

СРАВНЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УСТАНОВОК В ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГРУНТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

© 2026 О.И. Федорова, В.Ю. Горшков

*Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия, 620016;
e-mail: fougeo@mail.ru, vitalaa@yandex.ru*

Поступила в редакцию 24.12.2025; после доработки 27.03.2026; принята в печать 27.06.2026

При диагностике грунтовых гидротехнических сооружений (ГТС) используется метод электрической томографии. Измерения проводят разными установками. В настоящей работе исследуется разрешающая способность наиболее часто применяемых установок: Веннера, Шлюмберже, прямой и обратной трехэлектродной. Проведено численное 2D моделирование зондирований методом электротомографии с этими установками на предложенной геоэлектрической модели грунтовой плотины с использованием программ решения прямой и обратной задач RES2DMOD версии 3.01 и RES2DINV версии 3.4. Расчеты показали, что при инверсии лучшую сходимость к заданной геоэлектрической модели дает зондирование, выполненное прямой и обратной трехэлектродной установкой. Экспериментальные работы, проведенные на двух грунтовых плотинах, подтвердили преимущество применения электротомографии с комбинацией трехэлектродных установок для изучения состояния ГТС. Данная установка позволяет получить разрез удельного электрического сопротивления на большей глубине, а также локализовать аномалии с меньшими значениями удельных сопротивлений, указывающими на переувлажнение грунтового материала и места повышенной фильтрации воды из водоема.

Ключевые слова: грунтовая плотина, электротомография, численное моделирование, геоэлектрический разрез.

ВВЕДЕНИЕ

Плотины и дамбы, построенные из песчано-глинисто-щебенистого грунта, подвергаются постоянной фильтрации воды из водоема. В некоторых местах насыпи из-за неоднородности ее строения фильтрация усиливается и может привести к переувлажнению и разуплотнению насыпного материала и, как следствие, разрушению сооружения. Диагностика состояния грунтовых гидротехнических сооружений проводится не только прямыми гидрогеологическими методами, но также может успешно осуществляться с помощью геофизики. Изменение содержания поровой влаги в насыпном грунте создает предпосылки для применения геоэлектрических методов: естественного поля, электрических зондирований на постоянном и переменном токе (Федорова, Давыдов, 2014; Anchuela et al., 2018; Boleve et al., 2009; Davydov,

Gorshkov, 2022; Davydov et al., 2021). В настоящее время при обследовании грунтовых гидротехнических сооружений (ГТС) используется метод электрической томографии (Cygal et al., 2016; Mazurenko et al., 2016; Michalis et al., 2022; Soueid et al., 2020).

Электротомография (ЭТ) — современная технология электроразведочных исследований методом сопротивлений (Электроразведка, 2019). Основные преимущества ЭТ по сравнению с известными методами зондирований на постоянном токе состоят в автоматическом режиме измерений и повышенной дискретности наблюдений, обеспечивающих высокий уровень интерпретации в рамках двумерной и трехмерной моделей. Метод ЭТ применяется при малоглубинных электрических зондированиях для изучения удельного электрического сопротивления (УЭС) верхней части геологического разреза с помощью специализированной

аппаратуры, например, СКАЛА-48, СКАЛА-64 (КБ Электрометрии, Россия), Омега (Логистические системы, Россия), Terrameter SAS4000, SAS1000 (ABEM, Швеция); SYSCAL Pro (IRIS instruments, Франция). К электроразведочной станции подключаются многоканальные кабели с определенным количеством электродов, заземляющихся вдоль профиля наблюдений и определяющих максимальный разнос зондирования. В зависимости от исследований зондирования выполняются разными установками: четырехэлектродными, трехэлектродными, дипольными (Аппаратура..., 2013). В автоматическом режиме станция на всех заданных разносах подключает электроды к приемной и питающей линиям, выполняет измерения и вычисляет кажущиеся электросопротивления (ρ_k). Обработка полученных данных ρ_k проводится по программам 2D, 3D инверсии. В основном используются известные программы: RES2DINV и RES3DINV (<https://www.aarhusgeosoft.dk/> — автор М.Н. Локе), ZondRes2D и ZondRes3D (<http://zond-geo.com/> — автор А.Е. Каминский).

Изучение грунтовых ГТС электротомографией чаще всего проводят симметричными четырехэлектродными (Шлюмберже, Веннера) и трехэлектродными установками. Так, в работе (Козлов, Павлова, 2013) при геоэлектрическом мониторинге плотины Богучанской ГЭС в Красноярском крае методом ЭТ применялась комбинированная трехэлектродная установка поль-диполь ($AM \geq MN$). Сезонные геоэлектрические наблюдения на Верхне-Сысертской и Ельцевской грунтовых плотинах в Свердловской области выполнены установками Шлюмберже и Веннера (Fedorova, Gorshkov, 2023a, 2023b). В работе (Куликов и др., 2025) приводятся результаты режимных наблюдений на дамбе хвостохранилища рудного месторождения на Чукотке, полученные ЭТ с установками Веннера, Шлюмберже, комбинированной трехэлектродной. Исследования крупной плотины в Калифорнии выполнялись методом ЭТ с обратной установкой Шлюмберже (Minsley et al., 2011).

Выбор установки измерений практически не влияет на результаты исследований, выполненных над горизонтально-слоистой средой, за исключением глубины зондирования. Физико-геологическую модель грунтового гидротехнического сооружения в первом приближении можно представить, как горизонтально-слоистую среду разных пород и влажности. Но из-за неоднородности насыпного материала и неравномерной фильтрации воды из водоема возникают участки со значительно отличающимися параметрами электросопротивления. В возбуждаемом электрическом поле такие локальные объекты могут создавать краевые эффекты, вносящие погреш-

ности в вычисление УЭС и, соответственно, построение геоэлектрических разрезов. В этом случае результаты исследований зависят от выбора установки, а также алгоритма применяемой программы инверсии.

Целью настоящих исследований явилось выполнение численного моделирования зондирования методом электротомографии с разными установками на предложенной геоэлектрической модели грунтовой плотины и проведение экспериментальных работ по изучению ГТС с использованием данных установок для сравнения их разрешающей способности. В расчетах и натурных исследованиях применялись следующие установки: четырехэлектродные Шлюмберже и Веннера; трехэлектродная прямая и обратная. Для решения прямых задач мы выбрали программу RES2DMOD версии 3.01 а для инверсии — RES2DINV версии 3.4.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Грунтовые гидротехнические сооружения можно разделить на два основных типа — земляные и каменные, согласно СНиП 2.06.05-84 (Свод..., 2012). Грунтовая плотина состоит из насыпи — тела плотины и может иметь противофильтрационное устройство. Насыпной материал грунтовых земляных плотин имеет гранулометрический состав от глинистых до гравийно-галечниковых. Конструкции ГТС могут быть разных видов в зависимости от строения тела и противофильтрационных устройств.

Для численного моделирования выбрано наиболее простое, но часто используемое при строительстве, строение грунтовой земляной плотины: тело насыпи сложено песчано-глинистым грунтом с примесью щебня; верхний бьеф укреплен экраном из грунтового или негрунтового материала; дренаж выполнен у подножья сооружения со стороны нижнего бьефа. Как правило, гребень плотины отсыпается щебнем на 0.2–0.3 м. Геофизические исследования чаще всего проводят по гребню плотины со стороны верхнего и нижнего бьефов. В этом случае геоэлектрическую модель ГТС можно представить в виде горизонтально-слоистого разреза с включением низкоомной неоднородности, аппроксимирующей зону повышенной обводненности в теле плотины. Результаты электрических зондирования, выполненных на различных грунтовых ГТС, показали, что мощность и УЭС слоев может отличаться в зависимости от многих факторов: высоты сооружения, содержания глины и щебня в грунте, его влажности, сопротивления пород в основании сооружения, сезона измерений, уровня воды в водоеме и др. Предложена теоретическая физико-геологическая модель плотины

со следующими параметрами (рис. 1а). Первый слой с мощностью $d_1 = 0.3$ м и с $\rho_1 = 500$ Ом·м соответствует щебенистой отсыпке. Второй слой может иметь разное электрическое сопротивление $\rho_2 = 50\text{--}200$ Ом·м, в нашей модели выберем $d_2 = 3$ м с $\rho_2 = 70$ Ом·м — увлажненный песчано-глинистый-щебенистый слой. Слой, в котором происходит фильтрация воды из водоема ниже поверхности депрессии, в среднем имеет $\rho_3 = 20\text{--}40$ Ом·м, поэтому для третьего песчано-глинистого слоя возьмем параметры $d_3 = 3$ м и $\rho_3 = 30$ Ом·м. В основании плотины находятся коренные слабо выветрелые горные породы с $\rho_4 = 1000$ Ом·м. В третьем слое присутствует геоэлектрическая неоднородность (возможная утечка) с $\rho_5 = 10$ Ом·м и размерами 2×2 м.

Цель моделирования заключается в том, чтобы на предложенной модели грунтовой плотины решить прямые задачи зондирования установками Шлюмберже, Веннера, прямой и обратной трехэлектродной, затем провести инверсию и определить наилучшую сходимость решения обратной задачи к заданным параметрам модели. Для трехэлектродной установки рассмотрели две схемы зондирования. В первой схеме разности увеличиваются так, что $AM=MN$, во второй — $AM \geq MN$ с одним размером приемной линии $MN=1$ м (Аппаратура..., 2013).

Прямое численное моделирование выполнялось по программе RES2DMOD версии 3.01. При расчетах в каждой установке использовалось 48 электродов, соответствующих количеству

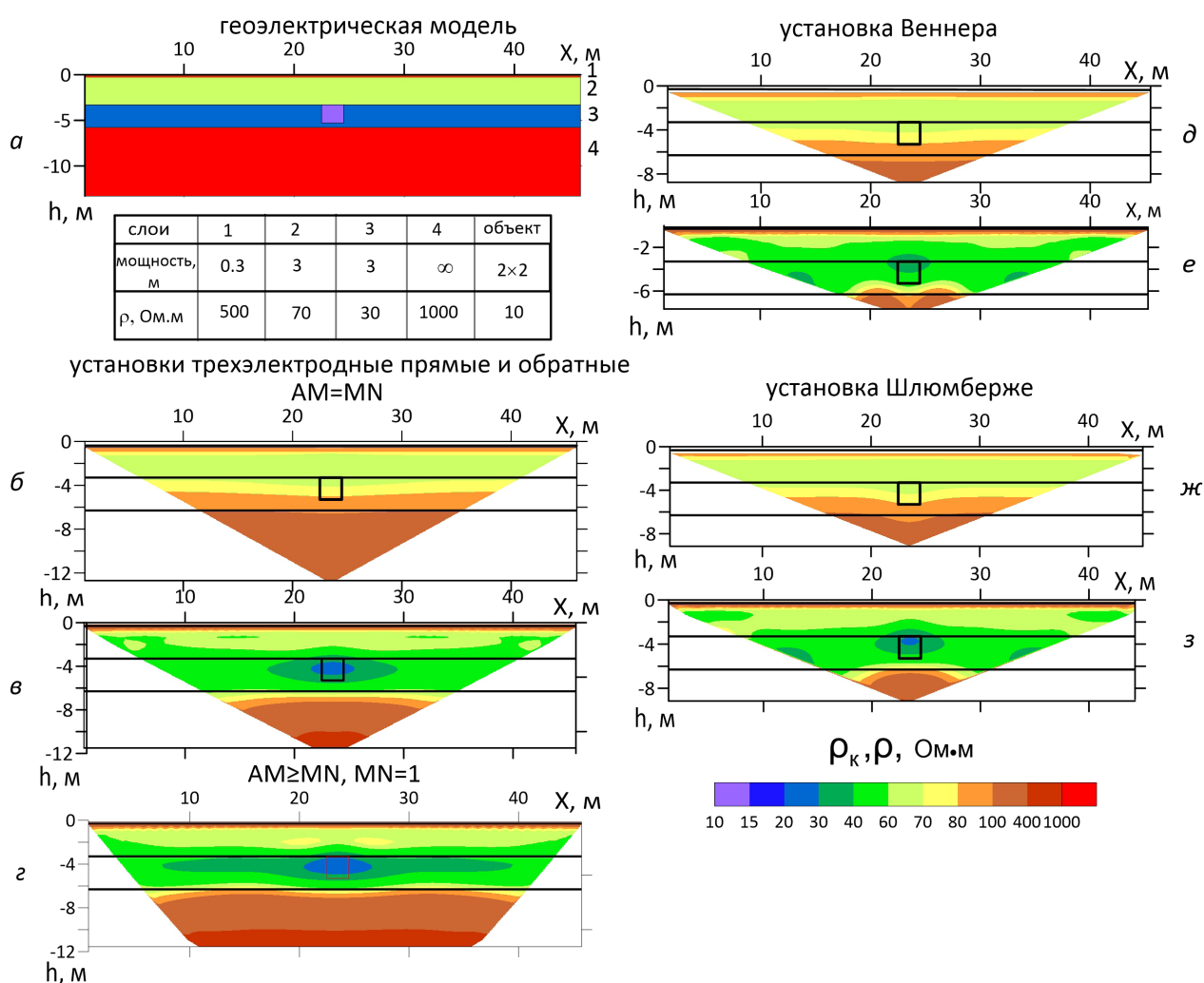


Рис. 1. Результаты численного моделирования: а — геоэлектрическая модель плотины; б — разрез кажущегося сопротивления, в — разрез УЭС для трехэлектродной прямой и обратной установки ($AM=MN$), з — разрез УЭС для трехэлектродной прямой и обратной установки ($MN=1$ м); д — разрез кажущегося сопротивления, е — разрез УЭС для установки Веннера; ж — разрез кажущегося сопротивления, з — разрез УЭС для установки Шлюмберже.

Fig. 1. Numerical modeling results: а — geoelectric model of the dam; б — apparent resistivity section, в — resistivity section for three-electrode forward and reverse array ($AM=MN$), з — resistivity section for three-electrode forward and reward array ($MN=1$ m); д — apparent resistivity section, е — the resistivity section for the Wenner array; ж — the apparent resistivity section, з — the resistivity section for the Schlumberger array.

электродов в аппаратуре СКАЛА–48. Первый электрод размещен на отметке 0. Расстояние между электродами выбрано равным 1 м. Для повышения точности расчетов использовались 4 ячейки между электродами, и полупространство было разбито на горизонтальные слои толщиной 0.1 м.

Инверсия выполнена по программе RES2DINV версии 3.4. При решении прямой и обратной задачи применены методы конечных разностей и Гаусса–Ньютона (Loke, Barker, 1996). Для трехэлектродной установки полупространство разбивалось на 39 слоев по 0.3 м толщиной (толщина первого слоя модели), для установок Веннера и Шлюмберже толщина каждого слоя задавалась 0.25 м, а количество слоев было 32 и 36 соответственно. Для увеличения точности и детальности инверсии было увеличено количество расчетных узлов по горизонтали, для этого между точками расположения электродов добавлен еще один узел. Результатом работы программы являлись таблицы значений УЭС в расчетных узлах — в зависимости от глубины d и координаты по профилю для каждой итерации. По выбранным итерациям построены геоэлектрические разрезы в программе Golden Software Surfer (рис. 1б–г, 1е, 1з).

Разрезы кажущихся сопротивлений от трех установок не имеют каких-либо выраженных отличий (рис. 1б, 1д, 1ж), за исключением глубины зондирования (h). Максимальная глубина на разрезах кажущихся и удельных сопротивлений достигается трехэлектродной установкой. В таблице представлены значения УЭС исходной модели и диапазон сопротивлений каждого структурного элемента подобранной модели при решении обратной задачи для рассматриваемых установок. Первый слой имеет небольшую мощность, в три раза меньше размеров приемной линии, поэтому значения УЭС в несколько раз занижены по сравнению с исходной моделью. Второй и третий слои лучше выделяются установками Шлюмберже и трехэлектродными,

а четвертый слой — трехэлектродной. Сопротивление проводящего объекта, расположенного в третьем слое, завышено от всех установок, но меньше всего от трехэлектродных установок. Аномалия наблюдается у верхней кромки объекта для установок Веннера и Шлюмберже и в центре объекта для трехэлектродных установок. По аномальным значениям вертикальные границы неоднородности значительно раздвинуты на разрезе УЭС трехэлектродной установки ($AM \geq MN$). В установке Веннера под нижней кромкой неоднородности выявляется понижение сопротивления за счет краевых эффектов.

Результаты численного моделирования показали следующее. При использовании программы инверсии RES2DINV версии 3.4 лучшую сходимость решения обратной задачи к заданной модели дает зондирование, выполненное прямой и обратной трехэлектродной установкой. Модель УЭС, полученная при зондировании установкой Шлюмберже, близка к модели от трехэлектродных установок. С учетом того, что наибольшая глубинность зондирования достигается комбинацией трехэлектродных установок, исследования грунтовых плотин методом электротомографии предпочтительно выполнять с данной установкой. Отметим, что количественная интерпретация в моделировании выполнена конкретной версией программы RES2DINV с выбранными настройками алгоритма расчетов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования по изучению грунтовых плотин методом электротомографии выполняли на двух ГТС, ограждающих крупные водохранилища в Свердловской области: Верхне-Сысертское (рис. 2) и Глубочинское. Применяли аппаратуру Скала-48 с разными установками: Веннера, Шлюмберже, трехэлектродной прямой и обратной. Для трехэлектродной установки выбрали схему $AM=MN$, поскольку

Значения УЭС структурных элементов геоэлектрической модели для трех установок

Resistivity values of the structural elements of the geoelectrical model for three arrays

слои	1	2	3	4	объект
Модель					
ρ (Ом·м)	500	70	30	1000	10
Установка Веннера					
ρ (Ом·м)	130-150	42-100	43-80	110-200	36-48
Установка Шлюмберже					
ρ (Ом·м)	130-150	45-90	32-70	80-320	29-41
Прямая и обратная трехэлектродная установка ($AM=MN$)					
ρ (Ом·м)	140-160	45-90	32-55	80-660	27-31
Прямая и обратная трехэлектродная установка ($AM \geq MN$)					
ρ (Ом·м)	130-150	45-90	29-55	80-620	25-30

с одной раскладкой из 48 электродов потребуется 1104 измерения, что в два раза меньше, чем со схемой $AM \geq MN$ с одной питающей линией (2160 измерений). К тому же с одной линией MN на больших разносах значительно увеличивается

погрешность измерений. При обработке данных зондирования использовалась программа инверсии RES2DINV версии 3.4.

Верхне-Сысертское ГТС построено на реке Сысерть в 1849 г. для железоделательного завода. Протяженность плотины составляет около 350 м, ширина 15 м, высота в центральной части достигает 18 м. Насыпной грунт представлен супесью с гравием и щебнем, суглинком с дресвой. По данным бурения построен геологический разрез плотины (рис. 3). В семидесятые годы прошлого века была выполнена реконструкция ГТС, верхний бьеф укрепили железобетонными плитами, гребень отсыпан щебнем, построена асфальтовая дорога, река вытекает по регулируемому шлюзу.

На Верхне-Сысертской плотине несколько лет (2021–2024 гг.) выполняли сезонный геоэлектрический мониторинг. Профиль наблюдений проходил по гребню плотины со стороны нижнего бьефа (рис. 2). В зависимости от сезона исследования полученные разрезы УЭС имели некоторые отличия, зависящие от метеорологических условий и уровня воды в водоеме.

В 2021 г. работы провели в конце апреля во время паводка. Зондирования выполняли с установками Шлюмберже и Веннера, шаг между электродами 5 м. После 2D инверсии получили геоэлектрические разрезы (рис. 4), на которых основание плотины выделяется примерно по изолинии $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Обими установками

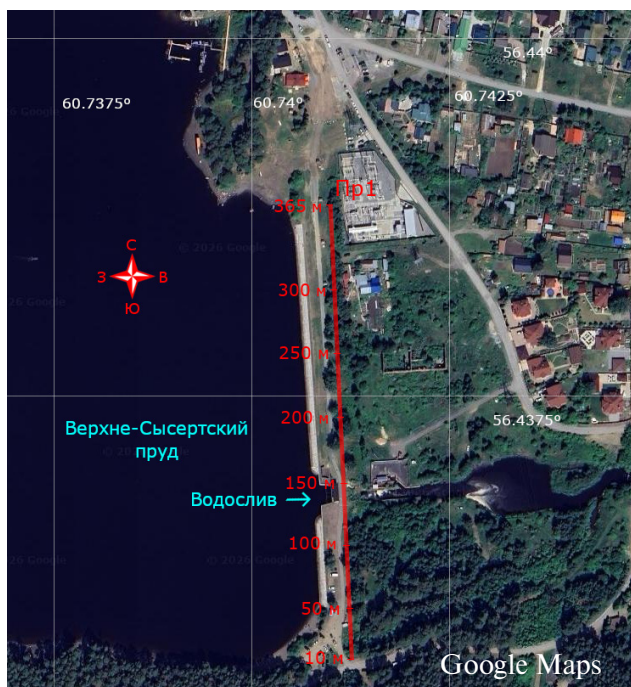


Рис. 2. Профиль исследований на Верхне-Сысертской плотине.

Fig. 2. Research profile at the Verkhne-Sysertskaia dam.

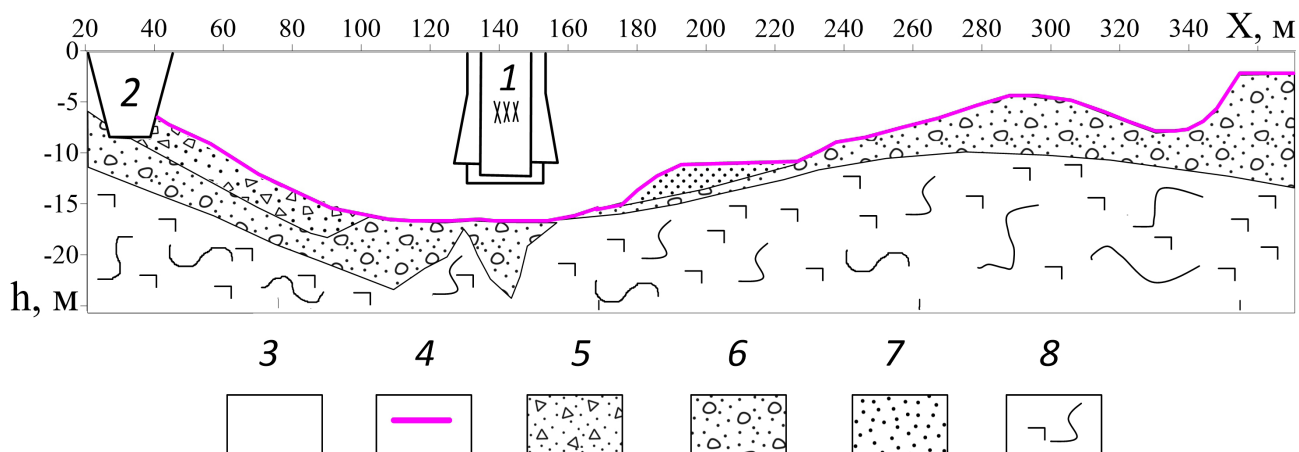


Рис. 3. Продольный разрез по центральной оси Верхне-Сысертского ГТС с геологическим описанием пород в его основании: 1 — железобетонный регулируемый водосброс, в нижней части деревянные клетки с глиной; 2 — временный водосброс, заполненный суглинком; 3 — тело плотины (супесь с гравием и щебнем, суглинок с дресвой); 4 — основание ГТС; 5 — песок дресвянистый со щебнем до 40 %; 6 — амфиболиты гнейсовидные, сильно выветрелые до состояния рухлякового щебня с глинистым заполнителем; 7 — песок мелкозернистый, местами гравелистый с галькой; 8 — биотитороговообманковые, гранатизированные, гнейсовидные амфиболиты выветрелые, трещиноватые. Местоположение профиля показано на рис.2.

Fig. 3. Longitudinal section along the central axis of the Verkhne-Sysertskaia HS with a geological description of the rocks at its base. Symbols: 1 — reinforced concrete adjustable spillway, with wooden cages with clay in the lower part; 2 — temporary spillway filled with loam; 3 — dam body (sandy loam with gravel and crushed stone, loam with gruss); 4 — base of the HS; 5 — sandy loam with up to 40 % of crushed stone; 6 — gneiss-like amphibolites, strongly weathered to the state of crumbly crushed stone with clayey aggregate; 7 — fine-grained sand, gravelly in places with pebbles; 8 — amphibolites weathered and fractured. The location of the profile is shown in Fig. 2.

СРАВНЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УСТАНОВОК

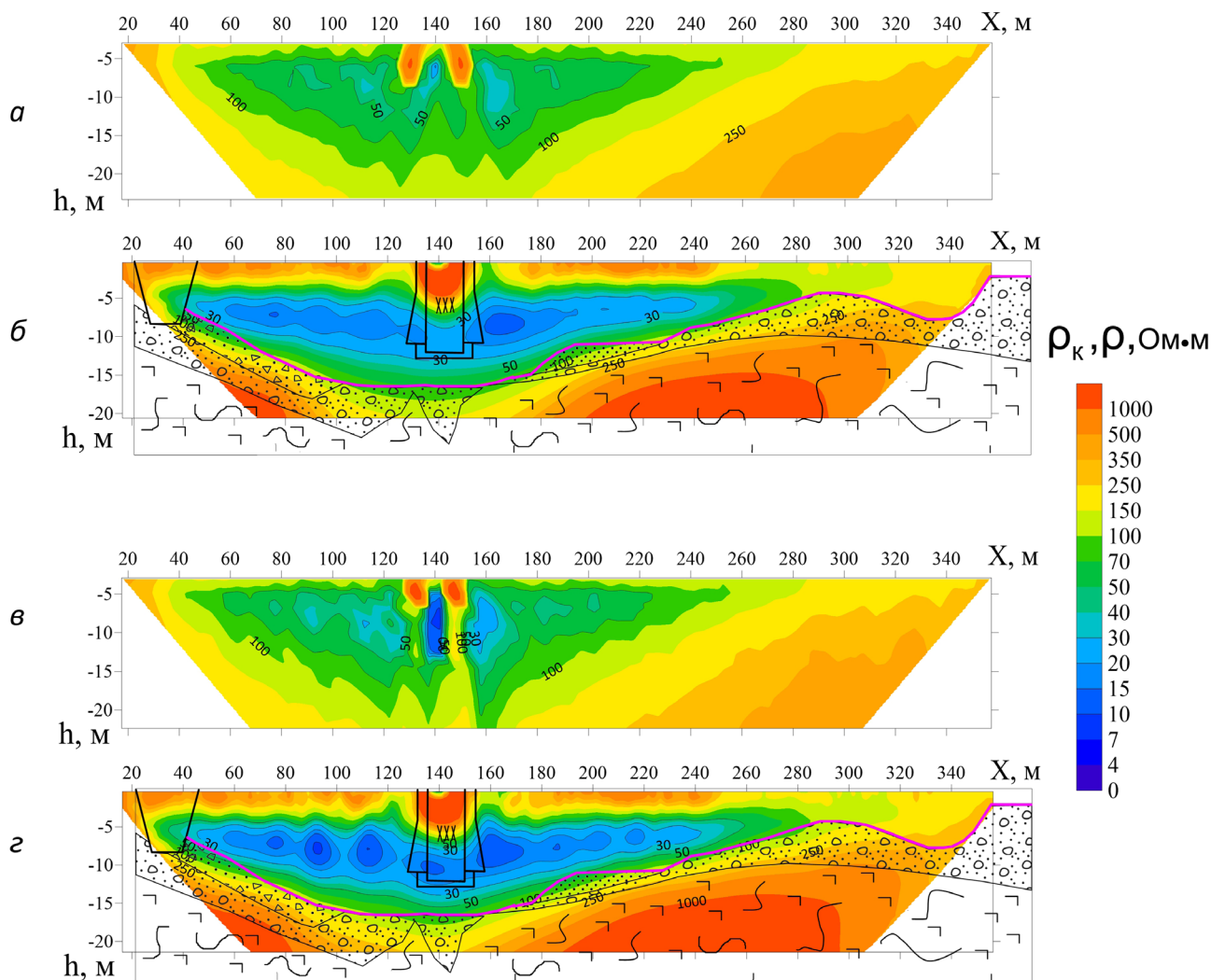


Рис. 4. Разрезы ρ_k и геоэлектрические от установок Веннера (а, б) и Шлюмберже (в, г) за 2021 г. по профилю 1 на Верхне-Сысертской плотине. Местоположение профиля показано на рис.е 2

Fig. 4. Apparent resistivity and geoelectric sections for the Wenner (a, б) and Schlumberger (в, г) arrays (2021) along profile 1 at the Verkhne-Sysertskaia dam. The location of the profile is shown in Fig. 2.

обнаружена проводящая аномалия в интервале 160–170 м и зона пониженных сопротивлений в интервале 60–130 м, которая на разрезе от установки Шлюмберже более четко выделяется в виде локальных аномалий на отметках 75, 90, 110 м и под водосливом (130 м), указывающих на усиленную фильтрацию воды из водоема в этих участках плотины.

В 2022 г. исследования выполняли также в весенний сезон с установками Веннера и прямой, обратной трехэлектродной по той же методике. Разрезы удельных электрических сопротивлений имеют значительную разницу (рис. 5). По измерениям с установкой Веннера основание плотины все так же выделяется по изолинии 100 Ом·м, присутствуют небольшие проводящие аномалии <15 Ом·м. На разрезе УЭС трехэлектродных установок изолинии ρ имеют больший градиент, и основание определяется по изолиниям 250–300 Ом·м. особенно слева от

водослива. Также здесь выявлены низкоомные аномалии менее 15 Ом·м в интервале 70–115 и на отметках 155, 185, 205 м. Низкоомная аномалия 2–4 Ом·м под водосливом в интервале 125–140 м может быть связана с выносом глинистой фракции под водослив и с ее разжижением, а также с разжижением глины, помещенной в клетки под сливом. Отметим, что аномалия на отметке 155 м приурочена к контакту насыпного материала с бетонным водосливом. В интервале 190–220 м наблюдается уменьшение сопротивления под основанием сооружения, что указывает на тектоническое нарушение, по которому происходит фильтрация воды в коренные породы.

Весной 2024 г. из-за высокого уровня воды возник сильный паводок, в результате которого произошел прорыв воды под основанием плотины на отметке 155 м. Со стороны верхнего бьефа обнаружено место утечки (160 м) и произведен тампонаж. Осенью этого же года про-

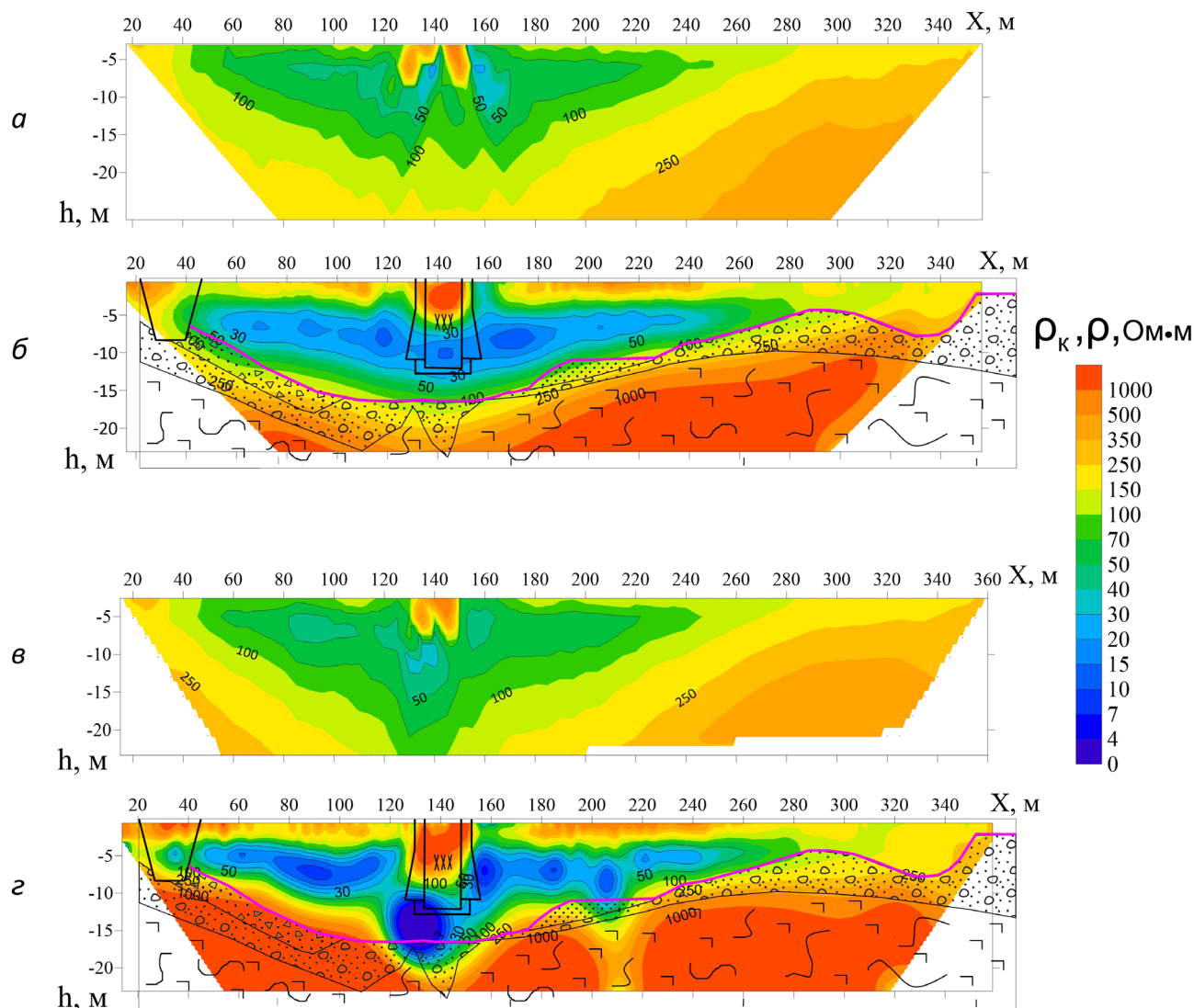


Рис. 5. Разрезы ρ_k и геоэлектрические от установок Веннера (а, б), прямой и обратной трехэлектродной АМ=MN (в, г) за 2022 г. по профилю 1 на Верхне-Сысертской плотине. Местоположение профиля показано на рис. 2.

Fig. 5. Apparent resistivity and geoelectric sections for the Wenner (а, б) and forward and reward three-electrode АМ=MN (в, г) arrays (2022) along profile 1 at the Verkhne-Sysertskaia dam. The location of the profile is shown in Fig. 2.

вели исследования методом ЭТ с установками Веннера, прямой и обратной трехэлектродной, шаг электродов составлял 3 м. Сгущение точек зондирования приводит к уменьшению максимального разброса и, соответственно, глубинности исследований. Для Веннера она составила 14 м, а для комбинированной установки больше 19 м, что позволяет подсесть основание плотины (рис. 6). После ликвидации утечки на разрезе установки Веннера в интервале 150–155 м сопротивление увеличилось по сравнению с прошлыми измерениями (рис. 5). На разрезе трехэлектродных установок точно на отметке 160 м выявлена узко локализованная аномалия повышенного сопротивления, указывающая на высушенный канал, по которому происходила

утечка. Но вода, по видимому, фильтруется в обход, так как наблюдаются низкие УЭС (менее 10 Ом·м) в интервале 155–170 м. Также в разрезе выявлены несколько проводящих локальных аномалий. Над тектоническим нарушением (отметка 210 м) под основанием плотины сопротивление грунта выше по сравнению с весной прошлого года за счет уменьшения фильтрации воды из водоема.

Установленные преимущества комбинации трехэлектродных установок также наблюдаются в исследованиях Глубочинской плотины, ограждающей водохранилище на реке Глубокая. Сооружение построено в середине XIX в. Оно представляет собой насыпь из песка, земли и камня, имеет длину около 800 м, ширину у осно-

СРАВНЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УСТАНОВОК

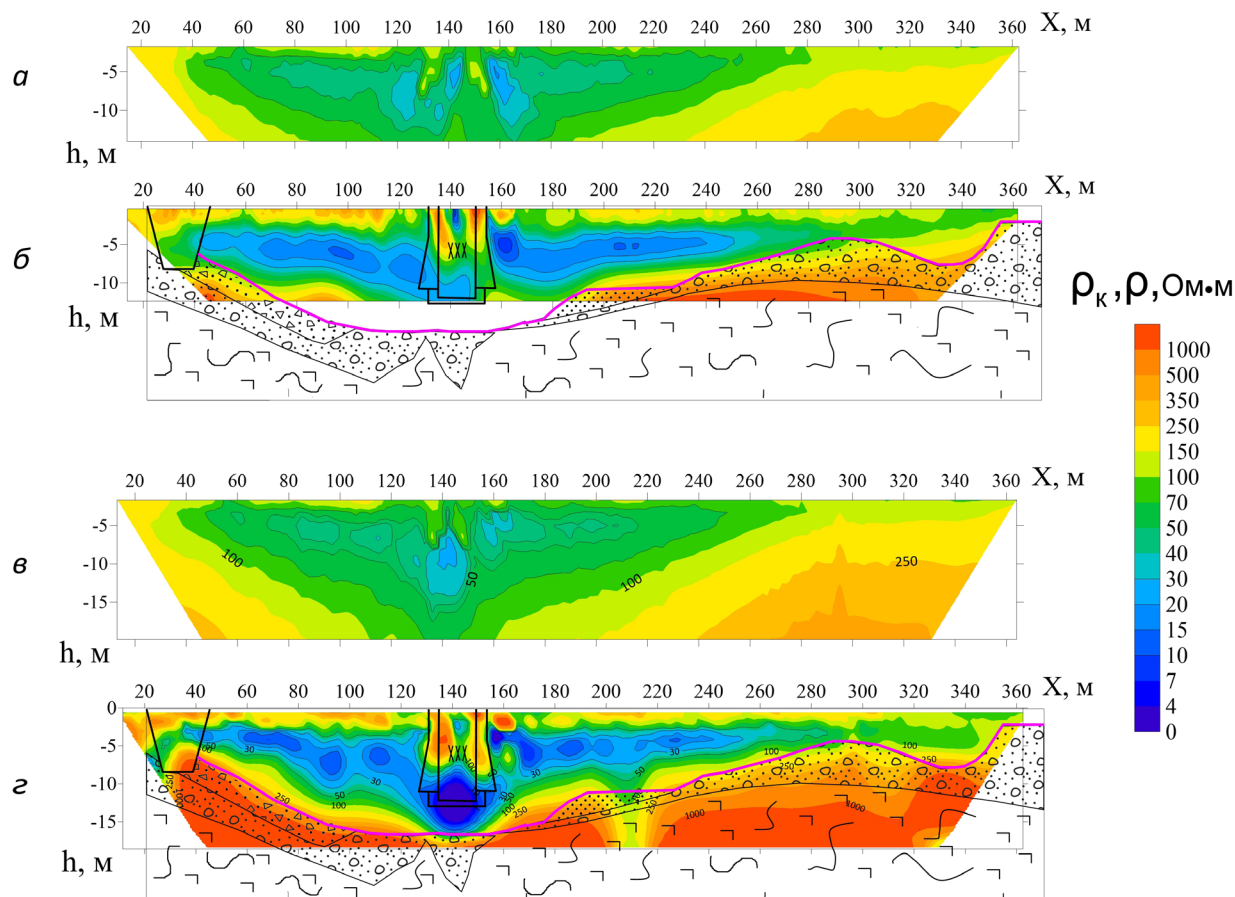


Рис. 6. Разрезы ρ_k и геоэлектрические от установок Венера (*a, б*), прямой и обратной трехэлектродной АМ=MN (*в, з*) за 2024 г. по профилю 1 на Верхне-Сысертской плотине. Местоположение профиля показано на рис. 2.

Fig. 6. Apparent resistivity and geoelectric sections for the Wenner (*a, б*) and forward and reward three-electrode АМ=MN (*в, з*) arrays (2024) along profile 1 at the Verkhne-Sysertskaia dam. The location of the profile is shown in Fig. 2.



Рис. 7. Профиль исследований на Глубочинской плотине.

Fig. 7. Research profile at the Glubochynskiy dam.

вания более 30 м и высоту около 20 м в районе перекрытой реки. На ГТС построен регулируемый шлюз, по которому осуществляется по необходимости сброс воды.

Профиль исследований проходил по гребню плотины со стороны нижнего бьефа (рис. 7). Измерения выполняли установками Венера и трехэлектродной, с шагом 5 м. Полученные разрезы УЭС имеют отличия (рис. 8). Глубина зондирования для комбинации трехэлектродных установок больше на 7 м. Основание плотины на обоих разрезах выделяется на глубине около 10 м до отметки 300 м, далее высота сооружения уменьшается в большей степени на разрезе от комбинированной установки. В районе перекрытой реки, где резко понижается рельеф, и увеличивается высота плотины, на разрезе прямой и обратной трехэлектродной установки это отмечается пониженными сопротивлениями

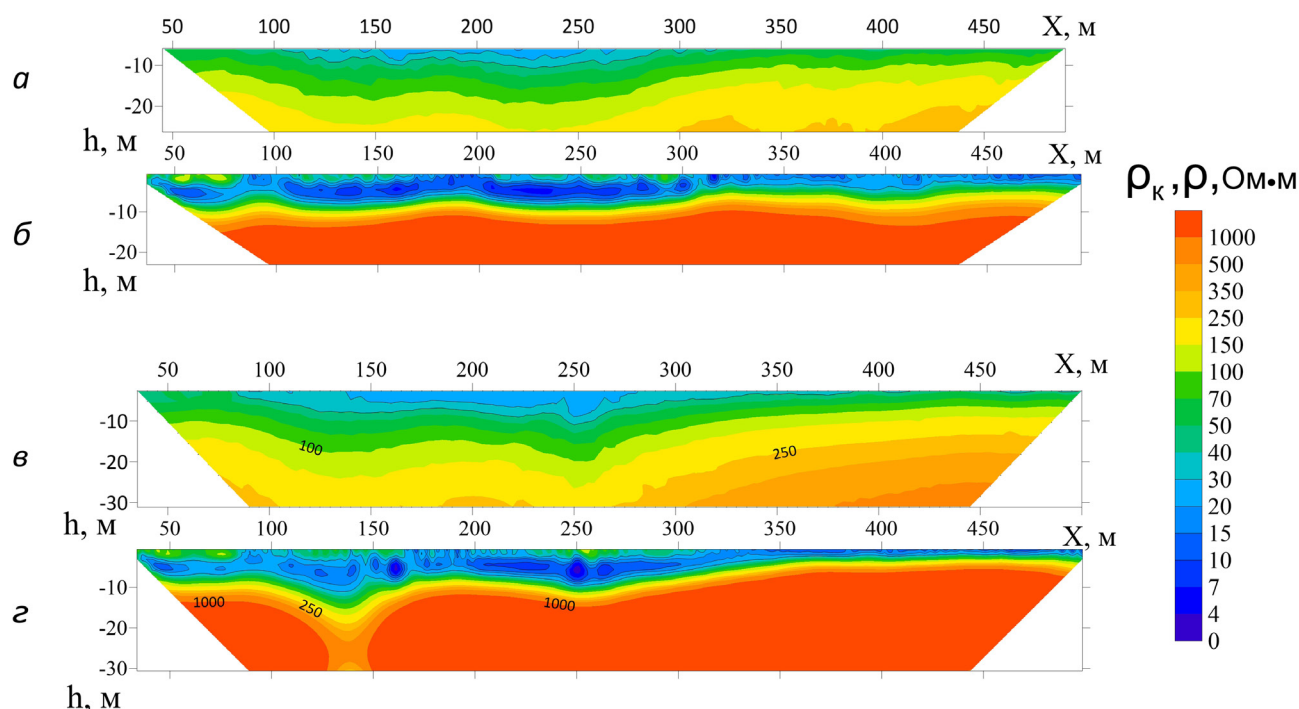


Рис. 8. Разрезы ρ_k и геоэлектрические от установок Веннера (*а, б*), прямой и обратной трехэлектродной ($AM=MN$) (*в, з*) по профилю 1 на Глубочинской плотине. Местоположение профиля показано на рис. 7.

Fig. 8. Apparent resistivity and geoelectric sections for the Wenner (*a, б*) and forward and reward three-electrode $AM=MN$ (*в, з*) arrays along profile 1 at the Glubochynskiy dam. The location of the profile is shown in Fig. 7.

в основании (интервал 130–150) в отличие от установки Веннера. Проводящий слой (менее 15 Ом·м) прослеживается для Веннера в интервале 100–300 м, для трехэлектродной в интервале 200–300 м. На обоих разрезах выявляются аномалии менее 7 Ом·м, указывающие на значительную фильтрацию.

Применение метода электротомографии при геоэлектрическом мониторинге, проведенном на Верхне-Сысертской плотине в разные сезоны, а также при обследовании Глубочинской плотины показало преимущества прямой и обратной трехэлектродной установки по сравнению с установками Веннера и Шлюмберже: большая глубина зондирований; повышенная чувствительность к геоэлектрическим неоднородностям и их четкая локализация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для сравнения разрешающей способности установок зондирования, применяемых в электрической томографии при диагностике грунтовых гидротехнических сооружений, были выполнены численное моделирование и экспериментальные исследования. Моделирование провели на предложенной физико-геологической модели грунтовой плотины с установками Веннера, Шлюмберже, прямой и обратной трехэлектрод-

ной с двумя схемами измерений, используя программы решения прямой и обратной задач — RES2DMOD версии 3.01, и RES2DINV версии 3.4. Расчеты показали, что лучшую сходимость решения обратной задачи к заданной модели плотины дает зондирование установками прямой и обратной трехэлектродной и Шлюмберже.

Экспериментальные работы на грунтовых плотинах двух крупных водохранилищ показали преимущество применения электротомографии с комбинацией трехэлектродных установок для изучения состояния ГТС. Данная установка позволяет получить разрез УЭС с большей глубиной, что очень важно при детализационных исследованиях, когда установка электродов сгущается и приводит к уменьшению максимального разброса, а также локализовать аномалии с меньшими значениями удельных сопротивлений, указывающими на переувлажнение грунтового материала и места повышенной фильтрации воды из водоема. При невозможности работы с бесконечной линией можно применять установку Шлюмберже.

Список литературы [References]

Аппаратура электроразведочная многоэлектродная «Скала-48». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Новосибирск: ООО КБ Электротометрии, 2013. 50 с [Apparatura elektrorazvedochnaya

- mnogoelektrodnaya «Skala-48». Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. Novosibirsk, 2013. 50 p (in Russian)].
- Козлов О.В., Павлова А.М. Геоэлектрический мониторинг каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС методом электротомографии // Инженерные изыскания, 2013. № 12. С. 40–47 [Kozlov O.V., Pavlova A.M. Geoelectrical monitoring of Boguchanskaya HPS rock-filled dam by electrical resistivity tomography // Inzhenernye izyskaniya, 2013. № 12. P. 40–47 (in Russian)].
- Куликов В.А., Рыжов Н.А., Шагарова Н.М. Результаты многолетних режимных наблюдений методом электротомографии на дамбе хвостохранилища рудного месторождения (МГУ им. М.В.Ломоносова, ООО «Северо-Запад») // EAGE. Инженерная и рудная геология 2025, г. Екатеринбург: тезисы докладов научно-практической конференции и выставки. (Екатеринбург, 21–25 апреля 2025 г.), 2025. С. 169–172 [Kulikov V.A., Ryzhov N.A., Shagarova N.M. Rezul'taty mnogoletnikh rezhimnykh nablyudeniy metodom elektrotomografii na dambe khvostokhranilishcha rudnogo mestorozhdeniya (MGU im. M.V.Lomonosova, OOO «Severo-Zapad») // EAGE. Inzhenernaya i rudnaya geologiya 2025, g. Ekaterinburg: tezisy dokladov nauchno-prakticheskaya konferentsii i vystavki. (Ekaterinburg, 21–25 aprelya 2025 g.), 2025. P. 169–172 (in Russian)].
- Свод правил СП 39.13330.2012 «СНиП 2.06.05-84* Плотины из грунтовых материалов». Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84 (утверждена приказом Министерства регионального развития РФ от 29 декабря 2011 г. N 635/18) (с изменениями и дополнениями) [Svod pravil SP 39.13330.2012 «SNiP 2.06.05-84* Plotiny iz gruntovykh materialov». Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.05-84 (utverzhdена prikazom Ministerstva regional'nogo razvitiya RF ot 29 dekabrya 2011 g. N 635/18) (s izmeneniyami i dopolneniyami) (in Russian)]. https://www.pkb-titan.ru/upload/library/snip/Normy_proekt/hydrroteh_sooryzhen/sp39.13330.2012pdf.pdf (дата обращения 26.03.2026)
- 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 [Fedorova O.I., Davydov V.A. Diagnostika gruntovykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy elektricheskimi i seysmicheskimi metodami na primere El'chevskoy plotiny // Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie, 2014. № 6. P. 44–55 (in Russian)].
- Электроразведка: учебное пособие / автор-составитель: А.А. Иванов, К.В. Новиков, П.В. Новиков. М.: МГРИ, 2019. 80 с [Elektrorazvedka: uchebnoe posobie / avtor-sostavitel: A.A. Ivanov, K.V. Novikov, P.V. Novikov. Moscow: MGRI, 2019. 80 p (in Russian)].
- Anchuela Ó.P., Frongia P., Gregorio F.Di et al. Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis: A case study of the Medau Zirimilis Dam (Sardinia, Italy) // Engineering Geology, 2018. № 237. P. 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.015>
- Boleve A., Revil A., Janod F. et al. Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography // Near Surface Geophysics, 2009. V. 7. P. 447–462. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2009012>
- Cygal A., Stefaniuk M., Kret A., Kurowska M. The application of electrical resistivity tomography (ERT), induced polarization (IP) and electromagnetic conductivity (EMC) methods for the evaluation of technical condition of flood embankment corpus // Geology, Geophysics and Environment. 2016. V. 42. № 3. P. 279–287. <https://doi.org/10.7494/geol.2016.42.3.279>
- Davydov V. A., Gorshkov V. Y. Remote Induction Sounding of Dams and Study of Frequency Effects // Power Technology and Engineering, 2022. V. 56, P. 500–507. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01544-6>
- Davydov V.A., Fedorova O.I., Gorshkov V.Y., Baydikov S.V. Assessment of state of earth dam of Elchovka settling pond by combination of electromagnetic soundings and polarization methods // Studia Geophysica et Geodaetica, 2021. № 65. P. 206–218. <https://doi.org/10.1007/s11200-020-0114-1>
- Fedorova O.I., Gorshkov V.Y. Electrical Monitoring in Diagnostics of the Soil Hydrotechnical Structures on the Example of Studying Earthfill Dam // Power Technology and Engineering, 2023a. V. 57. № 1 P. 39–44. <https://doi.org/10.1007/s10749-023-01620-x>
- Fedorova O., Gorshkov V. Geoelectric Monitoring of Earthen Hydraulic Structure State by Resistivity and Induced Polarization Methods: Mine Water Settling Pond Dam Case Study // Russian Journal of Earth Sciences, 2023b. № 4 P. 1–17. <https://doi.org/10.2205/2023es000849>
- Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. V. 44. № 1, P. 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Mazurenko M.M., Drozdov A.V., Panin G.L. Actual application of ERT in exploration of dams in different climatic conditions // 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics, 2016. Russia, Anapa, European Association of Geoscientists and Engineers. P. 491–496.
- Michalis P., Sentenac P., MacBrayne D. Geophysical Assessment of Dam Infrastructure: the Mugdock Reservoir Dam Case Study // In Proceedings 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring. Austria, Vienna, JISDM, 2016. P. 1–6.
- Minsley B.J., Burton B.L., Ikard S., Powers M.H. Hydrogeophysical investigations at hidden Dam, Raymond, California // Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2011. V. 16 (4). P. 145–164. <https://doi.org/10.2113/JEEG16.4.145>
- Soueid A.A., Revil A., Abdulsamad F. et al. Induced polarization as a tool to non-intrusively characterize embankment hydraulic properties // Engineering Geology, 2020. V. 271. P. 105604. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105604>

ФЕДОРОВА, ГОРШКОВ

**COMPARISON OF THE RESOLUTION CAPABILITY
OF ELECTROTOMOGRAPHY ARRAYS IN THE STUDY
OF GROUND HYDRAULIC STRUCTURES**

O.I. Fedorova, V.Yu. Gorshkov

Institute of Geophysics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, 620016

Received December 24, 2025; revised March 27, 2026; accepted June 27, 2026

Electrical tomography is used in the diagnostics of ground hydraulic structures (HS). Measurements are carried out using various arrays. This paper examines the resolution of the most commonly used arrays: Wenner, Schlumberger, and forward and reverse three-electrode. Numerical 2-D modeling of electrical tomography soundings with these arrays was conducted on the proposed geoelectric model of an earthen dam, using RES2DMOD version 3.01 and RES2DINV version 3.4 programs for solving forward and inverse tasks. Calculations showed that the best convergence of the inversion to the specified geoelectric model of the dam is achieved by forward and reward three-electrode array sounding. Experimental work conducted on two earthen dams confirmed the advantages of using electrical resistivity tomography with a combination of three-electrode arrays for studying the condition of the hydraulic structure. This array allows for obtaining a resistivity section at greater depths, and also for localizing anomalies with lower resistivity values, indicating waterlogged soils and areas of increased water seepage from the reservoir.

Keywords: earth dam, resistivity, electrical tomography, sounding arrays, numerical modeling, geoelectric section.