

Бандурин, М.А. Применение инженерной геофизики при диагностике сооружений инженерной защиты Варнавинского водохранилища для снижения ущерба от половодий и паводков / М.А. Бандурин, В.А. Волосухин, А.С. Романова // Construction and Geotechnics. – 2025. – Т. 16, № 1. – С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.1.01

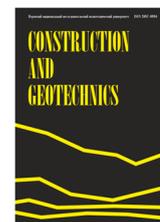
Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Romanova A.S. Application of engineering geophysics in the diagnosis of engineering protection structures of the Varnavinsky reservoir to reduce damage from floods and floods. *Construction and Geotechnics*. 2025. Vol. 16. No. 1. Pp. 5-18. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.1.01



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 1, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.1.01

УДК 627.514(470.620)

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СООРУЖЕНИЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ВАРНАВИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УЩЕРБОВ ОТ ПОВОДОЙ И ПАВОДКОВ

**М.А. Бандурин, В.А. Волосухин, А.С. Романова**

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина,  
Краснодар, Российская Федерация

### О СТАТЬЕ

Получена: 24 ноября 2023  
Одобрена: 22 декабря 2024  
Принята к публикации:  
05 марта 2025

#### Ключевые слова:

диагностика, климатические изменения, природные и техногенные катастрофы, ущерб, половодье, паводок, наводнение неразрушающие методы контроля.

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрено совершенствование методов применения инженерной геофизики при диагностике сооружений инженерной защиты Варнавинского водохранилища с целью уменьшения ущерба, причиняемого наводнениями, поскольку из-за климатических особенностей нашей страны каждый год происходят речные паводки, что может привести к превышению критических уровней воды в водохранилище. Это может нанести серьезный удар экономике Краснодарского края, повлечь за собой ущерб здоровью и причинить убытки населению из-за затопления хозяйственных объектов и населенных пунктов, расположенных в пойменных зонах. Цель исследований – выполнение оценки технического состояния инженерной защиты сооружений Варнавинского водохранилища с применением приборов неразрушающего контроля. Материалами к исследованию послужили данные неразрушающего контроля, выполненного в разное время года на Варнавинском водохранилище, георадаром «Око-3», «Пульсар-2.2», Nokta Invenio Smart и пенетрометром статического действия ПСГ-МГ4. Проведено применение инженерно-геофизических методов в модернизации технического состояния сооружений инженерной защиты. Получены радиограммы мест обрушения, возникших в результате аварий и устраненных при реконструкции плотины. Исследования показали, что железобетонные конструкции и грунтовое основание земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища находятся в приемлемом состоянии и выполняют свои функциональные задачи. Примененный аппаратно-методический комплекс позволил решить выявленные трудности. Преимуществом комплекса является его методическая мобильность. После проведения краткосрочных экспериментально-методических работ и оперативной обработки сочетание возможностей аппаратного комплекса с инженерно-геологической обстановкой позволяет достичь максимального качества в минимальные сроки и при минимальных затратах.

© **Бандурин Михаил Александрович** – доцент, доктор технических наук, e-mail: chepura@mail.ru.  
**Волосухин Виктор Алексеевич** – профессор, доктор технических наук, e-mail: director@ibgts.ru.  
**Романова Анна Сергеевна** – аспирант, e-mail: any30082002@mail.ru.

**Mikhail A. Bandurin** – Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: chepura@mail.ru.  
**Viktor A. Volosukhin** – Professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: director@ibgts.ru.  
**Anna S. Romanova** – Postgraduate Student, e-mail: any30082002@mail.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## **APPLICATION OF ENGINEERING GEOPHYSICS IN THE DIAGNOSIS OF ENGINEERING PROTECTION STRUCTURES OF THE VARNAVINSKY RESERVOIR TO REDUCE DAMAGE FROM FLOODS AND FLOODS**

**M.A. Bandurin, V.A. Volosukhin, A.S. Romanova**

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 24 November 2023  
Approved: 22 December 2024  
Accepted for publication:  
05 March 2025

#### *Keywords:*

diagnostics, climate change,  
natural and man-made disasters,  
damage, flood, high water, flood,  
non-destructive testing methods.

### ABSTRACT

The article considers the improvement of methods of applying engineering geophysics in the diagnosis of engineering protection structures of the Varnavinsky reservoir in order to reduce damage caused by floods and floods, since due to the climatic characteristics of our country, river floods occur every year, which can lead to exceeding critical water levels in the reservoir. This can cause serious damage to the economy of the Krasnodar Territory, cause damage to health and cause losses to the population due to flooding of economic facilities and settlements located in floodplain zones. The purpose of the research is to assess the technical condition of the engineering protection of the structures of the Varnavinsky reservoir using non-destructive testing devices. The materials for the study were data from non-destructive testing performed at different times of the year at the Varnavinsky reservoir using the Oko-3 and Pulsar-2.2 ground penetrating radars, the Nokta Invenio Smart, and the PSG-MG4 static penetrometer. The application of engineering and geophysical methods in the modernization of the technical condition of engineering protection structures has been carried out. Radiograms of the collapse sites that arose as a result of accidents and were eliminated during the reconstruction of the dam were received. Studies have shown that reinforced concrete structures and the soil base of the low-pressure earthen dam of the Varnavinsky reservoir are in an acceptable condition and perform their functional tasks. The applied hardware and methodological complex made it possible to solve the identified difficulties. The advantage of the complex is its methodical mobility. After carrying out short-term experimental and methodological work and operational processing, the combination of the capabilities of the hardware complex with the engineering and geological situation makes it possible to achieve maximum quality in the shortest possible time and at minimum cost.

---

## **Введение**

По данным всемирной организации «ЮНЕСКО», от наводнений погибло более 9 млн человек за последние 100 лет. Только за первое десятилетие XXI в. прямой ущерб от наводнений по данным международных баз данных, составил 273 млрд 718 млн долл. США [1].

Численность мирового населения удвоилась за предшествующие 50 лет. На сегодня она составляет 8,2 млрд человек, что способствует существенному увеличению антропогенных нагрузок в бассейнах рек. Мировой ущерб от наводнений неравномерен по годам, например, в 1998 г. он составил 236 млрд 647 млн долл. США, в 2002 г. – 29 млрд 694 млн долл. США, в 2005 г. – 82 млрд 250 млн долл. США. В 1998 г. в период наводнений было затоплено 170 млн 85 тыс. га сельскохозяйственных угодий, а в 2000 г. – 33 млн 12 тыс. га. Из зон затопления в мире было эвакуировано в 2000 г. – 50 млн 258 тыс. человек, в 2004 г. – 51 млн 468 тыс. человек, а в 2007 – 35 млн 661 тыс. человек. За последние 50 лет (1970–2020 гг.) число природных катастроф (наводнения, засухи, землетрясения и т.д.) возросло в мире более чем в 8 раз [2].

На период начала проведения политики индустриализации 100 лет назад на территории современной России в городах проживало всего 18,0 % населения. По данным переписи

си 2021 г. в городах проживало 74,8 % населения России, или 109,3 млн человек. Только за 10 лет (2010–2020 гг.) число городских жителей увеличилось в России на 3,4 млн человек. В промышленных регионах РФ (Свердловская, Кемеровская, Челябинская области, республики, края и др.) доля горожан колеблется от 82,6 до 86,5 %, что выше, чем в странах Евросоюза – Германии 76,9 %, Италии – 70,5 % [3, 4].

Под «наводнением» следует понимать временное затопление территорий, освоенных человеком для различных целей, вызывающее отрицательные последствия пагубного характера. В России ежегодно затопливается до 50 тыс. км<sup>2</sup> территории, а прямой экономический ущерб составляет около 50 млрд руб. Для хорошо известных паводкоопасных рек разработаны зоны затопления обеспеченности  $p=10$  %,  $p=5$  %,  $p=1$  %, однако эти сведения должны ежегодно уточняться, т.е. не реже одного раза в 5 лет. Установлено, что эффективным способом уменьшения ущерба от наводнений является создание крупных водохранилищ ( $W > 1$  млн м<sup>3</sup>). В России в настоящее время действует 2650 таких водохранилищ, общий полезный объем которых составляет 342 млрд м<sup>3</sup>. Из них 90 % приходится на объекты с объемом  $W_{нпу} > 10$  млн м<sup>3</sup>. На малых реках нашей страны используется более 50 тыс. прудов ( $W_{нпу} \leq 1,0$  млн м<sup>3</sup>). Для Российской Федерации характерно старение водохозяйственного комплекса и уменьшение эксплуатационной способности гидротехнических сооружений, особенно сооружений инженерной защиты (низконапорных земляных дамб – суммарной протяженностью около 14 тыс. км) [5–7].

Варнавинское водохранилище расположено на левом берегу пойменной террасы реки Кубань, ограниченной на юге надпойменной террасой и на севере системой речных гряд, территории бывшей Абино-Северской группы лиманов этой поймы, объединяющей устья рек Абин, Адагум с притоками рек Куафо, Шибс (Вторая), Шибик. Местоположение створа гидротехнических сооружений находится в 10 км от русла реки Кубань. Водосборная площадь Варнавинского водохранилища составляет 949,2 км<sup>2</sup>.

В настоящее время пойменные террасы заняты различными гидротехническими сооружениями мелиоративного назначения. Оросительные каналы и водосброс Варнавинского водохранилища проложены по насыпям высотой от 1–1,5 до 3–3,5 м. Большая часть водосброса окружена дорогами, также на насыпях высотой 1–1,5 м. Высота поверхности изменяется в пределах 6,0–7,0 м на границе надпойменной террасы, 3,7–4,0 м в самой низкой точке и 5,0–6,0 м на гребне набережной реки Кубань. Высота паводка колеблется от 5,0 до 6,0 м на востоке и от 1,3 до 2,6 м на западе. Рельеф в нижнем бьефе плотины изменяется от 4,5–5,0 до 6,5–7,0 м. Поверхность поймы имеет слабый уклон на запад (0,0001–0,00015). На берегу Варнавинского водохранилища принимаются стоки рек Абин и Адагум с их притоками, которые не имеют водохранилищ на своем пути. Густота речной сети в этом районе варьирует от 0,16 до 0,82 км/км<sup>2</sup>, а уклоны колеблются от 3,0 до 5,8 ‰. Также осуществляется регулируемый пропуск стока рек, впадающих в соседнее водохранилище, бассейн водохранилища составляет площадь 1340 км<sup>2</sup>. Средняя высота площадей водосбора находится в диапазоне от 275 до 465 м. Максимальный среднесуточный расход воды в июле 2022 г. составил 2150 м<sup>3</sup>/с. Сбросные воды и сток из Главного Афипского коллектора отводятся через Варнавинский сбросной канал в реку Кубань у станции Варениковской [8–10].

Цель исследований – выполнение оценки технического состояния инженерной защиты сооружений Варнавинского водохранилища с применением приборов неразрушающего контроля.

## Основная часть

Было необходимо выполнить изучение инженерно-геологических и гидрогеологических условий территории, прилегающей к Варнавинскому водохранилищу. Основой для составления отчета проведенных исследований послужили материалы проработок прошлых лет, полевые исследования, лабораторные и камеральные работы [11].

Основание земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища состоит из лиманно-аллювиальных отложений верхнего неоплейстоцен-голоценового возраста. Грунт основания земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища неоднороден по плотности отсыпки, изменяющейся при естественной влажности от 1,55 до 2,06 т/м<sup>3</sup>, пористость и угол внутреннего трения также варьируются от 36 до 58 % и от 11 до 23° соответственно. Плотность сухого грунта основания земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища (объемный вес скелета грунта) варьирует от 1,16 до 1,75 т/м<sup>3</sup>. Набухающие свойства грунта основания земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища проявляются в некоторых участках, где есть заторфованные глины, а величина свободного набухания меняется от 0,06 до 0,16 д.е. (от слабонабухающих до сильнонабухающих), среднее значение  $E_{sw} = 0,05$  д.е. Компрессионный модуль деформации грунта основания земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища при водонасыщении изменяется от 1,43 до 3,94 МПа. Модуль осадки при нагрузке 0,3 МПа колеблется от 19,2 до 128,46 мм/м, вследствие чего характеристика сжимаемости меняется от средней до сильной [2, 12, 13].

Физико-механические характеристики указывают на неравномерное уплотнение грунта основания земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища. Не наблюдается определенной закономерности в степени уплотнения грунта от основания до поверхности низконапорной дамбы. Для сокращения ущерба от наводнений необходимо использовать передовые технологии предпаводкового обследования сооружений в бассейнах рек, включающих в себя современные передвижные комплексы геофизического, геодезического и гидрологического оборудования, а также высококвалифицированных специалистов, способных оценить состояние сооружения и его основания, разработать гидродинамические модели для анализа поведения паводков в бассейне реки. Подготовка к весенним половодьям должна начинаться заблаговременно с осени предшествующего года. Каждый субъект Российской Федерации, имеющий угрозу наводнений в речных бассейнах, должен иметь свои региональные программы по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений (ГТС), закрепленные положением Федерального закона ФЗ № 117 «О безопасности гидротехнических сооружений» от 1997 г., которому уже более 25 лет [14–16]. Безопасность должна обеспечиваться не только федеральными источниками финансирования, но и региональными ресурсами.

Сооружения инженерной защиты могут выполнять свои функции только при паводках  $p \geq 1$  %. Если же обеспеченность будет менее  $p < 1$  %, то произойдет их разрушение. На территориях, подверженных периодическим затоплениям, должны жестко ограничиваться отдельные виды хозяйственной деятельности.

Исследование с помощью приборов неразрушающего контроля выполнялось в различные временные периоды, осуществлялось инструментальное обследование железобетонной облицовки Варнавинского водохранилища на аварийных участках дамбы обвалования длиной более 15 км георадаром «Око-3». Также произведены геодезические работы по определению вертикальности несущих конструкций оросительно-сбросной насосной

станции № 11. При проведении анализа использовались следующие приборы неразрушающего контроля [13, 17, 18]: «Пульсар-2.2», «Поиск-М», электронный тахеометр Sokkia CX-105 и Nokta Invenio Smart.

Оценка остаточной прочности бетонных конструкций гидротехнических сооружений насосной станции № 11 осуществлялась путем мониторинга в эксплуатационных условиях, а именно поверхностным профилированием как обследуемых железобетонных элементов, так и земляной низконапорной дамбы. В процессе инструментального обследования учитывалось наличие аварийных дефектов и повреждений как железобетонной облицовки дамбы, так и грунтового основания:

- деформация несущих элементов или всей конструкций сооружения;
- отклонение от вертикальной и горизонтальной привязки элементов конструкции;
- оползневые процессы на низконапорной дамбе обвалования;
- механические повреждения, образование пустот и разуплотнений, трещин различного характера;
- коррозионное разрушение бетона и металлических конструкций;
- повреждения каменных и армокаменных конструкций.

В ходе инструментального исследования было определено местонахождение арматуры железобетонной конструкции, включая расстояние между ними, диаметр и размер защитного слоя бетона. Визуальный осмотр выявил аварийные дефекты и повреждения в конструкции сооружения, были подготовлены необходимые рабочие чертежи. Полученные данные были обработаны для трехмерной визуализации исследуемых параметров окружающей среды и характеристик волнового поля. Грунтовое основание земляной низконапорной дамбы также было исследовано с помощью высокочастотного детектора Nokta Invenio Smart, и была создана 3D-модель, показывающая скрытые пустоты и геометрию неконсолидированного грунта. Методика обследования также включала изучение строительной конструкции гидротехнического сооружения в полном соответствии с действующими нормативными документами [19–23].

Инструментальный контроль проводится различными неразрушающими методами, а именно ультразвуковым методом для определения скрытых дефектов и повреждений сооружений, таких как размеры трещин и различных разуплотнений в теле грунтового основания земляной низконапорной дамбы. Использовалась технология искусственного интеллекта, способная формировать 3D-изображения пустот и разуплотнений грунтового основания низконапорной дамбы.

Во время первоначального визуального обследования местоположения сооружений Варнавинского водохранилища устанавливались видимые дефекты и повреждения, производились контрольные измерения, зарисовки и фотофиксация дефектных участков на цифровую камеру. Также разрабатывались соответствующие рабочие схемы для планирования последующих этапов исследования сооружений (рис. 1).

В ходе визуального обследования здания насосной станции № 11 установлено, что фундамент выполнен в виде монолитной железобетонной плиты, который можно охарактеризовать как фундамент мелкого заложения. Гидроизоляция фундаментной плиты первой секции выполнена оклеечной с использованием рулонного рубероида, гидроизоляция фундаментной плиты второй секции устроена битумной мастикой. Для определения конструкции фундамента устроено 2 шурфа в месте разделения секций деформационным швом и с торца здания насосной станции № 11. Установлено, что на стыке секций фунда-

мент насосной станции № 11 состоит из железобетонной плиты высотой 740 мм и ленточного фундамента высотой 1400 мм. Под фундаментной плитой была обнаружена бетонная лента высотой 510 мм, назначение которой не установлено. Также с помощью прибора «Поиск-М» был определен шаг армирования и величина защитного слоя бетона фундаментной плиты, составляющая 47 мм. Шаг вертикальных и горизонтальных стержней в верхнем поясе равен 200×200 мм. В целом плитный фундамент здания полностью соответствует проекту (табл. 1).



Рис. 1. Низконапорная дамба Варнавинского водохранилища

Fig. 1. Low-head dam of the Varnavinskoye reservoir

Таблица 1

Фрагмент данных о прочности железобетонной фундаментной плиты плит здания оросительно-сбросной насосной станции № 11 (результаты получены согласно показаниям прибора «Поиск-М»)

Table 1

A fragment of data on the strength of the reinforced concrete foundation slab of the building of the irrigation and discharge pumping station No. 11 (the results were obtained according to the readings of the Poisk-M device)

№ п/п	Средняя прочность бетона на сжатие по результатам испытаний $R_k$ , МПа (по 6 замерам)	Коэффициент вариации $W$ , %	Коэффициент требуемой прочности, $K_T$	Класс бетона, В
1	32,5	8,5	1,21	24
2	33,7	8,4	1,22	25
3	31,4	8,8	1,19	24
4	32,8	8,3	1,18	24
5	33,1	8,1	1,21	25
6	32,8	8,4	1,21	24
7	32,1	8,2	1,22	24
8	33,2	8,3	1,20	25
9	33,4	8,4	1,19	25
10	32,2	8,5	1,18	24

В ходе визуального обследования установлено, что стены зданий насосной станции № 11 монолитные, железобетонные, являются несущими. Толщина конструкций составляет 200 мм.

Проведена проверка армирования, в результате которой выявлено, что арматурный каркас насосной станции № 11 состоит из горизонтальных и вертикальных стержней класса А-III. Шаг стержней горизонтальной арматуры составляет порядка 300 мм, диаметр стержней – 12 мм. Шаг стержней вертикальной арматуры составляет 320 мм, диаметр – 16 мм. Шаг хомутов в местах пересечения стен равен 130 мм. Толщина защитного слоя бетона составляет 15 мм.

В результате визуального обследования стен здания оросительно-сбросной насосной станции № 11 обнаружены дефекты и повреждения:

- каверны и пустоты в теле бетона;
- трещины;
- разрушение защитного слоя бетона;
- образование грибковой плесени;
- устройство холодного шва (перерывы в бетонировании отдельных конструкций).

В ходе проверки армирования данных конструкций насосной станции № 11 установлено, что использовались арматурные стержни класса А-III. Верхний пояс армирован стержнями диаметром 12 мм с горизонтальным шагом 260 мм и вертикальным шагом 310 мм (результаты получены согласно показаниям прибора «Поиск-М»). Нижний пояс перекрытия насосной станции № 11 армирован сеткой стержней диаметра 10 мм с шагом 150×150 мм (табл. 2). Величина защитного слоя бетона плиты перекрытия насосной станции № 11 в верхней зоне составляет порядка 40 мм, в нижней зоне 17 мм.

Таблица 2

Фрагмент данных о прочности железобетонных плит облицовки низконапорной дамбы (результаты получены согласно показаниям прибора «Поиск-М»)

Table 2

A fragment of data on the strength of reinforced concrete slabs facing a low-pressure dam (results obtained according to the readings of the Poisk-M device)

№ п/п	Средняя прочность бетона на сжатие по результатам испытаний $R_k$ , МПа (по 6 замерам)	Коэффициент вариации $W$ , %	Коэффициент требуемой прочности, $K_T$	Класс бетона, В
1	24,5	7,6	1,17	21
2	23,5	8,2	1,14	20
3	24,3	8,7	1,15	20
4	24,6	8,7	1,17	21
5	23,8	7,9	1,16	20
6	23,3	8,5	1,17	20
7	23,7	8,3	1,15	21
8	24,7	8,7	1,16	20
9	24,1	8,5	1,17	20
10	24,4	8,4	1,15	21

В ходе проведения работ было выполнено исследование железобетонной облицовки Варнавинского водохранилища на проблемных участках длиной более 15 км георадаром «Око-3» (рис. 2).

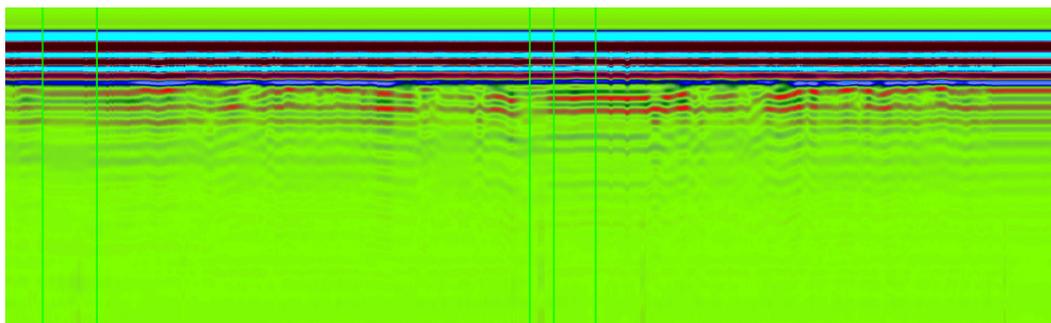


Рис. 2. Фрагмент профиля георадарного зондирования инженерной защиты Варнавинского водохранилища георадаром «Око-3»

Fig. 2. Fragment of the profile of ground penetrating radar sounding of the engineering protection of the Varnavinskoye reservoir using the Oко-3 ground penetrating radar

Было исследовано грунтовое основание земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища, на фрагменте радарограммы приведены зоны геометрической привязки образования оползневых процессов на низконапорной дамбе, а именно смещения грунтового основания, образовавшиеся в результате длительной эксплуатации. Во время аварии происходил сброс воды из-за паводковых вод. Вдоль земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища, на расстоянии около 10 м от основания, произошел выпор грунта на протяжении 230 м. По характеру консистенции, цвета и запаха грунта можно сделать вывод, что это иловые грунты, выброшенные из-под основания земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища. Параметры земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища соответствуют проектным. При настоящем обследовании оползневых явлений, сосредоточенных выходов фильтрационных вод на низовом откосе не обнаружено. Низовой откос не залужен, выявлены дождевые промоины и зарастание откоса кустарниковой растительностью. Нарушений конструкций горизонтального дренажа не выявлено. В целом состояние земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища удовлетворительное.

Типы грунтов основания земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища включают в себя глины плотные, суглинки тяжелые и глины иловатые. Тело дамбы состоит из местных глин и суглинков с плотностью до  $1,90 \text{ т/м}^3$ . Для крепления откосов и заложения дамбы использовались монолитные железобетонные плиты и посев трав. Пригрузку обеспечивает грунтовый банкет шириной 4,0 м из растительного грунта.

Параллельно проводилось исследование земляной низконапорной дамбы высокочастотным обнаружителем. Используя функции геосканера, в реальном времени происходит построение 3D-модели разуплотнений с геометрическими характеристиками, где можно дать оценку плотности грунта уже в самом разуплотнении, т.е. выделить зону с наиболее неплотным грунтом (рис. 3).

На рис. 4 представлена построенная 3D-модель грунтового разуплотнения с наиболее неплотным грунтовым основанием земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища.

Реконструкция земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища на этом участке включала в себя уширение и поднятие ее гребня. Проведенные работы увеличили нагрузку на грунтовые основания дамбы, что увеличило риск возникновения чрезвычайной ситуации. Примыкающие к плотине пруды со стороны сухого склона также имели высокий уровень воды, близкий к максимальному [13, 14].

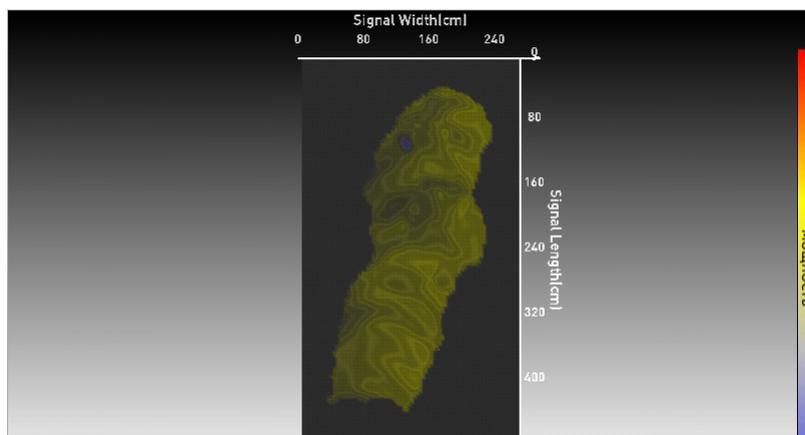


Рис. 3. Фрагмент 3D-модели разуплотнения грунтового основания инженерной защиты Варнавинского водохранилища высокочастотным обнаружителем Nokta Invenio Smart

Fig. 3. Fragment of a 3D model of loosening of the soil base of the engineering protection of the Varnavinskoye reservoir using a high-frequency detector Nokta Invenio Smart

Результаты исследования подтвердили, что железобетонная плита насосной станции № 11 потеряла процент армирования до 12%, так как коррозионные процессы источили арматурные стержни за длительный период эксплуатации. При контроле армирования конструкции инструментальным методом было установлено, что конструкция армирована арматурой класса А-III. Верхний пояс построен из арматурных стержней диаметром 14 мм, с шагом по горизонтали и вертикали 310 мм (результаты основаны на измерениях неразрушающим тестером «Пульсар-2.2»). Нижний пояс плиты насосной станции № 11 состоит из сетки прутков диаметром 12 мм с шагом 175×175 мм. Величина защитного слоя бетона плиты перекрытия оросительно-сбросной насосной станции № 11 составляет 50 мм в верхнем и 17 мм в нижнем поясе.

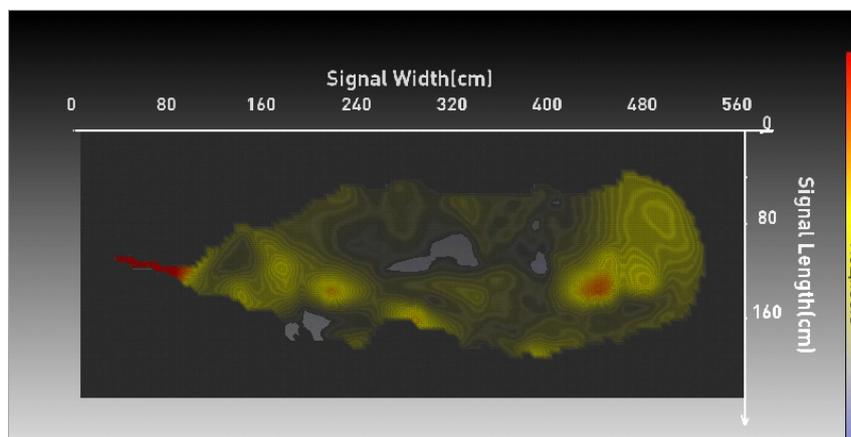


Рис. 4. Фрагмент 3D-модели грунтового разуплотнения с наиболее неплотным грунтовым основанием инженерной защиты Варнавинского водохранилища, выявленного высокочастотным обнаружителем Nokta Invenio Smart

Fig. 4. Fragment of a 3D model of soil loosening with the least dense soil base of the engineering protection of the Varnavinskoye reservoir, detected by a high-frequency detector Nokta Invenio Smart

Оценка соответствия фактических параметров насосной станции № 11: соответствует не всем требованиям проекта, определяющимся рассмотрением следующих показателей [16, 17]:

- конструктивных и компоновочных решений сооружений насосной станции № 11 – соответствуют;
- геометрических размеров элементов сооружений насосной станции № 11 – топо съемка оградительных дамб по всей длине за период эксплуатации производилась в неполном объеме, соответствие отметок их гребня и очертаний откосов проектным величинам не определено;
- конструкций противофильтрационных и дренажных устройств – соответствуют;
- типов волновых креплений и гасителей энергии водотоков – соответствуют;
- физико-механические и расчетные характеристики материалов сооружений: по бетону – не определялись, грунты – уточнения характеристик, выполненные еще в 2013 г., показали необходимость усиления устойчивости сооружения.

## **Заключение**

Исследования показали, что железобетонные конструкции и грунтовое основание земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища в целом находятся в удовлетворительном состоянии и выполняют свои функции. Примененный аппаратно-методический комплекс позволил решить выявленные трудности. Преимуществом комплекса является его методическая мобильность. После проведения краткосрочных экспериментально-методических работ и оперативной обработки сочетание возможностей аппаратного комплекса с инженерно-геологической обстановкой позволяет достичь максимального качества в минимальные сроки и при минимальных затратах.

Результаты исследования земляной низконапорной дамбы Варнавинского водохранилища подтвердили эффективность, результативность и информативность геофизических методов, применяемых при относительно небольших затратах. Проведены инструментальные исследования прочностных характеристик бетона и грунтов основания низконапорной земляной дамбы. Прочность бетона оценивалась комбинированным методом, который можно проводить в любых условиях, не прерывая работу водохранилища, поскольку он является дистанционным и неразрушающим.

Для анализа характеристик грунта в физико-механическом плане необходимы дополнительные работы с использованием эталонных скважин для бурения и корреляции параметров.

В заключение следует отметить, что выявленные трудности успешно решены с помощью описанного комбинированного геофизического метода, и основной проблемой является составление и его адаптация под конкретный объект. Исследования земляной низконапорной дамбы должны проводиться в режиме мониторинга при различных уровнях воды в водохранилище.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кубанского научного фонда (грант № 24-26-20003).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## **Библиографический список**

1. 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

2. Критический анализ инженерной защиты Нижней Кубани в условиях возрастающего дефицита оросительной воды из-за климатических изменений / И.А. Приходько, М.А. Бандурин, В.А. Волосухин, А.А. Руденко // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12, № 4. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-317-332
3. Колосов, М.А. Инженерная защита от экстремальных дождевых паводков на реках Черноморского побережья и Северного Кавказа / М.А. Колосов, Н.В. Селезнева // Речной транспорт (XXI век). – 2019. – № 2(90). – С. 33–36.
4. Мониторинг объектов инженерной защиты на имеретинской низменности / А.Д. Потапов, М.Е. Лейбман, А.А. Лаврусевич [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2012. – № 5. – С. 406–413.
5. Погорелов, А.В. Геоморфологические аспекты преобразования крупного равнинного водохранилища (по данным измерений на Краснодарском водохранилище) / А.В. Погорелов, А.А. Лагута, М.В. Кузякина // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 536–551. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-2-28-536-551
6. Особенности эксплуатации системы мониторинга инженерных конструкций мостового сооружения через реку Пур в Ямало-Ненецком автономном округе / И.А. Аганов, Г.В. Осадчий, Д.В. Ефанов [и др.] // Мир дорог. – 2021. – № 142. – С. 132–135.
7. Курбанов, С.О. Проблемы инженерной защиты и природоохранного обустройства прибрежных урбанизированных зон малых рек на Юге России / С.О. Курбанов, А.А. Созаев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 118. – С. 916–936.
8. Колосов, М.А. Инженерная защита от дождевых паводков на горных реках / М.А. Колосов, Н.В. Селезнева // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 3. – С. 6–13.
9. Чуркин, А.А. Контроль качества «стен в грунте» геофизическими методами / А.А. Чуркин, И.Н. Лозовский // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 49–61. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.05
10. Абдразаков, Ф.К. Обследование гидротехнических сооружений Ахмато-Лавровского водохранилища Краснокутского муниципального района Саратовской области при оценке их безопасности / Ф.К. Абдразаков, О.В. Михеева // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 7. – С. 74–78. DOI: 10.28983/asj.y2021i7pp74-78
11. Перминов, Н.А. Моделирование и мониторинг конструкционной безопасности уникальных подземных сооружений системы водоотведения крупных городов в сложных грунтовых условиях / Н.А. Перминов // Construction and Geotechnics. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 30–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03
12. Оценка устойчивости нагруженного склона в сложных инженерно-геологических условиях / А.Н. Богомолов, В.Г. Офрихтер, А.В. Редин [и др.] // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 4. – С. 70–85. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.06
13. Тлявлин, Р.М. Оценка технического состояния волногасящих сооружений инженерной защиты земляного полотна от волнового воздействия / Р.М. Тлявлин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 198–209. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209
14. Дьяченко, К.Н. Причины образования дефектов в дамбах обвалования при их эксплуатации в условиях Дальнего Востока / К.Н. Дьяченко, А.В. Зверев // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2017. – № 6. – С. 96–105.

15. Бандурин, М.А. Автоматизация мониторинга ливнеотводящих сооружений на водопроводящих каналах Ставропольского края / М.А. Бандурин, И.П. Бандурина // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2-1(35). – С. 37.

16. Крылова, Н.Н. Восстановление пропускной способности русел степных балок / Н.Н. Крылова, А.Е. Хаджиди, К.В. Яценко // Научное обеспечение агропромышленного комплекса, Краснодар, 26–28 ноября 2012 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2012. – С. 400–402.

17. Михайлова, Т.В. Организация мониторинга безопасности грунтовых дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий / Т.В. Михайлова // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2019. – № 4. – С. 67–78. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.12.4.007

18. Бандурин, М.А. Проблемы определения остаточного ресурса технического состояния закрытых водосбросов низконапорных гидроузлов / М.А. Бандурин // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 1(28). – С. 69.

19. Чечельницкий, А.И. Диагностика инженерных сооружений и земляного полотна / А.И. Чечельницкий // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 4. – С. 4–6.

20. Арефьев, Н.В. Оптимизация инженерной защиты земель при создании водохранилищ с помощью дамб обвалования / Н.В. Арефьев, Е.Н. Беллендир, Т.С. Иванов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2011. – Т. 261. – С. 99–103.

21. Мониторинг состояния дамбы хвостохранилища намывного типа / О.Г. Бесимбаева, Е.Н. Хмырова, А.В. Логинов, Е.А. Олейникова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 125–129.

22. Патент № 2552949 С1 Российская Федерация, МПК E02B 3/04, E02B 3/02. Способ охраны береговых ландшафтов рек от подтоплений: № 2014113070/13: заявл. 03.04.2014; опубл. 10.06.2015 / Е.В. Кузнецов, А.Е. Хаджиди, Х.И. Килиди, А.Н. Куртнезиров; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.

23. Мониторинг состояния оградящей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / А.А. Данилкин, А.И. Калашник, Д.В. Запорожец, Д.А. Максимов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 7. – С. 344–351.

## References

1. Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Rudenko A.A. Monitoring assessment of the low-pressure earthen dam of the Varnavinsky reservoir under conditions of an increasing risk of natural and man-made disasters. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 4, pp. 17-29. DOI 10.15593/2224-9826/2022.4.02.

2. Prikhodko I.A., Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Rudenko A.A. Critical analysis of engineering protection of the Lower Kuban under conditions of increasing deficit of irrigation water due to climate change. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, 2022, vol. 12, no. 4. DOI 10.31774/2712-9357-2022-12-4-317-332.

3. Kolosov M.A., Selezneva N.V. Engineering protection against extreme rainfall floods on the rivers of the Black Sea coast and the North Caucasus. *Rechnoi transport (XXI vek)*, 2019, no. 2(90). pp. 33-36.

4. Potapov A.D., Leibman M.E., Lavrusevich A.A. [et al.]. Monitoring of engineering protection facilities in the Imereti Lowlands. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2012, no. 5, pp. 406-413.

5. Pogorelov A.V., Laguta A.A., Kuzyakina M.V. Geomorphological aspects of transformation of a large plain water reservoir (based on measurements at the Krasnodar water storage site). *InterKarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 536-551. DOI 10.35595/2414-9179-2022-2-28-536-551.

6. Aganov I.A., Osadchii G.V., Efanov D.V. [et al.]. Features of operation of the monitoring system for engineering structures of the bridge over the Pur River in the Yamalo-Nenets Autonomous District. *Mir dorog*, 2021, no. 142, pp. 132-135.

7. Kurbanov S.O., Sozaev A.A. Problems of engineering protection and environmental management of coastal urbanized zones of small rivers in the South of Russia. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2016, no. 118, pp. 916-936.

8. Kolosov M.A., Selezneva N.V. Engineering protection against rainfall floods on mountain rivers. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2020, no. 3, pp. 6-13.

9. Churkin A.A., Lozovskii I.N. Quality assurance of diaphragm and pile walls by geophysics. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 2, pp. 49-61. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.05.

10. Abdrazakov F.K., Mikheeva O.V. Survey of hydraulic structures of the Akhmatovskoye water reservoir of Krasnokutsk municipal district of Saratov region in assessing their safety. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal*, 2021, no. 7, pp. 74-78. DOI 10.28983/asj.y2021i7pp74-78.

11. Perminov N.A. Modelling and monitoring of structural safety of unique underground structures of the sewage system of large cities in difficult ground conditions. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 1, pp. 30-45. DOI 10.15593/2224-9826/2021.1.03.

12. Bogomolov A.N., Ofrikhter V.G., Redin A.V., Bogomolova O.A., Bogomolov S.A. Assessment of the stability of a loaded slope in complex engineering and geological conditions. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 4, pp. 70-85. DOI 10.15593/2224-9826/2022.4.06.

13. Tlyavlin R.M. Assessment of the technical condition of wave-absorbing structures of engineering protection of the earth bed against wave action. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 198-209. DOI 10.20295/1815-588X-2020-2-198-209.

14. D'yachenko K.N., Zverev A.V. Causes of defects formation in embankment dams during their operation under conditions of the Far East. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2017, no. 6, pp. 96-105.

15. Bandurina M.A., Bandurina I.P. Automation of monitoring of stormwater drainage structures on water supply canals in Stavropol Krai. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2015, no. 2-1(35), p. 37.

16. Krylova N.N., Khadzhibi A.E., Yashchenko K.V. Restoration of carrying capacity of steppe gully channels. *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa, Krasnodar, 26–28 noyabrya 2012 goda*. Krasnodar, Kubanskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2012, pp. 400-402.

17. Mikhailova T.V. Organization of monitoring of safety of ground dams of liquid waste accumulators of mining enterprises. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti*, 2019, no. 4, pp. 67-78. DOI 10.25558/VOSTNII.2019.12.4.007.

18. Bandurin M.A. Problems of determining the residual service life of the technical condition of closed spillways of low-pressure hydroschemes. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2014, no. 1(28), pp. 69.
19. Chechel'nitskii A.I. Diagnostics of engineering structures and the earth bed. *Put' i putevoe khozyaistvo*, 2023, no. 4, pp. 4-6.
20. Aref'ev N.V., Bellendir E.N., Ivanov T.S. Optimization of engineering protection of lands at creation of reservoirs by means of embankment dams. *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*, 2011, vol. 261, pp. 99-103.
21. Besimbaeva O.G., Khmyrova E.N., Loginov A.V., Oleinikova E.A. Monitoring of the condition of the reclamation tailings dam. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 125-129.
22. Kuznetsov E.V., Khadzhide A.E., Kilidi K.H.I., Kurtnezirov A.N. A way to protect riverbank landscapes from waterlogging. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2552949 C1 (2014).
23. Danilkin A.A., Kalashnik A.I., Zaporozhets D.V., Maksimov D.A. Monitoring of the condition of the barrier dam in the mining zone of the technogenic deposit at Kovdorskiy GOK. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2014, no. 7, pp. 344-351.