УДК 550.837

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Федорова О.И., Давыдов В.А., Байдиков С.В., Горшков В.Ю., Маликов А.В. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Рассмотрены результаты геофизического мониторинга состояния грунтовой плотины. Исследования проведены вертикальными электрическими, дистанционными индуктивными и микросейсмическими зондированиями. Применяемыми методами выделяются зоны фильтрации воды в насыпи плотины и ее основании. Показана динамика изменений во времени изучаемых физических параметров грунта и подстилающей геологической среды.

Грунтовая плотина, фильтрация воды, вертикальные электрические зондирования, дистанционные индуктивные зондирования, микросейсмические зондирования.

MONITORING OF SOIL DAMS CONDITION BY GEOPHYSICAL METHODS

Fedorova O.I., Davydov V.A., Baydikov S.V., Gorshkov V.Y., Malikov A.V. – Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Results of geophysical monitoring of soil dams condition are considered. Researches were done by VES, FDEM and microseismic methods. Used methods allocate zones of water filtration in dam body and foundation. Dynamic of studied physical characteristics of soil and underlying geological environment in time is shown.

Soil dam, water filtration, vertical electrical soundings, frequency domain electromagnetic, microseismic soundings.

Введение

Грунтовые плотины находятся под постоянным гидравлическим напором. При эксплуатации гидротехнического сооружения (ГТС) с течением времени в местах повышенной проницаемости грунта в теле и основании насыпи усиливается фильтрация воды из водоема, что приводит к развитию суффозионных процессов и, как следствие, к разрушению плотины.

Контроль за состоянием грунтовых ГТС осуществляется с помощью инженерно-геологических методов. Прямые методы исследований дают точечную информацию об изменении физических свойств насыпного материала, поэтому недостаточно полно отражают ситуацию. Для оперативного наблюдения за грунтовыми гидротехническими сооружениями также используют геофизические методы разведки. Основные задачи, которые ставятся перед геофизическими исследованиями, – это выявление зон обводненности и разуплотнения в теле плотины и определение мест фильтрации воды в основании сооружения. Для решения подобных задач применяют известные кондуктивные электроразведочные методы, которые чувствительны к изменению количества влаги в порах горной породы (Улитин и др., 2000). Чаще всего используют вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ).

Верхняя часть плотины, как правило, отсыпана глинисто-щебенистым материалом, и при использовании методов электроразведки на постоянном токе иногда возникают трудности с установкой заземлений, которые могут приводить к погрешностям измерений. В таких случаях, исследования вертикальными электрическими зондированиями можно дополнить индуктивными бесконтактными методами зондирований.

Электрозондирования позволяют изучить электрофизические свойства грунтового материала с поверхности до некоторой глубины и выявить области пониженного сопротивления, но не всегда удается установить их связь с повышенной фильтрацией воды сквозь тело плотины. В этом

случае, как было показано исследованиями, целесообразно проводить геоэлектрический мониторинг (Шестаков, Федорова, 2011). По результатам мониторинга выделяются нестабильные участки плотины, где изменяются электрические свойства грунта. Уменьшение электросопротивления со временем является основным критерием обнаружения зон обводненности, приводящих к постепенному разрушению плотины.

Из-за фильтрации воды в насыпи происходит размывание грунта, что приводит к его разуплотнению и даже образованию каверн. Определить области разуплотнения грунта по увеличению его электросопротивления не всегда представляется возможным. Поэтому желательно, чтобы в комплекс с электроразведочными методами были включены сейсмические методики, которые отражают упругие свойства изучаемой среды (Федорова, Давыдов, 2014).

В статье рассматриваются результаты геофизического мониторинга грунтовой плотины. Исследования проводили методами вертикальных электрических, индуктивных дистанционных и микросейсмических зондирований.

Характеристика плотины и методика работ

Плотина ограждает отстойник-накопитель донных отложений, образующихся в результате нейтрализации кислых дренажных вод одного из медно-колчеданных рудников Урала. Добыча руды прекратилась в 1995 году, но откачка шахтных вод продолжается до сих пор в объеме более 5,5 млн м^3 в год. Нейтрализация шахтных вод проводится известковым раствором с выделением металлов и осаждением их в виде шламов в пруде-отстойнике. Откачиваемые воды имеют высокое содержание железа, меди, цинка и марганца. На 2011 год объем донных отложений составил 4,4 млн м^3.

Плотина сложена преимущественно суглинком с примесью щебня, имеет протяженность около 700 м и высоту 9–12 м. Геологический разрез в районе строительства плотины по данным бурения имеет довольно пестрый характер (рис. 1, цветная вкладка) (Один пруд-отстойник … , 1991). 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 речного аллювия. Гранулометрический состав рыхлых отложений включает всю шкалу – от глин до крупнообломочного материала (щебень, глыбы).

Исследования проводили по гребню плотины. Точки электромагнитных зондирований располагались через 20 метров. Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) выполняли симметричной четырехэлектродной установкой A^+MNB^- по стандартной методике. Разносы менялись от 1,5 до 100 м (AB/2). Измерения проводили с электроразведочной аппаратурой ЭРА-ЗНАК и ЭРА-МАКС. Эффективная глубина исследований для кажущегося электрического сопротивления принималась равной $h_{эф}$ = AB/4.

Дипольные дистанционные зондирования (ДИЗ) выполняли с индукционной аппаратурой МЧЗ-8, разработанной в ИГФ УрО РАН, которая состоит из генератора переменного тока с рамочным излучателем электромагнитного поля и измерительного блока с чувствительным магнитоприемником индукционного типа (Байдиков, Человечков, 2011). Измерения проводили на частоте 10 кГц с разносами: 5, 10, 20, 30, 40, 60 и 80 м. Глубина исследования принималась равной четверти расстояния между генератором и приемником: $h_{эф} = r/4$. Эффективное удельное электрическое сопротивление рассчитывалось по формуле для низкочастотной асимптотики (Вешев и др., 1971):

$$\rho_{эф} = 2 f r^2 |H_z/H_r|,$$

где f – рабочая частота, Гц; r – расстояние между приёмником и генератором, км; H_z – вертикальная составляющая напряжённо-

сти магнитного поля, А/м; H_r – радиальная составляющая напряжённости магнитного поля, А/м.

Результаты представляются в виде вертикальных разрезов кажущегося удельного сопротивления $\rho_к$ для ВЭЗ и $\rho_{эф}$ для ДИЗ от эффективной глубины $h_{эф}$. Для ВЭЗ по программе IPI2win выполнена количественная интерпретация и построен разрез удельного сопротивления среды.

Работы по изучению микросейсмических колебаний проводились на универсальной приемно-регистрирующей аппаратуре серии OMAP-2 (Давыдов, 2015а). В качестве датчиков использованы вертикальные и горизонтальные сейсмоприемники GS-20DX («Геоспейс Технолоджис Евразия», Россия), закрепленные в едином корпусе. Микросейсмический шум главным образом состоит из поверхностных волн, а отношения амплитудных спектров горизонтальных (*H*) и вертикальных (*V*) компонент смещений зависят от динамических характеристик геологического разреза (Nakamura, 1989). За счет введения специальной частотной коррекции и высокого динамического диапазона станции в целом, достигнута уверенная регистрация в диапазоне частот 2–3000 Гц. Это позволило провести микросейсмические зондирования до глубины 30 метров. На пунктах наблюдений осуществлялась непрерывная двухканальная запись сигналов в течение 3–10 минут. По окончанию полевых работ, полученные записи с помощью специальных программ редактировались, отбраковывались и обрабатывались в камеральных условиях. Частотные спектры сигналов вычислялись с помощью быстрого преобразования Фурье. Учет дисперсии скорости фундаментальной моды релеевских волн проводился по данным ранее проведенных сейсморазведочных работ (Федорова, Давыдов, 2014).

Глубинность микросейсмических зондирований (МСЗ) приблизительно соответствует половине длины волны (λ) Релея фундаментальной моды:

$$h \approx \lambda / 2 = V_R(f) / 2f,$$

где V_R – скорость релеевской волны в верхнем слое; f – частота колебаний.

Эллиптичность (*H/V*-отношение) волн Релея меняется с частотой в слоях грунта. В однородной изотропной среде имеет место пропорциональность эллиптичности микросейсм от коэффициента Пуассона, в неоднородной слоистой среде зависимость усложняется за счет возникновения резонансных эффектов. Для визуального представления микросейсмического разреза более предпочтительно использование спектральных отношений $\varepsilon = V(f) / H(f)$ (Давыдов, 2015б).

Результаты исследований

По результатам микросейсмических зондирований построены сводные разрезы спектральных *V/H*-отношений (ε) и их изменения (Δε, %) за период наблюдений с 2013 по 2015 год (см. рис. 1, цветная вкладка).

Тело плотины характеризуется повышенными значениями е относительно коренных пород основания. Это достаточно характерно для слоистой среды и связано с проявлением резонансных явлений двух типов: резонансом поперечных волн ($H/V > 3$) и возникновением стоячих релеевских волн ($V/H > 2$). Граница, выделяемая по резонансу поперечных волн, практически совпадает с кровлей коры выветривания коренных горных пород (отмечена пунктиром на рис. 1а, цветная вкладка). Аномалии высоких значений $\varepsilon > 2$, по-видимому, связаны с зонами неоднородностей, в пределах которых возникает резонанс волн Релея. Увеличение со временем амплитуды *V/H*-отношений может свидетельствовать о снижении однородности среды и характеризовать данные аномалии как ослабленные зоны. К таким участкам можно отнести: зону аэрации (на глубине около 2 м), контакты пород разного состава, зоны трещиноватости и области протечек в плотине. Некоторые из этих аномалий можно идентифицировать на разрезе изменений спектральных отношений (см. рис. 1б, цветная вкладка). Так, максимальное за два года увеличение е произошло в районе ПК 520–600 м (до 70 %), что указывает на присутствие здесь области повышенной фильтрации в теле и основании плотины.

Электрофизические параметры грунта наиболее чувствительны к изменению влажности горной породы. За трехлетний период обследования плотины (2013–2015 гг.) методом вертикальных электрических зондирований наблюдаются значительные изменения электросопротивления изучаемого грунта насыпи и подстилающей геологической среды (рис. 2 а–в, цветная вкладка). Выделяются западная (ПК 10–26) и восточная (ПК 48–60) аномальные зоны, приуроченные к наиболее трещиноватым, проницаемым породам, залегающим в основании плотины.

Уменьшение электрического сопротивления произошло на участке пикетов 48–60 особенно за последний год, когда аномальная зона распространилась на глубину. По всей видимости, это произошло в результате большого количества выпавших осадков, приведших к повышению влагонасыщенности грунтов плотины за счет инфильтрации и увеличения уровня воды в водоеме. Надо отметить, что и западная, и центральная части плотины также подверглись изменениям с уменьшением электросопротивления грунта. В центральной части насыпи заметно повысилась фильтрация воды на пикетах 36 и 40–42.

В 2014 году в комплекс исследований включили дистанционные индукционные зондирования. Результаты ДИЗ (рис. 2г, цветная вкладка) и ВЭЗ (рис. 2б, цветная вкладка) достаточно неплохо коррелируют в аномальных зонах: в западной части профиля на пикетах 4–24; в восточной – пикеты 48, 52–60. По мониторингу, выполненному дистанционными зондированиями в 2015 году, наблюдается значительное уменьшение электросопротивления на ПК 56–60 как в теле, так и под основанием плотины, что также подтверждается результатами ВЭЗ.

По результатам вертикальных электрических зондирований за трехлетний период наблюдений построен геоэлектрический разрез. Количественную интерпретацию проводили в основном по кривым, полученным за последний год исследований. На некоторых пикетах кривые за 2015 год были отбракованы и заменены результатами 2013 или 2014 года. На разрезе удельных сопротивлений четко выделяются несколько слоев (рис. 3, цветная вкладка). Первый низкоомный слой – зона аэрации прослеживается на глубину около 2 м. Затем выделяется слой более повышенных значений электросопротивлений до уровня воды в водоеме (4–5 м). Третий слой от 5 до 10–12 м имеет дифференцированное электрическое сопротивление, в котором находятся участки достаточно низких сопротивлений 10–30 Ом·м. Далее вода фильтруется в осадочные породы и кору выветривания и по ним дренирует из водоема по подземному стоку. Под основанием плотины зоны низких сопротивлений совпадают с просачиванием воды из-под насыпи. Утечки хорошо видны на местности со стороны нижнего бьефа.

При сопоставлении результатов электрических и микросейсмических зондирований в первую очередь выделяются участки плотины, где наблюдаются пониженные значения электросопротивлений и повышенные значения спектральных отношений е: по западному борту плотины пикеты 0–4; пикеты 8–14 и 52–60. На этих участках грунт в большей степени разуплотнен и, как следствие, наиболее водопроницаем.

Заключение

Изучение состояния грунтовых плотин методами электромагнитных зондирований позволяет выявить зоны обводненности в теле плотины и определить места фильтрации воды в основании сооружения. Как показали экспериментальные исследования, обследование можно проводить как кондуктивными, так и индуктивными методиками. Наиболее информативны результаты, полученные методом вертикальных электрических зондирований. Дистанционные индукционные зондирования также определяют основные аномальные области исследуемого объекта, но результаты менее детальны по сравнению с ВЭЗ.

На основании микросейсмических зондирований выделяются ослабленные зоны, связанные с разуплотнением грунтового материала и проницаемостью горных по-

род, по которым фильтруется вода. По электромагнитным и микросейсмическим исследованиям в аномальных областях наблюдается корреляция результатов.

Геоэлектрический мониторинг плотин по закрепленной сети позволяет наблюдать за аномальными зонами, а также обнаруживать новые нестабильные участки в насыпи. Цикличными наблюдениями по изменениям, происходящим с течением времени, устанавливается взаимосвязь выявленных аномалий с фильтрацией воды в теле и основании плотины.

Результаты экспериментальных исследований показывают перспективность применения электрических и сейсмических методов зондирований при изучении состояния грунтовых плотин.

Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект №15-2-5-31.

Литература

Байдиков С.В., Человечков А.И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 4–8.

Вешев А.В., Ивочкин В.Г., Игнатьев Г.Ф. Электромагнитное профилирование. Л.: Недра, 1971. 216 с.

Давыдов В.А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований // Уральский геофизический вестник. 2015а. № 1 (25). С. 37–41.

Давыдов В.А. Спектральный анализ данных микросейсмических зондирований // Геофизика. 2015б. № 1. С. 72–77.

Один пруд-отстойник на реке Ельчевка. Паспорт гидротехнического сооружения. Дегтярское рудоуправление, 1991.

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: Сборник. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. Вып. 2. С. 84–98.

Федорова О.И., Давыдов В.А. Диагностика грунтовых гидротехнических сооружений электрическими и сейсмическими методами на примере Ельчевской плотины // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 6. С. 44–55.

Шестаков А.Ф., Федорова О.И. Геоэлектрический мониторинг при инженерно-экологических исследованиях в районе накопителей промстоков // Разведка и охрана недр. 2011. № 12. С. 51–56.

Nakamura Y. A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1989. V. 30. N 1. P. 25–33.

К статье Федорова О.И., Давыдов В.А., Байдиков С.В., Горшков В.Ю., Маликов А.В. – «Мониторинг состояния грунтовых плотин геофизическими методами»

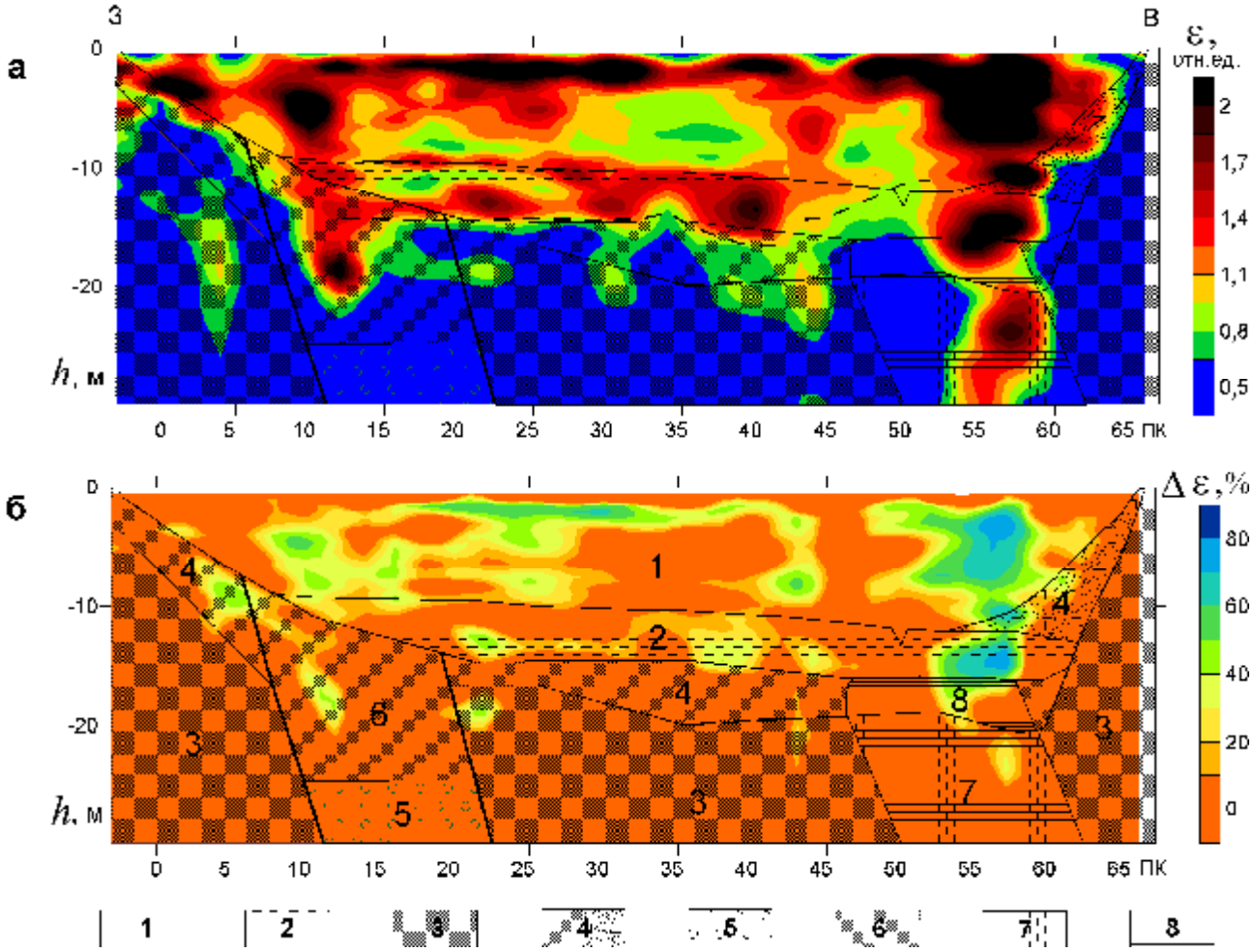

Рис. 1. Микросейсмический мониторинг грунтовой плотины:
а) разрез спектральных *V/H*-отношений (ε) за 2013 г.; б) изменение спектральных отношений за период с 2013 по 2015 годы.
Условные обозначения для геологической основы: 1 – тело плотины; 2 – аллювиальные отложения; 3 – порфириты; 4 – элювиальные и делювиальные суглинки коры выветривания порфиритов; 5 – туфы; 6 – кора выветривания туфов; 7 – известняки; 8 – глины.
Пунктирной линией на рис. 1а показана граница раздела, выделенная по резонансу поперечных волн

К статье Федорова О.И., Давыдов В.А., Байдиков С.В., Горшков В.Ю., Маликов А.В. – «Мониторинг состояния грунтовых плотин геофизическими методами»

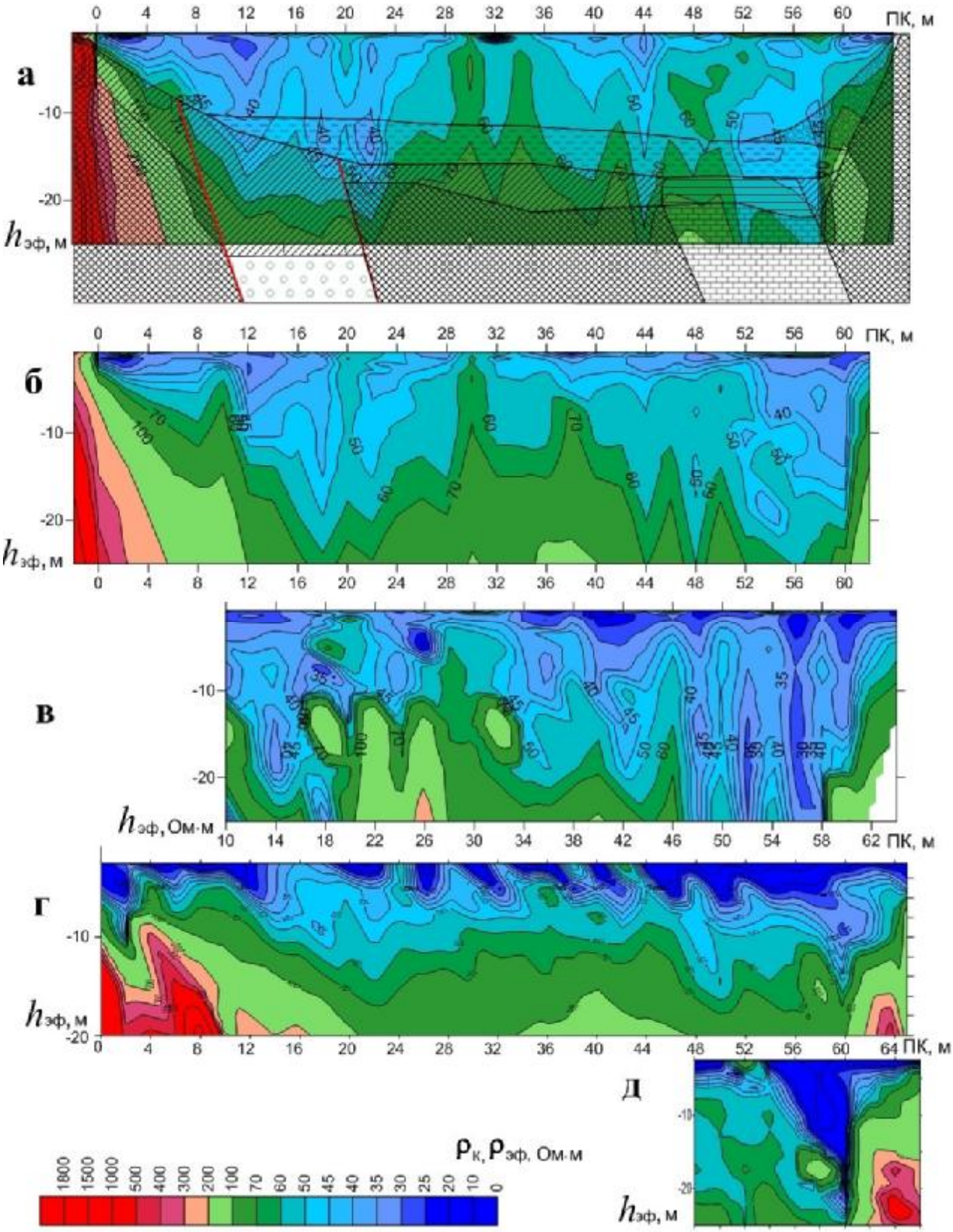

Рис. 2. Геоэлектрический мониторинг плотины: а–в – разрезы кажущихся сопротивлений, полученные методом ВЭЗ за трехлетний цикл наблюдений (2013–2015 гг.); г, д – разрезы эффективных сопротивлений, полученные методом ДИЗ за 2014–2015 гг.

К статье Федорова О.И., Давыдов В.А., Байдиков С.В., Горшков В.Ю., Маликов А.В. – «Мониторинг состояния грунтовых плотин геофизическими методами»

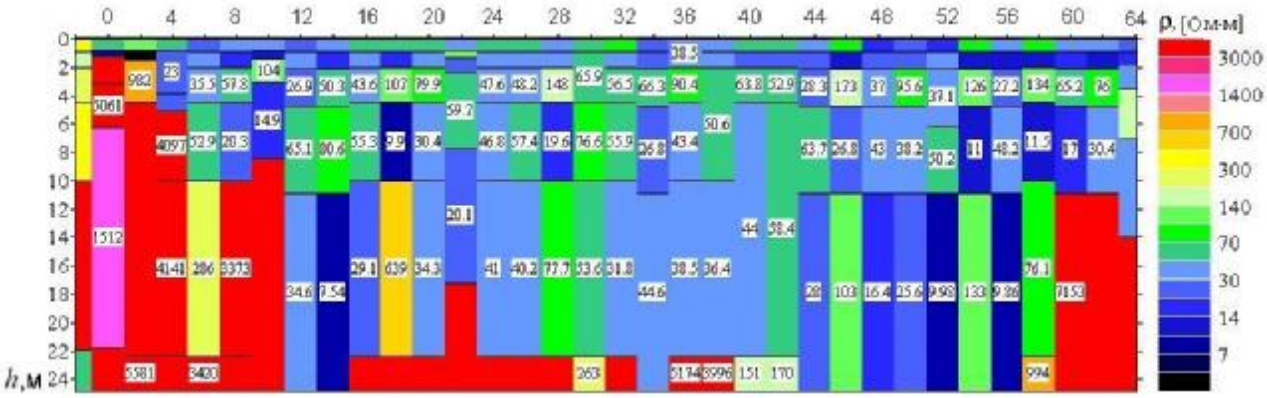

Рис. 3. Геоэлектрический разрез, построенный по результатам трехлетних наблюдений методом ВЭЗ. Числа на разрезе – значения удельных сопротивлений в слоях в Ом·м

К статье Ратушняк А.Н., Байдиков С.В., Теплухин В.К. – «Индукционный каротаж скважин с учетом влияния проводящей промывочной жидкости»

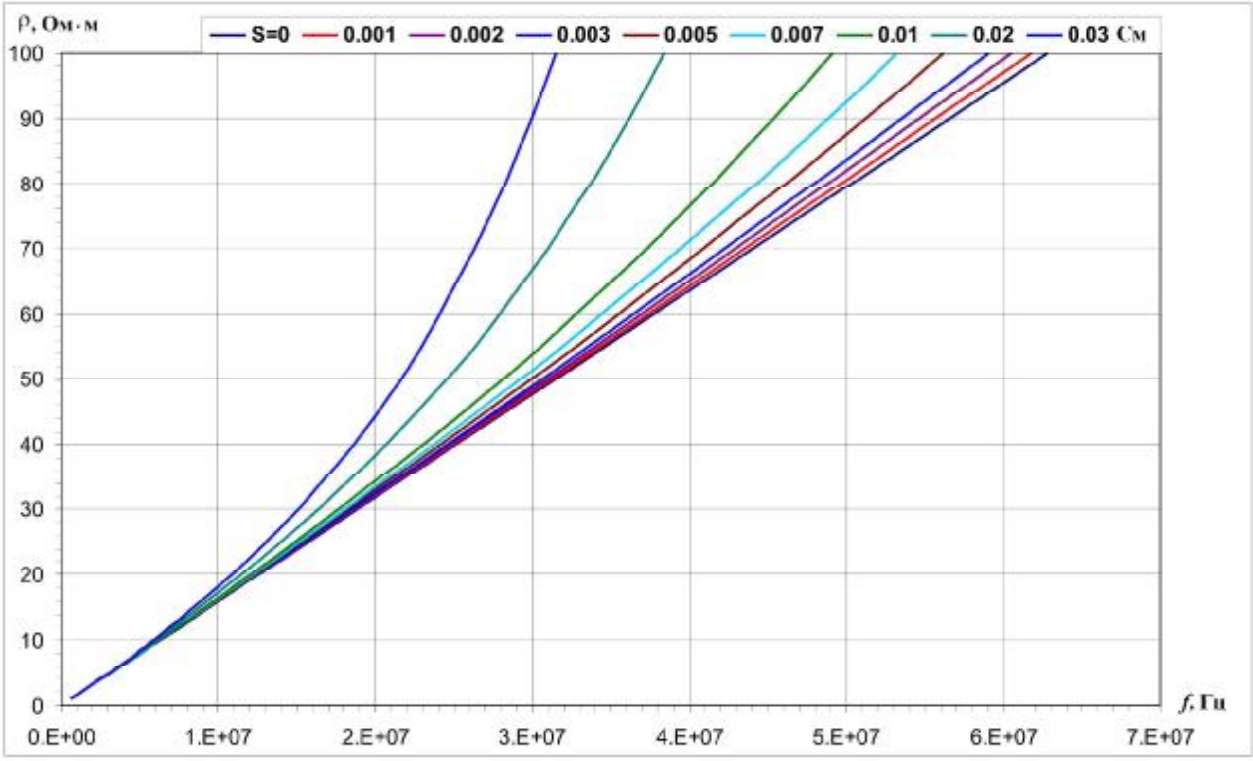

Рис. 5. Палетка определения ρ среды [Ом·м] по частоте *f*, соответствующей экстремуму Im B_z для зонда с моментом $M_z^* = 1$ А·м^2 на разносе $L = 1$ м. Шифр кривых – *S* [См]