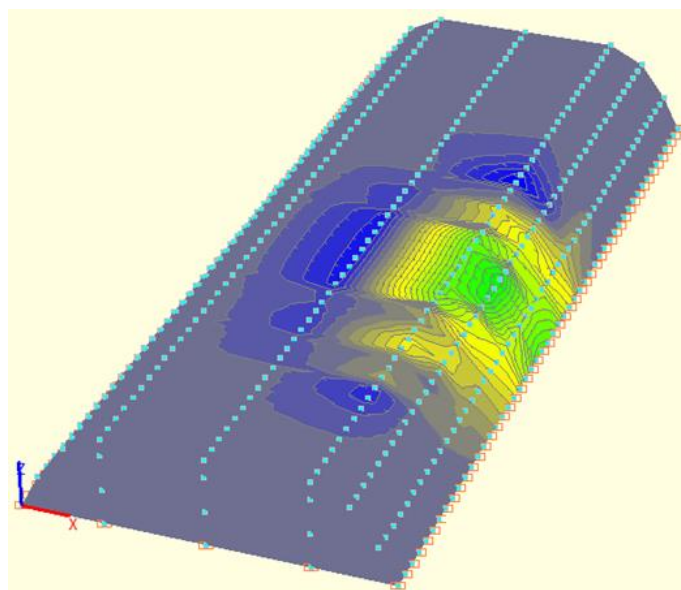


Рисунок 9 – Эпюра нормальных напряжений по оси Y (G_y)
Figure 9 – The Y (G_y) axis normal stress diagram

Эпюра продольных нормальных напряжений G_x отражает внутреннее напряженное состояние плотины вдоль ее протяженности. Наиболее высокие значения интенсивности напряжений зафиксированы в зоне геометрической неоднородности: в местах изменения крутизны откосов и перехода между различными конструктивными элементами. Превышение

предельно допустимых значений в этих областях свидетельствует о риске образования продольных трещин и последующем разрушении тела плотины [16, 17] (рисунок 10).

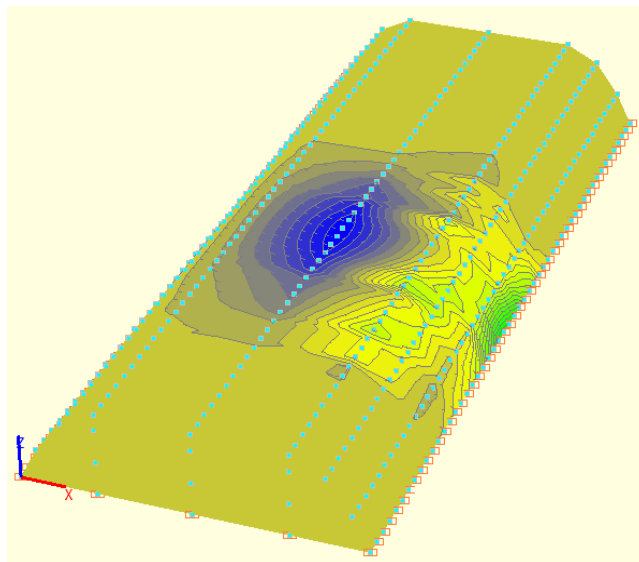


Рисунок 10 – Эпюра нормальных напряжений по оси X (G_x)

Figure 10 – The X axis (G_x) normal stress diagram

Анализ эпюр перемещений и интенсивности нормальных напряжений (G_z , G_y , G_x), представленных на рисунках 4–10, позволил выявить зоны с опасными значениями деформаций и напряжений в теле грунтовой низконапорной плотины Октябрьского водохранилища. Эти участки коррелируют с зонами активного оползнеобразования, выявленными при визуальном осмотре и инструментальном контроле [18, 19]. Полученные результаты моделирования являются основой для разработки проектных решений по реконструкции и усилению тела плотины, направленным на предотвращение гидродинамической аварии и обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнического сооружения.

Для предотвращения возникновения гидродинамической аварии необходимо выполнить мероприятия по ликвидации развития поползневых процессов в теле плотины:

- запретить движение транспортных средств по всей длине плотины до проведения работ по полной реконструкции тела плотины;

- выполнить первоочередные экстренные работы по ликвидации последствий оползневых процессов на плотине;
- вести постоянный геодезический мониторинг и визуальный контроль состояния плотины;
- выполнить работы по реконструкции тела плотины на всей протяженности.

Установлено количество материала, необходимого на проведение аварийно-спасательных работ по ликвидации наиболее вероятной аварии (таблица 1).

Таблица 1 – Объемы материалов и работ для ликвидации последствий аварии на низконапорной плотине Октябрьского водохранилища

Table 1 – Volumes of materials and work to eliminate the consequences of the accident at the low-head dam of the Oktyabrsky reservoir

Наименование	Единица измерения	Количество
Суглинисто-гравийная смесь	м ³	5800
Покрытие дороги:		
- асфальт, толщина $t = 0,10$ м	м ³	90
- щебень, толщина $t = 0,15$ м	м ³	145
Планировка гребня и низового откоса	м ²	3500
Растительный грунт с посевом трав	м ³ /м ²	380/2575

Выводы. В результате проведенного комплексного исследования и компьютерного моделирования оценено техническое состояние грунтовой низконапорной плотины Октябрьского водохранилища с применением инженерно-геофизических методов. Выявлены локальные зоны активного развития оползневых процессов, обусловленных длительной эксплуатацией, неоднородностью грунтового основания и воздействием внешних факторов. Установлены предельные размеры развития оползневых процессов, которые опасны для дальнейшей эксплуатации низконапорной плотины, когда оползень занимает более 17 % тела плотины в поперечном профиле и более 22 % в продольном. Настоящее исследование показало, что климатические изменения оказывают значительное влияние на гидрологический

режим низконапорной плотины Октябрьского водохранилища. Полученные эпюры перемещений и напряжений свидетельствуют о существующих в теле плотины деформациях. Результаты моделирования позволяют рекомендовать проведение мероприятий, а именно: реконструкция гидротехнических сооружений с использованием современных строительных материалов и технологий, направленных на повышение устойчивости тела плотины и обеспечение ее безопасной эксплуатации в условиях возможных природных и чрезвычайных техногенных воздействий. Установлены локальные зоны активного развития оползневых процессов, обусловленных длительной эксплуатацией, неоднородностью грунтового основания и внешними факторами. Полученные эпюры перемещений и напряжений свидетельствуют о существовании в теле плотины деформаций, особенно в зоне контакта грунтового массива с бетонными конструкциями и вблизи температурно-осадочных швов. Эти участки требуют постоянного мониторинга и усиления для предотвращения аварийных ситуаций. Комплексный подход к моделированию устойчивости откоса плотины позволяет предложить проектные решения по реконструкции и укреплению сооружения. Все это обеспечит повышение устойчивости тела плотины и безопасную эксплуатацию в условиях возможных природных и техногенных воздействий.

Список источников

1. Экспериментальное исследование механических свойств низового клина низконапорной дамбы в условиях повышения уровня паводковых вод / М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, И. А. Приходько, А. Ю. Вербицкий // Construction and Geotechnics. 2023. Т. 14, № 1. С. 111–122. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.09. EDN: PQYJUJ.
2. Катастрофический оползень и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС (бассейн Амура) / В. В. Кулаков, А. Н. Махинов, В. И. Ким, А. В. Остроухов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2019. № 3. С. 12–20. DOI: 10.31857/S0869-78092019312-20. EDN: BVZITZ.
3. Волосухин Я. В. Сейсмостойкость откосов плотины и дамбы Бахчисарайского водохранилища в Крыму // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 1(91), ч. 1. С. 57–62. DOI: 10.23670/IRJ.2020.91.1.012. EDN: OJUCCH.
4. Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений: монография / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова, О. А. Бавев, Е. Д. Михайлов. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. 283 с. ISBN: 978-5-9907461-5-2. EDN: WUYTAT.

5. Применение численного моделирования для расчета ветрового волнения на Крюковском водохранилище / И. А. Приходько, М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, А. Ю. Вербицкий // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 353–378. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-353-378. EDN: FCUZXF.

6. Косиченко Ю. М., Талалаева В. Ф. Эксплуатация и использование Пролетарского водохранилища // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 4. С. 346–359. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-346-359. EDN: MXCCOB.

7. Ткачев А. А., Анохин А. М. Реконструкция Новотроицкого водохранилища в Ставропольском крае // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11, № 4. С. 302–315. DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-302-315. EDN: ICYRZY.

8. Иванкова Т. В., Кипкеева П. А., Потапенко Ю. Я. Природно-хозяйственные структуры малых речных бассейнов горного рельефа и пути их развития: инновации, оптимизация или реставрация // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2018. Т. 26, № 1(89). С. 67–75. EDN: OSNIXX.

9. Мониторинговая оценка низконапорной земляной плотины Варнавинского водохранилища в условиях повышающегося риска природных и техногенных катастроф / М. А. Бандурин, В. А. Волосухин, И. А. Приходько, А. А. Руденко // Construction and Geotechnics. 2022. Т. 13, № 4. С. 17–29. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.02. EDN: QWBLEE.

10. Абдразаков Ф. К., Дегтярев В. Г., Коженко Н. В. Анализ основания мелиоративной плотины при работе в напорно-переменном режиме // Аграрный научный журнал. 2021. № 8. С. 82–86. DOI: 10.28983/asj.y2021i8pp82-86. EDN: FPQYCS.

11. Дегтярева О. Г. Исследование жесткостных характеристик гравитационной и контрфорсной плотин посредством анализа собственных колебаний // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 63. С. 169–177. DOI: 10.21515/1999-1703-63-169-177. EDN: YLPTEB.

12. Sukhinov A. I., Sidoryakina V. V., Protsenko E. A. Hydrodynamic wave processes numerical modeling in the coastal recreational zone of the Tsimlyansk reservoir // Computational Mathematics and Information Technologies. 2021. Vol. 1, no. 1. P. 36–43. DOI: 10.23947/2587-8999-2021-1-1-36-43. EDN: CTRRCP.

13. The monitoring of condition of hydraulic structures / F. K. Abdrazakov, S. S. Orlova, T. A. Pankova, E. N. Mirkina, T. V. Fedyunina // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018. Vol. 10, no. 13. P. 1952–1958. EDN: EHGFNC.

14. Погорелов А. В., Лагута А. А., Кузякина М. В. Геоморфологические аспекты преобразования крупного равнинного водохранилища (по данным измерений на Краснодарском водохранилище) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28, № 2. С. 536–551. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-536-551. EDN: GSKZWN.

15. Имитационное моделирование устойчивости оградительных дамб реки Пескупс в условиях возрастающих статических и сейсмических воздействий / В. А. Волосухин, М. А. Бандурин, И. А. Приходько, И. Д. Евтеева // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 5(389). С. 459–463. DOI: 10.55186/25876740_2022_65_5_459. EDN: JCHJKA.

16. Кондратьева Л. М., Махинов А. Н., Ким В. И. Экологические последствия крупного оползня на побережье Бурейского водохранилища // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42, № 4. С. 58–66. DOI: 10.15372/GIPR20210406. EDN: PAORHA.

17. Belolipetskii V. M., Belolipetskii P. V., Genova S. N. Numerical Modelling of the Hydrothermal Regime of the Krasnoyarsk Reservoir // Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. 2018. Vol. 11, no. 5. P. 569–580. DOI: 10.17516/1997-1397-2018-11-5-569-580. EDN: YMKFFZ.

18. Физическое моделирование разрушения грунтовой дамбы водохранилища в процессе переполнения водоема / Г. В. Пряхина, А. С. Боронина, С. В. Попов, В. А. Распу-

тина, А. Е. Войнаровский // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151, № 2. С. 51–63. DOI: 10.31857/S0869-6071151251-63. EDN: ZFBDIL.

19. Прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния дамб хвостохранилищ на базе пространственной конечно-элементной модели / С. С. Сайидкосимов, Б. Р. Раимжанов, Ф. Я. Умаров, М. Х. Рахимова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 9. С. 38–55. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_38. EDN: EFMOCM.

References

1. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Verbitsky A.Yu., 2023. *Eksperimental'noe issledovanie mekhanicheskikh svoystv nizovogo klina nizkonapornoy damby v usloviyakh povysheniya urovnya pavodkovykh vod* [Experimental study of mechanical properties of the downstream wedge of a low-head dam under conditions of rising flood water levels]. Construction and Geotechnics, vol. 14, no. 1, pp. 111-122, DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.09, EDN: PQYJUJ. (In Russian).

2. Kulakov V.V., Makhinov A.N., Kim V.I., Ostroukhov A.V., 2019. *Katastroficheskiy opolzen' i tsunami v vodokhranilishche Bureyskoy GES (basseyne Amura)* [A catastrophic landslide and tsunami in the reservoir of the Bureyskaya hydropower plant (the Amur River basin)]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geocology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology], no. 3, pp. 12-20, DOI: 10.31857/S0869-78092019312-20, EDN: BVZITZ. (In Russian).

3. Volosukhin Ya.V., 2020. *Seysmostoykost' otkosov plotiny i damby Bakhchisarayskogo vodokhranilishcha v Krymu* [Seismic Stability of slopes of dam and levee in the Bakhchisarai Reservoir in Crimea]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], no. 1(91), part 1, pp. 57-62, DOI: 10.23670/IRJ.2020.91.1.012, EDN: OJUCCH. (In Russian).

4. Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., Baklanova D.V., Baev O.A., Mikhailov E.D., 2016. *Obespechenie bezopasnosti i nadezhnosti nizkonapornykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: monografiya* [Ensuring the Safety and Reliability of Low-Pressure Hydrotechnical Structures: monograph]. Novocherkassk, RosNIIPM, 283 p., ISBN: 978-5-9907461-5-2, EDN: WUYTAT. (In Russian).

5. Prikhodko I.A., Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Verbitsky A.Yu., 2023. *Primenenie chislennogo modelirovaniya dlya rascheta vetrovogo volneniya na Kryukovskom vodokhranilishche* [Using numerical modeling for calculation of wind waves at the Kryukovskiy Reservoir]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 2, pp. 353-378, DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-353-378, EDN: FCUZXF. (In Russian).

6. Kosichenko Yu.M., Talalaeva V.F., 2021. *Ekspluatatsiya i ispol'zovanie Proletarskogo vodokhranilishcha* [The Proletarskiy Reservoir operation and usage]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 11, no. 4, pp. 346-359, DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-346-359, EDN: MXCCOB. (In Russian).

7. Tkachev A.A., Anoshin A.M., 2021. *Rekonstruktsiya Novotroitskogo vodokhranilishcha v Stavropol'skom krae* [Reconstruction of the Novotroitskiy Reservoir in Stavropol Territory]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 11, no. 4, pp. 302-315, DOI: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-302-315, EDN: ICYRZY. (In Russian).

8. Ivankova T.V., Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya., 2018. *Prirodno-khozyaystvennyye struktury malyykh rechnykh basseynov gornogo rel'efa i puti ikh razvitiya: innovatsii, optimizatsiya ili restavratsiya* [Natural and economic structures of small river basins in mountainous terrain and ways for their development: innovation, optimization or restoration]. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan* [Bullet. of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan], vol. 26, no. 1(89), pp. 67-75, EDN: OSNIXX. (In Russian).

9. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Rudenko A.A., 2022. *Monitoringovaya otsenka nizkonapornoy zemlyanoy plotiny Varnavinskogo vodokhranilishcha v usloviyakh povyshayushchegosya riska prirodnnykh i tekhnogennykh katastrof* [Monitoring assessment of the low-head earthen dam of the Varnavinsky reservoir under conditions of an increasing risk of natural and man-made disasters]. *Construction and Geotechnics*, vol. 13, no. 4, pp. 17-29, DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.02, EDN: QWBLEE. (In Russian).

10. Abdrazakov F.K., Degtyarev V.G., Kozhenko N.V., 2021. *Analiz osnovaniya meliorativnoy plotiny pri rabote v naporno-peremennom rezhime* [Analysis of the base of a reclamation dam when operating in a pressure variable mode]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 8, pp. 82-86, DOI: 10.28983/asj.y2021i8pp82-86, EDN: FPQYCS. (In Russian).

11. Degtyareva O.G., 2016. *Issledovanie zhestkostnykh kharakteristik gravitatsionnoy i kontrforsnoy plotin posredstvom analiza sobstvennykh kolebaniy* [Research of stiffness characteristics of gravity and of buttress weir on facilities of analysis of eigentones]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceed. of Kuban State Agrarian University], no. 63, pp. 169-177, DOI: 10.21515/1999-1703-63-169-177, EDN: YLPTEB. (In Russian).

12. Sukhinov A.I., Sidoryakina V.V., Protsenko E.A., 2021. Hydrodynamic wave processes numerical modeling in the coastal recreational zone of the Tsimlyansk reservoir. *Computational Mathematics and Information Technologies*, vol. 1, no. 1, pp. 36-43, DOI: 10.23947/2587-8999-2021-1-1-36-43, EDN: CTRRCP.

13. Abdrazakov F.K., Orlova S.S., Pankova T.A., Mirkina E.N., Fedyunina T.V., 2018. The monitoring of condition of hydraulic structures. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, vol. 10, no. 13, pp. 1952-1958, EDN: EHGFCN.

14. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kuzyakina M.V., 2022. *Geomorfologicheskie aspekty preobrazovaniya krupnogo ravninnogo vodokhranilishcha (po dannym izmereniy na Krasnodarskom vodokhranilishche)* [Geomorphological aspects of the transformation of a large plain reservoir (according to measurements at the Krasnodar reservoir)]. *InterKarto. InterGIS* [InterCarto. InterGIS], vol. 28, no. 2, pp. 536-551, DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-536-551, EDN: GSKZWN. (In Russian).

15. Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Evteeva I.D., 2022. *Imitatsionnoe modelirovanie ustoychivosti ograditel'nykh damb reki Psekups v usloviyakh vozrastayushchikh staticheskikh i seysmicheskikh vozdeystviy* [Simulation modeling of stability of Psekups river protective dams under increasing static and seismic impacts]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* [International Agricultural Journal], no. 5(389), pp. 459-463, DOI: 10.55186/25876740_2022_65_5_459, EDN: JCHJKA. (In Russian).

16. Kondratieva L.M., Makhinov A.N., Kim V.I., 2021. *Ekologicheskie posledstviya krupnogo opolznya na poberezh'e Bureyskogo vodokhranilishcha* [Ecological consequences of a large landslide on the coast of the Bureya Reservoir]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], vol. 42, no. 4, pp. 58-66, DOI: 10.15372/GIPR20210406, EDN: PAORHA. (In Russian).

17. Belolipetskii V.M., Belolipetskii P.V., Genova S.N., 2018. Numerical Modelling of the Hydrothermal Regime of the Krasnoyarsk Reservoir. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*, vol. 11, no. 5, pp. 569-580, DOI: 10.17516/1997-1397-2018-11-5-569-580, EDN: YMKFFZ.

18. Pryakhina G.V., Boronina A.S., Popov S.V., Rasputina V.A., Voinarovsky A.E., 2019. *Fizicheskoe modelirovanie razrusheniya gruntovoy damby vodokhranilishcha v protsesse perepolneniya vodoema* [Physical modeling of the destruction of a reservoir ground dam in consequence of the overflow of water body]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Proceed. of the Russian Geographical Society], vol. 151, no. 2, pp. 51-63, DOI: 10.31857/S0869-6071151251-63, EDN: ZFBDIL. (In Russian).

19. Sajjkosimov S.S., Raimdzhанov B.R., Umarov F.Ya., Rakhimova M.Kh., 2023. *Prognoznaya otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya damb khvosto-khranilishch na baze prostranstvennoy konechno-elementnoy modeli* [Predictive assessment of the stress-strain state of tailings dams based on a spatial finite element model]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 9, pp. 38-55, DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_38, EDN: EFMOCM. (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, конечно-элементное моделирование, написание статьи. А. С. Романова – проведение натурных исследований, подготовка иллюстраций, конечно-элементное моделирование, обработка полученных результатов, формирование выводов статьи и ее написание. Я. А. Полторак – обработка полученных результатов 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 objectives and tasks, conducted finite element modeling, wrote the article. A. S. Romanova – conducted field studies, prepared illustrations, conducted finite element modeling, processed the obtained results, formed and wrote the article's conclusions. Ya. A. Poltorak – processed the obtained 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 24.06.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2025; принята к публикации 22.09.2025.

The article was submitted 24.06.2025; approved after reviewing 09.09.2025; accepted for publication 22.09.2025.