УДК 550.837

ИЗУЧЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОЗОНДИРОВАНИЯМИ

Федорова О.И., Горшков В.Ю., Маликов А.В. – Институт геофизики Уро РАН, Екатеринбург

Аннотация. Рассмотрены результаты комплексирования вертикальных и дифференциальных электрических зондирований при изучении состояния грунтовых гидротехнических сооружений. Предложенная методика позволяет исследовать электрофизические характеристики насыпного материала плотин и выявлять локальные геоэлектрические неоднородности, связанные с просачиванием воды сквозь тело сооружения.

Грунтовое гидротехническое сооружение, геоэлектрическая неоднородность, электропроводность, зондирование.

STUDYING OF THE STATE SOIL HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS BY VERTICAL AND DIFFERENTIAL ELECTRICAL SOUNDING

Fedorova O.I., Gorshkov V.Yu., Malikov A.V. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Results of the integration of vertical and differential electrical soundings at studying of soil hydraulic engineering construction are considered. The tendered technique allows to prospect electromanual performances of the construction and to reveal local geoelectric inhomogeneity.

Soil hydraulic engineering construction, geoelectric inhomogeneity, electrical conductivity, sounding.

Введение

Грунтовые гидротехнические сооружения (ГТС) – плотины, ограждающие дамбы и т.д. сложены из насыпного материала, имеющего сложный гранулометрических состав: суглинок, супесь, глина с разным содержанием щебня. В процессе длительной эксплуатации сооружения из-за постоянного гидравлического напора возможно просачивание воды по водопроницаемым участкам в теле плотины, что вызывает разжижение насыпного грунта и потерю прочностных свойств гидротехнического сооружения. Поэтому необходимо осуществлять контроль состояния плотин, дамб с целью прогнозирования возможных катастрофических событий. Для этого перспективно применение геофизических, прежде всего, геоэлектрических методов, поскольку переувлажнение грунта, в первую очередь, отражается на изменении его электропроводности.

Изучение электрофизических характеристик ГТС от верхней его части до основания проводится с помощью электромагнитных зондирований. Если внешняя часть грунтовых плотин с поверхности ничем не укреплена, то, чаще всего, применяются кондуктивные методы электрозондирований на постоянном (низкочастотном) токе, среди которых предпочтение отдается методу вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ).

Теоретические основы в методе ВЭЗ хорошо проработаны для модели горизонтально-слоистой среды. Но на искусственных грунтовых сооружениях среда не всегда может удовлетворять такой модели из-за погрешностей в технологии строительства, сложного состава грунта, разной его влагонасыщенности и т.д. Тогда при интерпретации приходится ограничиваться качественными данными об электросопротивлении среды.

В электроразведке на постоянном токе известны методы чистых аномалий. К ним относится метод MAN, использующий дифференциальную установку, в которой между двумя приемными заземлениями M и N в центре располагается питающее заземление A, второе отнесено в бесконечность (Тархов, 1957). В этом случае измеряемая разность потенциалов (ΔU) в однородной и горизонтально-слоистой среде равна нулю, а аномальная ΔU появляется над неоднородностью. Метод применялся

в 50–60 годах только в варианте профилирования для глубинных исследований. В работах (Улитин, Федорова, 1999; Улитин и др., 2000) показано использование профилирования с дифференциальной установкой MAN при геоэлектрической методике контроля состояния грунтовых гидротехнических сооружений. Но профилирование позволяет выявить неоднородности, находящиеся лишь на некоторой глубине, зависящей от размера установки. В разрезе геоэлектрическую характеристику аномальной разности потенциалов, возникающей вокруг неоднородностей, можно получить зондированием за счет увеличения разноса между приемными заземлениями. Построение разреза ΔU от полуразноса приемной линии даст качественное представление о распределении разности потенциалов с глубиной.

Для обоснования электрозондирований с дифференциальной установкой MAN выполнены теоретические расчеты над локальными объектами – погруженным шаром и безграничным вертикальным пластом, выходящим на поверхность, – и в рамках рассмотренных моделей выделены некоторые критерии качественной интерпретации экспериментальных данных (Улитин, Федорова, 2009).

При дефектоскопии грунтовых гидротехнических сооружений дифференциальные зондирования дадут возможность изучить распространение локальных неоднородностей в разрезе, но не позволят определить электрическое сопротивление как аномальной области, так и вмещающей среды из-за специфики установки. Поэтому необходимо применять дифференциальные зондирования с каким-либо методом сопротивлений. Авторами предлагается зондирования с установкой MAN комплексировать с методом ВЭЗ.

Методика и результаты экспериментальных исследований

Комплексная методика вертикальных и дифференциальных зондирований рассмотрена в работе (Пат. 2332690). Суть методики состоит в совмещении установок: симметричной четырехэлектродной (ВЭЗ) и дифференциальной (MAN) – и проведении двойных зондирований в точке измерений. Результаты зондирования представляются разрезами двух типов: разрезами MAN – разности потенциалов, приведенных к выходному току питающего генератора; разрезами ВЭЗ – кажущихся сопротивлений, построенных по профилю в зависимости от полуразноса приемных электродов. Качественная интерпретация сводится к выделению аномальных областей на обоих разрезах и их сравнению. Глубина до аномалий, возникающих вокруг неоднородностей, в методе MAN, как показали расчеты, соизмерима с полуразносом приемной линии (*MN/2*), поэтому глубинность исследований приближенно можно оценивать по разрезу $\Delta U/I$.

Комплексирование вертикальных и дифференциальных электрозондирований было опробовано на гидротехническом объекте – плотине, ограждающей накопитель жидких отходов производства крупного химического предприятия (Челябинская обл.). Плотина высотой 15–18 м сложена из грунтового насыпного материала. Экспериментальные работы проводили по верхнему бьефу центральной части плотины, где ранее по геоэлектрическим исследованиям обнаружены участки, в пределах которых предположительно происходит просачивание воды из водохранилища. Пункты измерений размещались через 20 м, минимальный и максимальный полуразнос зондирований AB/2(MN/2) = 1,5–50 м, бесконечность для дифференциальной установки составляла 350 м. Результаты работ представлены на рис. 1 (цветная вкладка).

Полученные кривые ВЭЗ показали значительную неоднородность как насыпного материала плотины, так и подстилающей геологической среды, что хорошо видно на разрезе кажущихся сопротивлений (см. рис. 1а). В этом случае выполнить количественную обработку данных по существующим распространенным программам, в основе которых заложена горизонтально-слоистая модель среды, не представляется возможным. По результатам качественной интерпретации выявле-

ны следующие электрофизические особенности изучаемой среды. Вблизи поверхности кажущееся сопротивление грунта практически по всему профилю превосходит 50 Ом·м. При увеличении полуразносов питающих заземлений сопротивление грунтового материала уменьшается.

На разрезе $\rho_к$ по всей длине профиля выделяется зона пониженного (менее 30 Ом·м) сопротивления, верхняя граница которой ограничивается полуразносами 8–10 м, нижняя – 20–40 м, а на пикетах 730–710 и 650–630 электросопротивление составляет менее 20 Ом·м при полуразносах 10–20 м. В основание разреза чередуются участки повышенного (более 200 Ом·м) и пониженного (30–40 Ом·м) кажущегося сопротивления.

При дифференциальных зондированиях (MAN) из-за разных условий заземления приемных электродов приходится использовать ток разной величины, поэтому измеряемая разность потенциалов приведена к выходному току генератора. На разрезе значений $\Delta U/I$ выявлены две поверхностные аномалии (см. рис. 1б). Первая – на пикете 770 приурочена, по всей видимости, к обнаруженной ранее и на момент проведения измерений уже затампонированной каверне. Каверна по результатам заверочного бурения находилась на отметках 2,4–5,3 м. Нижняя граница аномального объекта отмечается изолинией 0,2–0,5 В/А на полуразносах 5–6 м. На разрезе $\rho_к$ высокоомный затампонированный участок выделяется не достаточно четко, но зато на полуразносе 5 м фиксируется низкоомная аномалия, что свидетельствует о просачивании воды из накопителя ниже устраненного дефекта в теле насыпи. Аномалия повышенных значений разности потенциалов на пикете 650, обнаруженная дифференциальным зондированием, на разрезе сопротивлений проявляется слабо, незначительным повышением $\rho_к$. Можно предположить, что здесь происходит разуплотнее насыпного материала.

На пикете 710 прослеживается вертикальная аномалия повышенных значений $\Delta U/I$. В этом месте рядом с точкой измерений находились три тампонажных скважины, по всей видимости, здесь также обнаружены пустоты, о чем до выполнения работ не было известно. Поскольку повышенные значения разности потенциалов фиксируются в интервале полуразносов 2–15 м, можно предположить, что тампонаж проведен сквозь всю насыпь до основания плотины. На разрезе кажущихся сопротивлений в этом месте фиксируется проводящая зона, минимальные значения $\rho_к$ которой находятся в интервале полуразносов 10–20 м, т.е. тампонажом устранены пустоты в насыпи, но не решена проблема фильтрации воды из накопителя.

Вторая вертикальная аномалия $\Delta U/I$ выявлена на пикетах 490–470. Максимальные значения измеряемой разности потенциалов находятся в интервале полуразносов 7–15 м, а минимальные значения $\rho_к$ – 15–30 м. Геоэлектрическая морфология поля здесь схожа с ситуацией на пикете 710. На данном участке можно прогнозировать фильтрацию воды через среднюю и нижнюю часть насыпи с возможным размыванием грунта и образованием зоны разуплотнения в теле плотины.

Кроме аномалий с повышенными значениями разности потенциалов на разрезе дифференциальных зондирований отмечаются аномалии пониженных значений (менее 0,02–0,05 В/А), которые вероятнее идентифицировать с зонами пониженных электросопротивлений. Область пониженных разностей потенциалов тянется, так же как и пониженных значений $\rho_к$, вдоль всего изучаемого участка. Но по глубине они не везде совпадают. Так аномалия $\Delta U/I$ (менее 0,02 В/А) на пикетах 670–630 прослеживается в интервале полуразносов 6–15 м, а аномалия $\rho_к$ (менее 20 Ом·м) – 12–25 м. Верхняя кромка аномальной зоны разности потенциалов на пикетах 550–510 фиксируется на глубине 5 м (ПК 530), а по аномалии $\rho_к$ – 10 м (ПК 510). Нижняя граница аномалии $\Delta U/I$ вытягивается до ПК 570, у аномалии $\rho_к$ – до ПК 550. Здесь в центральной части насыпи (пикеты 690–550) происходит утечка воды из накопителя. Это подтверждается просачиванием воды на дневную поверх-

ность у подножия плотины.

Та же методика комплексирования вертикальных (ВЭЗ) и дифференциальных (MAN) электрозондирований была применена на плотине пруда-осветлителя, куда после нейтрализации попадают шахтные воды. Плотина длиной 700 м и высотой 10 –13 м построена на р. Ельчевке, впадающей в Волчихинское водохранилище (Свердловская обл.). Геофизические исследования здесь проводились впервые. Точки наблюдений размещались через 20 м, полуразносы для ВЭЗ: 1,5–100 м, для MAN: 1,5–50 м, бесконечность составляла 400 м.

На разрезе кажущихся сопротивлений (см. рис. 1в) наблюдается преимущественно блочное строение плотины в отличие от выше рассмотренной, где, как видно по изолиниям $\rho_к$, выдерживается послойная засыпка грунта разного состава. В верхней части Ельчевской плотины $\rho_к$ насыпного материала составляет 30–40 Ом·м, и к основанию сопротивление либо остается таким же, либо увеличивается до 50–70 Ом·м. По всей видимости, данная плотина сложена из грунта с небольшим содержанием глины. Выделяются несколько участков пониженного сопротивления в теле плотины: пикеты 2–4; 8–14; 18–24; 40–44; 52–58. Здесь же наблюдается понижение $\rho_к$ и в коренных породах, особенно это касается пикетов 22, 40, 46, 52–58, где наиболее низкие сопротивления, которые могут характеризовать зоны, имеющие тектоническую природу.

На разрезе дифференциальных зондирований (см. рис. 1г) в верхней и центральной части тела плотины отмечаются аномалии повышенной разности потенциалов. На пикете 4, 10 эти аномалии совпадают с областью пониженных $\rho_к$ и локализуются полуразносами 3,8–5; 2–4 м соответственно. Здесь может быть максимальное переувлажнение грунта с возможным разуплотнением. На пикете 36 аномалия $\Delta U/I$ (полуразносы 2,8–6 м) наблюдается на фоне небольшого повышения элеткросопротивления, в этом месте также можно ожидать развитие кавернозности в грунте. Вертикальная аномалия повышенной разности потенциалов, которая прослеживается на пикете 22 от поверхности до основания плотины и протягивается в геологическое пространство, совпадает с пониженными значениями $\rho_к$ и может быть связана с возможной тектонической структурой, находящейся в этом месте.

Пониженные значения $\Delta U/I$, приуроченные к зонам проводимости, фиксируются в основании плотины с 10 по 60 пикеты. Причем аномальная область распространяется как в тело плотины, так и геологическую среду. Это говорит о том, что вода из осветлителя фильтруется и через нижнюю часть плотины, и по водопроницаемым горным породам.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований показывают перспективность применения комплексной методики вертикальных и дифференциальных электрозондирований при изучении состояния гидротехнических сооружений. Вертикальные зондирования дают интегральную характеристику электросопротивления насыпного материала, на фоне которой небольшие неоднородности проявляются нечетко. Зондирования с дифференциальной установкой более чувствительны к локальным объектам и дополняют геоэлектрические особенности изучаемой среды, выявленные методом ВЭЗ. По разрезу кажущихся сопротивлений определяются области повышенной проводимости в насыпи, связанные с переувлажнением грунта, которые уточняются и локализуются на разрезах приведенной разности потенциалов. Области разуплотнения грунта возможно связывать с повышенными значениями разности потенциалов. Кроме того, электрозондированиями исследуется верхняя геологическая часть разреза под сооружением и фиксируется фильтрация воды из водоема по водопроницаемым породам. Это важный момент, особенно для водоемов-отстойников, когда с поверхности утечки не наблюдаются, а по рыхлым осадочным отложениям и по трещиноватым породам загрязненные воды инфильтруются в гео-

логическое пространство и распространяются по стоку подземных вод.

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

Литература

Тархов А.Г. Об электроразведочных методах чистой аномалии // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. № 8. С. 979–989.

Улитин Р.В., Федорова О.И. Кондуктивное дифференциальное профилирование при решении инженерных и геоэкологических задач. Ин-т геофизика УрО РАН. Екатеринбург, 1999. 15 с. – Рукопись деп. в ВИНИТИ. № 2474-В99.

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.

Пат. 2332690 (РФ). Способ геоэлектроразведки / Р.В. Улитин, О.И. Федорова. 2008.

Улитин Р.В., Федорова О.И. Особенности распределения электрического поля при дифференциальном электрозондировании над локальными неоднородностями // Уральский геофизический вестник. 2009. № 1. С. 65–69.

К статье Федоровой О.И., Горшкова В.Ю., Маликова А.В. «Изучение состояния грунтовых...»

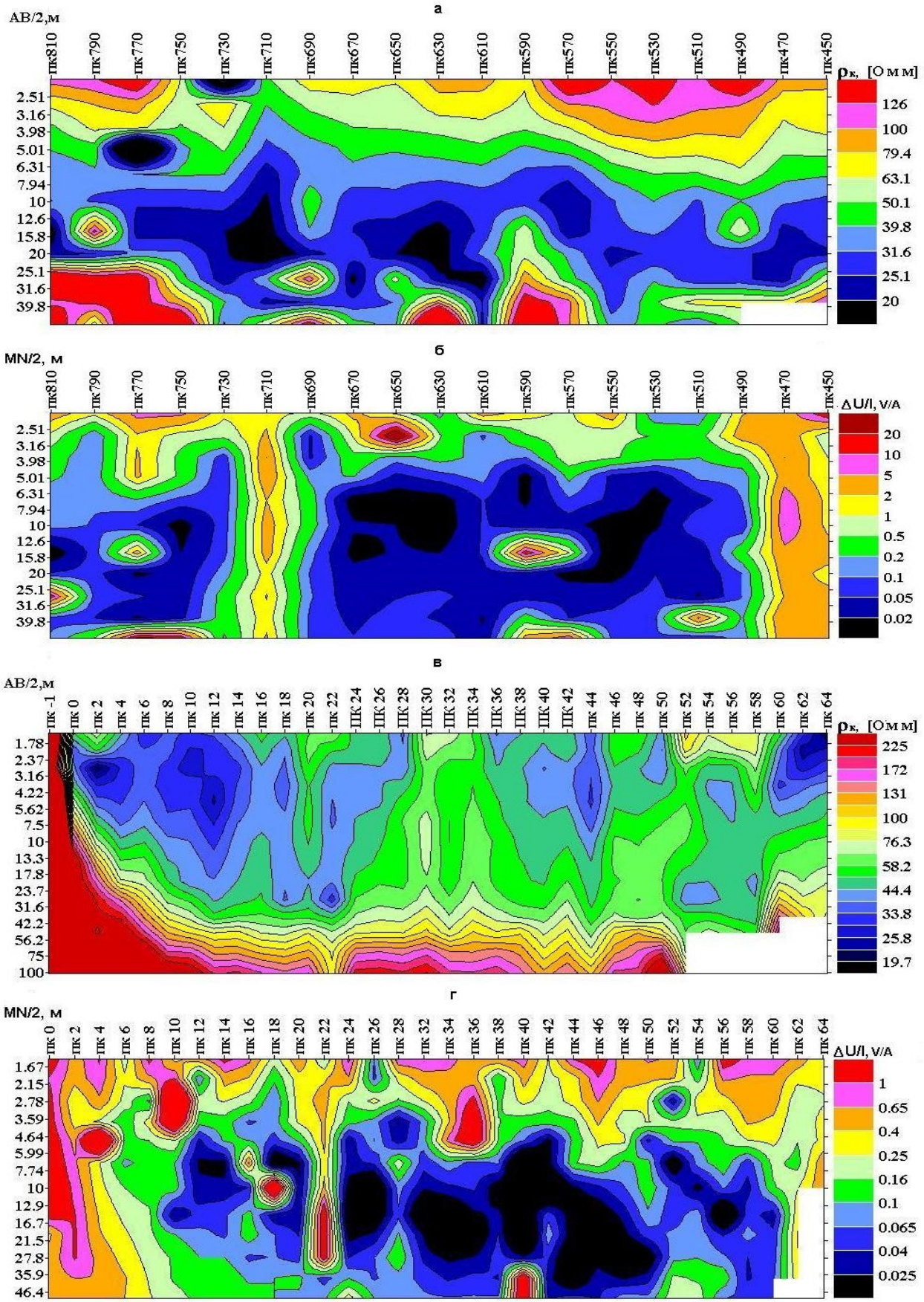

Рис. 1. Разрезы кажущихся сопротивлений (ВЭЗ) и приведенной разности потенциалов (MAN), полученные по результатам обследования плотин на р. Тече (Челябинская обл.) – а, б и р. Ельчевка (Свердловская обл.) – в, г