

Применение 1D–2D-инверсий электромагнитных зондирований при изучении грунтовых плотин

Вадим Анатольевич ДАВЫДОВ*,
Ольга Ивановна ФЕДОРОВА**,
Сергей Владимирович БАЙДИКОВ***

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Россия, Екатеринбург

Актуальность работы обусловлена возрастающим интересом к использованию геофизических технологий для неразрушающего контроля гидротехнических сооружений.

Основная цель работ заключалась в определении возможностей бесконтактных методов электромагнитных зондирований, при обследовании грунтовых плотин. Зондирования проводились индукционными установками с вертикальными магнитными диполями и частично с помощью электрических зондирований. К задачам исследований относились выделение основных структурных элементов плотин и идентификация аномальных зон по характеру геоэлектрических разрезов, полученных различными методами электромагнитных зондирований. Количественная обработка электроразведочных данных осуществлялась в форме одно- и двухмерных (1D–2D) инверсий с применением программного обеспечения разных производителей. При тестировании алгоритмов решения обратных задач был определен наиболее оптимальный по быстродействию и качеству интерпретации метод двухмерной инверсии, реализованной в программе RES2DINV. С помощью данного программного обеспечения впервые выполнена обработка дистанционных индукционных зондирований с получением электротомографических разрезов грунтовых плотин. В статье приведен сравнительный анализ 1D- и 2D- инверсии электромагнитных зондирований, полученных на трех грунтовых плотинах Свердловской области. Сравнение результатов электрических и индукционных зондирований показало хорошую сопоставимость электрофизических свойств, хотя в ряде случаев наблюдается отличие величин удельных электрических сопротивлений (УЭС) на постоянном и переменном токе из-за разного характера проводимости изучаемых объектов. Обработка результатов с применением 1D–2D-инверсий позволяет определять по УЭС форму и структуру аномальных зон, участки повышенной водонасыщенности и возможные места утечек. Проведенные исследования подтверждают высокую эффективность электромагнитных методов при обследовании гидротехнических сооружений.

Методология проведения работы: использовались электромагнитные методы дистанционных зондирований индукционными установками с вертикальными магнитными диполями и с помощью электрических установок с емкостными стелющими линиями. В качестве сравнительного арбитражного метода использовались вертикальные электрические зондирования. Количественная обработка электроразведочных данных осуществлялась в форме одно- и двухмерных (1D–2D) инверсий с применением программного обеспечения разных производителей.

Результаты. Научно-исследовательские работы, проведенные на трех грунтовых плотинах Свердловской области, показали, что все полученные на постоянном и переменном токе геоэлектрические разрезы схожи по морфологии. Достаточно четко выделяются основные элементы плотин: насыпная часть, основание, водослив, а также инженерные конструкции (колодцы и т. д.). Одномерные (1D) и двухмерные (2D) геоэлектрические разрезы, построенные с помощью разных методов зондирований, оказались похожими друг на друга, но со своими характерными особенностями. В ряде случаев наблюдается отличие величин удельных электрических сопротивлений на постоянном и переменном токе из-за разного характера проводимости изучаемых объектов, однако общие черты структурного строения плотины уверенно видны на всех разрезах. При тестировании алгоритмов решения обратных задач был определен наиболее оптимальный по быстродействию и качеству интерпретации метод двухмерной инверсии. С его помощью впервые выполнена обработка дистанционных индукционных зондирований с получением электротомографических разрезов грунтовых плотин.

Выводы. Отмечается хорошая сопоставимость геоэлектрических разрезов для всех методов электромагнитных зондирований. Обработка результатов с применением 1D- и 2D- инверсий позволяет определять строение плотин по удельному электрическому сопротивлению, в том числе форму и структуру аномальных зон, участки повышенной водонасыщенности и возможные места утечек. Проведенные исследования подтверждают высокую эффективность геофизических методов при обследовании гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: грунтовая плотина, электрические зондирования, дистанционные индукционные зондирования, инверсия, удельное электрическое сопротивление, геоэлектрический разрез, геотомография.

Введение

Геофизические технологии довольно успешно используются для изучения состояния грунтовых плотин. Предпочтение отдается геоэлектрическим методикам, позволяющим по электрофизическим характеристикам грунта обнаруживать обводненные участки и места повышенной фильтрации воды [1]. Применяются как кондуктивные методы зондирования, так и индуктивные. К наиболее используемым контактным методам относятся вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). По гребню плотины часто обустраивают дороги, отсыпанные щебенкой или заасфальтированные. В связи с этим возникают трудности с заземлением электродов при гальваническом возбуждении тока. В этом случае целесообразно применение альтернативных методов, таких как бесконтактные электрические зондирования (БЭЗ) с емкостными линиями [2] и дистанционные индукционные зондирования (ДИЗ) [3].

Результаты зондирования, как правило, представляются в виде разрезов кажущихся сопротивлений ρ_k для всех видов методик. Оценка электросопротивления грунтового материала на некоторой эффективной глубине дает качественное представление об изменении состояния полотна плотины, в первую очередь от повышения влажности грунта. Это позволяет определять местоположение аномальных участков в насыпи и локализовать потенциально опасные участки плотины, в том числе зоны сосредоточенной фильтрации [4]. Однако характер грунта и степень его увлажнения по кажущемуся сопротивлению оценить трудно. Необходимо получить количественные показатели выявленных аномалий:

* ✉ davyde@yandex.ru

id <https://orcid.org/0000-0003-2483-2154>

** fougeo@mail.ru

*** badikek@mail.ru

id <https://orcid.org/0000-0003-2881-9854>

удельное электрическое сопротивление (УЭС) грунта и линейные размеры (вертикальную, горизонтальную мощности) аномальной области в рамках эквивалентности решения обратной задачи для восстановления геоэлектрического разреза. Количественная интерпретация проводится чаще всего по программам одномерной (1D) инверсии, однако с распространением томографических технологий появилась возможность двухмерной (2D) обработки полевых зондирований, в том числе бесконтактных методов электроразведки.

Основная цель работ заключалась в определении возможностей бесконтактных методов электромагнитных зондирований при обследовании грунтовых плотин. В первую очередь рассматриваются результаты количественной обработки дистанционных индукционных зондирований в плане достоверности получаемых геоэлектрических разрезов. К задачам исследований относилось выделение основных структурных элементов плотин и аномальных зон кондуктивными и индуктивными методами зондирования. В статье приведены сравнительные результаты 1D- и 2D-инверсии основных типов геометрических электромагнитных зондирований, полученных на различных грунтовых плотинах Свердловской области.

Методы исследований

Электрометрические исследования плотин проводились комплексными зондированиями на постоянном и переменном токе с использованием электрических и магнитных полей. Работы методом вертикальных электрических зондирований выполняли комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) симметричной установкой Шлюмберже по стандартной методике. Длина приемной линии MN равнялась 2 м, питающие электроды разносились на расстояние $AB/2$ до 100 м. Измерения проводились на частоте 4,88 Гц при стабилизированном токе в питающей линии от 10 до 50 мА. На каждом разносе рассчитывалось кажущееся удельное электрическое сопротивление по стандартной формуле. Результаты заносились в журнал и отстраивались на логарифмическом бланке. Погрешность полевых измерений составила около 3 %.

Бесконтактные электрические зондирования проводились комплектом аппаратуры «Электротест ЕИС-3мк» (НТК «ДИОГЕН», г. Москва) на частоте 16,5 кГц. Использована дипольно-осевая установка с емкостными электрическими антеннами длиной 10 м. В излучающем диполе поддерживался стабилизированный ток 3 мА, что позволило добиться максимального разноса между центрами установок в 50 м. Все показания прибора вместе со служебной информацией запоминались в энергонезависимой памяти приемного блока в виде файла данных. Кажущееся сопротивление рассчитывалось по формуле, аналогичной ВЭЗ, со своими геометрическими коэффициентами, которые определялись в соответствии с [5].

Для дистанционных индукционных зондирований использовалась высокочастотная аппаратура МЧЗ-8, разработанная в Институте геофизики УрО РАН [6]. Генераторная и приемная части аппаратуры работают под управлением микропроцессоров и связаны по радиоканалу, поэтому многие операции производятся в автоматическом режиме. Генератор имеет 8 рабочих частот (от 1,25 до 160 кГц), возбуждающее электромагнитное поле генерируется с помощью вертикального магнитного диполя. Наблюдения обычно велись на 2–3 частотах, измерялась амплитуда двух ортогональных составляющих переменного магнитного поля – вертикальная H_z и горизонтальная H_x . Точки зондирования располагались по профилю через 10–20 м, при этом приемник оставался на месте, а генератор последовательно относился на расстояние r от 5 до 80 м по линии профиля с переменным шагом. Кажущееся сопротивление рассчитывалось по рекомендуемой формуле с учетом волнового параметра поля [7]. Все данные полевых измерений вместе со служебной информацией записывались во внутреннюю флэш-память приемника.

Одномерную количественную интерпретацию ВЭЗ проводили с помощью программы IPI2Win, разработанной в Московском государственном университете [8]. Для двухмерной инверсии применяли программу Каминского ZondRes2D [9] и распространенное программное обеспечение для геотомографии RES2DINV (Geotomo Software, Малайзия) [10]. Для оптимизации процесса обработки проведено тестирование функциональных возможностей используемых программ на предмет скорости расчетов и достоверности результатов. Основной задачей программ инверсии является восстановление параметров геоэлектрического разреза по полученным данным полевых наблюдений. Существует несколько вариантов решения обратной задачи, важнейшими из которых являются сглаживающая и фокусирующая инверсия – для получения гладкого и кусочно-гладкого распределения геоэлектрических параметров с глубиной. Наиболее подходящим по быстродействию и качеству интерпретации был признан метод наименьших квадратов с квази-Ньютоновской оптимизацией [11], на котором базируется программа RES2DINV. Перспективы дальнейшего развития геотомографии и внедрение двумерной инверсии в бесконтактных методах электрометрии также связаны с этим популярным программным обеспечением [12–15]. На основе имеющихся алгоритмов был реализован способ преобразования полученных данных в формат программы RES2DINV, а также разработана и опробована методика двухмерной интерпретации дистанционных индукционных зондирований. Это позволило впервые провести 2D-инверсию ДИЗ на грунтовых плотинах с получением количественных геотомографических разрезов.

Результаты работ

Научно-исследовательские работы выполнялись на трех грунтовых плотинах Свердловской области, расположенных на реках Сысерть, Ельцевка и Арамилка.

Плотина Верхнесысертьского пруда была возведена в 1849 г. Общая длина дамбы составляет около 350 м, ширина по гребню более 15 м, высота достигает 10 м в центральной части. Ядро плотины состоит из утрамбованной глины, основанием служат скальные грунты метаморфических пород палеозойского возраста. По гребню плотины выполнены вертикальные электрические и дипольные индукционные зондирования. Результаты ВЭЗ обработаны программами 1D–2D инверсии, ДИЗ – 2D-инверсией. Геоэлектрические разрезы по данным зондирования имеют схожую структуру (рис. 1).

По результатам одномерной инверсии ВЭЗ среднее удельное электрическое сопротивление глинистого материала составляет 25–30 Ом·м. Двухмерная инверсия ВЭЗ и ДИЗ показывает более высокие значения: 30–50 Ом·м и 60–100 Ом·м соответственно. Эти

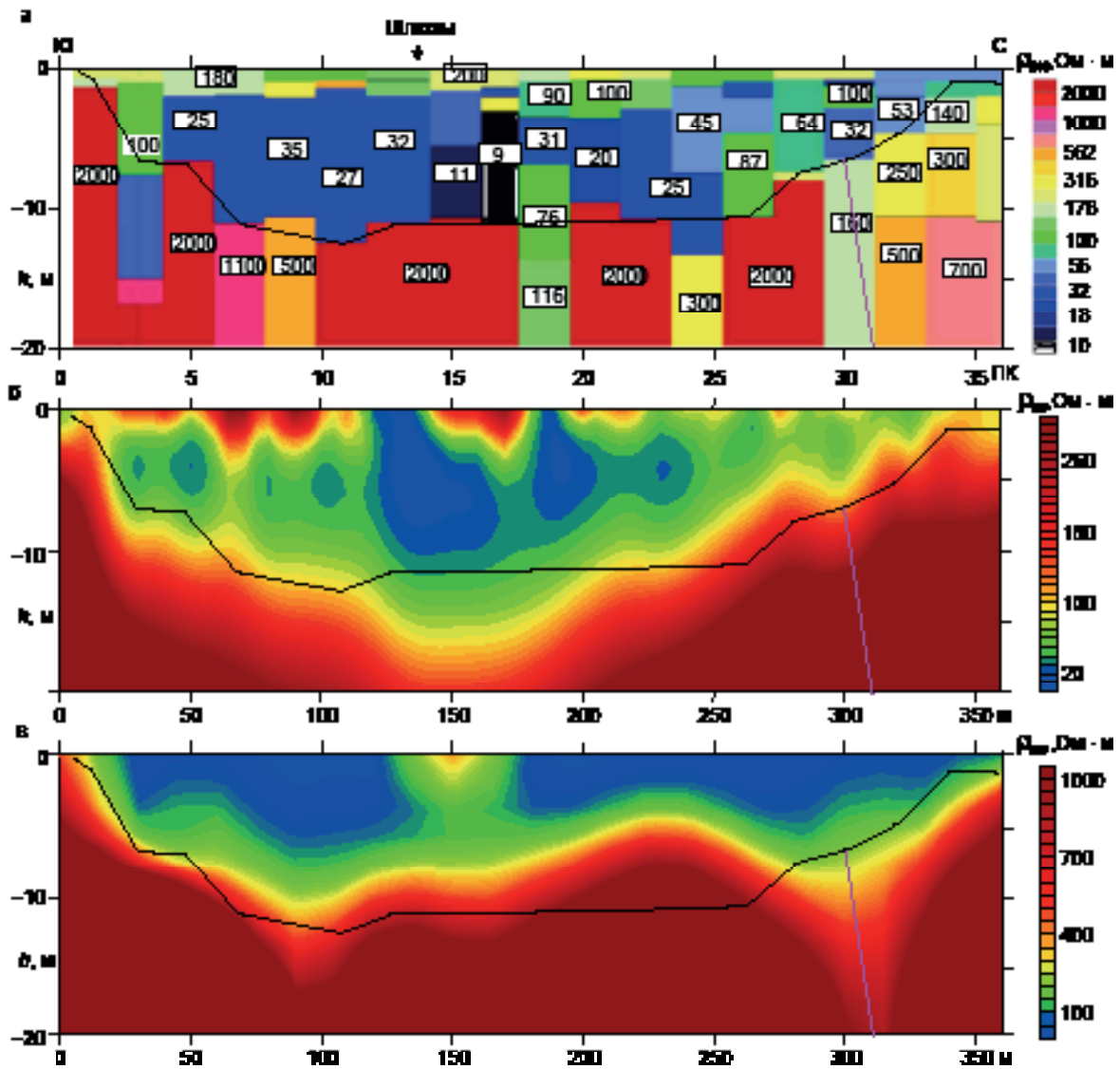


Рисунок 1. Геоэлектрические разрезы Верхнесыертской плотины. а – одномерный (1D) разрез ВЭЗ (цифрами на разрезе отмечены значения УЭС в указанном месте); б – двухмерный (2D) разрез ВЭЗ; в – 2D-разрез ДИЗ на частоте 2,5 кГц. Черной линией показана граница основания плотины по данным одномерной интерпретации ВЭЗ. Красной линией выделен предполагаемый контакт пород разного состава.

Figure 1. Geoelectric sections of the Verkhnsyertskaaya dam. a) one-dimensional (1D) VES section (numbers on the section indicate the specific electrical resistance values at the specified location); b) two-dimensional (2D) VES section; c) 2D-section of DIZ at a frequency of 2.5 kHz. The black line shows the dam base boundary according to one-dimensional interpretation of VES. The red line indicates the intended contact of rocks of different composition.

показатели являются нормальными и указывают на хорошее состояние плотины, за исключением аномальных областей ($\rho = 9-11 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), в которых происходит повышенная фильтрация воды из водохранилища. Выделяются две основные аномальные области в районе шлюзов (ПК12–16) и на пикетах 18–20, которые имеют пониженные сопротивления по сравнению с грунтами остальной части плотины. Электросопротивление среды, вычисленное по данным ДИЗ, имеет более высокие значения в силу индуктивной природы возбуждения электромагнитного поля в среде. Насыпные грунты верхней части плотины характеризуются широким разбросом УЭС от 50 до 340 Ом · м. Основание плотины, сложенное кристаллическими сланцами, отличается высокими значениями сопротивлений ($\rho = 300-2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). В районе ПК30 предположительно находится контакт пород разного состава, заметно выделяющийся на геоэлектрических разрезах пониженными сопротивлениями (рис. 1, а, в). Следует отметить, что детализация 1D-инверсии ВЭЗ более высокая, чем на полученных 2D-разрезах. Это, по-видимому, связано с избыточным сглаживанием в алгоритмах двумерной инверсии. Однако в целом полученные геоэлектрические разрезы довольно хорошо сопоставимы между собой и соответствуют реальной физико-геологической обстановке.

Аналогичные работы были проведены на Ельцевской плотины. Ельцевский пруд является отстойником-накопителем донных отложений, образующихся в результате нейтрализации кислых вод, изливающихся из затопленных шахт Дегтярского рудника. Плотина на реке Ельцевке введена в эксплуатацию в 1954 г. и реконструирована в 1979 г. Она сложена преимущественно суглинком с примесью щебня и имеет протяженность около 700 м. Максимальная

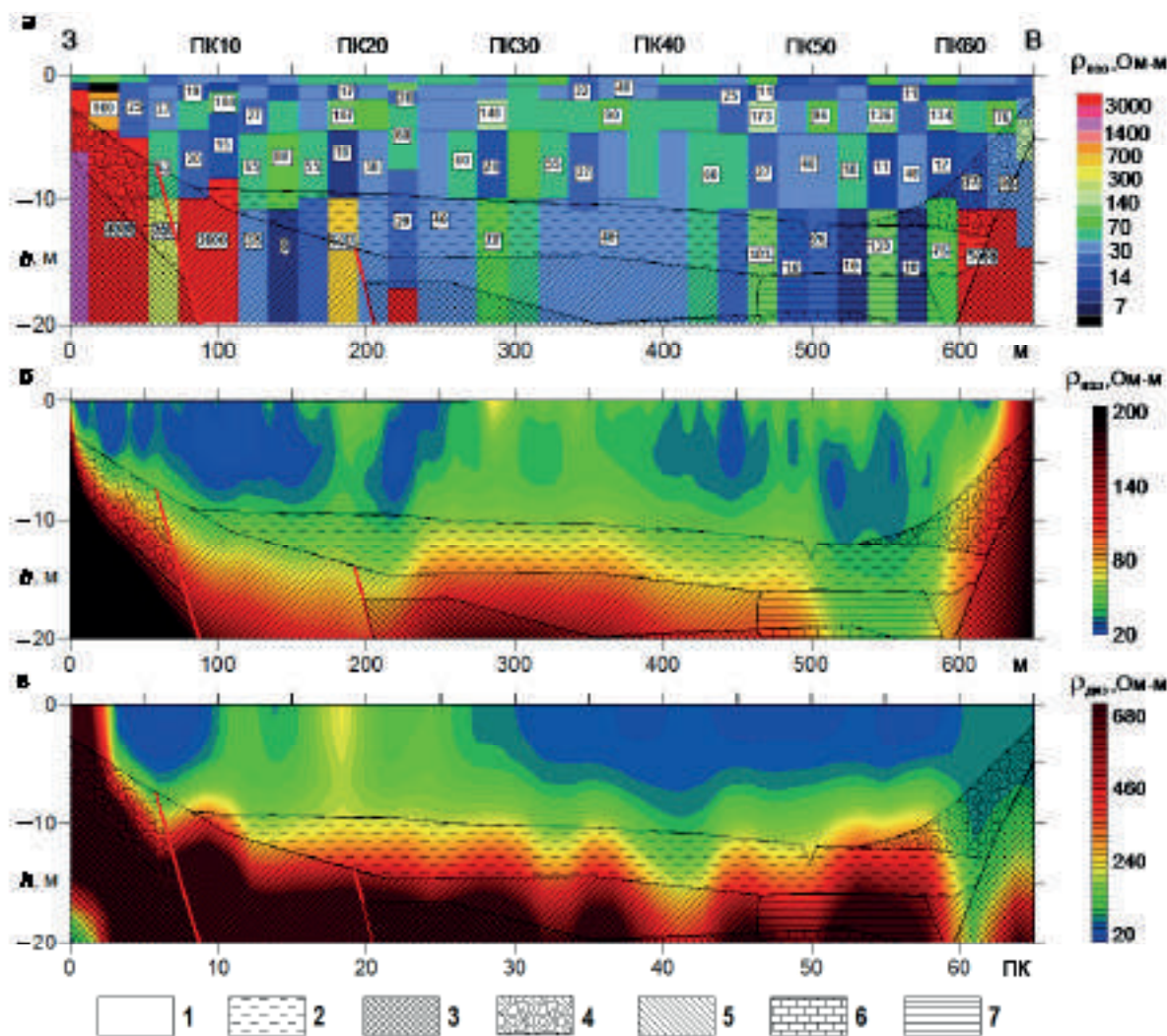


Рисунок 2. Геоэлектрические разрезы Ельчевской плотины на геологической основе. а – 1D-разрез ВЭЗ (цифрами отмечены значения УЭС); б – 2D-разрез ВЭЗ; в – 2D-разрез ДИЗ на частоте 10 кГц; 1 – тело плотины; 2 – аллювиальные отложения; 3 – базальты; 4 – делювиальные суглинки с щебнем; 5 – элювиальные супеси; 6 – известняки; 7 – глины.

Figure 2. Geoelectric sections of the Elchevsk dam on a geological basis. a – 1D – VES section (figures indicate the values of resistivity); b – 2D – VES section; c – DIZ 2D-section at a frequency of 10 kHz. 1 – dam body; 2 – alluvial deposits; 3 – basalts; 4 – deluvial loam with rubble; 5 – eluvial sandy loam; 6 – limestone; 7 – clay.

высота насыпи составляет 13 м. Геологический разрез в районе плотины представлен тремя типами коренных пород субвертикального залегания: базальтами, туфами и известняками. Широко развита трещиноватость скальных пород, а контакты туфов с базальтами осложнены тектоническими нарушениями. Осадочные образования состоят из элювиальных и делювиальных отложений коры выветривания коренных пород, торфа и аллювия долины р. Ельчевки. Ельчевская плотина на протяжении нескольких лет служила хорошим полигоном для детальных исследований различными геофизическими методами [16]. При комплексной обработке электромагнитных зондирований (ВЭЗ, ДИЗ) в рамках двухмерной модели (2D-инверсия) приближенная начальная модель была выбрана исходя из известной геологической информации.

Все полученные геоэлектрические разрезы схожи по морфологии (рис. 2). Достаточно четко выделяется основание плотины, осадочные и коренные породы. Это особенно заметно при наложении на геоэлектрический разрез контура геологической ситуации с нанесенными основными границами разделов. Геоэлектрические аномалии на разрезе ВЭЗ выделяются более локальными областями, нежели на разрезе ДИЗ. Средние значения УЭС насыпного грунта при двумерной инверсии составляют 40–60 Ом · м по ВЭЗ и 60–120 Ом · м по ДИЗ. На геоэлектрическом 1D-разрезе ВЭЗ (рис. 2, а) полотно плотины представляется более детально, но менее контрастно. Верхний 1,5–2-метровый слой соответствует зоне аэрации, далее выделяется слой средних сопротивлений (80–150 Ом · м) до глубины 5 м (уровень воды в водоеме). Мощность слоя водонасыщенных грунтов плотины составляет 5–6 м, средние значения УЭС: 40–60 Ом · м. Значения электрических сопротивлений в аномальных зонах снижаются до 10–15 Ом · м. Граница на глубине приблизительно в 9–11 м отвечает подошве насыпных грунтов. Сравнивая 1D- и 2D-разрезы, можно заметить, что основные аномальные проводящие области (западная и восточная) в теле плотины совпадают, но отличаются по детальности и по значениям удельных сопротивлений, указывая на области реально существующих утечек. Нижняя часть разреза (по 2D-инверсии) более достоверно и наглядно отражает геологические и структурные особенности среды.

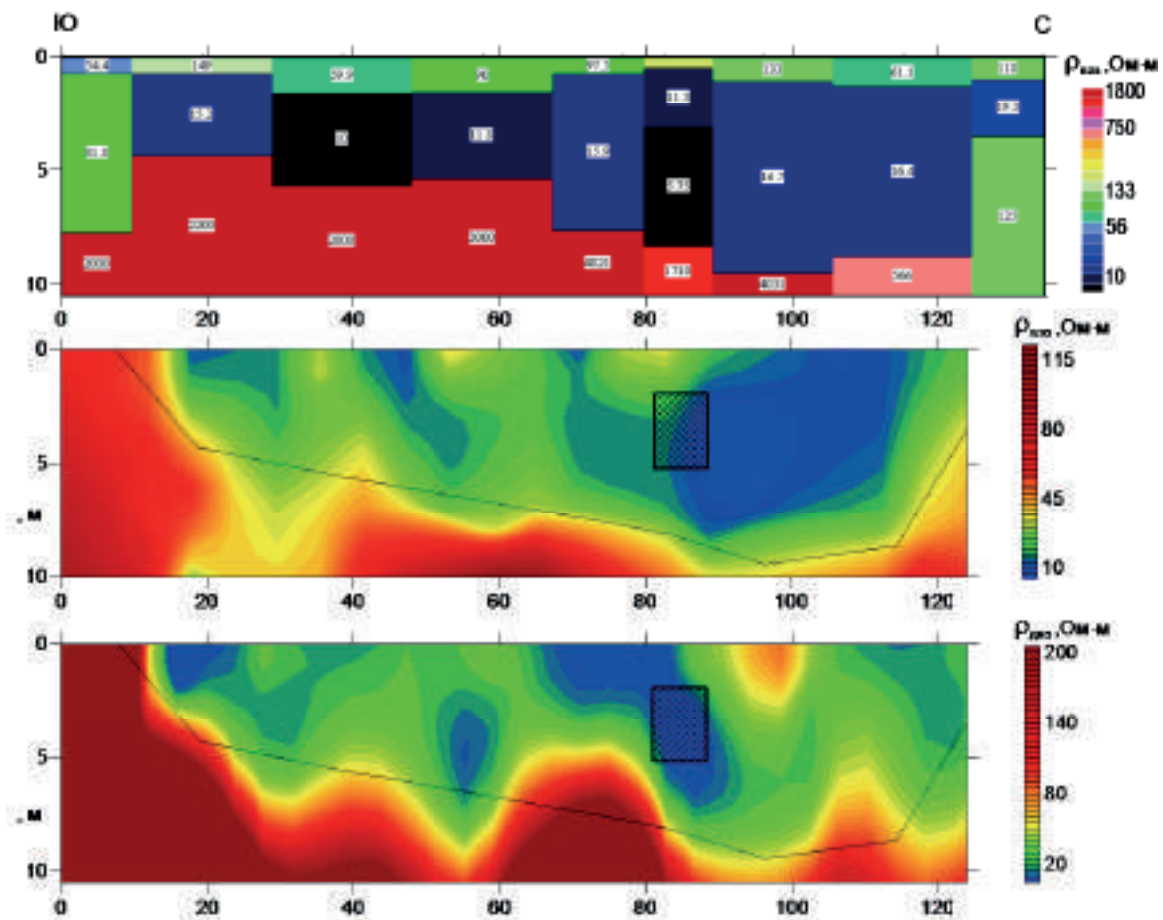


Рисунок 3. Геоэлектрические разрезы плотины на р. Арамилке. а – разрез ВЭЗ (1D-инверсия); б – 2D-разрез БЭЗ на частоте 16,5 кГц; в – 2D-разрез ДИЗ на частоте 20 кГц. Черной линией показана граница основания плотины по данным одномерной интерпретации ВЭЗ. Заштрихованным прямоугольником выделен водослив плотины.

Figure 3. Goelectrical sections of the dam on the Aramilka river. a – VES section(1D inversion); b – 2D – BEZ section at a frequency of 16.5 kHz; c – DIZ 2D-section at a frequency of 20 kHz. The black line shows the dam base boundary according to one-dimensional interpretation of VES. The shaded rectangle highlights the dam spillway.

Следующий объект исследований – маловысотная грунтовая плотина на реке Арамилке. Длина плотины небольшого сельского пруда чуть больше 120 м, высота в среднем 5–7 м. В основании залегают серпентинизированные породы ультраосновного состава. Кроме методов ВЭЗ и ДИЗ, ее обследовали с помощью бесконтактных электрических зондирований (БЭЗ). Причем рабочая частота индукционных зондирований (20 кГц) была выбрана максимально близко к рабочей частоте электрических зондирований (16,5 кГц). Это было сделано для проверки подобия получаемых величин УЭС при возбуждении и приеме переменного электрического поля (БЭЗ) к соответствующим результатам наблюдений в переменных магнитных полях (ДИЗ). В идеальном случае геоэлектрические разрезы БЭЗ и ДИЗ должны совпадать, на практике они оказались похожими друг на друга, но со своими особенностями и различием в значениях электрических сопротивлений (рис. 3).

Основное отличие заключается в более высоком уровне УЭС при индукционных зондированиях. Небольшая разница в рабочих частотах станций не дает такого эффекта. Возможной причиной может служить разница в условиях приема полезного сигнала, на который оказывают влияние анизотропные свойства среды в продольном и поперечном направлении плотины. На всех геоэлектрических разрезах низкими значениями сопротивлений довольно хорошо выделяется водослив плотины. Некоторое отклонение аномалии БЭЗ от центра водослива можно объяснить смещением точки записи за счет близкого влияния металлических конструкций шлюзов. Удельное электрическое сопротивление материала плотины составляет, по данным ВЭЗ, 15–20 Ом · м; по данным БЭЗ и ДИЗ, 20–30 Ом · м. Это указывает на глинистый состав насыпного материала и его высокую влагонасыщенность. Значения электросопротивлений залегающих в основании серпентинитов сильно отличаются при измерениях разными методами. По данным ВЭЗ, коренные породы имеют очень высокие УЭС (до 4000 Ом · м), однако, по результатам БЭЗ и ДИЗ, сопротивления не превышают 200–300 Ом · м. Это объясняется акцессорной вкрапленностью магнетита в серпентинитах, не образующего проводящих цепочек на постоянном токе (ВЭЗ), но являющегося слабым проводником в переменном электромагнитном поле. Несмотря на существующие отличия, общие черты структурного строения плотины видны на всех геоэлектрических разрезах.

Выводы

Сравнение результатов различных электромагнитных зондирований показало хорошую сопоставимость 1D–2D-геоэлектрических разрезов. В то же время в ряде случаев наблюдается отличие величин УЭС из-за разного характера проводимости изучаемых объектов на постоянном и переменном токе. Обработка результатов с применением 1D- и

2D-инверсий позволяет определять строение плотин по удельному электрическому сопротивлению, в том числе форму и структуру аномальных зон, участки повышенной водонасыщенности и возможные места утечек. Проведенные исследования подтверждают высокую эффективность геофизических методов при обследовании гидротехнических сооружений.

Авторы выражают признательность своим коллегам из Института геофизики УрО РАН В. Ю. Горшкову и А. В. Маликову за участие в совместных полевых работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. Вып. 2. С. 84–98.
2. Kuras O., Beamish D., Meldrum Ph. I., Ogilvy R. D. Fundamentals of the capacitive resistivity technique // Geophysics. 2006. Vol. 71(3). G135–G152. <https://doi.org/10.1190/1.2194892>
3. Титлинов В. С., Журавлева Р. Б. Технология дистанционных индуктивных зондирований. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1995. 58 с.
4. Davydov V. A., Baidikov S. V., Gorshkov V. Y., Malikov A. V. Geophysics Methods in Electrometric Assessment of Dams // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50, issue 2. P. 168–175. <https://doi.org/10.1007/s10749-016-0678-7>
5. Lee S. K., Cho S. J., Song Y., Chung S. H. Capacitively-coupled Resistivity Method-Applicability and Limitation // Geophysics and Geophysical Exploration. 2002. Vol. 5 (1). P. 23–32.
6. Байдииков С. В., Человечков А. И. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 4–8.
7. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Игнатьев Г. Ф. Электромагнитное профилирование. Л.: Недра, 1971. 216 с.
8. Бобачев А. А., Модин И. Н., Шевнин В. А. Программа IPI2Win: руководство пользователя. М.: МГУ, 2003. 25 с.
9. Каминский А. Е. Программа двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации (наземный, скважинный и акваторный варианты) / ZondRes2D. СПб.: Zond Software, 2014. 139 с.
10. Loke M. H. RES2DINV. Rapid 2D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Penang, Malaysia: Geotomo Software. Manual. 2017. 137 p.
11. Loke M. H., Barker R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. Vol. 44. P. 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
12. Neukirch M., Klitzsch N. Inverting capacitive resistivity (line electrode) measurements with direct current inversion programs // Vadose Zone Journal. 2010. Vol. 9 (4). P. 882–892. <https://doi.org/10.2136/vzj2009.0164>
13. Oldenborger G. A., LeBlanc A. M. Capacitive resistivity inversion using effective dipole lengths for line antennas // Journal of Applied Geophysics. 2013. Vol. 98. P. 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.09.003>
14. Kuras O., Swift R., Uhlemann S., Wilkinson P., Inauen C., Meldrum P. Geoelectrical Imaging of Concealed Objects with Capacitive Sensor Arrays. In 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2018, September. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802649>
15. Niu Q., Wang Y. H. Inversion of capacitively coupled resistivity (line-antenna) measurements // Geophysics. 2014. Vol. 79, № 3. P. E125–E135. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0282.1>
16. Федорова О. И., Давыдов В. А. Диагностика грунтовых гидротехнических сооружений электрическими и сейсмическими методами на примере Ельцевской плотины // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 6. С. 44–55.

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2019 г.

Application of 1D–2D inversion of electromagnetic sounding in the study of ground water dam

Vadim Anatol'evich DAVYDOV*,
Ol'ga Ivanovna FEDOROVA**,
Sergey Vladimirovich BAIDIKOV***

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

The results of the use of geophysical technologies for the study of hydraulic structures are considered. The main purpose of the work was to determine the possibilities of noncontact methods of electromagnetic sounding during surveys of ground water dams. Soundings were carried out by induction installations with vertical magnetic dipoles and, in part, using electrical installations with capacitive parallel lines. VES surveys were used as a comparative reference method. The objectives of the research included identifying the main structural elements of dams and identifying anomalous zones by geoelectrical sections obtained by various methods of electromagnetic soundings. Quantitative processing of electrical data was carried out in the form of one- and two-dimensional (1D – 2D) inversions using software from different manufacturers. When testing algorithms for solving inverse problems, the method of two-dimensional inversion implemented in the RES2DINV program was found to be the best in terms of speed and quality of interpretation. With the help of this software, for the first time, the processing of remote induction soundings was performed with obtaining electro-tomographic sections of ground water dams. The paper gives a comparative analysis of 1D and 2D inversion of electromagnetic soundings obtained at three ground water dams of the Sverdlovsk region. Comparison of the results of electrical and induction soundings showed good comparability of electrical properties, although in some cases there is a difference in the values of specific electrical resistances (CER) for direct and alternating currents due to the different nature of the conductivity of the objects under study. Processing the results with the use of 1D – 2D inversions allows us to determine the shape and structure of anomalous zones, areas of high water saturation and possible leak points according to specific electrical resistance. Studies have confirmed the high efficiency of electromagnetic methods in the inspection of hydraulic structures.

The relevance of the work is due to the increasing interest in the use of geophysical technologies for non-destructive testing of hydraulic structures.

The purpose of the work: to find out the possibilities of using non-contact methods of electromagnetic sounding during surveys of ground water dams.

Methodology of work: electromagnetic methods of geometrical soundings were used out by induction installations with vertical magnetic dipoles as well as using electrical installations with capacitive parallel lines. VES surveys were used as a comparative reference method. Quantitative processing of electrical data was carried out in the form of one- and two-dimensional (1D – 2D) inversions using software from different manufacturers.

Results. The research conducted at three ground water dams in the Sverdlovsk region showed that all the geoelectrical sections obtained on direct and alternating currents are similar in morphology. The main elements of the dams are clearly distinguished: embankment, base, spillway, as well as engineering structures (wells, etc.). One-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) geoelectrical sections constructed using different sounding methods, turned out to be similar to each other, but with their characteristic features. In some cases, there is a difference in the values of specific electrical resistances for direct and alternating currents due to the different nature of the conductivity of the objects under study; however, the general features of the structural architecture of the dam are clearly visible on all sections. When testing algorithms for solving inverse problems, the method of two-dimensional inversion was found to be the most optimal in terms of speed and quality of interpretation. For the first time, remote induction soundings were processed to produce electro-tomographic sections of ground water dams with the help of that method.

Conclusion. There is good comparability of geoelectrical sections for all methods of electromagnetic sounding. Processing the results with the use of 1D and 2D inversions allows determining the structure of dams by their specific electrical resistance, including the shape and structure of anomalous zones, areas of high water saturation and possible leak points. The conducted studies confirm the high efficiency of geophysical methods while the survey of hydraulic structures.

Keywords: ground water dam, electrical sounding, remote induction sounding, inversion, electrical resistivity, geoelectrical section, geotomography.

The authors express their gratitude to their colleagues from the Institute of Geophysics, UB RAS V. Yu. Gorshkov and A. V. Malikov for their participation in joint field works.

REFERENCES

- Ulitin R. V., Gavrilova I. E., Petukhova Yu. B., Fedorova O. I., Kharus R. L. 2000, *Geoelektrika pri reshenii geoeologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh zadach* [Geological electrical engineering when solving geo-ecological and engineering-geological problems. Theory and practice of geological electrical engineering research], collection of research papers, issue 2. Ekaterinburg, pp. 84–98.
- Kuras O., Beamish D., Meldrum Ph.I., Ogilvy R.D. 2006, Fundamentals of the capacitive resistivity technique. *Geophysics*, vol. 71(3), G135–G152. <https://doi.org/10.1190/1.2194892>
- Titlinov V. S., Zhuravleva R. B. 1995, Technology of remote inductive sounding. Ekaterinburg, 58 p.
- Davydov V. A., Baidikov S. V., Gorshkov V. Y., Malikov A. V. 2016, Geophysics Methods in Electrometric Assessment of Dams. *Power Technology and Engineering*, vol. 50, issue 2, pp. 168–175. <https://doi.org/10.1007/s10749-016-0678-7>
- Lee S. K., Cho S. J., Song Y., Chung S. H. 2002, Capacitively-coupled Resistivity Method-Applicability and Limitation. *Geophysics and Geophysical Exploration*, vol. 5 (1), pp. 23–32.
- Baidikov S. V., Chelovechikov A. I. 2011, Equipment for high-frequency induction soundings MChZ-8. *Ural'skiy Geofizicheskiy Vestnik* [Ural Geophysical Bulletin], no. 1, pp. 4–8. (In Russ.)
- Veshev A. V., Ivochkin V. G., Ignatyev G. F. 1971, *Elektromagnitnoye profilirovaniye* [Electromagnetic profiling operations], 216 p.
- Bobachev A. A., Modin I. N., Shevnin V. A. 2003, IPI2Win program, user manual. Moscow, 25 p.
- Kaminskiy A. E. 2014, The program of two-dimensional data interpretation of the method of resistance and induced polarization (land, borehole and territorial variants). Saint-Petersburg, 139 p.

* [✉ davyde@yandex.ru](mailto:davyde@yandex.ru)

 <https://orcid.org/0000-0003-2483-2154>

** fougeo@mail.ru

*** baidikek@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2881-9854>

10. Loke M. H. RES2DINV. 2017, Rapid 2D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Penang, Malaysia, Geotomo Software. Manual, 137 p.
11. Loke M. H., Barker R. D. 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, vol. 44, pp. 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
12. Neukirch M., Klitzsch N. 2010, Inverting capacitive resistivity (line electrode) measurements with direct current inversion programs. *Vadose Zone Journal*, vol. 9 (4), pp. 882–892. <https://doi.org/10.2136/vzj2009.0164>.
13. Oldenborger G. A., LeBlanc A. M. 2013, Capacitive resistivity inversion using effective dipole lengths for line antennas. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 98, pp. 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.09.003>
14. Kuras O., Swift R., Uhlemann S., Wilkinson P., Inauen C., Meldrum P. 2018, Geoelectrical Imaging of Concealed Objects with Capacitive Sensor Arrays. In *24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
15. Niu Q., Wang Y. H. 2014, Inversion of capacitively coupled resistivity (line-antenna) measurements. *Geophysics*, vol. 79, no. 3, pp. E125–E135. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0282.1>
16. Fedorova O. I., Davydov V. A. 2014, Diagnostics of soil hydraulic structures by electrical and seismic methods using the Elchevsk dam as an example. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye* [Water sector of Russia: problems, technology, management], no. 6, pp. 44–55. (In Russ.)

The article was received on February, 26, 2019