

ДИАГНОСТИКА ГРУНТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НА ПРИМЕРЕ ЕЛЬЧЕВСКОЙ ПЛОТИНЫ*

© 2014 г. О.И. Федорова, В.А. Давыдов

Институт геофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Ключевые слова: сейсмические зондирования, преломляющая граница, скорости продольных и поперечных волн, электрические зондирования, электрическая проводимость грунтов.



О.И. Фёдорова



В.А. Давыдов

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований при диагностике состояния грунтовой плотины сейсмическими и электрическими зондированиями. Была применена сейсмическая комбинированная методика МПВ и MASW и комплексная методика электрических вертикальных и дифференциальных зон-

дирований. По сейсмическим данным определены упругие свойства грунтов, выделены преломляющие границы и зоны разуплотнения в насыпи. По электрическим зондированиям выявлены зоны проводимости в теле насыпи и ее основании, связанные с повышенной влажностью грунта за счет фильтрации воды из водоема.

Введение

Грунтовые плотины – одни из самых распространенных гидротехнических сооружений. В Свердловской области их насчитывается более 400, многие плотины горнозаводского Урала построены еще в XVIII веке. Грунтовые плотины экономичны при строительстве, но наиболее подвержены частичному или полному разрушению, что может привести к катастрофическим последствиям. Плотины находятся под постоянным гидравлическим напором, поэтому с течением времени происходит разрушение насыпи, в основном из-за неоднородности используемого природного грунта, нарушений

* Работа выполнена при поддержке проекта ОФИ (№ 13-5-004-СГ).

технологии строительства грунтового гидротехнического сооружения (ГТС) и несвоевременно выявленных изменений в теле насыпи.

Контроль за состоянием плотин осуществляется инженерно-геологическими методами. Изучаются физические свойства грунтового материала, взятого из пробуренных скважин. Эти исследования самые достоверные, но дают точечную информацию и разрушают целостность насыпи. Для оперативного неразрушающего контроля ГТС используют альтернативные геологическим геофизические методы [1, 2]. Наибольшее предпочтение отдается геоэлектрическим методикам, позволяющим по электрофизическим характеристикам грунта обнаружить участки повышенной обводненности и места инфильтрации воды [3]. Электроразведочные работы недороги, вполне доступны как в оснащении необходимым оборудованием, так и в методическом плане, и позволяют выявлять основной негативный фактор, влияющий на состояние плотины, – влагонасыщенность грунта. В местах фильтрации воды сквозь тело и основание насыпи возможно развитие процессов суффозии, приводящих к разуплотнению породы, образованию полостей. В этом случае целесообразно в комплекс с электрическими исследованиями включать сейсмические методы для изучения упругих свойств среды.

В статье представлены результаты геофизических исследований, проведенных на дамбе, ограждающей водоем-осветлитель на р. Ельчевке, впадающей в Волчихинское водохранилище (Свердловская обл.). В отстойник, построенный в 1950-е гг., десятки лет сбрасываются нейтрализованные известью шахтные воды. Изучение состояния плотины выполнено комплексными электрическими и сейсмическими методами. Научная цель работы – применение не только известных распространенных геофизических методик, но и нестандартных технологий наблюдений и обработки полученных результатов. Практическая задача – обследование плотины, локализация утечек через тело плотины и ее основание.

Характеристика объекта

Плотина пруда на р. Ельчевке в Свердловской области расположена в 9 км к северу от г. Дегтярска, построена в 1952 г., реконструирована в 1972 г. Плотина сложена преимущественно суглинком с примесью щебня, ее протяженность около 700 м, высота 9–12 м. Полный проектный объем Ельчевского водохранилища составляет 9,34 млн м³, площадь зеркала воды – более 2 млн м². Русловая сеть водосбора водохранилища представлена тремя реками – Ельчевка, Исток, Дегтярка. Сток осуществляется через нерегулируемый водосбросный канал в восточной части плотины, пробитый в скальном грунте (рис. 1).

Ельчевский пруд является отстойником-накопителем донных отложений, образующихся в результате нейтрализации кислых дренажных вод



Рис. 1. Вид на Ельчевское водохранилище с плотины, рядом с водосбросным каналом.

Дегтярского рудника. Добычу медной руды проводили на Дегтярском медноколчеданном месторождении с 1914 по 1995 гг. как открытыми, так и подземными горными выработками. Откачка шахтных вод продолжается и после закрытия рудника в объеме более 5,5 млн м³ в год. Откачиваемые воды имеют низкое значение водородного показателя рН (около 2,5), высокие содержания железа, меди, цинка и марганца. Нейтрализацию шахтных вод проводят известковым раствором с доведением рН до 6,5–8,5 с выделением металлов и осаждением их в виде шламов в Ельчевском пруду-отстойнике. На 2011 г. объем донных отложений составил 4,4 млн м³, таким образом в настоящее время отстойник заполнен наполовину [4]. После осветления вода из пруда попадает в Волчихинское водохранилище – основной источник питьевого водоснабжения г. Екатеринбург.

Геологический разрез в районе строительства плотины по данным бурения имеет довольно пестрый характер. Он представлен тремя типами коренных пород субвертикального залегания: порфиритами, туфами и известняками. Широко развита трещиноватость скальных пород, а контакты туфов с порфиритами осложнены тектоническими нарушениями. Осадочные образования состоят из элювиальных и делювиальных отложений коры выветривания коренных пород, торфа и аллювия долины р. Ельчевка. Гранулометрический состав рыхлых отложений включает всю шкалу – от глин до крупнообломочного материала (щебень, глыбы).

Методика исследований

Основным сейсмическим методом изучения малых глубин является метод преломленных волн (МПВ), с помощью которого получают данные о скорости распространения продольных сейсмических волн (V_p) в среде. В процессе развития инженерной сейсморазведки появились новые методические приемы получения и обработки сейсмической информации. Одно из таких направлений – многоканальный анализ поверхностных волн (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) [5], получивший широкое распространение за рубежом для изучения различных геотехнических объектов. Метод MASW основан на явлении дисперсии скоростей распространения поверхностных волн, т. е. их зависимости от частоты колебаний. График данной зависимости называют дисперсионной кривой. Толщина грунтового слоя, частицы которого вовлечены в движение поверхностными волнами, обратно пропорциональна частоте колебаний, это позволяет по характеру дисперсионных кривых получить глубинный разрез скоростей поперечных волн (V_s). Методика комбинированных наблюдений МПВ и MASW с использованием стандартной (или модифицированной) системы наблюдений позволяет изучить упругие параметры среды – скорости продольных и поперечных волн [6].

Сейсмические измерения на Ельцевской плотине по методике комбинированных наблюдений проводили 24-канальной портативной цифровой сейсмостанцией «Синус-24М», разработанной в Институте геофизики УрО РАН [7]. В качестве детекторов сейсмических колебаний использованы вертикальные сейсмоприемники GS-20DX с установкой через два метра. Наблюдения осуществляли по системе встречных и нагоняющих годографов с 7 пунктами возбуждения на одну стоянку, с выносами на 13 и 25 м от каждого края косы. Это обеспечило полные перекрытия годографов для непрерывного прослеживания сейсмических границ, а также избыточность материала при изучении дисперсии поверхностных волн.

Колебания вызывали с помощью кувалды и металлической подложки в виде диска. Отметку момента удара фиксировали пьезодатчиком, закрепленным на кувалде и связанным со станцией по переговорной линии. Время дискретизации получаемого сигнала $\Delta t = 0,5$ мс, длина записи полезных волн 0,512 с. Для уменьшения помех и повышения отношения сигнал/шум использовали до 10 накоплений сигналов. Перед началом работы на каждой новой стоянке проводили запись микросейсмического фона. Качество полученных сейсмограмм контролировали непосредственно в момент измерений, при необходимости проводили повторное возбуждение и запись колебаний. Достигнутая глубина исследований составила 22–25 м.

Сейсмические данные обрабатывали комплектом специализированных программ, разделяя их на два этапа в соответствии с типом целевых волн. Для получения информации по продольным волнам сейсмограммы фильтровали, выделяли и прослеживали первые вступления головных волн, по которым проводили построение годографов. Годографы пересчитывали способом времени задержки для построения сейсмических преломляющих границ и томографическим способом (как рефрагированные волны) для получения скоростных разрезов продольных волн. Вторым типом целевых волн являлись поверхностные волны Релея, к ним применяли вариант суммирования скоростных спектров в скользящем окне с получением более контрастных дисперсионных кривых, которые затем конвертировались в скоростной разрез поперечных волн. Располагая информацией о сейсмических скоростях продольных и поперечных волн вычисляли еще один упругий параметр среды – коэффициент Пуассона (μ). Построение разреза коэффициента Пуассона можно использовать для решения различных инженерно-геологических задач, в частности, ранее были получены неплохие результаты при изучении подземных выработок и опасных геологических процессов [8, 9].

Электрофизические характеристики плотины изучали вертикальными электрическими зондированиями (ВЭЗ). Применяли в основном четырехэлектродную симметричную установку A^+MNB^- , в некоторых точках наблюдений из-за невозможности растянуть симметричную установку измерения выполнены с трехэлектродной установкой A^+MN (заземление B^- относилось в бесконечность).

Одновременно с вертикальными зондированиями выполняли дифференциальные с установкой MAN , где M и N – питающие заземления, между которыми в центре размещается первое питающее заземление (A), второе (B) относится в бесконечность [10]. Исследования с установкой MAN являются одними из немногих методик чистых аномалий на постоянном токе, при которых в однородной и горизонтально-слоистой среде измеряемая разность потенциалов равна нулю, аномальный сигнал появляется над локальной неоднородностью. Дифференциальная установка чувствительна к латеральному изменению электросопротивления среды.

Ранее метод MAN применяли только в варианте профилирования [11]. Зондирование осуществляется за счет разнесения питающих заземлений. Для обоснования электрзондирований с дифференциальной установкой выполнены теоретические расчеты над локальными проводящими объектами – погруженным шаром и безграничным вертикальным пластом, выходящим на поверхность [12].

Разносы зондирований в методе ВЭЗ менялись от 1,5 до 100 м ($AB/2$), в методе MAN 1,5–50 м ($MN/2$). Линия «бесконечности» для дифференци-

альных зондирований составляла 400 м. Измерения проводили электроразведочной аппаратурой ЭРА-ЗНАК и ЭРА-МАХ, точки наблюдений располагались через 20 м.

Результаты электроразведочных зондирований представлены разрезами кажущихся и удельных электрических сопротивлений (ВЭЗ), а также разрезом абсолютных значений разности потенциалов, приведенных к выходному току генератора (MAN). Количественная интерпретация результатов вертикальных зондирований выполнена в рамках одномерной модели (1D) по программе IPI2win, двумерная инверсия (2D) проведена с помощью программы ZondRes2D. Интерпретация экспериментальных данных метода MAN проводилась качественно.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты сейсмических исследований представлены в виде разрезов скоростей продольных (V_p), поперечных (V_s) волн и коэффициента Пуассона μ (рис. 2).

Выделены две преломляющие границы. В пределах первой сейсмические скорости составляют: $V_p = 200\text{--}250$ м/с; $V_s = 120\text{--}160$ м/с. Ее можно связать с разуплотненными грунтами зоны аэрации. Далее пластовые скорости возрастают: $V_p = 300\text{--}500$ м/с и $V_s = 150\text{--}200$ м/с, что свидетельствует об уплотнении и повышении влажности грунта. Вторая преломляющая граница разделяет насыпную часть дамбы от прежней дневной поверхности. В районе этой границы происходит скачок $V_p = 1500\text{--}2000$ м/с за счет водонасыщения как насыпного грунта, так и грунтов коры выветривания. На отметках 530, 170, 500 м выделяются зоны депрессии, первая связана с положением русла реки до затопления, остальные, возможно, с палеоруслуями. В коренных породах $V_p = 2000\text{--}4000$ м/с; $V_s = 400\text{--}800$ м/с. Несмотря на контрастное поведение продольных волн, более четко выделяются субвертикальные границы пород разного состава на разрезе V_s , в частности, тектонические контакты порфиритов и туфов (рис. 2б). При определении локальных неоднородностей показательным является коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации). Это единственный упругий параметр среды, который можно определить по сейсмическим данным, не зная плотность.

Теоретически коэффициент Пуассона изменяется $0 < \mu < 0,5$, однако в реальных неоднородных средах значения μ могут принимать отрицательные величины [13]. Низкие значения $\mu < 0,2$ наблюдаются с поверхности до первой преломляющей границы, проходящей на глубине порядка 2 м, в самых верхних несвязанных грунтах плотины, представленных суглинком с большим количеством строительного щебня (рис. 2в). Эту область

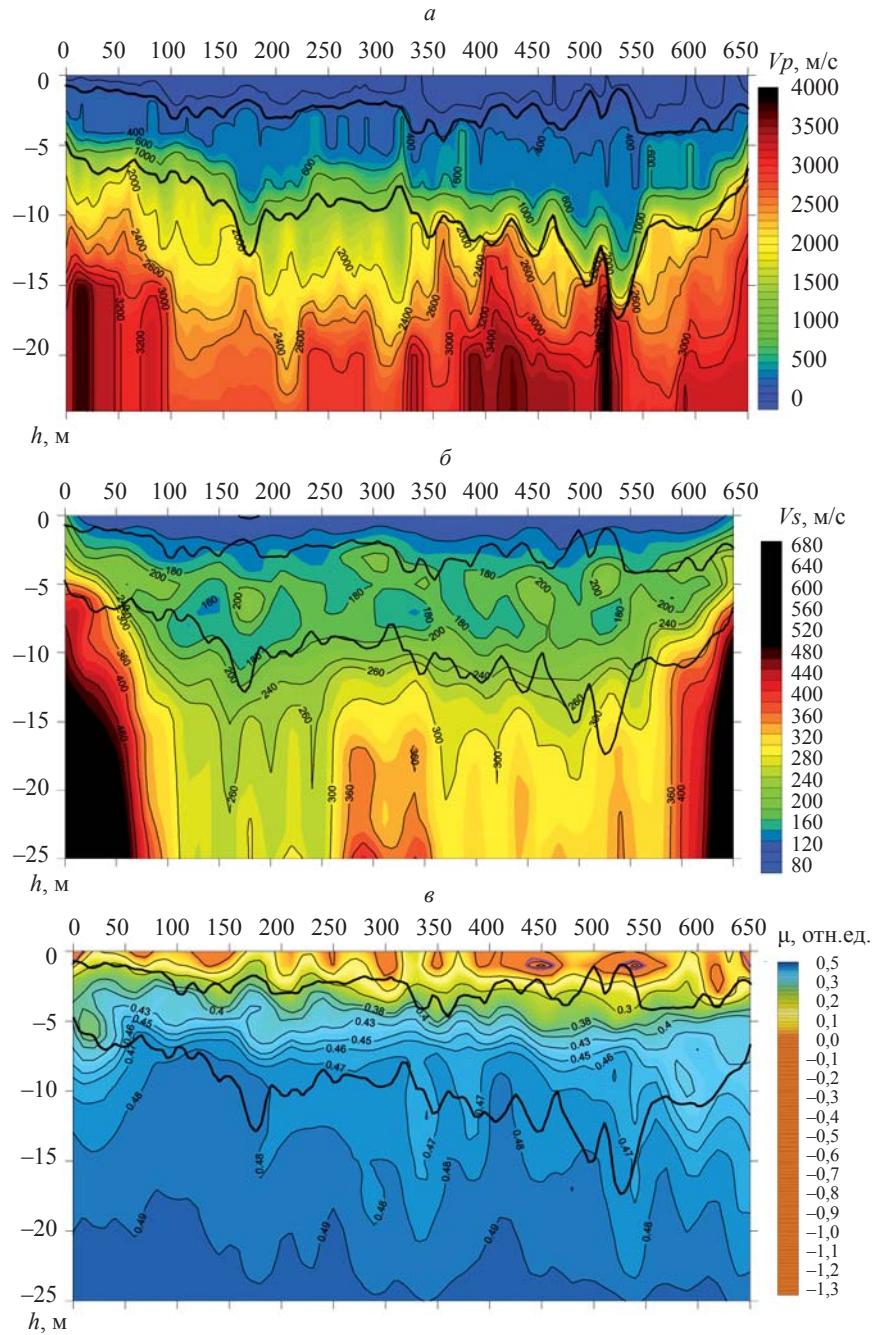
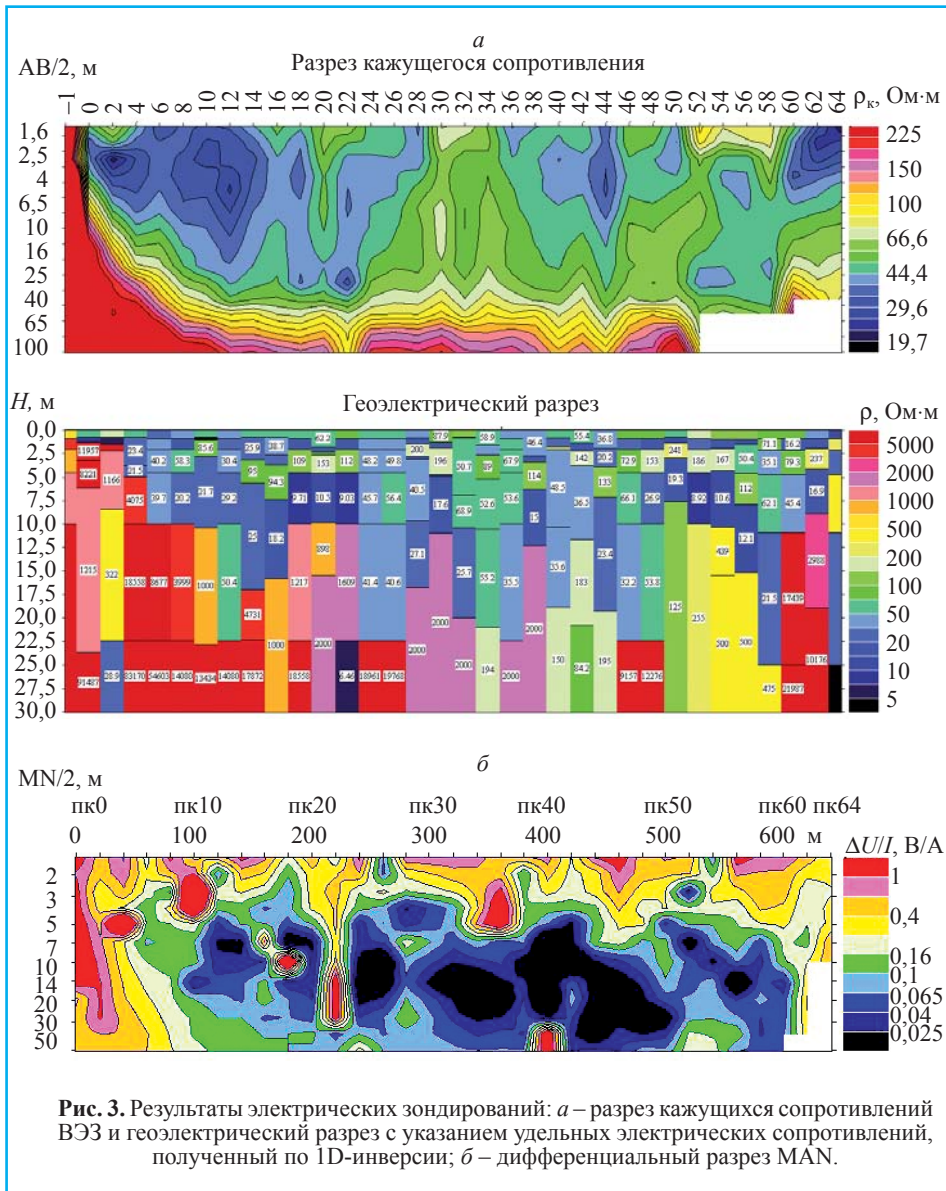


Рис. 2. Результаты сейсморазведочных работ: скоростные разрезы продольных (а) и поперечных (б) волн, разрез коэффициента Пуассона (в). Широкие черные линии выделены сейсмические преломляющие границы.

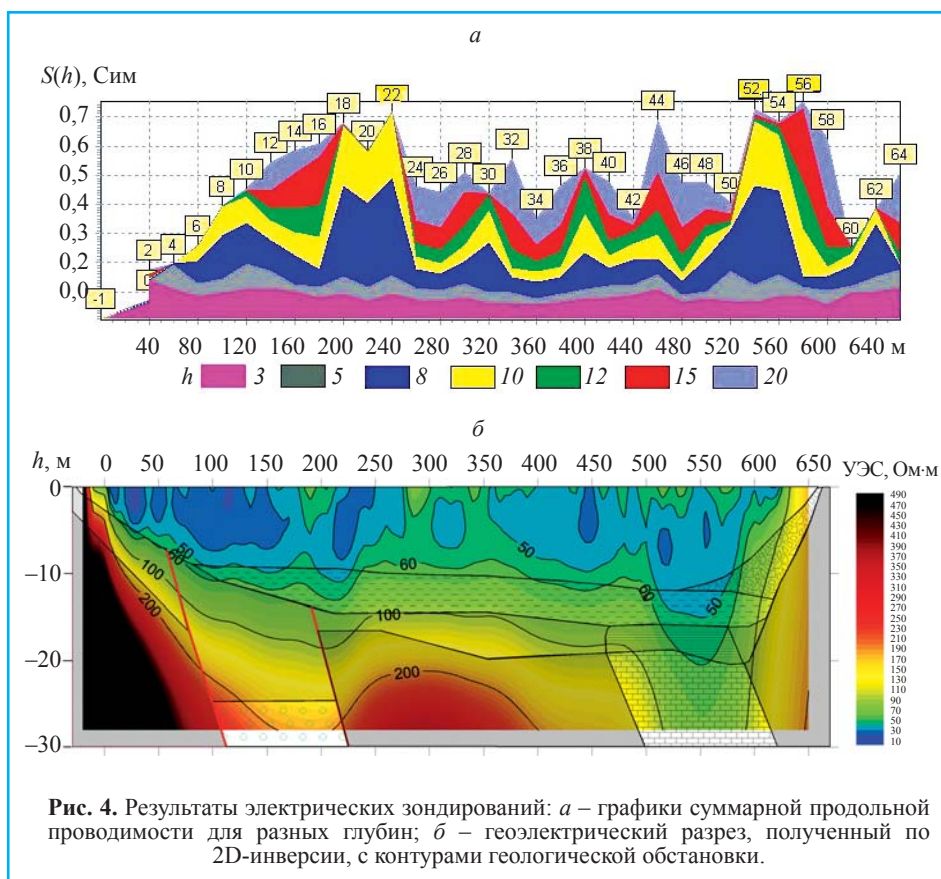
можно связать с разуплотненными грунтами зоны аэрации. На отметках 450 и 540 м коэффициент Пуассона принимает отрицательные значения. Здесь на глубине 1 м возможно развитие кавернозности. В теле плотины значения коэффициента Пуассона растут с глубиной от 0,2 до 0,44–0,45 отн. ед. Понижения значений μ заметны на краях дамбы в интервалах 0–40 и 580–650 м, вблизи второй преломляющей границы. Данные аномалии могут быть связаны со слабым сцеплением насыпных грунтов плотины с ее основанием на более крутых склонах. В коренных породах основания коэффициент Пуассона имеет значение около 0,48 и практически не изменяется. Это еще раз подтверждает тот факт, что при $V_p \geq 2500$ м/с величина μ стабилизируется.

Результаты электрических зондирований приведены на рис. 3 и 4. По разрезу кажущихся сопротивлений ρ_k (рис. 3а) наблюдается преимущественно блочное строение плотины. В западном (пк 4–24) и восточном (пк 52–58) блоке, а также на ПК 40–42 ρ_k насыпного материала составляет в среднем 30–40 Ом·м и к основанию сопротивление либо остается таким же, либо увеличивается до 50–70 Ом·м. Выделяются участки с пониженными ρ_k и в коренных породах, особенно это касается пикетов 22, 40–44, 52–58, где наиболее низкие сопротивления, которые могут характеризовать зоны, имеющие тектоническую природу. Грунты в средней части насыпи имеют кажущееся электросопротивление 60–90 Ом·м. На геоэлектрическом разрезе до первой преломляющей сейсмической границы (глубина в среднем 2 м) выделяются два слоя повышенного и пониженного сопротивления, затем наблюдается высокоомный слой, который местами или отсутствует, или проявляется на большей глубине. На разрезе четко прослеживается граница насыпных грунтов. В средней и нижней частях насыпи имеются электропроводные зоны, нижняя граница которых доходит до основания плотины и глубже. В теле плотины выделяются два аномальных участка повышенной влажности: пикеты 80–220 и 480–560, здесь возможна инфильтрация воды через основание ГТС. Зоны депрессии в нижней преломляющей границе подтверждаются пониженными значениями удельных электрических сопротивлений (УЭС). Центральная часть плотины обводнена в меньшей степени, судя по геоэлектрическому разрезу, вода здесь фильтруется в кору выветривания и распространяется по рыхлым осадочным образованиям.

На разрезе дифференциальных зондирований (рис. 3б) в верхней и центральной частях тела плотины отмечаются аномалии повышенной разности потенциалов, некоторые из них в приповерхностной области совпадают с низкими значениями коэффициента Пуассона и с высоким электросопротивлением. Это указывает, скорее всего, на разуплотнение грунтов. На пикетах 4, 10 аномалии совпадают с областью пониженных ρ_k



и локализуются разносами 3,8–5 м, 2–4 м соответственно. Здесь может быть переувлажнение грунта с возможным разуплотнением. На пикете 36 аномалия $\Delta U/I$ (разносы 2,8–6 м) наблюдается на фоне небольшого повышения электросопротивления, в этом месте также можно ожидать развития кавернозности в грунте. Аномалии повышенной разности потенциалов, которые прослеживаются на пикетах 16, 18, 22, 28–30 в основании плотины и протягиваются в геологическое пространство, указывают на



контакт с проводящей средой, а на пикете 22 аномалия может быть связана с находящейся в этом месте тектонической структурой. Пониженные значения $\Delta U/I$, приуроченные к зонам проводимости, фиксируются в основании плотины с 10 по 60 пикеты. Причем аномальная область распространяется как в теле плотины, так и геологической среде. Это говорит о том, что вода из осветлителя фильтруется и через нижнюю часть плотины, и по водопроницаемым горным породам.

Показательным параметром электропроводности среды является суммарная продольная проводимость $S(h)$. По геоэлектрическому разрезу выполнили расчеты $S(h)$ для разных глубин (рис. 4а). На глубине 3 м проводимость грунтов везде одинаковая. С глубиной суммарная проводимость увеличивается. Наибольший интерес представляют глубины 8–12 м, на которых возможно интенсивное просачивание воды через плотину. Аномальные значения проводимости для этих глубин соответствуют участкам: пк 8–12, пк 18–22, пк 28–30, пк 38, пк 44, пк 50–54, пк 62.

В процессе обработки данных вертикальных электротзондирований была проведена количественная интерпретация в рамках 2D-инверсии. Приближенную начальную модель выбрали по известной геологической и физической информации. Полученный геоэлектрический разрез (рис. 4б) близок по физическим параметрам к разрезу кажущихся сопротивлений, но на нем более контрастно выделяются основные структурные элементы среды. Если сравнивать геоэлектрические разрезы, полученные по 1D- и 2D-инверсии, то главные аномальные проводящие области (западная и восточная) в теле плотины совпадают. Отличия заключаются в детальности и в минимальных значениях удельных электрических сопротивлений: в первом случае они составляют 9–12 Ом·м, во втором – 30 Ом·м. Нижняя часть разреза, полученная в результате 2D-инверсии, более четко и достоверно отражает характер залегания коренных пород основания плотины. Это особенно заметно при наложении на геоэлектрический разрез контура геологической ситуации с нанесенными основными границами разделов (рис. 4б).

В целом по результатам геофизического обследования плотины можно сделать следующие выводы. По сейсмическим данным зоны разуплотнения присутствуют в первых метрах от гребня насыпи и, возможно, по бортам. Граница насыпных грунтов в основании не четкая, имеются зоны депрессии. Электрические исследования указывают на повышенную влагонасыщенность грунтов в средней, нижней частях плотины. Судя по низким значениям удельных сопротивлений, имеются некоторые участки полностью влагонасыщенных грунтов в теле насыпи, а это может привести к их разжижению. Просачивание воды через основание плотины наиболее интенсивно происходит в западной и восточной аномальной области.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований показывают перспективность применения сейсмических и электрических методов зондирований при изучении состояния грунтовых плотин. Комплексирование вертикальных и дифференциальных электротзондирований позволяет изучать электросопротивление насыпного материала, а также дополнительно выявлять геоэлектрические неоднородности, используя дифференциальную установку, которая более чувствительна к локальным объектам. По разрезам электрических сопротивлений определяются области повышенной проводимости в насыпи, связанные с влагонасыщенностью грунта, которые уточняются и локализуются на разрезе приведенной разности потенциалов в методе MAN, а также фиксируется фильтрация воды из водоема под основанием плотины и по водопроницаемым породам. По сейсмическим зондированиям с комбинированной методикой МПВ и MASW определяются упругие свойства насыпных и природных грунтов, выявляются преломляющие

границы, зоны разуплотнения в теле насыпи. Диагностика плотин предложенным комплексом сейсмических и электрических зондирований позволяет наиболее полно оценить состояние сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников В.П., Коноплев А.В., Пригара А.М. и др. Технология комплексных инженерно-геофизических изысканий для диагностики состояния гидротехнических сооружений // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6; URL: www.science-education.ru/106-7839 (06.04.2014).
2. Канарейкин Б.А., Прихода А.Г., Сагайдачная О.М. и др. Сейсмотомографические исследования грунтов при инженерно-геологических изысканиях // Геофизика. 2004. № 5.
3. Улитин Р.В., Гаврилова И.Э., Петухова Ю.Б., Федорова О.И., Харус Р.Л. Геоэлектрика при решении геоэкологических и инженерно-геологических задач // Теория и практика геоэлектрических исследований. Сб. науч. трудов. Вып. 2. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 84–98.
4. Павлюк А.В., Сергеев А.П., Буевич А.Г. и др. Экспериментальная оценка эффективности пруда-отстойника на примере Ельцевского водохранилища // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 1 (8). С. 2073–2076.
5. Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. 1999. Vol. 64. No. 3. P. 800–808.
6. Давыдов В.А. Обнаружение подземных пустот антропогенного характера с помощью геофизических методов // Инженерные изыскания. 2013. № 7. С. 52–57.
7. Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Сейсмическая станция «Синус» // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 5. С. 162–163.
8. Давыдов В.А. Применение малоглубинной сейсморазведки для изучения подработанных территорий // Известия вузов. Горный журнал. 2010. № 4. С. 111–116.
9. Давыдов В.А. Изучение опасных геологических процессов, приводящих к повреждению объектов городской застройки [Электронный ресурс] / В.А. Давыдов // Архитектон: изв. вузов. 2013. № 2 (42). Режим доступа: http://archvuz.ru/2013_2/19.
10. Патент 2332690. Способ геоэлектроразведки. Улитин Р.В., Федорова О.И. / № 2006140014/28 от 13.11.2006, регистрация 27.08.2008. Бюл. № 24.
11. Улитин Р.В., Федорова О.И. Кондуктивное дифференциальное профилирование при решении инженерных и геоэкологических задач: Депонирована в ВИНТИ. № 2474-B99. 15 с.
12. Улитин Р.В., Федорова О.И. Особенности распределения электрического поля при дифференциальном электроразведании над локальными неоднородностями // Уральский геофизический вестник. 2009. № 1. С. 65–69.
13. Рекомендации по применению сейсморазведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей / сост. В.И. Бондарев, под ред. В.А. Шемшурина и др. М.: Стройизыскания, 1974. 142 с.

Сведения об авторах:

Федорова Ольга Ивановна, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, Институт геофизики Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 620016, г. Екатеринбург, ул. Амурдсена, 100; e-mail: fougeo@mail.ru

Давыдов Вадим Анатольевич, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник, Институт геофизики Уральского отделения Российской академии наук (УрО РАН), 620016, Екатеринбург, ул. Амурдсена, 100; e-mail: davyde@yandex.ru