

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.514(470.620)

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-220-236

**Диагностика с помощью приборов неразрушающего контроля
железобетонной облицовки и грунтового основания для оценки
технического состояния дамбы Крюковского водохранилища**

**Михаил Александрович Бандурин¹, Игорь Александрович Приходько²,
Виктор Алексеевич Волосухин³, Артем Анатольевич Руденко⁴**

^{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>

²prihodkoigor2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4855-0434>

³director@ibgts.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9029-7802>

⁴away704@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8724-6980>

Аннотация. Цель: проведение диагностики с помощью приборов неразрушающего контроля железобетонной облицовки и грунтового основания дамбы Крюковского водохранилища для оценки ее технического состояния. **Материалы и методы.** Материалами к исследованию послужили данные визуального обследования Крюковского водохранилища, были выделены опасные участки, где проведен инструментальный контроль неразрушающими методами. В дальнейшем опасные участки обследовались детально на предмет наличия дефектов и повреждений. В ходе проведения исследования было выполнено инструментальное обследование железобетонной облицовки Крюковского водохранилища на проблемных участках длиной 12 км георадаром «Око-3». При обработке полученных данных имеется возможность трехмерной визуализации параметров исследуемой среды и атрибутов волнового поля. Одновременно обследованию подвергалось грунтовое основание дамбы высокочастотным обнаружителем Nokta Invenio Smart, в реальном времени при использовании функции геосканера происходит построение трехмерной модели исследуемого участка грунтового основания с отображением геометрических характеристик скрытых полостей и разуплотнений грунта. **Результаты.** Проведена диагностика технического состояния железобетонной облицовки и грунтового основания дамбы Крюковского водохранилища. Были обследованы примыкания земляных сооружений к бетонным, состояние температурно-осадочных швов бетонных и железобетонных сооружений, способных повлиять на устойчивость. Получены радарограммы мест нахождения просадок грунтового основания, образовавшихся в результате аварии и ликвидированных в процессе реконструкции дамбы. **Выводы.** На основании проведенных исследований установлено, что железобетонная облицовка дамбы водохранилища находится в целом в удовлетворительном состоянии и отвечает своему функциональному назначению. Диагностика основания дамбы показала необходимость усиления устойчивости сооружения.

Ключевые слова: дамба обвалования, водохранилище, надежность, техническое состояние, неразрушающие методы контроля, георадар, высокочастотный обнаружитель

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Кубанского научного фонда № 22-17-20001.

Для цитирования: Диагностика с помощью приборов неразрушающего контроля железобетонной облицовки и грунтового основания для оценки технического состояния

дамбы Крюковского водохранилища / М. А. Бандурин, И. А. Приходько, В. А. Волосухин, А. А. Руденко // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 220–236.
<https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-220-236>.

HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

Diagnostics using non-destructive testing devices for reinforced concrete lining and soil foundation to assess the technical condition of the dam of the Kryukovskoe reservoir

**Mikhail A. Bandurin¹, Igor A. Prihodko², Viktor A. Volosukhin³,
Artem A. Rudenko⁴**

^{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>

²prihodkoigor2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4855-0434>

³director@ibgts.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9029-7802>

⁴away704@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8724-6980>

Abstract. Purpose: to perform diagnostics using non-destructive testing devices for reinforced concrete lining and soil foundation of the Kryukovskoe reservoir dam for its technical condition assessment. **Materials and methods.** The materials for the study were the data of a visual survey of the Kryukovskoe reservoir, the hazardous areas, where the instrumental control by non-destructive methods was performed, were identified. Later the hazardous areas were examined in detail for the presence of defects and damage. In the course of research, an instrumental survey of the reinforced concrete lining of the Kryukovskoe reservoir was carried out in problem areas 12 km long by the Oke-3 georadar. When processing the obtained data, there is a possibility of three-dimensional visualization of the parameters of the medium under study and the attributes of the wave field. At the same time, the soil foundation of the dam was surveyed by a high-frequency detector Nokta Invenio Smart, in real time using the functions of a geoscanner, a three-dimensional model of the studied section of the soil foundation is modelled, displaying the geometric characteristics of hidden cavities and soil softening. **Results.** Diagnostics of the technical condition of the reinforced concrete lining and soil foundation of the dam of the Kryukovskoe reservoir was performed. The abutments of earthen structures to concrete ones, the state of temperature-settlement joints of concrete and reinforced concrete structures that could affect stability were examined. Radargrams of soil foundation subsidence locations, formed as a result of the accident and removed during the dam reconstruction, were obtained. **Conclusions.** On the basis of the conducted studies it was defined that the reinforced concrete lining of the reservoir dam is, in general, in a satisfactory condition and serves its functional purpose. Diagnostics of the dam foundation showed the need to strengthen the stability of the structure.

Key words: flood wall, reservoir, reliability, technical condition, non-destructive control methods, georadar, high-frequency detector

Funding: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation № 22-17-20001.

For citation: Bandurin M. A., Prihodko I. A., Volosukhin V. A., Rudenko A. A. Diagnostics using non-destructive testing devices for reinforced concrete lining and soil foundation to assess the technical condition of the dam of the Kryukovskoe reservoir. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):220–236. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-220-236>.

Введение. Крюковское водохранилище располагается в левобережной пойме нижнего течения р. Кубани, в восточной части Закубанского массива, на территории бывшего Крюковского лимана, лежит в пределах левобережной пойменной террасы р. Кубани.

Варнавинское и Крюковское водохранилища работают совместно при регулировании паводков Закубанских рек. Крюковское водохранилище соединено с Варнавинским водохранилищем Крюковским сбросным каналом, по которому производится сброс в Варнавинское водохранилище избытка стока рек, впадающих в Крюковское водохранилище. Избыточный сток воды после перерегулирования Варнавинским водохранилищем сбрасывается в р. Кубань по Варнавинскому сбросному каналу [1].

Крюковское водохранилище аккумулирует сток восьми рек и ручьев, из которых пять впадают непосредственно в водохранилище (р. Песчанка, Иль, Дубровина, Бугай и Эйбза), а сток р. Ахтырь, Бугундырь и Хабль, стекающих на земли западнее Крюковского водохранилища, перехватывается искусственным нагорным каналом и направляется в водохранилище [2]. Площадь водосбора Крюковского водохранилища составляет 966 км². Густота речной сети этой зоны колеблется в пределах 0,41–1,28 км/км², уклоны 0,89–7,5 ‰, высота бассейна 46–260 м.

Максимальный наблюдаемый расход, близкий к расчетному, за время эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) Крюковского водохранилища был зафиксирован 25.12.2001 – 97 м³/с. Выше створа ГТС водохранилищем принимается группа рек, которые не имеют в своем течении водохранилищ. Ниже створа ГТС отсутствует речной водный объект, а имеется Крюковский сбросной канал с характеристиками [3]:

- назначение – регулируемый пропуск в Варнавинское водохранилище избытка стока группы рек, впадающих в Крюковское водохранилище;
- расчетный расход – 75 м³/с;
- длина канала – 22,5 км;

- поперечное сечение – в полувыемке-полунасыпи;
- материал тела валов канала – из местных грунтов, глин и суглинков.

Также ниже створа имеется водораспределительная сеть оросительной системы, главный Афипский коллектор (тип – сбросной, длина – 101 км, пропускная способность 12–25 м³/с) с НС № 2 в конце, которая перекачивает воды системы в Варнавинский сбросной канал.

Цель исследований – проведение комплексной диагностики с помощью приборов неразрушающего контроля железобетонной облицовки и грунтового основания дамбы Крюковского водохранилища для оценки ее технического состояния.

Территория Закубанских плавней сложена в основном породами четвертичного возраста. Коренные отложения третичного возраста имеют распространение за пределами южной части границ массива. Отложения четвертичного возраста подразделяются на ряд горизонтов, а именно современные – молодые аллювиальные образования, слагающие верхние горизонты пойменной террасы р. Кубани и аллювиально-аккумулятивной равнины. Древнеаллювиальные отложения залегают ниже современных. Первые представлены довольно пестрым литологическим составом: глинами, супесчаными и песчаными породами, а вторые в основном плотными глинами [4]. В основании дамбы водохранилища залегают лиманно-аллювиальные отложения верхнего неоплейстоцен-голоценового возраста. Грунт дамбы неоднороден по плотности отсыпки. Плотность грунта при естественной влажности изменяется от 1,55 до 2,06 т/м³, плотность сухого грунта (объемный вес скелета грунта) варьируется от 1,16 до 1,75 т/м³, пористость изменяется от 36 до 58 %, коэффициент пористости от 0,57 до 1,36 д. ед. Угол внутреннего трения грунта дамбы изменяется от 110 до 230°, соответственно сцепление – от 0,0233 до 0,0733 МПа.

Компрессионный модуль деформации определялся для наиболее худших условий (при водонасыщении) [5], значение его меняется от 1,43

до 3,94 МПа. Модуль осадки при нагрузке 0,3 МПа колеблется от 19,2 до 128,46 мм/м, и соответственно характеристика сжимаемости меняется от средней до сильной. В большей части грунт дамбы не обладает набухающими свойствами, лишь в пяти случаях значения давления набухания колеблются от 0,21 до 0,70 МПа, среднее значение данного давления $P_{sw} = 0,5$ МПа; величина свободного набухания грунта меняется от 0,06 до 0,16 д. ед. (от слабо- до сильнонабухающих), среднее значение $E_{sw} = 0,05$ д. ед. Набухающие свойства проявляются там, где в грунтах дамбы имеются линзы заторфованных глин ржаво-бурого цвета. Характеристики физико-механических свойств грунта дамбы водохранилища показывают [6], что уплотнение грунта различно, какой-либо закономерности в степени уплотнения грунта от подошвы тела дамбы к ее поверхности не наблюдается.

В качестве основных расчетных характеристик рекомендуются следующие (осредненные для дамбы в целом) нормативные значения [7]: естественная влажность $W = 26,4$ %; показатель текучести $IL < 0$; плотность при естественной влажности $\rho_h = 1,83$ т/м³; плотность сухого грунта $\rho_d = 1,45$ т/м³; удельный вес $\rho_s = 2,74$ т/м³; угол внутреннего трения $\varphi = 15^\circ$, удельное сцепление $C = 0,0425$ МПа; угол внутреннего трения $\varphi = 7^\circ$, удельное сцепление $C = 0,0081$ МПа; компрессионный модуль деформации при водонасыщении $E_c = 2,14$ МПа. Грунт характеризуется повышенной сжимаемостью (осредненный модуль осадки при нагрузке до 0,3 МПа – 59,97 мм/м).

Гидрогеологические условия. Грунты по содержанию сульфат-ионов среднеагрессивны к бетонам марки W4 на портландцементе и неагрессивны к бетонам на шлакопортландцементе и сульфатостойком цементе. По содержанию иона хлора грунты среднеагрессивны к бетонам марки W4 на портландцементе, шлакопортландцементе и сульфатостойком цементе. В толще четвертичных отложений вскрыт водоносный горизонт неоплейстоцен-голоценовых лиманно-аллювиальных отложений. Коэффици-

енты фильтрации отложений водоносного горизонта: пески от 3,2 м/сут, супеси с прослоями песка – от 3,18 м/сут, суглинки тяжелые – от 0,054 до 0,39 м/сут, глины – 0,089 м/сут.

Насыпные грунты дамбы водохранилища по фильтрационным свойствам близки к грунтам естественного сложения, для глин и суглинков частные значения коэффициента фильтрации колеблются от 0,003 до 1,32 м/сут, среднее геометрическое значение коэффициента фильтрации равно 0,078 м/сут, а пределы его изменения с вероятностью 85 % составляют 0,063–0,096 м/сут. Средние показатели: влажность $W_{cp} = 23,6 \%$, плотность $\rho_{cp} = 1,90 \text{ т/м}^3$, плотность сухого грунта $\rho_{d_{cp}} = 1,54 \text{ т/м}^3$, угол внутреннего трения $\varphi_n = 20^\circ$, сцепление $C_n = 0,0229 \text{ МПа}$, модуль деформации по лабораторным определениям – 4,51 МПа.

Материалы и методы. Материалами к исследованию послужили данные визуального обследования ГТС Крюковского водохранилища, полученные за 15-летний период эксплуатационного контроля, были выделены опасные участки, где выполнен инструментальный контроль неразрушающими методами. В ходе проведения исследования было выполнено обследование железобетонной облицовки Крюковского водохранилища на проблемных участках длиной 12 км георадаром «Око-3». При обработке полученных данных имеется возможность трехмерной визуализации параметров исследуемой среды и атрибутов волнового поля. Одновременно обследованию подвергалось грунтовое основание дамбы высокочастотным обнаружителем Nokta Invenio Smart, в реальном времени при использовании функции геосканера происходит построение трехмерной модели исследуемого участка грунтового основания с отображением геометрических характеристик скрытых полостей и разуплотнений грунта.

Методы исследований включали в себя обследование строительных конструкций ГТС строго в соответствии с действующими нормативными

документами [8–10]. Инструментальный контроль проводится различными неразрушающими методами, а именно ультразвуковым методом для определения размеров скрытых дефектов ГТС, таких как трещины и различные разуплотнения в теле грунтового основания дамбы. Использовалась технология искусственного интеллекта, способная формировать 3D-изображения пустот и разуплотнений грунтового основания дамбы.

Результаты и обсуждение. На Крюковском водохранилище в ночь с 29 на 30 марта 2017 г. произошла просадка водоограждающей дамбы на участке бывшей протоки, примыкающей к селу Михайловскому Северского района Краснодарского края. Протяженность просадки составила 300 м от ПК 45 + 00 до ПК 48 + 00. Деформации произошли в центральной части дамбы и распространились визуально от середины «мокрого» до середины «сухого» откоса. Максимальная просадка по гребню составила 2,5–4,0 м, при том что нижние части обоих откосов не претерпели существенной деформации. На участке максимальной просадки величина «сухого» запаса составила не менее 1,5 м при высоте волны в месте просадки 50–60 см.

По результатам обследования проблемных участков железобетонной облицовки Крюковского водохранилища георадаром «Око-3» (рисунок 1а) получены данные трехмерной визуализации параметров исследуемой среды и атрибутов волнового поля [11]. Также, используя функции геосканера (Nokta Invenio Smart), построили трехмерные модели обследуемого участка грунтового основания дамбы водохранилища с отображением геометрических характеристик скрытых полостей и разуплотнений грунта (рисунок 1б).

На фрагментах радарограммы, приведенных на рисунке 2, показаны места нахождения просадок грунтового основания, образовавшихся в результате аварии и ликвидированных в процессе реконструкции дамбы.



a



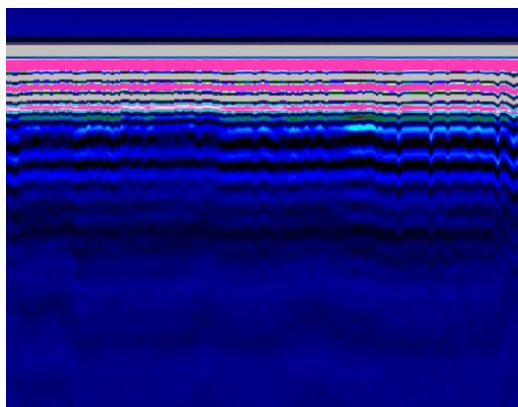
b

a – проведение обследования железобетонной облицовки дамбы георадаром «Око-3»;
b – проведение обследования грунтового основания дамбы высокочастотным обнаружителем Nokta Invenio Smart

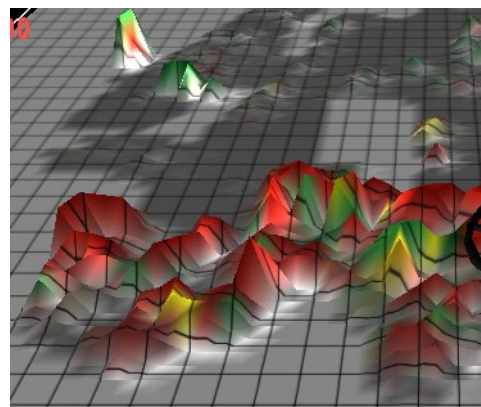
a – inspection of the reinforced concrete lining of the dam with GPR Oко-3; *b* – conducting a survey of the soil foundation of the dam with a high-frequency detector Nokta Invenio Smart

Рисунок 1 – Применение приборов неразрушающего контроля для проведения диагностики технического состояния дамбы Крюковского водохранилища (автор фото М. А. Бандурин)

Figure 1 – Application of non-destructive testing devices for diagnosing the technical condition of the dam of the Kryukovskoe reservoir (author of the photo M. A. Bandurin)



a



b

a – полученный фрагмент радарограммы с помощью георадара «Око-3»;
b – полученный фрагмент радарограммы при использовании высокочастотного обнаружителя Nokta Invenio Smart

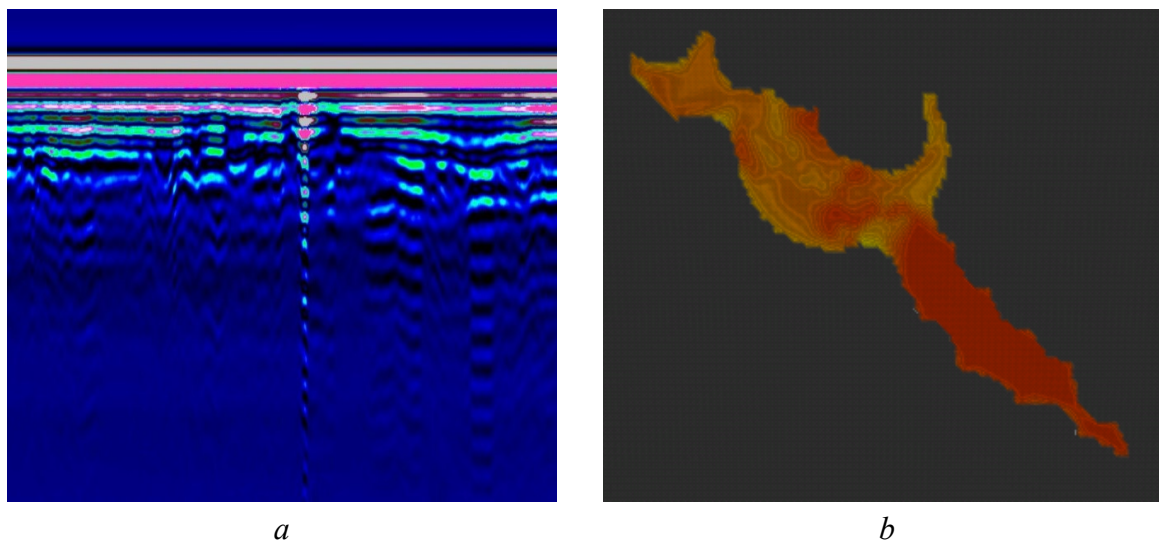
a – obtained fragment of the radargram by the Oко-3 georadar;
b – obtained fragment of the radargram by the high-frequency detector Nokta Invenio Smart

Рисунок 2 – Фрагмент радарограммы грунтового основания дамбы водохранилища на участке максимальной просадки (автор фото М. А. Бандурин)

Figure 2 – Fragment of the radargram of the soil foundation in the area of maximum subsidence (author of the photo M. A. Bandurin)

Места скрытых дефектов были обследованы на предмет нахождения разуплотнений. В процессе реконструкции были выполнены следующие виды работ [12]: наращивание водоограждающих дамб (456 тыс. м³), реконструкция водосбросного сооружения, реконструкция водозаборного сооружения, реконструкция заградительного сооружения сбросного канала, расчистка дренажных каналов (27,05 км).

На рисунке 3 представлены фрагменты радарограммы полости в теле дамбы, заполненной илистыми грунтами. В период аварии осуществлялся пропуск паводковых вод, обусловленный продолжительными атмосферными осадками, непрерывно длившимися в течение 3 сут. В дренажный канал, расположенный вдоль плотины на расстоянии около 10 м от подошвы, произошел выпор грунтов на длине 230 м. Консистенция, цвет и запах грунтов позволяют сделать вывод, что это погребенные илистые грунты, вытесненные из-под плотины.



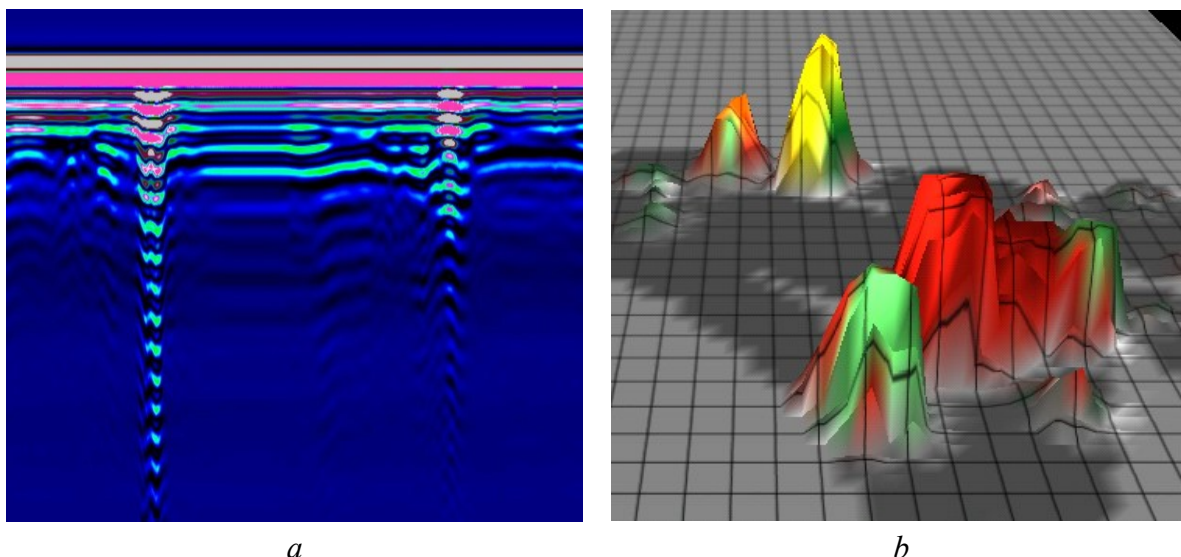
- a* – полученный фрагмент радарограммы с помощью георадара «Око-3»;
b – полученный фрагмент радарограммы с применением высокочастотного обнаружителя Nokta Invenio Smart
- a* – obtained fragment of the radargram by the Oко-3 georadar;
b – obtained fragment of the radargram by the high-frequency detector Nokta Invenio Smart

Рисунок 3 – Фрагмент радарограммы полости, заполненной илистыми грунтами, в теле дамбы (автор фото М. А. Бандурин)

Figure 3 – A fragment of a radargram of a cavity filled with silt in the dam body (author of the photo M. A. Bandurin)

Реконструкция плотины на данном участке предусматривала уширение и поднятие гребня плотины. Тем самым выполненные мероприятия усилили нагрузку на илистые грунты. Вследствие этого вероятность возникновения аварийной ситуации увеличилась. Со стороны сухого откоса вплотную к плотине расположены пруды, уровень воды в которых тоже был близким к максимальному [13, 14].

На рисунке 4 показан фрагмент радарограммы с зоной разуплотнения грунтового основания в местах бурения скважин в теле дамбы водохранилища. По нему можно определить геометрические размеры разуплотнения.



a – полученный фрагмент радарограммы с помощью георадара «Око-3»;
b – полученный фрагмент радарограммы с применением высокочастотного обнаружителя Nokta Invenio Smart
a – obtained fragment of the radargram by the Oко-3 georadar;
b – obtained fragment of the radargram by the high-frequency detector Nokta Invenio Smart

**Рисунок 4 – Фрагмент радарограммы с зоной разуплотнения
грунтового основания в местах бурения скважин в теле дамбы
(автор фото М. А. Бандурин)**

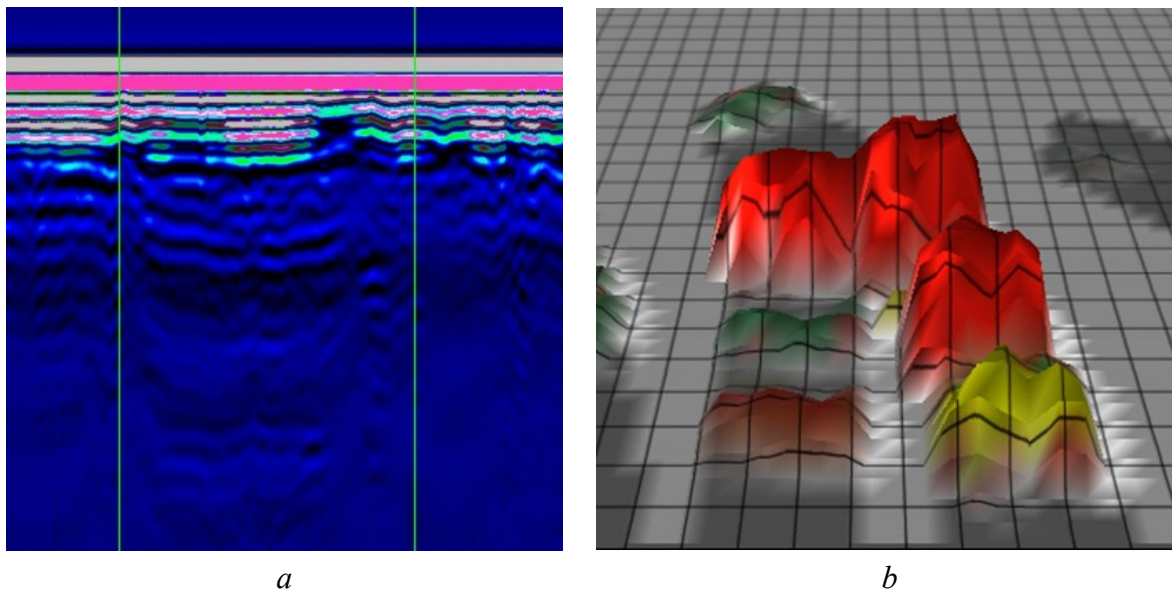
**Figure 4 – A fragment of a radargram with a zone of decompaction
of soil foundation at the sites of well drilling in the dam body
(author of the photo M. A. Bandurin)**

На рисунке 5 показаны фрагменты радарограммы зоны разрушения железобетонной облицовки в местах соприкосновения с грунтовым основанием. Тип грунтов основания дамбы (участки: западная, северная, юго-

восточная), образующей водохранилище, – глины плотные, тугопластичные, суглинки тяжелые, в местах перехода стариц и русел рек – глины иловатые, полутвердые. Материалы тела дамб: местные глины и суглинки с уплотнением до $1,90 \text{ т/м}^3$. Заложение откосов и крепление дамб:

- напорного – $m = 3; 3,5$, закреплен монолитными железобетонными плитами толщиной 15–20 см;

- низового – $m = 2,0; 2,5$, закреплен посевом трав по слою растительного грунта, пригрузка – грунтовый банкет (из растительного грунта) шириной 4,0 м.



a – полученный фрагмент радарограммы с помощью георадара «Око-3»;
b – полученный фрагмент радарограммы с помощью высокочастотного обнаружителя Nokta Invenio Smart

a – obtained fragment of the radargram by the Oко-3 georadar; *b* – obtained fragment of the radargram by the high-frequency detector Nokta Invenio Smart

Рисунок 5 – Фрагмент радарограммы зоны разрушения железобетонной облицовки в местах соприкосновения с грунтовым основанием (автор фото М. А. Бандурин)

Figure 5 – Fragment of the radargram of the destruction zone of the reinforced concrete lining at the points of contact with soil foundation (author of the photo M. A. Bandurin)

Районирование расположения дамбы соответствует сейсмичности 8 баллов (ранее – 6 баллов).

Оценка соответствия фактических параметров ГТС проекту: соответствуют не всем требованиям проекта. Соответствие ГТС Крюковского водохранилища проектной документации определялось рассмотрением следующих показателей [15–17]:

- конструктивные и компоновочные решения сооружений – соответствуют;

- геометрические размеры элементов сооружений – топоъемка ограждающих дамб по всей длине за период эксплуатации производилась в неполном объеме, соответствие отметок их гребня и очертаний откосов проектным величинам не определено;

- конструкции противофильтрационных и дренажных устройств – соответствуют;

- типы 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;

- сейсмичность района – не соответствует проекту ГТС;

- показатели условий эксплуатации – не соответствуют.

Выводы. На основании проведенных исследований установлено, что железобетонные конструкции дамбы обвалования находятся в целом в удовлетворительном состоянии и отвечают своему функциональному назначению. В ходе обследования дамбы выполнялись инструментальные исследования прочностных характеристик как бетона, так и грунтового основания. Прочность бетона оценивалась комплексным методом [18]. По результатам диагностики можно сделать следующие выводы:

- 1) качественная характеристика уровня безопасности ГТС водохранилища – опасный;

2) необходимо разработать мероприятия по приведению ГТС Крюковского водохранилища в работоспособное состояние. Срок выполнения: при поступлении финансирования;

3) необходимо иметь постоянный неснижаемый запас аварийного материала;

4) требуется систематически проводить подготовку, переподготовку и аттестацию эксплуатационного персонала, ежегодно проводить тренировки работников эксплуатирующей организации по действиям в экстремальных и предаварийных ситуациях. Периодичность проведения: 2 раза в год;

5) в нижнем бьефе ГТС произвести расчистку и удаление древесной растительности. Срок выполнения: при поступлении финансирования;

6) произвести ремонт бетонных конструкций. Срок выполнения: при поступлении финансирования;

7) произвести заполнение шпоночных уплотнений между плитами облицовки. Зачистить шпоночные уплотнения от растительности на ПК 0 – ПК 24 Западной дамбы, на ПК 21 + 50 – ПК 110 + 50 Северной дамбы, на ПК 110 – ПК 200 Юго-Восточной дамбы Крюковского водохранилища. Срок выполнения: при поступлении финансирования.

Список источников

1. Детальный обзор Крюковского водохранилища и его проблем / К. С. Бондаренко, Н. Е. Кравченко, Т. И. Имамалыев, С. В. Разгоняев, Д. С. Смоляков // *ЕрOPEN. Global* [Электронный ресурс]. 2021. № 23. С. 6–13. URL: <https://epomen.ru/issues/global/23/ErOPEN.Global-23-2021.pdf> (дата обращения: 01.06.2023).

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* [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 4. С. 317–332. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1328> (дата обращения: 01.06.2023). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-317-332.

3. Малышева Н. Н., Якуба С. Н., Хаджиди А. Е. К вопросу развития мелиорации в степной зоне Краснодарского края // *Рисоводство*. 2021. № 4(53). С. 66–73. DOI: 10.33775/1684-2464-2021-53-4-66-73.

4. Волосухин В. А., Бандурин М. А., Приходько И. А. Изменение климата: причины, риски для водохозяйственного комплекса Краснодарского края // *Природообустройство*. 2022. № 4. С. 50–56. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-50-56.

5. Ольгаренко В. И., Ольгаренко Г. В., Ольгаренко И. В. Комплексная оценка технического уровня гидромелиоративных систем // Мелиорация и водное хозяйство. 2013. № 6. С. 8–11.

6. Kosichenko Y. M., Baev O. A. Selection of an effective seepage-control lining for canals made of traditional and geosynthetic materials // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 54, № 6. P. 819–824. DOI: 10.1007/s10749-021-01293-4.

7. Ольгаренко И. В., Ольгаренко В. И., Ольгаренко О. Н. Анализ технических функций оросительных систем с позиций экологического мониторинга // Мелиорация и водное хозяйство: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 145-летию образования «Донлесхоза» (ГБУ РО «Дирекция особо охраняемых природных территорий областного значения»), г. Новочеркасск, 21–22 окт. 2021 г. Вып. 19. Новочеркасск: Лик, 2021. С. 57–63.

8. Абдразаков Ф. К., Лазарева А. А. Нарушение надежности работы облицованных оросительных каналов // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2012. Т. 12, № 6. С. 52–54.

9. Ткачев А. А., Слинько М. А. Исследование берегоукрепительных сооружений на р. Куме в Ставропольском крае // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 1. С. 213–227. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1269> (дата обращения: 01.06.2023). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-213-227.

10. Учет и установление собственника для бесхозяйных мелиоративных объектов – определяющий фактор их эффективного использования / Г. Т. Балакай, И. Ф. Юрченко, Е. А. Лентяева, Г. Х. Ялалова // Природообустройство. 2015. № 4. С. 8–14.

11. Ольгаренко В. И., Ольгаренко И. В. Планирование и реализация ремонтно-эксплуатационных работ на оросительных системах // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2010. № 4. С. 8–11.

12. Ольгаренко В. И., Ольгаренко И. В. Техничко-экономические показатели эффективности водопользования на оросительных системах // Природообустройство. 2009. № 4. С. 102–106.

13. Погорелов А. В., Лагута А. А. О циркуляции вод в долинном водохранилище (Краснодарское водохранилище) // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2020. № 4(208). С. 87–97. DOI: 10.18522/1026-2237-2020-4-87-97.

14. Адаптированная технология восстановления Краснодарского водохранилища для обеспечения экологической безопасности региона / Е. В. Кузнецов, А. Е. Хаджиди, Л. В. Моторная, А. А. Тратникова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11, № 1(57). С. 141–145. DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0029.

15. Обоснование эффективности планирования технологических процессов водопользования и оперативное управление водораспределением на базе использования метода Монте-Карло / В. И. Ольгаренко, И. Ф. Юрченко, И. В. Ольгаренко, Г. Г. Костюнин, М. С. Эфендиев, В. Иг. Ольгаренко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2018. № 1(29). С. 49–65. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=913> (дата обращения: 01.06.2023).

16. 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.

17. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Методы расчета водопроницаемости полимерных противифльтрационных экранов гидротехнических сооружений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2017. Т. 286. С. 10–21.

18. Безопасность бесхозных гидротехнических сооружений мелиоративного водохозяйственного комплекса / Г. Т. Балакай, И. Ф. Юрченко, Е. А. Лентяева, Г. Х. Ялалова. Германия: LAP LAMBERT, 2016. 85 с.

References

1. Bondarenko K.S., Kravchenko N.E., Imamalyev T.I., Razgonyaev S.V., Smolyakov D.S., 2021. *Detal'nyy obzor Kryukovskogo vodokhranilishcha i ego problem* [Detailed review of the Kryukovsky reservoir and its problems]. Epomen. Global, no. 23, pp. 6-13, available: <https://epomen.ru/issues/global/23/Epomen.Global-23-2021.pdf> [accessed 01.06.2023]. (In Russian).
2. Prikhodko I.A., Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Rudenko A.A., 2022. [Critical analysis of the engineering protection of the Lower Kuban under conditions of irrigation water increasing shortage due to climate change]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 4, pp. 317-332, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1328> [accessed 01.06.2023], DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-317-332. (In Russian).
3. Malysheva N.N., Yakuba S.N., Khadzhidi A.E., 2021. *K voprosu razvitiya melioratsii v stepnoy zone Krasnodarskogo kraya* [On the development of land reclamation in the steppe zone of the Krasnodar Territory]. *Risovodstvo* [Rice Growing], no. 4(53), pp. 66-73, DOI: 10.33775/1684-2464-2021-53-4-66-73. (In Russian).
4. Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Prikhodko I.A., 2022. *Izmenenie klimata: prichiny, riski dlya vodokhozyaystvennogo kompleksa Krasnodarskogo kraya* [Climate change: reasons, risks for the water management complex of the Krasnodar Territory]. *Prirodobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 50-56, DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-50-56. (In Russian).
5. Olgarenko V.I., Olgarenko G.V., Olgarenko I.V., 2013. *Kompleksnaya otsenka tekhnicheskogo urovnya gidromeliorativnykh sistem* [Comprehensive assessment of the irrigation systems technical level]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 6, pp. 8-11. (In Russian).
6. Kosichenko Y.M., Baev O.A., 2021. Selection of an effective seepage-control lining for canals made of traditional and geosynthetic materials. *Power Technology and Engineering*, vol. 54, no. 6, pp. 819-824, DOI: 10.1007/s10749-021-01293-4.
7. Olgarenko I.V., Olgarenko V.I., Olgarenko O.N., 2021. *Analiz tekhnicheskikh funktsiy orositel'nykh sistem s pozitsiy ekologicheskogo monitoringa* [Analysis of the technical functions of irrigation systems from the standpoint of environmental monitoring]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konf., posvyashchennoy 145-letiyu obrazovaniya "Donleskhoza" (GBU RO "Direktsiya osobo okhranyaemykh prirodnikh territoriy oblastnogo znacheniya")* [Land Reclamation and Water Management: Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 145th Anniversary of the Formation of "Donleskhoz" (GBU RO "Directorate of Specially Protected Natural Territories of Regional Significance")]. Novocherkassk, Lik Publ., pp. 57-63. (In Russian).
8. Abdrazakov F.K., Lazareva A.A., 2012. *Narushenie nadezhnosti raboty oblitsovannykh orositel'nykh kanalov* [Violation of reliability of the revetted irrigation canals]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta* [Bulletin of Kyrgyz-Russian Slavic University], vol. 12, no. 6, pp. 52-54. (In Russian).
9. Tkachev A.A., Slinko M.A., 2022. [Study of bank protection structures on the Kuma river in Stavropol Territory]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 12, no. 1, pp. 213-227, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1269> [accessed 01.06.2023], DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-213-227. (In Russian).
10. Balakay G.T., Yurchenko I.F., Lentyaeva E.A., Yalalova G.Kh., 2015. *Uchet i*

ustanovlenie sobstvennika dlya beskhozyaynykh meliorativnykh ob"ektov – opredelyayushchiy faktor ikh effektivnogo ispol'zovaniya [Recording and establishment of the owner for ownerless land reclamation facilities is a defining factor of their efficient usage]. *Prirodooobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 8-14. (In Russian).

11. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., 2010. *Planirovanie i realizatsiya remontno-ekspluatatsionnykh rabot na orositel'nykh sistemakh* [Planning and realization of repair and maintenance operations at irrigation systems]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences], no. 4, pp. 8-11. (In Russian).

12. Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., 2009. *Tekhniko-ekonomicheskiye pokazateli effektivnosti vodopol'zovaniya na orositel'nykh sistemakh* [Technical and economic indices of the efficiency of water use in irrigation systems]. *Prirodooobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 102-106. (In Russian).

13. Pogorelov A.V., Laguta A.A., 2020. *O tsirkulyatsii vod v dolinnom vodokhranilishche (Krasnodarskoe vodokhranilishche)* [On water circulation in the valley reservoir (Krasnodar reservoir)]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki* [Bull. of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Series: Natural Sciences], no. 4(208), pp. 87-97, DOI: 10.18522/1026-2237-2020-4-87-97. (In Russian).

14. Kuznetsov E.V., Khadzhibi A.E., Motornaya L.V., Tratnikova A.A., 2022. *Adaptirovannaya tekhnologiya vosstanovleniya Krasnodarskogo vodokhranilishcha dlya obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti regiona* [Adapted technology for restoration of the Krasnodar reservoir to ensure environmental safety of the region]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus], vol. 11, no. 1(57), pp. 141-145, DOI: 10.46548/21vek-2022-1157-0029. (In Russian).

15. Olgarenko V.I., Yurchenko I.F., Olgarenko I.V., Kostyunin G.G., Efendiev M.S., Olgarenko V.Ig., 2018. [Planning effectiveness substantiation of technological processes of water use and operating control of water distribution using the Monte Carlo method]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(29), pp. 49-65, available: <http://www.ros-niipm-sm.ru/article?n=913> [accessed 01.06.2023]. (In Russian).

16. 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-pressure earthen dam of the Varnavinsky reservoir under conditions of an increasing risk of natural and man-caused disasters]. *Construction and Geotechnics*, vol. 13, no. 4, pp. 17-29, DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.02. (In Russian).

17. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2017. *Metody rascheta vodopronitsaemosti polimernykh protivofil'tratsionnykh ekranov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Methods of water perviousness calculation for polymer impervious screens of hydraulic structures]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Proc. of the VNIIG named after B. E. Vedeneev], vol. 286, pp. 10-21. (In Russian).

18. Balakay G.T., Yurchenko I.F., Lentyaeva E.A., Yalalova G.Kh., 2016. *Bezopasnost' beskhozyaynykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy meliorativnogo vodokhozyaystvennogo kompleksa* [Security Ownerless Hydraulic Engineering Structures of Water Management Complex]. Germany, LAP LAMBERT Publ., 85 p. (In Russian).

Информация об авторах

М. А. Бандурин – декан факультета гидромелиорации, доктор технических наук, доцент;
И. А. Приходько – заведующий кафедрой строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов, кандидат технических наук, доцент;

В. А. Волосухин – профессор кафедры сопротивления материалов, доктор технических наук, профессор;

А. А. Руденко – аспирант.

Information about the authors

M. A. Bandurin – Dean of the Faculty of Hydroreclamation, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

I. A. Prikhodko – Head of the Department of Construction and Operation of Water Management Facilities, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

V. A. Volosukhin – Professor of the Department of Strength of Materials, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A. A. Rudenko – Postgraduate Student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023; одобрена после рецензирования 16.06.2023; принята к публикации 05.07.2023.

The article was submitted 27.04.2023; approved after reviewing 16.06.2023; accepted for publication 05.07.2023.