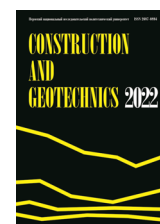




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 13, № 4, 2022

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.02

УДК 624.151.2: 626.814 (470.620)

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

Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 06 сентября 2022

Одобрена: 17 октября 2022

Принята к публикации:

15 ноября 2022

Ключевые слова:

низконапорная земляная плотина, риск, система обвалования, климатические изменения, природные и техногенные катастрофы.

АННОТАЦИЯ

Необходимость повышенного внимания к надежности и безопасности гидротехнических сооружений водохозяйственного комплекса юга России определяется масштабами социально-экономических последствий их аварий. В ходе длительной эксплуатации низконапорной земляной плотины Варнавинского водохранилища образовались различные скрытые дефекты и повреждения, которые в дальнейшем могут привести к техногенной катастрофе. Угроза возникновения катастрофических наводнений при образовании скрытых дефектов и повреждений приведет уже к природным катастрофам, а именно разрушению тела плотины. Выявление данных скрытых дефектов и повреждений является первоочередной задачей при оценке технического состояния тела земляной плотины. В статье рассмотрены только два метода неразрушающего контроля обнаружения скрытых дефектов и повреждений – методы электроконтактного динамического зондирования и проведения сейсморазведочных работ. Они позволяют получать удельное электрическое сопротивление грунтов при расчленении разреза по литологическому признаку. В результате обработки данных и интерпретации получены геоэлектрические разрезы удельного электрического сопротивления грунтов. Применяемый аппаратный и методический комплекс позволил решить поставленные задачи. Достоинством комплекса является его мобильность в методическом отношении. После непродолжительных опытно-методических работ и экспресс-обработки удается сочетать возможности аппаратного комплекса и инженерно-геологической ситуации для получения максимального качества и при наименьших затратах времени и средств. Исследования грунтовых низконапорных плотин следует проводить в режиме мониторинга при различных уровнях воды в водохранилище. Как видно из результатов обработки, геофизический комплекс неразрушающего контроля позволяет изучать грунтовые плотины с определением параметров грунтов. Для определения физико-механических свойств грунтов следует проводить большой объем работ с использованием опорных скважин бурения и выявлением корреляционных зависимостей параметров.

© ПНИПУ

© **Бандурин Михаил Александрович** – доктор технических наук, доцент, e-mail: chepura@mail.ru

Волосухин Виктор Алексеевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: director@ibgts.ru

Приходько Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: prihodkoigor2012@yandex.ru

Руденко Артем Анатольевич – аспирант, e-mail: 4away704@gmail.com

Mikhail A. Bandurin – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: chepura@mail.ru

Viktor A. Volosukhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: director@ibgts.ru

Igor A. Prikhodko – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: prihodkoigor2012@yandex.ru

Artem A. Rudenko – Postgraduate Student, e-mail: 4away704@gmail.com

MONITORING ASSESSMENT OF THE LOW-PRESSURE EARTHEN DAM OF THE VARNAVINSKY RESERVOIR UNDER CONDITIONS OF AN INCREASING RISK OF NATURAL AND MAN-MADE DISASTERS

M.A. Bandurin, V.A. Volosukhin, I.A. Prikhodko, A.A. Rudenko

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

ARTICLE INFO

Received: 06 September 2022
Approved: 17 October 2022
Accepted for publication:
15 November 2022

Keywords:

low-pressure earth dam, risk,
embankment system, climate
change, natural and man-made
disasters.

ABSTRACT

The need for increased attention to the reliability and safety of hydraulic structures in the water management complex of southern Russia is determined by the scale of the socio-economic consequences of their accidents. During the long-term operation of the low-pressure earthen dam of the Varnavinsky reservoir, various hidden defects and damages were formed. Which in the future can lead to a man-made disaster. The threat of catastrophic floods with the formation of hidden defects and damage will lead to natural disasters, namely the destruction of the dam body. The identification of these hidden defects and damages is a priority task in assessing the technical condition of the body of an earthen dam. The article considers only two methods of non-destructive testing for the detection of hidden defects and damage. Methods of electrocontact dynamic sounding and seismic exploration. They make it possible to obtain the electrical resistivity of soils when subdividing a section according to a lithological feature. As a result of data processing and interpretation, the geoelectric section of the electrical resistivity of soils was obtained. Applied hardware and methodological complex allowed to solve the tasks. The advantage of the complex is its methodological mobility. After a short experimental and methodological work and express processing, it is possible to clearly orient and combine the capabilities of the instrumentation complex and the engineering-geological situation in order to obtain the maximum quality and at the lowest cost of time and money. Studies of low-pressure earth dams should be carried out in the monitoring mode at various water levels in the reservoir. As can be seen from the results of processing, the geophysical complex of non-destructive testing makes it possible to study earth dams with the determination of soil parameters. To determine the physical and mechanical properties of soils, a greater amount of work should be carried out using reference drilling wells and identifying correlation dependencies of parameters.

© PNRPU

Введение

Первые наблюдения за уровнем воды р. Кубани были организованы в 1881 г. возле Краснодара и продолжались около года. Регулярные наблюдения за уровнем воды начаты в 1903 г. возле Краснодара и продолжаются до настоящего времени. Период с 1903–1948 гг. считается периодом естественного режима реки. В период с 1949 по 1966 гг. вводятся в эксплуатацию Невинномысский канал, Тшикское и Шапсугское водохранилища, с 1967 по 1972 гг. – ввод в эксплуатацию Большого Ставропольского канала и Федоровского гидроузла, Варнавинского и Крюковского водохранилищ. С 1975 г. по настоящее время – период регулирования стока Краснодарским водохранилищем. В пределах дельты на территории бывших Приазовских плавней построены рисовые оросительные системы: Петровско-Анастасиевская, Темрюкская правобережная, Азовская и Черноерковская. Федоровский гидроузел (1967 г.) обеспечивает командование горизонтов в магистральные каналы Кубанской, Федоровской, Марьяно-Чебургольской и Понуро-Калининской систем. Общая площадь мелиоративных систем около 80 тыс. га. Для перераспределения стока между рекой Кубанью и рукавом Протоки предназначен Тиховский гидроузел.

Варнавинское водохранилище построено в 1969–1971 гг. на площади Абино-Северской группы лиманов, расположено в центре массива, в одном километре восточнее железнодоро-

рожной линии Крымская – Тимашевская. Водохранилище образовано низконапорными земляными плотинами, включившими в чашу лиманы и их прибрежные подтопленные земли, и принято в постоянную эксплуатацию в 1971 г.

Основные проектные параметры низконапорной земляной плотины, запроектированные в 1960–1962 гг., следующие: длина 39,5 км, отметка гребня 10,95 м, ширина 4,5–6 м. Водосбросное сооружение Варнавинского водохранилища представляет собой трехпролетный открытый шлюз-регулятор с водосливом практического профиля, пропускная способность сооружения – 180 м³/с.

По проекту класс капитальности основных гидротехнических сооружений – IV [1]. Варнавинское водохранилище регулирует сток стекающих с Северного склона Кавказского хребта горных рек – Абин, Адагум, Куафо, Шибс и Шибик. Выполняет следующий комплекс задач:

- регулирование паводков рек, стекающих с Северного склона Кавказского хребта, защищает от затопления и подтопления 39 тыс. га ценных сельскохозяйственных земель, населенные пункты, животноводческие фермы и прочие объекты [2];
- использование зарегулированного стока для обеспечения водой Варнавинской оросительной системы площадью 10 579 га, в том числе рисовых – 3696 га, Закубанской оросительной системы и части Крюковской общей площадью около 13 тыс. га [3];
- обслуживание нужд рыбоводства в чаше водохранилища.

Варнавинское водохранилище находится в собственности Министерства сельского хозяйства Российской Федерации и эксплуатируется Крымским эксплуатационно-мелиоративным государственным учреждением. Оценка экономической эффективности реконструкции противопаводковой системы обвалования рек Кубани и Протоки произведена в соответствии с методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов и ведомственных методических рекомендаций [4–6].

На основании расчетных границ затапливаемых земель определен земельный фонд и его экспликация в восьми административных районах Краснодарского края (Северском, Абинском, Крымском, Анапском, Темрюкском, Славянском, Красноармейском и Калининском) и Тахтамукайском районе Республики Адыгея. Реконструкция противопаводковой системы в бассейнах рек Кубани и Протоки (Нижней Кубани) позволит защитить в восьми районах края и одном районе Республики Адыгея 261,0 тыс. га земель, в том числе 197,5 тыс. га сельскохозяйственных угодий, из которых 175,1 тыс. га пашни, из нее 88,8 тыс. га орошаемой (рисовых систем 73,0 тыс. га).

Проектируемые противопаводковые инженерно-технические мероприятия при 3 % обеспеченности паводка (расход $Q = 1500$ м³/с сбрасываемого с Краснодарского водохранилища) позволят защитить 84 населенных пункта с общим количеством проживающего населения 133,6 тыс. человека, а также производственные и непромышленные фонды на сумму 20 513,7 млн руб.

В сельскохозяйственном производстве будет предотвращена гибель от затопления при возникновении наводнения: зерна – 368,37 тыс. т, кормов – 239,99 тыс. т к единице, плодов и винограда – 3,0 тыс. т.

Предотвращенный среднегодовой ущерб от затопления в результате реконструкции противопаводковой системы в Нижней Кубани составляет в целом 365,48 млн руб., который складывается из убытков, потерь и затрат (прямых и косвенных) и состоит из экономического, социально-экономического и экологического ущерба.

Оценка эффективности произведена в текущих ценах при коэффициенте дисконтирования около 0,06. Срок службы земляных низконапорных плотин после реконструкции принят 34 г. Строительные работы по первой очереди реконструкции инженерных сооружений будут осуществляться в течение четырех лет. Средства на реконструкцию первой очереди противопаводковой системы обвалования рек Кубани и Протоки в сумме 1466,23 млн руб предоставлены из Федерального бюджета на безвозмездной основе [7].

Реализация проектируемых мероприятий на реках Кубани и Протоке скажется положительно на улучшении экономической, социально-экономической и экологической обстановки в восьми районах, г. Краснодаре Краснодарского края и Тахтамукайском районе Республики Адыгеи. Экономические расчеты подтверждают хозяйственную необходимость и экономическую целесообразность проведения инженерно-защитных мероприятий на реках Кубани и Протоке [8].

Основная часть

Исследования проводятся в Крымском районе, в восточной части грунтовой низконапорной земляной плотины Варнавинского водохранилища.

При постановке методики для проведения сейсморазведочных работ по обследованию грунтовой плотины учитывались факторы поверхностных условий, глубины исследования, уровень техногенных и естественных шумов.

Для проведения работ неблагоприятными были техногенные шумы, вызванные движением транспорта, шумы от колебаний поверхностного слоя, вызванные наличием ветра [9].

Виды и объемы фактически выполненных натурных работ [10] приборами неразрушающего контроля приведены в таблице.

Виды и объемы выполненных работ

Types and volumes of work performed

Наименование работы	Единица	Объем работ	Методика выполнения
Георадиолокационные исследования (АБ-1700)	Измерения	1587	Комплекс «ОКО-2»
Георадиолокационные исследования (АБ-400)	Точка	872	Комплекс «ОКО-2»
Электроразведка	Точка	12	Комплекс «ОКО-2»
Сейсморазведка	Точка ВЭЗ	17	Комплекс «Era-Max»
Электроконтактное динамическое зондирование (ЭДЗ)	Профиль	19	Комплекс «Лакколит X-2М»

Схема расположения отработанных фрагментов геофизических профилей на низконапорной земляной плотине Варнавинского водохранилища приведена на рис. 1.

При выполнении сейсморазведочных работ по изучению верхней части разреза (до 300 м) основная сложность при регистрации и обработке избавление от волн помех. Анализ волнового поля позволяет выделить несколько типов волн.

Полезные волны представлены преломленными и рефрагированными, отраженными волнами. Для обработки общей глубинной точки полезными являются отраженные волны, характеризующиеся высокими скоростями по отношению к другим типам волн. На «сырых» сейсмограммах выделяются нечетко, имеют спектр частот 18–120 Гц и характеризуются

ются раздвоением фаз при удалении от пункта возбуждения. Преломленные и рефрагированные волны отделены от отраженных по времени, поэтому их «вырезание» из информативной временной области не вызывает затруднений [11].

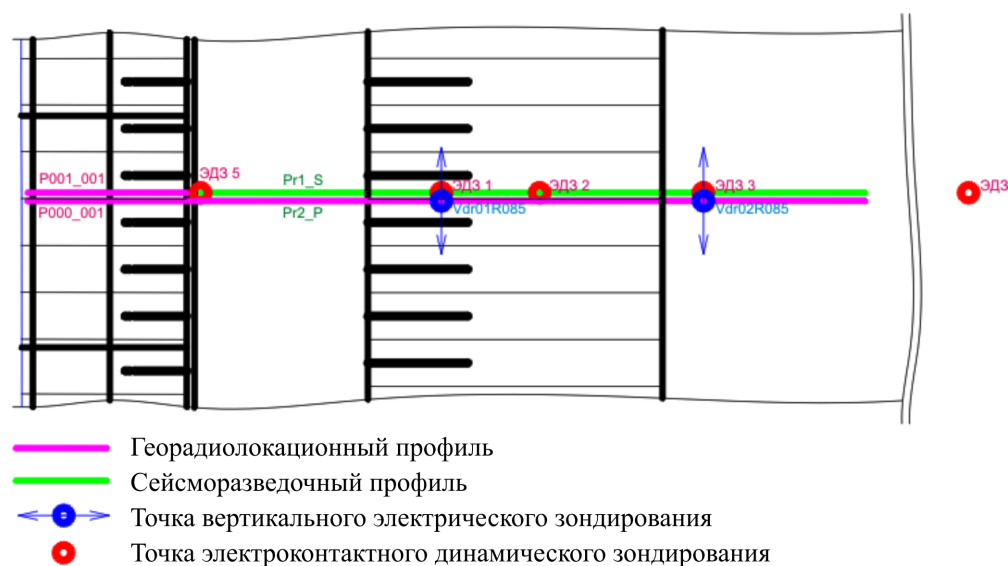


Рис. 1. Расположение фрагмента геофизических профилей и точек зондирования
Fig. 1. Location of a fragment of geophysical profiles and sounding points

Волны-помехи представлены поверхностными волнами Лява и Рэлея. Доминируют в верхней части разреза, характеризуются высокой интенсивностью, низкочастотным составом колебаний 5–30 Гц, низкими скоростями – до 200 м/с, веерообразной формой цуга колебаний, идущих от центра пункта возбуждения. Волны Рэлея быстро затухают с глубиной, имея при этом 3–4 четко выраженных периода колебаний. Выделение техногенных шумов, вызванных падением леса и работой строительной техники, определяется по скорости и углам подхода волны. Регулярный шум, обусловленный колебаниями поверхности земли за счет ветра, качеством установки сейсмоприемников, имеет широкополосный спектр [12].

Сейсморазведочные работы проводились с регистрацией двух составляющих, горизонтальной и вертикальной. При анализе волнового поля волн-помех выделено, что чем больше мощность почвеннорастительного слоя и меньше скорость волн, тем интенсивнее и продолжительнее волны Рэлея. Этот слой является своеобразным фильтром низких частот, частотный состав полезного сигнала значительно ослаблен в области верхних частот и его выделение затруднено.

При анализе разрезов использовалось преобразование Гильберта, позволяющее более контрастно отобразить изменение параметров амплитуды, фазы и частоты сигнала с получением качественных показателей [13].

Комплексная интерпретация полученных в результате обработки полученных геофизических данных при работах по обследованию грунтовой низконапорной плотины Варнавинского водохранилища проведена с целью определения положения динамической кривой, тектонических нарушений, оползневых процессов, расчленения разреза по литологическому составу с получением характерных параметров. По результатам проведения сейсмических исследований построены глубинные разрезы продольных и поперечных волн.

При работах с малыми глубинами основной информационный диапазон частот 100–1000 Гц и на разрезах частоты более 300 Гц нечитаемы. При попытке их выделения путем полосовой фильтрации нарушается амплитудно-частотная зависимость. Поэтому для отражения столь коротких во времени и столь значимых характеристик использовалась обработка сигнала при помощи преобразования Гильберта [14].

На рис. 2 приведен глубинный сейсмический разрез продольных волн по фрагменту профиля № 11. Продольная волна порождается деформациями сжатия при вертикальном ударе кувалдой по поверхности земли. На разрезе по скорости продольных волн 1600–1700 м/с определена динамическая кривая. Оползневой участок определен по отражению положительной амплитуды (черный цвет), где выявлено отклонение от нормального залегания грунтов, уменьшение частоты сигнала в объеме оползня и увеличение амплитуды сигнала из-за увеличения акустической жесткости ниже зоны скольжения. Максимальная мощность оползневой участка составляет 3–3,5 м, протяженность порядка 8 м.

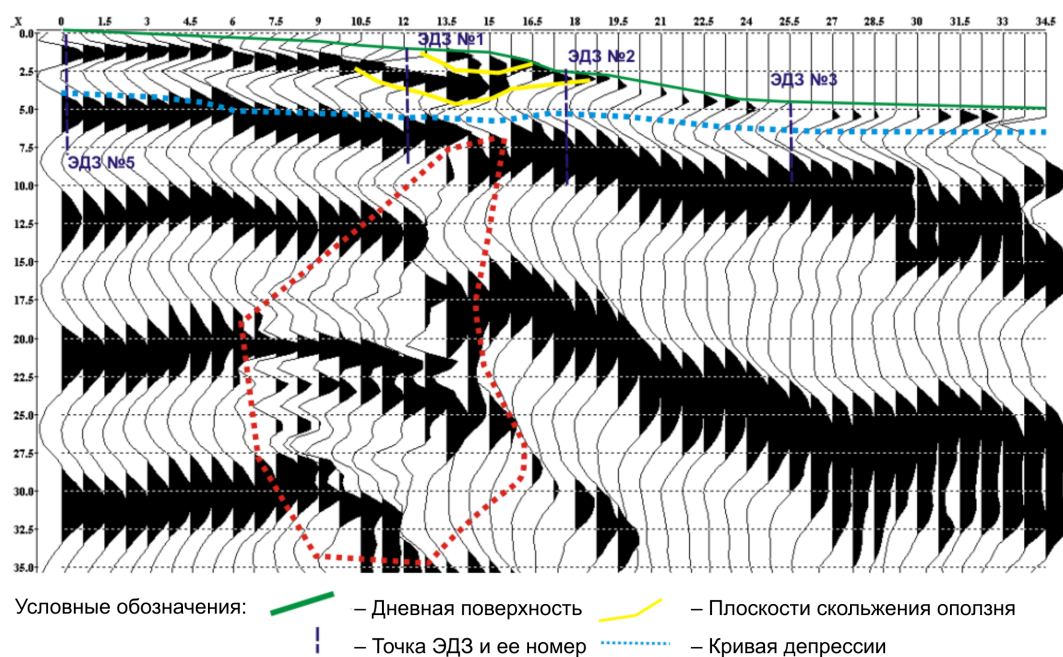


Рис. 2. Глубинный сейсмический разрез по фрагменту профиля № 11 (продольные волны)
Fig. 2. Deep seismic section along profile fragment No. 11 (longitudinal waves)

На глубинном разрезе в центральной части наблюдается потеря корреляционной зависимости отражений (красная пунктирная линия). Ее происхождение связано с резкими изменениями скоростей продольных волн и плотностью пород. Это положение нашло свое отражение на разрезе мгновенной амплитуды сигнала (рис. 3).

Указанная область является зоной пликативных нарушений, разделяющей разрез на два блока. На рис. 4 приведен разрез мгновенной фазы, где по наиболее резкой цветовой границе наблюдается изменение корреляционной зависимости, а также разность блоков по амплитудно-фазовому спектру [15]. Левый блок характеризуется относительно пониженными скоростями по отношению к правому, более узким фазовым спектром, уменьшением ширины частотного спектра в области низких частот.

На разрезе мгновенной частоты (рис. 5) красным цветом отображены основные отражающие границы красным цветом, а затем выделена область сочленения блоков.

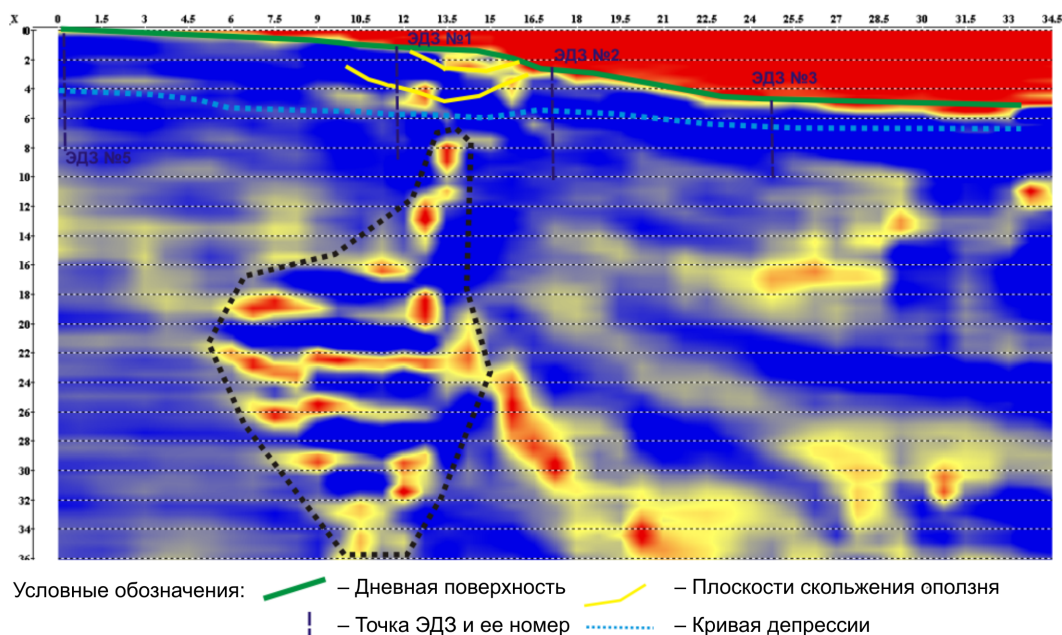


Рис. 3. Глубинный сейсмический разрез по фрагменту профиля № 11
 (разность блоков мгновенной амплитуды по амплитудно-фазовому спектру)
 Fig. 3. Deep seismic section of instantaneous amplitude along profile fragment No. 11
 (instantaneous amplitude difference of blocks in the amplitude-phase spectrum)

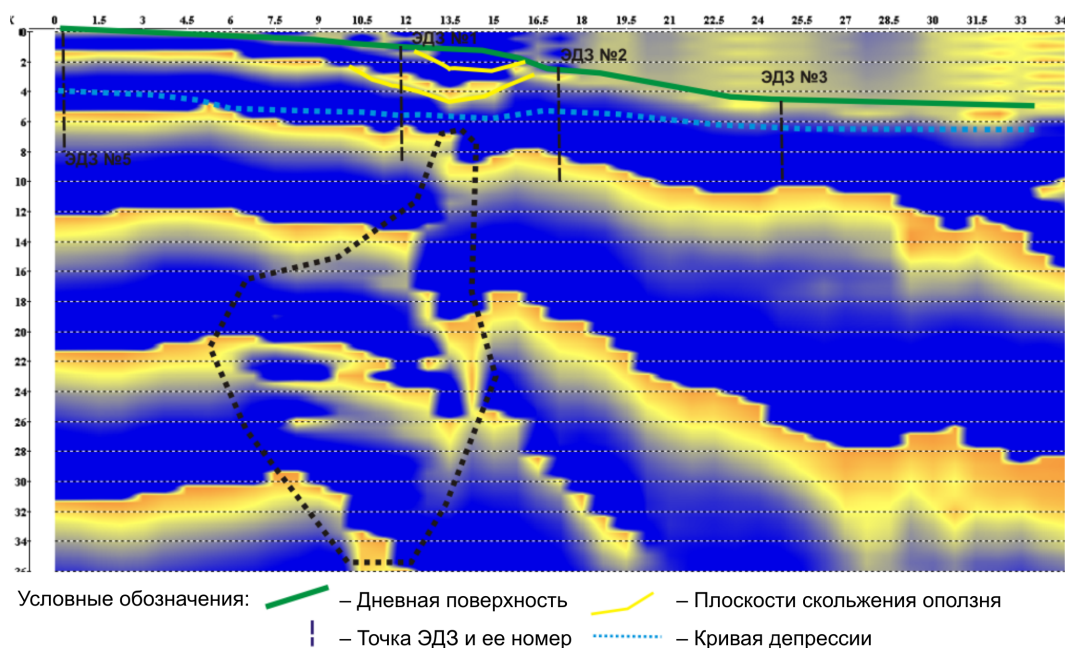


Рис. 4. Глубинный сейсмический разрез по фрагменту профиля № 11 (область низких частот)
 Fig. 4. Deep seismic section along profile fragment No. 11 (low frequency region)

Сейсмический разрез поперечных волн является порождением сдвиговых деформаций, на рис. 6 приведен глубинный сейсмический разрез поперечных волн по фрагменту профиля № 11. Отмечено незакономерное расположение отражающих сейсмических границ относительно поперечного сечения низконапорной плотины. Разделение вышеописанных блоков не наблюдается.

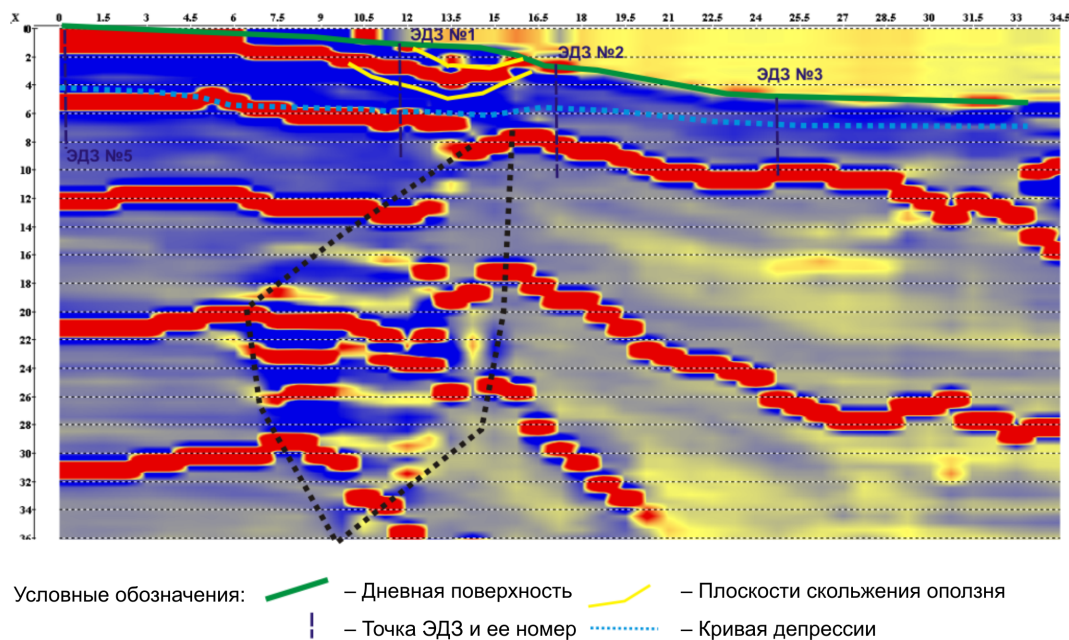


Рис. 5. Глубинный сейсмический разрез по фрагменту профиля № 11 (область сочленения блоков)
 Fig. 5. Deep seismic section along profile fragment No. 11 (block junction area)

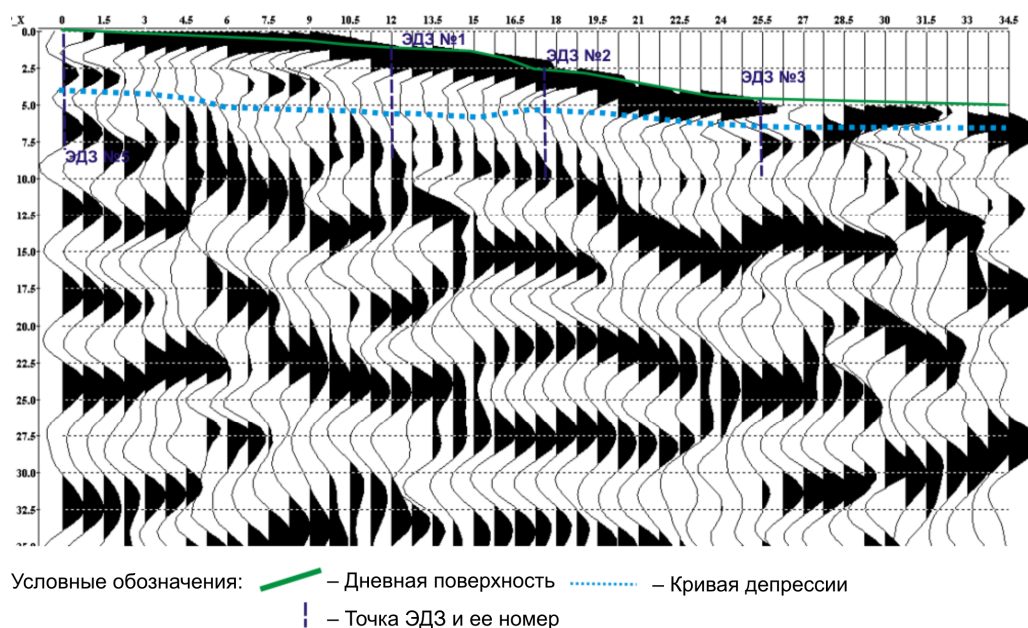


Рис. 6. Глубинный сейсмический разрез по фрагменту профиля № 11 (поперечных волн)
 Fig. 6. Deep seismic section along profile fragment No. 11 (transverse waves)

На рис. 7 приведен разрез мгновенной амплитуды, где черной пунктирной линией снизу ограничена зона наиболее резких изменений скорости поперечных волн и соответственно сдвиговых деформаций.

Это связано прежде всего с тем фактом, что на волновом поле волны-помехи высокой интенсивности по частотному и скоростному составу практически не разделяются с полезными волнами и подавляют их [16]. При обработке использовано максимальное количество этапов по выделению полезных волн. Это положение подтверждается разрезом мгновенной фазы (рис. 8).

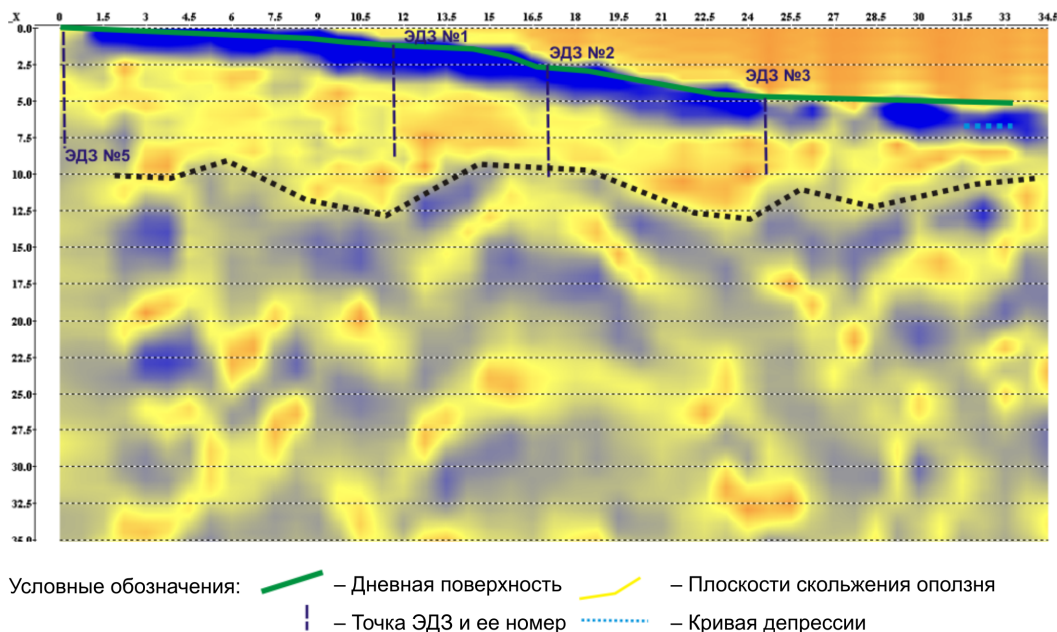


Рис. 7. Глубинный сейсмический разрез по фрагменту профиля № 11 (сдвиговые деформации)
Fig. 7. Deep seismic section along profile fragment No. 11 (shear deformations)

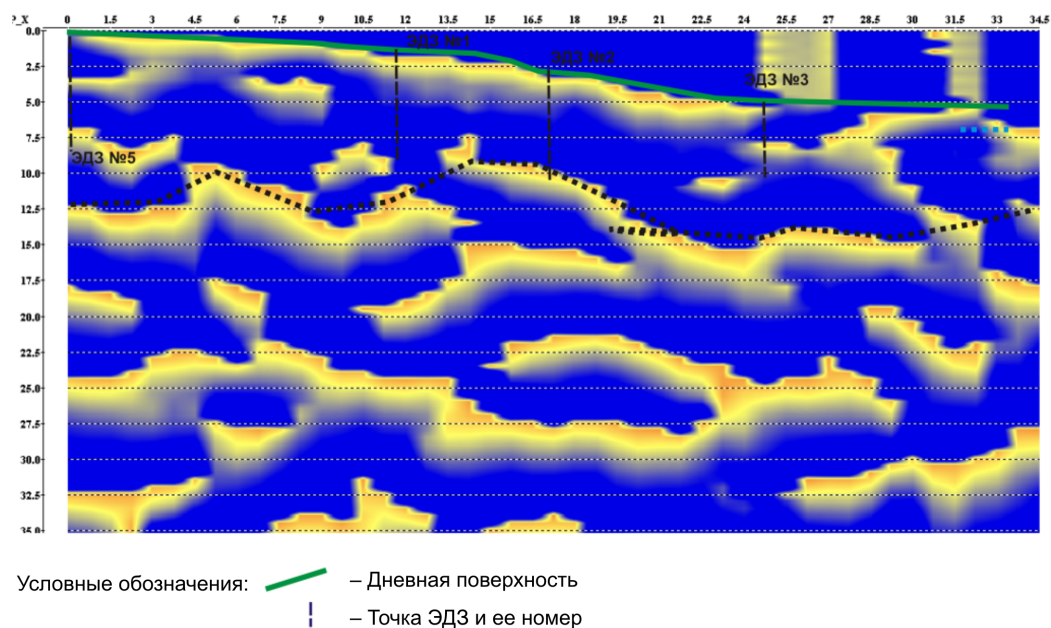


Рис. 8. Глубинный сейсмический разрез по профилю № 11 (продольные волны)
Fig. 8. Deep seismic section along profile No. 11 (longitudinal waves)

Зона оползня выделяется красным полем значений, распространяющимся от точки электроконтактного динамического зондирования от точки один до точки три, на разрезе продольных волн (рис. 9) выделена только наиболее неустойчивая зона оползня.

Разрез мгновенной частоты позволяет наиболее наглядно выделить основные сейсмические границы.

В завершение анализа выделенных блоков следует отметить, что правый блок приподнят на 3–4 м, имеет те же литологические типы грунтов, но более уплотненных и подверженных меньшим нагрузкам со стороны плотины [17].

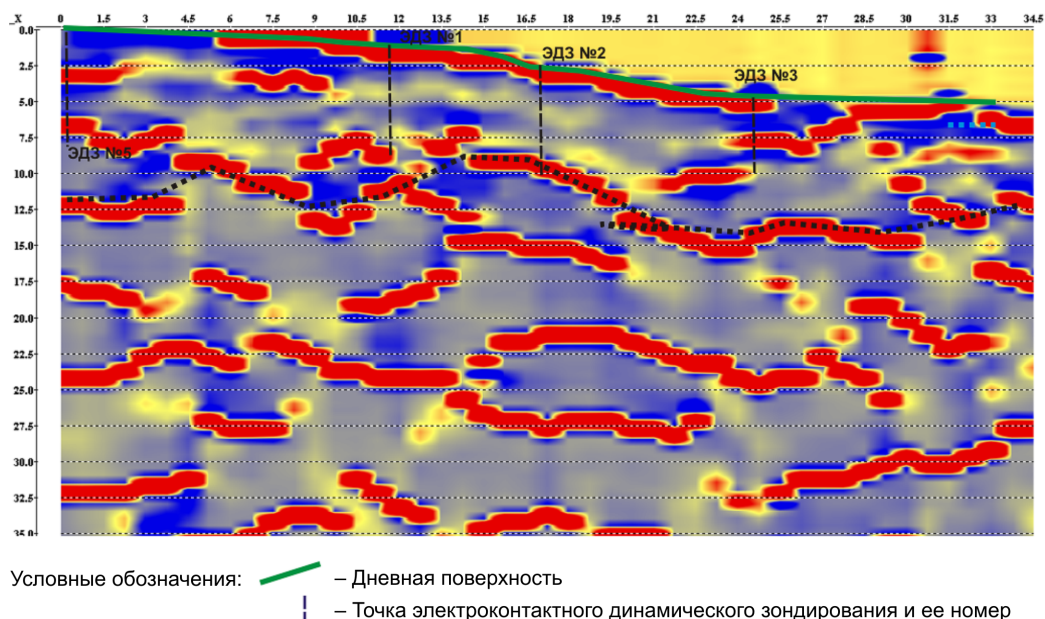


Рис. 9. Неустойчивая зона оползня
Fig. 9. Landslide unstable zone

Электроразведочные данные не позволили подтвердить данные о пликативных нарушениях ввиду их близкого расположения относительно друг друга и нахождения в зоне сочленения [18]. Выделенные слои уровня грунтовых вод, по данным электроконтактного динамического зондирования, хорошо коррелируются с данными сейсморазведки и электроразведки.

Данные георадиолокации позволяют в большей степени судить о степени увлажненности грунтов, по диэлектрической проницаемости сухие суглинки и глины не сильно отличаются. Полевые работы методом электроконтактного динамического зондирования проведены в пяти характерных по рельефу точках профиля. Зондирование осуществлялось на глубину до 7,5 м.

По результатам электроконтактного динамического зондирования построены кривые динамического сопротивления грунтов и кривые тока, а также проведена интерпретация данных. Границы определяются по значениям динамического сопротивления грунтов и силе электрического тока, а также их взаимным зависимостям, по значениям давления и относительно резкого увеличения сопротивления можно судить о водонасыщенности грунтов и глубине уровня грунтовых вод.

Выводы

В результате проведения работ по обследованию грунтовой плотины Варнавенского водохранилища получены результаты, которые подтверждают эффективность, производительность и информативность применяемых геофизических методов при относительно небольших затратах. Также отмечена еще большая эффективность при применении комплекса геофизических методов.

Применяемый аппаратный и методический комплекс позволил решить поставленные задачи. Достоинством комплекса является его мобильность в методическом отношении. После непродолжительных опытно-методических работ и экспресс-обработки удается

сочетать возможности аппаратного комплекса и инженерно-геологической ситуации для получения максимального качества и при наименьших затратах времени и средств.

Методы поиска относятся к дистанционным и неразрушающим, что дает возможность проводить исследования и мониторинг, не прекращая работу водохранилища, в любой обстановке.

Исследования грунтовых плотин следует проводить в режиме мониторинга при различных уровнях воды в водохранилище.

Как видно из результатов обработки, геофизический комплекс позволяет изучать грунтовые плотины с определением параметров грунтов. Для определения физико-механических свойств грунтов следует проводить большой объем работ с использованием опорных скважин бурения и выявлением корреляционных зависимостей параметров.

В заключение следует отметить, что поставленные задачи успешно решаются комплексом геофизических методов и основным вопросом является составление и корректировка методики индивидуально для объекта.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Библиографический список

1. Аль Фатин Х.Д., Мустафин М.Г. Методика оценки деформаций водоподпорных плотин // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 45–56. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-1-45-56
2. Юрченко И.Ф. Безопасность автоматизированных технологий регулирования мелиоративного режима агроэкосистемы // Инженерные технологии и системы. – 2022. – Т. 32, № 1. – С. 28–40.
3. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Особенности гидравлических и фильтрационных расчетов осушительно-оросительной системы // Природообустройство. – 2021. – № 4. – С. 90–98.
4. Utkin V.S., Sushev L.A. The Reliability Analysis of Existing Reinforced Concrete Piles in Permafrost Regions // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – Vol. 13, No 2. – P. 64–72.
5. Baev O., Kosichenko Yu., Silchenko V. Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – № 3 (111). – P. 11109.
6. Абдразаков Ф.К., Лазарева А.А. Нарушение надежности работы облицованных оросительных каналов // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2012. – Т. 12, № 6. – С. 52–54.
7. Numerical analysis of static strength for different damages of hydraulic structures when changing stressed and strained state / V.A. Volosukhin, M.A. Bandurin, V.V. Vanzha, A.V. Mikheev, Y.V. Volosukhin // Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 Enterprise Information Systems. – 2018. – P. 042061.
8. The use of ionizing radiation for the tungsten preparation / B.P. Chesnokov, F.K. Abdrazakov, O.V. Naumova, D.S. Krivoschapov, V.A. Strelnikov // J. of Industrial Pollution Control. – 2017. – P. 1–12.

9. Бандурин М.А. Совершенствование методов проведения эксплуатационного мониторинга и определения остаточного ресурса водопроводящих сооружений // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. – 2013. – № 1 (09). – С. 68–79.
10. Мельников Н.Н., Калашник А.И. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем // *Вестник Кольского научного центра РАН*. – 2010. – № 3. – С. 4–8.
11. Yurchenko I.F. Information support system designed for technical operation planning of reclamative facilities // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2018. – Т. 96, № 5. – P. 1253–1265.
12. Integrating geographic information system, remote sensing, and modeling to enhance reliability of irrigation network / E.H. Ashour, S.M. Elsayed, S.E. Ahemd, M.E. Basiouny, F.S. Abdelhaleem // *Water and Energy International*. – 2021. – Vol. 64, № 1. – С. 6–13.
13. Features of investing in reconstruction of reclamation objects by the example of irrigation systems of the Saratov region / L.A. Zhuravleva, T.V. Fedyunina, L.Yu. Evsyukova, A.V. Rusinov, D.A. Kolganov, L.N. Pototskaya // *Revista Turismo Estudos & Práticas*. – 2020. – № S4. – С. 19.
14. Over-extraction from shallow bedrock versus deep alluvial aquifers: reliability versus sustainability considerations for India's groundwater irrigation / R.M. Fishman, U. Lall, T. Siegfried, P. Raj, V. Modi // *Water Resources Research*. 2011. – Vol. 47, № 12.
15. Method for assessing the reliability of earth dams in irrigation systems / K.S. Sultanov, B. Khusanov, P.V. Loginov, Sh. Normatov // *Construction of Unique Buildings and Structures*. – 2020. – № 4 (89). – P. 8901.
16. Хидиров С.Т. Мониторинг напряженно-деформированного состояния оснований зданий и сооружений как фактор обеспечения безопасной эксплуатации // *Инновации и инвестиции*. – 2020. – № 12. – С. 291–294.
17. Тищенко А.И. Расчет плит крепления в нижнем бьефе гидротехнических сооружений мелиоративной сети с целью увеличения их эксплуатационной надежности // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. – 2019. – № 2 (34). – С. 165–184.
18. Детальное сейсмометрическое обследование низконапорных плотин ГЭС при проектировании АССК / Р.В. Козлов, Л.А. Короленко, А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. – 2021. – № 4. – С. 76–87. DOI 10.36535/0869-4179-2021-04-6

References

1. Al' Fatin KH.D., Mustafin M.G. Metodika otsenki deformatsiy vodopodpornykh plotin. *Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologiy)*. 2021, 26, no. 1, pp. 45–56. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-1-45-56.
2. Yurchenko, I.F. Bezopasnost' avtomatizirovannykh tekhnologiy regulirovaniya meliorativnogo rezhima agroekosistemy. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy*. 2022, 32, no. 1. pp. 28–40.
3. Kosichenko Y.M., Bayev O.A. Osobennosti gidravlicheskikh i fil'tratsionnykh raschetov osushitel'no-orositel'noy sistemy. *Prirodoobustroystvo*, 2021, no 4, pp. 90–98.
4. Utkin V.S., Sushev L.A. The Reliability Analysis of Existing Reinforced Concrete Piles in Permafrost Regions. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017, Vol. 13, no. 2, pp. 64–72.

5. Baev O., Kosichenko Yu., Silchenko V. Effect of subsoil moisture on filtration through a screen defect *Magazine of Civil Engineering*, 2022, no. 3 (111), pp. 11109.

6. Abdrazakov F.K., Lazareva A.A. Narusheniye nadezhnosti raboty oblitsovannykh orositel'nykh kanalov. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo Slavyanskogo universiteta*, 2012, vol. 12, no. 6. pp. 52–54.

7. Volosukhin V.A., Bandurin M.A., Vanzha V.V., Mikheev A.V., Volosukhin Y.V. Numerical analysis of static strength for different damages of hydraulic structures when changing stressed and strained state *Journal of Physics: Conference Series. International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 Enterprise Information Systems*, 2018, pp. 042061.

8. Chesnokov B.P., Abdrazakov F.K., Naumova O.V., Krivoschapov D.S., Strelnikov V.A. The use of ionizing radiation for the tungsten preparation *J. of Industrial Pollution Control*, 2017, pp. 1–12.

9. Bandurin M.A. Sovershenstvovaniye metodov provedeniya ekspluatatsionnogo monitoringa i opredeleniya ostatochnogo resursa vodoprovodyashchikh sooruzheniy. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, 2013, no. 1 (09), pp. 68–79.

10. Mel'nikov N.N., Kalashnik A.I. Innovatsionnyye georadarnyye tekhnologii izucheniya podpoverkhnostnoy struktury i sostoyaniya prirodno-tekhnicheskikh system. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2010, no 3, pp. 4–8.

11. Yurchenko I.F. Information support system designed for technical operation planning of reclamative facilities. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2018, vol. 96, no. 5, pp. 1253–1265.

12. Ashour E.H., Elsayed S.M., Ahemd S.E., Basiouny M.E., Abdelhaleem F.S. Ntegrating geographic information system, remote sensing, and modeling to enhance reliability of irrigation network. *Water and Energy International*, 2021, 64, no. 1, pp. 6–13.

13. Zhuravleva L.A., Fedyunina T.V., Evsyukova L.Yu., Rusinov A.V., Kolganov D.A., Pototskaya L.N. Features of investing in reconstruction of reclamation objects by the example of irrigation systems of the Saratov region. *Revista Turismo Estudos & Práticas*, 2020, no. S4, pp. 19.

14. Fishman R.M., Lall U., Siegfried T., Raj P., Modi V. Over-extraction from shallow bedrock versus deep alluvial aquifers: reliability versus sustainability considerations for India's groundwater irrigation. *Water Resources Research*, 2011, vol. 47, no. 12.

15. Sultanov K.S., Khusanov B., Loginov P.V., Normatov Sh. Method for assessing the reliability of earth dams in irrigation systems. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2020, no. 4 (89), pp. 8901.

16. Khidirov S.T. Monitoring napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovaniy zdaniy i sooruzheniy kak faktor obespecheniya bezopasnoy ekspluatatsii. *Innovatsii i investitsii*, 2020, no. 12, pp. 291–294.

17. Tishchenko A.I. Raschet plit krepleniya v nizhnem b'yefe gidrotekhnicheskikh sooruzheniy meliorativnoy seti s tsel'yu uvelicheniya ikh ekspluatatsionnoy nadezhnosti. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, 2019, no. 2 (34), pp. 165–184.

18. Kozlov R.V., Korolenko L.A., Kuz'menko A.P., Saburov V.S. Detal'noye seysmometricheskoye obsledovaniye nizkonapornykh plotin GES pri proyektirovani ASSK. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy*, 2021, no. 4, pp. 76–87. DOI 10.36535/0869-4179-2021-04-6