

УДК 627.8.059: 550.8.04

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЫ ВОДОХРАНИЛИЩА К-25 В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Ахметов Еркем Мауленович¹,
aem.47@mail.ru

Миргаликызы Толкын³,
m_t85@mail.ru

Асемов Камбар Мустафаевич¹,
kassmov@kazkern.kz

Аширов Беимбет Маманович⁴,
bashirov.kz@gmail.com

Муканова Балгайша Гафуровна²,
mbsha01@gmail.com

Жолдыбаев Алексей Кадыржанович⁵,
gado_graf@mail.ru

¹ Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, Казахстан, А10М6G5, г. Алматы, ул. Жандосова, 67.

² Astana IT University, Казахстан, Z05T3C8, г. Нур-Султан, Мангилик Ел пр., 55/11.

³ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, Z01A3D7, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2.

⁴ ТОО «Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция», Казахстан, А15Е3F4, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 75а.

⁵ Институт геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан, Казахстан, F10D0X5, г. Курчатов, площадка «Меридиан».

Актуальность. Проблемы безопасности плотин, используемых в целях мелиорации сельскохозяйственных угодий, остро стоят в обществе. Их разрушение приводит к большому экономическому и экологическому ущербу. Достойное место для решения данной проблемы занимает их мониторинг неинвазивными геофизическими методами. Геофизические методы позволяют получать информацию об объекте исследования дешево и оперативно и дополняют традиционные геотехнические методы. В процессе эксплуатации плотины происходит просачивание воды через ее тело, вокруг водосборных конструкций, а также в прибортовой части, что приводит к образованию эрозионных зон. Этот процесс сопровождается изменением физико-механических свойств пород, которые могут существенно влиять на устойчивость и безопасность сооружения. Своевременное обнаружение на ранней стадии таких изменений геофизическими методами имеет важное значение для принятия превентивных мер и предотвращения катастроф.

Цель: обоснование выбора рационального комплекса геофизических методов, опробование их на гидротехнических сооружениях земляного типа, оценка их информативности в определении текущего состояния сооружения.

Объект: зоны эрозии земляной плотины водохранилища К-25 в Казахстане.

Методика: полевые исследования, обработка и интерпретация полученных данных; выявление зон эрозии, связанных с увлажненностью, по параметрам сопротивления, поляризации, диэлектрической проницаемости; построение исходного инженерно-геологического разреза сооружения; обоснование режимного наблюдения методом естественного электрического поля; картирование зон инфильтрации и ее направления при различной степени наполненности водохранилища; выделение зон разуплотнений и их оценка по данным продольных и поперечных волн; комплексная интерпретация результатов исследований, анализ и составление структурного строения сооружения.

Результаты. Создана технология диагностики физического состояния земляной плотины по геофизическим данным в условиях Республики Казахстан. Методы диполь-электрического зондирования вызванной поляризации, вертикального электрического зондирования и георадарное зондирование показали высокую эффективность при выявлении участков с повышенной водопроницаемостью. Проведена оценка информативности геоэлектрических параметров для выявления струйных водоносных зон и их картирования в плане. Проведен анализ осложняющих факторов при использовании этих параметров. По данным вертикального электрического зондирования получены детальные распределения электрического сопротивления, свидетельствующие о существенной неоднородности тела плотины в этом параметре. По комплексным данным составлены инженерно-геологические разрезы, которые можно рассматривать как стартовые модели для мониторинга водопроницаемости плотины. Площадная электроразведка методом естественного электрического потенциала в варианте режимных наблюдений оказалась эффективной при выявлении зон фильтрации воды. Сейсморазведка на продольных и поперечных волнах была достаточно результативной при изучении строения плотины и выявлении ослабленных зон, в которых могут проходить фильтрационные процессы. Результаты сейсморазведки достаточно хорошо коррелируются с результатами дисперсии электрического потенциала при оценке фильтрационной обстановки. По результатам опытно-методических работ можно сделать вывод, что электроразведку целесообразно использовать для первичной оценки состояния плотины как наиболее экспрессный метод. Для более детального изучения структурного строения необходимо применить метод естественного поля и сейсморазведку на продольных и поперечных волнах.

Ключевые слова:

Геофизические методы, земляная плотина, зоны эрозии, инфильтрация, режимные наблюдения, интерпретация, мониторинг.

Введение

В вопросах обеспечения безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений, используемых для ирригационных нужд, достойное место занимает их мониторинг неинвазивными геофизическими методами. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации в мире по практическому применению методов геофизики для диагностики состояния земляных плотин [1–9]. Обнаружение на ранней стадии образования зон эрозии внутри сооружения имеет важное значение. Отмечается универсальность геофизических методов, их экспрессивность и экономичность в получении первичной информации о состоянии плотины по сравнению с традиционными геотехническими методами. Совместное их использование с геотехническими данными позволит принимать упреждающие меры по предотвращению катастроф. Изменение физико-механических свойств (уплотнение, разуплотнение, сдвиги) и петрофизических характеристик (сопротивление, проводимость, плотность) в зонах эрозии создает аномальные геофизические поля, которые можно измерить на поверхности земли и оценить. Для выявления этих зон чаще применяются геофизические методы электроразведки в различной модификации в комплексе с электромагнитным и сейсмическим зондированием, реже – с георадарным. Таким образом, геофизические методы являются достаточно эффективным способом посто-

янного мониторинга состояния плотины. Физической предпосылкой применения методов геофизики является изменение петрофизических свойств пород, связанных с их увлажненностью [10].

На основе опыта различных исследователей был использован рациональный комплекс геофизических методов: электроразведочные методы диполь-электрического зондирования (ДЭЗ), вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), естественного электрического поля (ЕП), георадарное и сейсмическое зондирование. Основной целью была оценка потенциальных возможностей этих методов для картирования зон эрозии, выявления в ней участков инфильтрации и возможного её направления в теле сооружения.

Объектом исследования была грунтовая плотина водохранилища К-25 высотой 18 м, длиной 156 м и шириной гребня 4,5 м. Назначение ирригационное. Эксплуатируется с 1964 г. Полный объем воды 4,08 млн м³. В теле плотины находятся эксплуатационный и аварийный водоводы (рис. 1). Внешний осмотр плотины показывает, что северный склон покрыт густой растительностью и кустарниками, что может свидетельствовать о возможной инфильтрации воды сквозь плотину. В восточной части сооружения, на стыке тела с основанием, наблюдается зона струйной фильтрации.



Рис. 1. Схема расположения геофизических профилей и точек вертикального электрического зондирования

Fig. 1. Schematic location of geophysical profiles and vertical electrical sounding points

Геофизическим съёмкам предшествовало топографическое обеспечение. В состав работ входило:

- вешение и промер профилей для сейсморазведки и метода ЕП с расстановкой пикетов через 10 м, между ними закопущки через 5 м;
- координатно-высотная привязка точек геофизических наблюдений электронным тахеометром с шагом 5 м;
- координатная привязка концов профилей и точек излома GPS-навигатором типа Garmin.

Объект ранее был исследован электроразведочными методами (ДЭЗ, ВЭЗ) и георадарным зондированием. Результаты этих исследований опубликованы в работах [11, 12].

Дополнительно для уточнения фильтрационной обстановки и структурного строения были проведены обследования методами ЕП и сейсморазведки, результаты которых рассмотрены в настоящей статье.

Методы и методология

Особенностью метода ЕП является его чувствительность непосредственно к потоку грунтовых вод [10, 13]. Поток грунтовых вод, просачиваясь через пористую среду, создает электрическое поле на поверхности земли [14, 15]. Также в [14, 15] показано, что сходные аномальные эффекты потенциала имеют место за счет формирования диффузионно-адсорбционных процессов, связанных с различиями в пористости грунтов и минерализации поровой жидкости. Такие аномалии наблюдаются совместно с фильтрационными и разделить их, как правило, не представляется возможным. Осложняющим фактором при диагностике аномальных эффектов является наличие в изучаемой среде электропроводящих объектов: металлических труб и других конструкций. В них, согласно [16], формируются «природные гальванические элементы» в виде неравномерно окисляющихся электропроводящих тел. Это проявляется локальными отрицательными аномалиями в поле ЕП, которые по конфигурации также могут быть сходными с фильтрационными. Комплексирование геофизических методов увеличивает достоверность данных ЕП, связанных с фильтрационными процессами.

В работах [17–19] для распознавания диффузионно-адсорбционных аномалий предложена и реализована на ряде объектов корреляция полей ЕП и кажущихся сопротивлений.

В исследованиях плотин Вилюйской [16] и Иркутской ГЭС [17] для повышения эффективности метода ЕП по фильтрационной обстановке применялись режимные наблюдения. При этом диагностическим признаком фильтрации, подтвержденной другими методами, являлась аномально повышенная динамика значений потенциала ЕП, отчетливо проявленная в графиках. Кроме того, проведены исследования увеличения набора информативных параметров. С этой целью кроме традиционного потенциала использована его дисперсия для количественной характеристики проявления фильтрационных процессов.

Полевые измерения ЕП выполнялись способом потенциала. В качестве измерительных электродов использовались медно-сульфатные неполяризующиеся электроды. Съёмка ЕП выполнена 3 раза по шести субпараллельным профилям с расстоянием между ними порядка 10 м и перпендикулярному с шагом 5 м в осенний период с интервалом в 1 месяц при общем понижении уровня воды на 2 м. При этом уровень воды в водохранилище составлял 757,5, 756,0 и 755,5 м в соответствующих датах измерения. В сложных условиях заземления, связанных с существенной неоднородностью верхней части разреза, сложенной проросшей травой и каменной наброской плотины, погрешность повторных измерений составила $\pm 1,0$ мВ, а контрольных – $\pm 2,5$ –3,0 мВ.

При проведении сейсмических исследований был применен корреляционный метод преломленных и рефрагированных волн. Для обеспечения глубинности сейсмического зондирования рефрагированными волнами порядка 40 м длина годографа составляла 200 м. Возбуждение упругих вертикальных (для продольных волн) и горизонтальных (для поперечных волн) колебаний вызывалось ударами кувалды с расстоянием между пунктами возбуждения 40 м. Приём упругих колебаний осуществлялся для продольных волн вертикальными сейсмоприемниками GS-32СТ, для поперечных волн – JF20DX. Для ослабления остаточного фона продольных волн возбуждение поперечных волн выполнялось в виде двух разнополярных воздействий ($\pm Y$). Регистрация упругих колебаний раздельная (для продольных и поперечных волн) с шагом квантования сигнала 1 мС.

Результаты и обсуждение

Метод естественного электрического поля. Плотина была первично обследована методом ЕП, полученные результаты подробно приводятся в работе [20].

Для повышения достоверности диагностики потенциала естественного электрического поля $U_{\text{ЕП}}$, связанного с фильтрационными процессами, применены способы математической статистики, к примеру дисперсионный анализ. Дисперсия σ^2 рассчитывалась для каждой точки трёхкратных измерений по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n},$$

где x_i – измеренное значение; \bar{x} – среднее выборочное значение; n – количество выборки.

Для расчёта σ^2 из наблюдаемого поля по всем профилям вычиталась региональная составляющая $U_{\text{ЕП}}$ по его тренду. Расчёт σ^2 (рис. 2, а) показывает наличие в диапазоне пикетов 100–150 аномальной зоны, трудно обнаруживаемой в поле $U_{\text{ЕП}}$. Результаты интерпретации дисперсии $\sigma^2_{\text{ЕП}}$ по всей площади приведены на рис. 2, б. При этом сечение изолиний этого параметра принято равным величине стандартного отклонения от среднего 1,3.

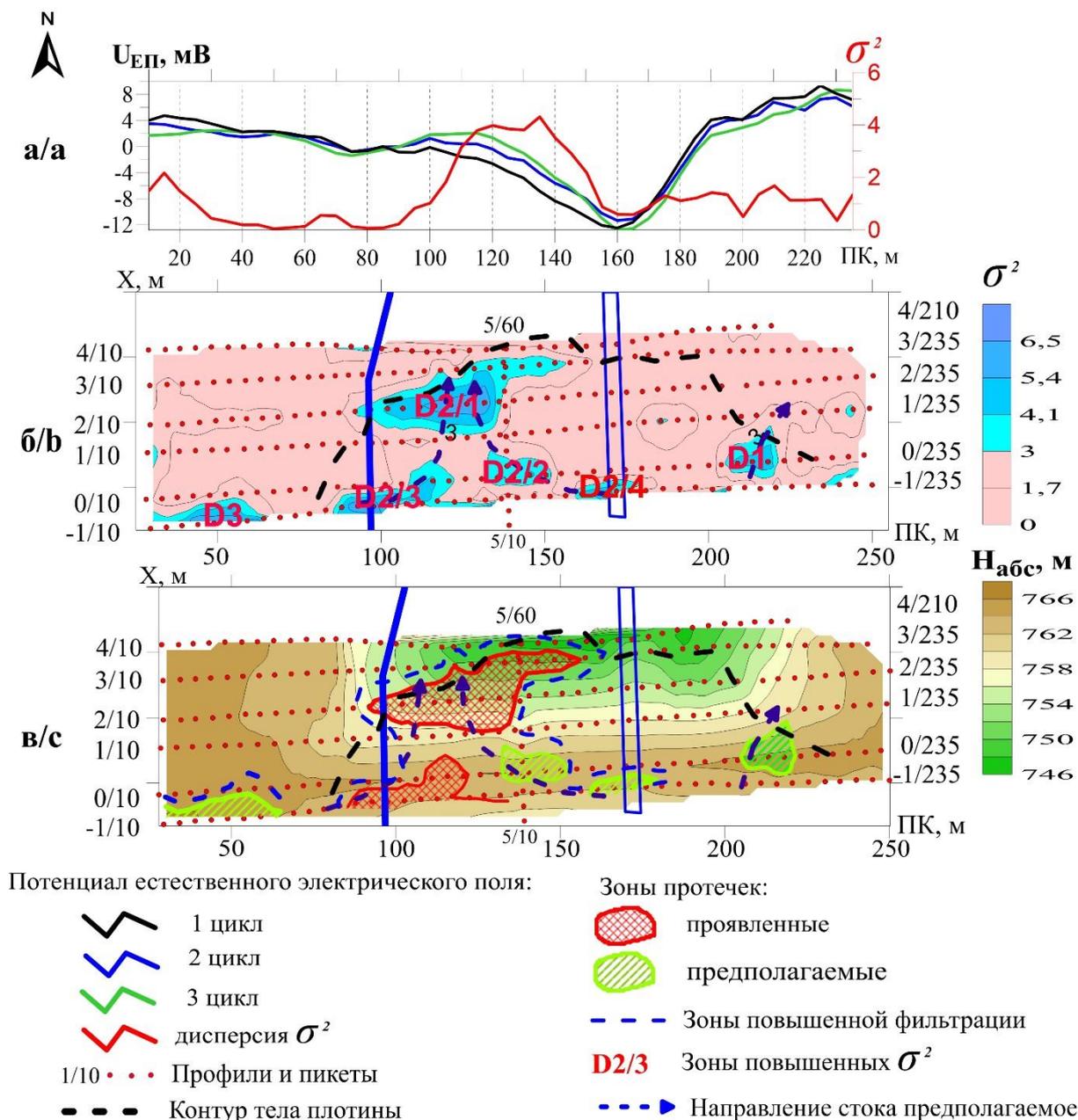


Рис. 2. Результаты расчета σ^2 по профилю 3 (а), карты дисперсии естественного поля (б) и зон протечек (в)
 Fig. 2. Results of σ^2 calculating along the profile 3 (a), maps of self-potential dispersion (b) and leakage zones (c)

Наиболее контрастные повышения дисперсии установлены в пространстве между водоводами. Среди них наиболее интенсивна аномалия D2/1, которая простирается до основания плотины. Эта зона проинтерпретирована как область, где максимально проявляются фильтрационные процессы. Там же располагаются зоны аномалий D2/2, D2/3 и D2/4, в которых максимальные значения дисперсии локализуются по профилю 1. С учётом конфигурации изолиний повышенных значений дисперсии они объединены с зоной D2/1 в одну область повышенной фильтрации. Зона D3 находится на расстоянии 15–20 м вне пределов плотины. Аномальная зона D1 выявлена на восточном фланге плотины, в области, прилегающей к её гребню.

Схема зон протечек по параметру дисперсии U_{EP} показана на рис. 2, в. Наиболее интенсивные фильтрационные процессы отмечены в северо-западной части плотины. Учитывая, что рельеф дневной поверхности в этой части понижен, следует ожидать дополнительные деструктивные процессы, связанные с атмосферными осадками. Диффузионно-адсорбционное и фильтрационное происхождение аномальной зоны D2/1 вполне однозначно может быть определено по данным сейсморазведки.

Особенностью зоны фильтрации D1 в правобережной части плотины является её меньшая проявленность в параметре дисперсии. Зона D1 располагается в пониженной части рельефа практически вкост борта, что может способствовать разрушению сооружения.

В целом по данным электроразведки ЕП получена общая характеристика фильтрационной обстановки в плотине. По аномальным эффектам в параметре дисперсии потенциала ЕП выявлены зоны, предположительно связанные с фильтрационными процессами, требующие уточнения их природы и определения фильтрационных характеристик.

Сейсмическая разведка. Разрез профиля 0 в пределах тела плотины представляет собой структуру «проседания» с повышенной мощностью (до 5–6 м) низкоскоростных грунтов (рис. 3, б). С учётом инженерно-геологических данных и результатов ВЭЗ эти грунты проинтерпретированы водопроницаемыми суглинками. По кровле подстилающих их образований получена преломляющая граница 1 как в продольных, так и поперечных волнах (рис. 3, в). Там же данными ВЭЗ отмечено и повышение электрического сопротивления. По совокупности полученных данных эта

граница объяснена кровлей слабопроницаемых суглинков.

Жесткая преломляющая граница в продольных волнах в пределах плотины расположена на глубине 18 м. Она совпадает с геоэлектрической границей и вызвана уплотнёнными суглинками основания плотины. По флангам плотины к основанию примыкает преломляющая граница 2. Она, вероятно, связана с фациальным изменением природных суглинистых грунтов. Основание плотины диагностировано в поперечных волнах по максимальным значениям вертикального градиента скорости. Кроме того, в обоих типах волн установлено наличие скоростных границ при смене подстилающих грунтов основания на материнские подстилающие грунты. Это подтверждается результатами метода сопротивлений, которые интерпретируют их как русловые гравийно-валунно-суглинистые отложения.

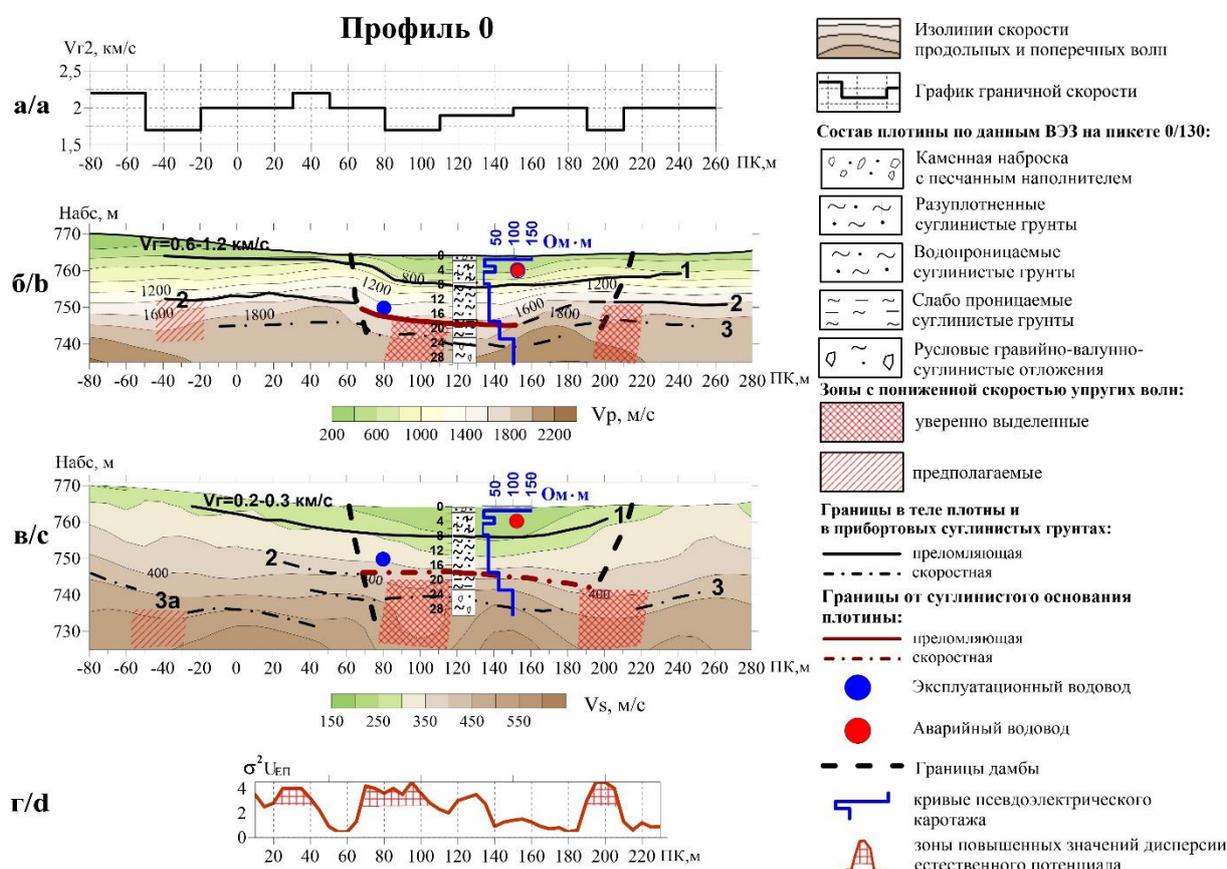


Рис. 3. Строение плотины по профилю 0: график граничной скорости (а); по продольной волне (б); по поперечной волне (в); график дисперсии естественного потенциала (г)

Fig. 3. Dam structure along the profile 0: boundary velocity graph (a); longitudinal wave (b); transverse wave (c); self-potential dispersion graph (d)

Особенностью разреза является его существенная латеральная неоднородность, проявленная как в граничной скорости продольных волн на глубине залегания основания плотины (рис. 3, а), так и в скоростных разрезах обоих типов волн. Важной особенностью такой неоднородности представляется наличие зон с аномально пониженной скоростью упругих волн. Такие зоны установлены в бортовых частях плотины:

в интервалах 0/80–0/110 и 0/190–0/210, а также в начале профиля за пределами плотины 0/–50–0/–20. Интерес представляют первые две зоны, наиболее контрастно проявленные в скоростном разрезе в поперечных волнах. В них происходят наибольшие деформации геологических сред с понижением их прочностных свойств и повышением водопроницаемости. Косвенным подтверждением повышения во-

допроницаемости в таких зонах следует считать данные по дисперсии потенциала ЕП (рис. 3, з). Области anomalно повышенных значений этого параметра интерпретируются динамикой фильтрационной обстановки и однозначно коррелируются с зонами с пониженной скоростью упругих волн.

Аналогичные результаты были получены по профилям 1 и 2.

Комплексная интерпретация данных. На рис. 4 приведены комплексные интерпретированные данные по распределению зон с повышенной электропроводностью, поляризуемостью и диэлектрической проницаемостью аномальных эффектов, полученные геофизическими методами [11, 12]. Как видно из рисунка, наибольшая плотность аномальных зон имеет место в пространстве, прилегающем к западному борту плотины.

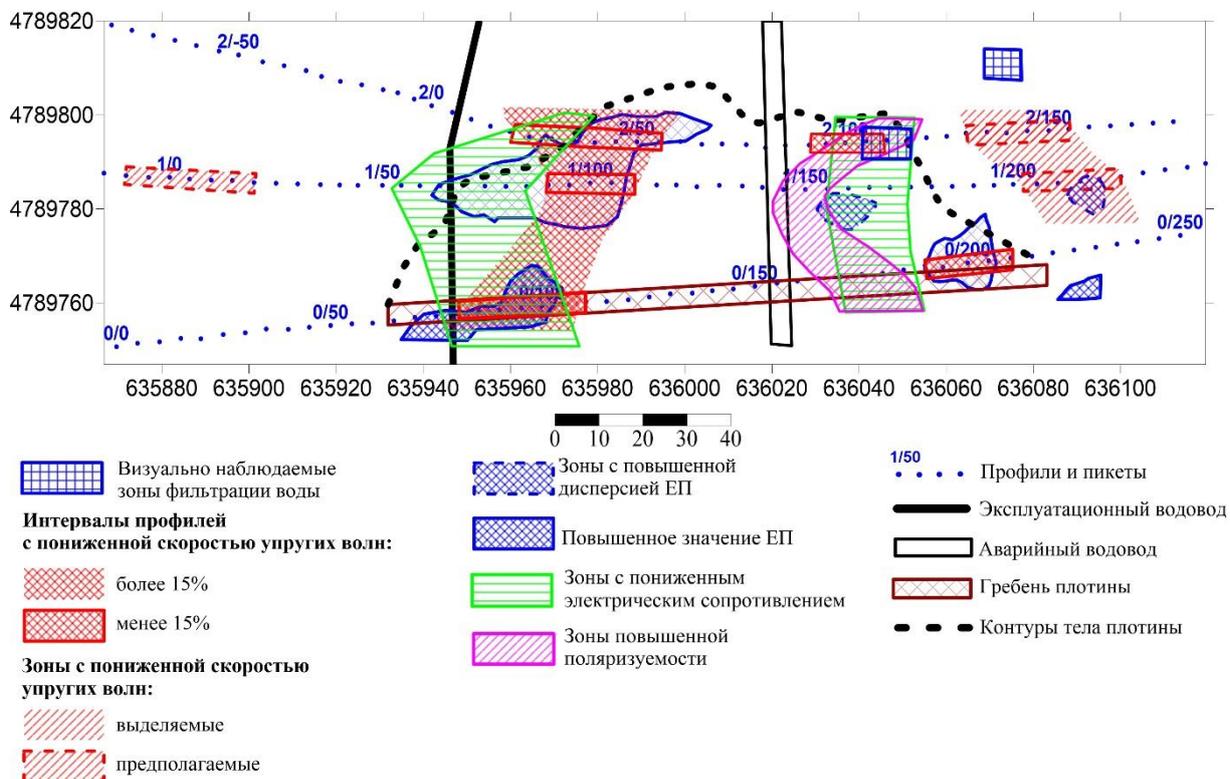


Рис. 4. Схема распределения зон аномальных эффектов в геофизических параметрах
 Fig. 4. Schematic distribution of anomalous effects zones in the geophysical parameters

Особенностью распределения зон, выделенных по всем параметрам, является их удовлетворительная сходимость в области гребня плотины по профилю 0 на участке 0/75–0/110 и в различной степени их расхождение по остальным профилям. По профилю 1 в контуры аномалий электрического сопротивления и поляризуемости попала только западная область аномалии дисперсии ЕП, тогда как наиболее интенсивная её часть и зона понижения скорости упругих волн оказались за его пределами. По профилю 2 в аномальные зоны электрического сопротивления и поляризуемости вошла только западная половина зоны с пониженной скоростью упругих волн. Ещё большие расхождения в местоположении рассматриваемых аномальных зон получены в восточной прибортовой части плотины. В этой области повышенные электропроводность и поляризуемость коррелируются с зоной пониженной скорости лишь по профилю 2 в районе визуально наблюдаемой зоны фильтрации, а по профилю 1 – с зоной слабо проявленной аномалии дисперсии ЕП. Наблюдается также вытянутость зоны с anomalно повышенной поляризуемостью в сторону аварийного водопровода. Существенная неоднород-

ность тела плотины и пересечённый рельеф дневной поверхности являются наиболее вероятными причинами приведённых расхождений аномальных эффектов. Также не следует исключать и влияния металлических конструкций (водопроводов) на эффекты в электропроводности и поляризуемости, особенно в увлажнённой среде.

При создании схемы фильтрации за основу были взяты данные по дисперсии ЕП и скорости упругих волн. Первый параметр использовался в качестве индикатора динамики фильтрационных процессов, второй – для их увязки с ослабленными зонами. На рис. 5 приведена схема расположения зон повышенной фильтрации воды. Границы таких зон проводились по осредненным контурам обоих параметров, а направление основного стока – по максимумам дисперсии ЕП.

Наиболее контрастной и уверенно диагностируемой зоной фильтрации представляется F1, выделенная в западной прибортовой части плотины. Она охватывает область за пределами насыпного тела плотины, начиная с пикета 1/77 и далее на северо-восток. Направление основного стока в этой зоне практически проходит по её середине.

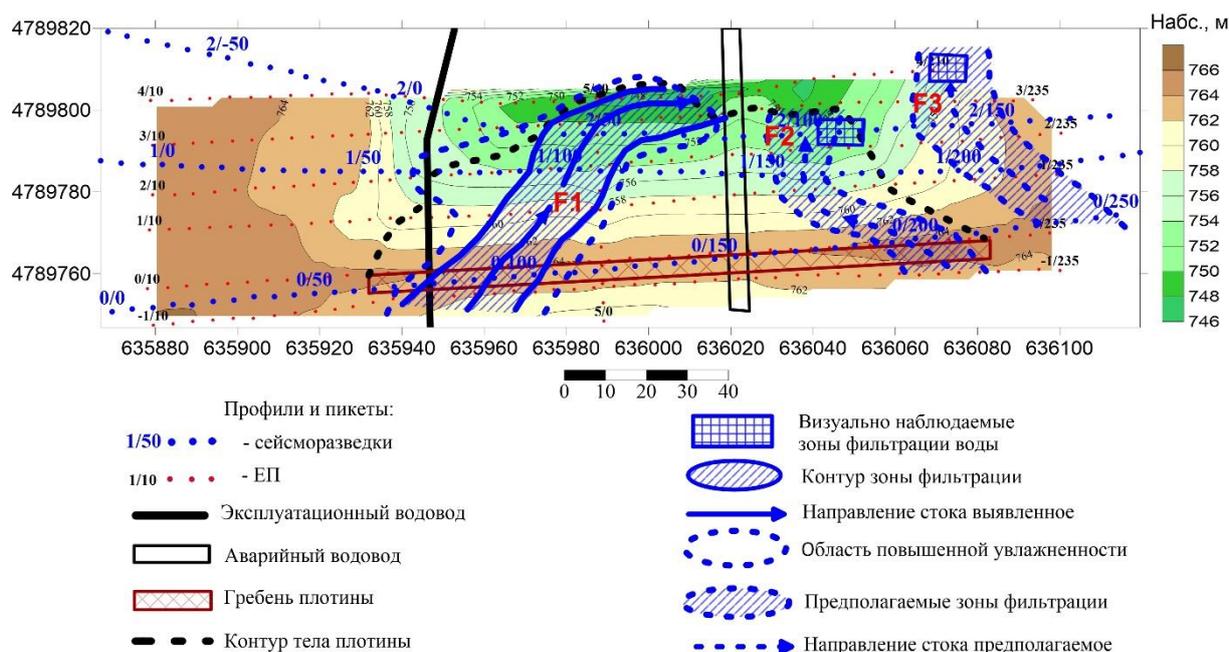


Рис. 5. Схема расположения зон повышенной фильтрации воды
Fig. 5. Schematic location of zones with the increased water filtration

Зоны фильтрации F2 и F3 визуально подтверждаются выходами на дневную поверхность фильтрующейся воды на профиле 2 от 2/105 до 2/115 и у пикета 4/210. Если источник фильтрации по зоне F2 более или менее понятен и находится, предположительно, в бортовой части плотины, то для зоны F3, находящейся за пределами плотины, источником могут быть как водохранилище, так и близлежащие дома жилого посёлка.

Таким образом, выбранный рациональный комплекс является достаточным для определения расположения ослабленных зон в теле плотины, которые являются потенциально опасными путями фильтрации воды.

Данное исследование планируется развить и продолжить в направлении повышения производительности, включая в предлагаемый рациональный комплекс вместо метода ВЭЗ метод электрической томографии (ERT), который является современной модификацией ВЭЗ и позволит с помощью многоэлектродной системы добиться высокой плотности наблюдений и обеспечить необходимую скорость измерений [21].

Заключение

Получены экспериментальные данные по структурно-вещественным особенностям внутреннего строения тела плотины водохранилища К-25. Метод диполь-электрического зондирования в модификации вызванной поляризации показал высокую эффективность по выявлению участков с повышенной водопроницаемостью. Дана оценка информативности электрических параметров кажущего сопротивления и относительной поляризуемости при выявлении в теле плотины зон инфильтраций и расположения их в плане. При использовании этих параметров в качестве диагностических признаков проведен анализ осложняющих их факторов.

По результатам вертикального электрического зондирования получены сведения о детальном распределении параметров кажущего сопротивления по вертикали 40 и более метров, свидетельствующие о неоднородности строения тела сооружения в этом параметре.

По данным совместной интерпретации результатов диполь-электрического зондирования в модификации вызванной поляризации, вертикального электрического и георадарного зондирования составлены инженерно-геологические разрезы, которые можно рассматривать как исходные модели для мониторинга водопроницаемости плотины.

Площадная электроразведка методом естественного электрического поля показала высокую результативность в варианте режимных наблюдений при выявлении зон фильтрации воды. С целью достоверности диагностики аномальных эффектов, связанных с фильтрационными процессами, использован параметр дисперсии электрического потенциала.

Сейсморазведка корреляционным методом преломленных и рефрагированных волн на продольных и поперечных волнах была достаточно продуктивной при изучении строения плотины и выявлении в ней ослабленных зон, в которых могут проходить фильтрационные процессы. Корреляция выделенных сейсморазведкой ослабленных участков с зонами аномально повышенной дисперсии электрического потенциала существенно повысила достоверность геофизических данных при оценке фильтрационной обстановки в плотине.

По результатам работ можно сделать вывод, что электроразведку методом диполь-электрического зондирования в модификации вызванной поляризации целесообразно использовать для первичной оценки состояния плотины как наиболее экспрессно-

го метода. Для более детального изучения структурного строения объекта необходимо применить электроразведку методом естественного поля и сейсморазведку на продольных и поперечных волнах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geophysical methods and their applications in dam safety monitoring / N. Adamo, N. Al-Ansari, V. Sissakian, J. Lau, S. Knutsson // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. – 2020. – V. 11. – № 1. – P. 291–345.
2. Park C. Geophysical methods for reservoir safety investigations // Environment Agency and British Dam Society. – 2017. – P. 3–33. URL: <https://damsafetygroup.com/wp-content/uploads/2022/01/Geophysical-methods-for-reservoir-safety-investigations.pdf> (дата обращения: 23.03.2021).
3. Characterization of focused seepage through an Earthfill dam using geoelectrical methods / J.S. Ikard, A. Revil, M. Schmutz, M. Karaoulis, A. Jardani, M. Mooney // Groundwater. – 2014. – V. 52. – № 6. – P. 952–965.
4. Dahlin T., Sjödhall P., Johansson S. Investigation of geophysical methods for assessing seepage and internal erosion in embankment dams: a guide to resistivity investigation and monitoring of embankment dams // Report for CEA Technologies Inc. – Burbany, Canada: BC Hydro, 2008. – P. 2–84.
5. Dam seepage investigation of an Earthfill dam in Warren County, Missouri using geophysical methods / S.C. Nwokebuihe, A.M. Alotaibi, A. Elkry, E.V. Torgashov, N.L. Anderson // AIMS Geosciences. – 2017. – V. 3 (1). – P. 1–13.
6. Karastathis V., Karmis P. Geophysical investigations of seepage and settlement effects at Mornos dam // 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC. – Copenhagen, Denmark, 2012. – V. 4. – P. 2909–2913.
7. Sari M., Seren A., Alemdag S. Determination of geological structures by geophysical and geotechnical techniques in Kirklartepe Dam Site (Turkey) // Journal of Applied Geophysics. – 2020. – V. 182. – article 104174.
8. Al-Fares W., Asfahani J. Evaluation of the leakage origin in Abu Baara earthen dam using electrical resistivity tomography, northwestern Syria // Geofisica Internacional. – 2018. – V. 57. – № 4. – P. 223–237.
9. Seepage investigation on an existing dam using integrated geophysical methods / N.K. Olasunkanmi, A. Aina, S. Olatunji, M. Bawalla // Journal of Environment and Earth Science. – 2018. – V. 8. – № 5. – P. 6–16.
10. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 501 с.
11. Akhmetov Y.M., Assemov K.M., Shaytorov V.N. Geophysical survey of earthen dam using the electrical prospecting methods // Contributions to Geophysics and Geodesy. – 2020. – V. 50/2. – P. 249–259.
12. Исследование земляной плотины комплексом геофизических методов / Е.М. Ахметов, К.М. Асемов, Е.Т. Мукашбеков,

Примененный рациональный комплекс геофизических методов с достаточной точностью определяет состояние грунтовых плотин и может быть использован для мониторинга их технического состояния.

- M.B. Шульга // Научно-технический журнал Евро-Азиатского геофизического общества. Геофизика. – 2020. – № 3. – С. 72–77.
13. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л.: Недра, 1980. – 446 с.
14. Совместный анализ данных естественного поля и электромографии для изучения Александровского городища (Калужская область) / В.А. Шевнин, А.А. Бобачев, С.В. Иванова, К.И. Баранчук // Инженерная геофизика 2014: 10-я научно-практическая конференция и выставка Европейской ассоциации геоучёных и инженеров. – Геленджик, Россия, 2014. – С. 1–6.
15. Шевнин В.А. Распознавание аномалий естественного электрического поля диффузионно-адсорбционного происхождения // Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология. – 2018. – № 2. – С. 93–98.
16. Великин С.А., Снегирев А.М. Локальный геофизический мониторинг состояния правобережного примыкания плотины Вилюйской ГЭС-1 // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. – 2005. – № 2. – Вып. № 6. – С. 77–85.
17. Динамика физического состояния ослабленных зон насыпной плотины Иркутской ГЭС за период 2002–2012 гг. / В.И. Джурик, А.Ю. Ескин, С.П. Серебренников, Е.В. Брыжак // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2014. – Т. 8. – С. 35–41.
18. Технология комплексных инженерно-геофизических изысканий для диагностики состояния гидротехнических сооружений / В.П. Колесников, А.В. Коноплев, А.М. Пригара, А.В. Татаркин // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 257–262.
19. Определение физико-механических свойств грунтов при оценке состояния гидротехнических сооружений методами неразрушающего контроля / А.М. Пригара, А.В. Татаркин, А.В. Пенский, Б.М. Осовецкий, А.В. Коноплев // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84 (10). – С. 2–12.
20. Применение метода естественного электрического поля для диагностики состояния земляной плотины / Е.М. Ахметов, К.М. Асемов, Е.Т. Мукашбеков, Н.Н. Кусербаева // Геология и охрана недр. – 2020. – № 2 (75). – С. 75–78.
21. Turarova M., Mirgalikyu T., Mukanova B., Kaznacheev P. Simulation of electrical resistivity tomography curves in a three-dimensional medium with a ground surface relief and immersed inhomogeneity // International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities ICISCT. – Tashkent, Uzbekistan, 2019. – P. 1–4.

Поступила 24.11.2021 г.

Информация об авторах

Ахметов Е.М., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан.

Асемов К.М., главный специалист, Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан.

Муканова Б.Г., доктор физико-математических наук, профессор, Astana IT University.

Миргаликызы Т., и.о. доцента, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева.

Аширов Б.М., генеральный директор, ТОО «Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция».

Жолдыбаев А.К., ведущий инженер, Институт геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан.

UDC 627.8.059: 550.8.04

APPLICATION OF THE COMPLEX OF GEOPHYSICAL METHODS TO INVESTIGATE THE K-25 RESERVOIR EARTH DAM IN THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Yermek M. Akhmetov¹,
aem.47@mail.ru

Kambar M. Assemov¹,
kassm@kazkern.kz

Balgaisha G. Mukanova²,
mbsha01@gmail.com

Tolkyn Mirgalikyzy³,
m_t85@mail.ru

Beimbet M. Ashirov⁴,
bashirov.kz@gmail.com

Alexey K. Zholdybaev⁵,
gado_graf@mail.ru

¹ National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan, 67, Zhandossov street, Almaty, A10M6G5, Kazakhstan.

² Astana IT University, 55/11, Mangilik Yel avenue, Nur-Sultan, Z05T3C8, Kazakhstan.

³ L.N. Gumilev Eurasian National University, 2, Satpaev street, Nur-Sultan, Z01A3D7, Kazakhstan.

⁴ Seismological Experimental Methodological Expedition Ltd, 75a, Al-Farabi avenue, Almaty, A15E3F4, Kazakhstan.

⁵ Institute of Geophysical Research, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Meridian site, Kurchatov, F10D0X5, Kazakhstan.

The relevance. The safety problems of dams used for agricultural land reclamation are acute in the society. Their destruction leads to the great economic and environmental damage. Their monitoring by the non-invasive geophysical methods takes a worthy place for solving this problem. The geophysical methods allow obtaining the information about the object of research cheaply and promptly and complete the traditional geotechnical methods. During the dam operation water seeps through its body, around the spillway structures, as well as in the near-side part, which leads to the formation of erosion zones. This process is accompanied by the changes in the physical-mechanical properties of rocks, which can significantly influence the stability and safety of construction. The timely detection at an early stage of such changes by the geophysical methods is important to take the preventive measures and preventing the disasters.

The aim of the study is to substantiate rational set of geophysical methods, their testing on the earth type hydraulic structures and evaluate their informativity when determining the structure current state.

Object: erosion zones of the K-25 reservoir earth dam in Kazakhstan.

Methodology: field study, processing and interpretation of received data; identification of erosion zones, related to humidifying, by the resistance, polarization, dielectric penetrability parameters; drawing of the initial engineering-geological section of construction; substantiation of regime supervision by the self-potential method; mapping of infiltration zones and its direction at the different degrees of reservoir filling; allocation of decompaction zones and their evaluation by the longitudinal and lateral wave data; complex interpretation of results.

Results. The authors have developed the diagnostic technology of earth dam physical state according to the geophysical data in the conditions of the Republic of Kazakhstan. The methods of dipole electric sounding of evoked polarization, vertical electric sounding and ground penetration radar sounding have shown the high efficiency at revealing the sites with the increased water permeability. The information content of geoelectric parameters was assessed for the identification of the flowing water bearing zones and their mapping in the plan. The authors carried out the analysis of complicating factors when using these parameters. According to the data of vertical electrical sounding, the detailed distributions of electric resistance, testifying to the essential inhomogeneity of dam body in this parameter, were obtained. The engineering-geological cross-sections, which may be considered as the starting models for monitoring dam permeability, were made based on the complex data. The area electrical survey by the self-potential method at a variant of regime observations proved to be effective at the revealing of water filtration zones. The longitudinal and transverse seismic surveys were quite effective to study the structure of dam and identify the weakened zones, where filtration may take place. The results of seismic survey correlate quite well to the results of electric potential dispersion when assessing the filtration conditions. According to the results of experimental-methodical works it is possible to conclude, that it is expedient to use the electrical survey for the primary estimation of dam condition, as the most express method. For more detailed study of structure, it is necessary to apply self-potential method and seismic survey on the longitudinal and transverse waves.

Key words:

Geophysical methods, earthen dam, erosion zones, infiltration, regime observations, interpretation, monitoring.

REFERENCES

1. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Lau J., Knutsson S. Geophysical Methods and their Applications in Dam Safety Monitoring. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 2020, vol. 11, no. 1, pp. 291–345.
2. Park C. Geophysical methods for reservoir safety investigations. *Environment Agency and British Dam Society*, 2017, pp. 3–33. Available at: <https://damsafetygroup.com/wp-content/uploads/2022/01/Geophysical-methods-for-reservoir-safety-investigations.pdf> (accessed 23 March 2021).
3. Ikard S.J., Revil A., Schmutz M., Karaoulis M., Jardani A., Mooney M. Characterization of focused seepage through an Earth-

- fill dam using geoelectrical methods. *Groundwater*, 2014, vol. 52, no. 6, pp. 952–965.
4. Dahlin T., Sjödhall P., Johansson S. Investigation of geophysical methods for assessing seepage and internal erosion in embankment dams: a guide to resistivity investigation and monitoring of embankment dams. *Report for CEA Technologies Inc.* Burbany, Canada, BC Hydro, 2008. pp. 2–84.
 5. Nwokebuihe S.C., Alotaibi A.M., Elkrry A., Torgashov E.V., Anderson N.L. Dam seepage investigation of an earthfill dam in Warren County, Missouri using geophysical methods. *AIMS Geosciences*, 2017, vol. 3 (1), pp. 1–13.
 6. Karastathis V., Karmis P. Geophysical investigations of seepage and settlement effects at Mornos dam. *74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012*. Copenhagen, Denmark, 2012. Vol. 4, pp. 2909–2913.
 7. Sari M., Seren A., Alemdag S. Determination of geological structures by geophysical and geotechnical techniques in Kırklartepe Dam Site (Turkey). *Journal of Applied Geophysics*, 2020, vol. 182, article 104174.
 8. Al-Fares W., Asfahani J. Evaluation of the leakage origin in Abu Baara earthen dam using electrical resistivity tomography, north-western Syria. *Geofisica Internacional*, 2018, vol. 57, no. 4, pp. 223–237.
 9. Olasunkanmi N.K., Aina A., Olatunji S., Bawalla M. Seepage investigation on an existing dam using integrated geophysical methods. *Journal of Environment and Earth Science*, 2018, vol. 8, no. 5, pp. 6–16.
 10. Ogilvi A.A. *Osnovy inzhenernoy geofiziki* [Fundamentals of engineering geophysics]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 501 p.
 11. Akhmetov Y.M., Assemov K.M., Shaytorov V.N. Geophysical survey of earthen dam using the electrical prospecting methods. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 2020, vol. 50/2, pp. 249–259.
 12. Akhmetov Y.M., Assemov K.M., Mukashbekov Y.T., Shulga M.V. Investigation of an earthen dam using a complex of geophysical methods. *Scientific and technical journal of the Euro-Asian Geophysical Society. Geophysics*, 2020, no. 3, pp. 72–77. In Rus.
 13. Semenov A.S. *Elektrorazvedka metodom estestvennogo elektricheskogo polya* [Electrical prospecting by the method of natural electric field]. Leningrad, Nedra Publ., 1980. 446 p.
 14. Shevnin V.A., Bobachev A.A., Ivanova S.V., Baranchuk K.I. Sovmestny analiz dannykh estestvennogo polya i elektrotomografii dlya izucheniya Aleksandrovskogo gorodishcha (Kaluzhskaya oblast) [Joint analysis of natural field data and electrical tomography for the study of the Alexandrovskoe settlement (Kaluga region)]. *10-ya nauchno-prakticheskaya konferentsiya i vystavka Evropeyskoy assotsiatsii geouchonykh i inzhenerov. Inzhenernaya geofizika 2014* [10th scientific-practical conference and exhibition of the European Association of Geoscientists and Engineers. Engineering Geophysics 2014]. Gelendzhik, Russia, 2014. pp. 1–6.
 15. Shevnin V.A. Recognition of anomalies of the natural electric field of diffusion-adsorption origin. *Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology*, 2018, no. 2, pp. 93–98. In Rus.
 16. Velikin S.A., Snegirev A.M. Local geophysical monitoring of the state of the right-bank abutment of the dam of the Vilyui HPP-1. *Bulletin of the Kamchatka regional association «Educational and scientific center»*. *Earth Sciences*, 2005, no. 2, Iss. 6, pp. 77–85. In Rus.
 17. Dzhurik V.I., Eskin A.Yu., Serebrennikov S.P., Bryzhak E.V. Dinamika fizicheskogo sostoyaniya oslablennykh zon nasypnoy plotiny Irkutskoy GES za period 2002–2012 gg. [Physical condition dynamics on the weakened zones of the bulk dam of the Irkutsk Hydroelectric Power Station for the period 2002–2012]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*, 2014, vol. 8, pp. 35–41.
 18. Kolesnikov V.P., Konoplev A.V., Prigara A.M., Tatarkin A.V. Technology of complex geophysical survey for diagnosis of hydraulic structures. *Modern problems of science and education*, 2012, no. 6, pp. 257–262. In Rus.
 19. Prigara A.M., Tatarkin A.V., Pensky A.V., Osovetsky B.M., Konoplev A.V. Determination of physical and mechanical properties of soils when assessing the condition of hydraulic structures using non-destructive testing methods. *Scientific journal of Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 84 (10), pp. 2–12. In Rus.
 20. Akhmetov Y.M., Assemov K.M., Mukashbekov Y.T., Kuserbaeva N.N. Application of self-potential method for the diagnostics of the earth dam state. *Geology and Subsoil Protection*, 2020, no. 2 (75), pp. 75–78. In Rus.
 21. Turarova M., Mirgalikzy T., Mukanova B., Kaznacheev P. Simulation of electrical resistivity tomography curves in a three-dimensional medium with a ground surface relief and immersed inhomogeneity. *International Conference on Information Science and Communications Technologies: Applications, Trends and Opportunities ICISCT*, Tashkent, Uzbekistan, 2019. pp. 1–4.

Received: 24 November 2021.

Information about the authors

Yermek M. Akhmetov, Cand Sc, associate professor, leading researcher, National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan.

Kambar M. Assemov, chief specialist, National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan.

Balgaisha G. Mukanova, Dr. Sc., professor, Astana IT University.

Tolkyn Mirgalikzy, associate professor, L.N. Gumilev Eurasian National University.

Beimbet M. Ashirov, general director, Seismological Experimental Methodological Expedition Ltd.

Alexey K. Zholdybaev, leading engineer, Institute of Geophysical Research, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.