

УДК 550.370, 556
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4301
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Инженерно-геофизические исследования методом электротомографии при поиске подземных вод в Бодайбинском районе Иркутской области

Т.С. Шойхонова^{1✉}, М.С. Шкиря¹, П.Г. Бирюков¹, А.А. Дунюшин², А.С. Башкеев¹

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

² ООО «ЭКОСТАНДАРТ "Технические Решения"», Россия, г. Санкт-Петербург

✉ tshoikhonova@geo.istu.edu

Аннотация. *Актуальность* исследования заключается в потребности поиска подземных вод технического назначения под строительство водозаборной скважины для водоснабжения вахтового поселка горно-обогатительного комбината «Светловский» в Бодайбинском районе Иркутской области. Электротомография является распространенным методом исследования верхней части разреза и широко применяется при поиске полезных ископаемых, геологическом картировании, инженерных изысканиях, а также гидрологических и экологических исследованиях. Применение метода электротомографии в рамках представленного исследования позволит обосновать места заложения поисковых гидрогеологических скважин. **Цель:** оценка геолого-гидрогеологических условий района работ на перспективу добычи подземных вод технического водоснабжения для нужд вахтового поселка. **Объекты:** коренные породы, характеризующиеся высокими значениями удельного электрического сопротивления и являющиеся водопорами; проницаемые зоны пониженного сопротивления, которые являются водовмещающими породами. **Методы:** наземные геофизические исследования методом электротомографии; двумерная инверсия данных электротомографии и их интерпретация с учетом инженерно-геологических данных бурения и комплекса геофизических исследований скважин. В результате выполненных инженерных гидрогеологических изысканий с использованием наземных геофизических исследований методом электротомографии было установлено, что водоносный комплекс трещиноватых пород имнянской свиты протерозойского комплекса отложений (PR_{2-3im}) представлен трещиноватыми известняками от серых до голубоватых с прослоями мусковитовых сланцев. Анализ результатов исследований показал, что мощность вскрытых отложений составляет до 50 м, уровень подземных вод эксплуатационного горизонта вскрывается на глубинах от 21 до 28 м. Их перекрывает комплекс слабопроницаемых отложений мощностью от 5 до 11 м, представленных переслаиванием плотных известняков серого цвета и черных метапесчаников.

Ключевые слова: электротомография, удельное электрическое сопротивление, инверсия, подземные воды, обводненная зона, геофизические исследования скважин, водоснабжение, водоупор

Для цитирования: Инженерно-геофизические исследования методом электротомографии при поиске подземных вод в Бодайбинском районе Иркутской области / Т.С. Шойхонова, М.С. Шкиря, П.Г. Бирюков, А.А. Дунюшин, А.С. Башкеев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 14–25. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4301

UDC 550.370, 556
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4301

Engineering geophysical investigations using electrical resistivity tomography for groundwater exploration in the Bodaibo district of the Irkutsk region

T.S. Shoikhonova^{1✉}, M.S. Shkiria¹, P.G. Biryukov¹, A.A. Dunyushin², A.S. Bashkeev¹

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

² LLC "ECOSTANDART "Engineering solution", Saint Petersburg, Russian Federation

✉ tshoikhonova@geo.istu.edu

Abstract. Relevance. The need in technical groundwater exploration to construct a groundwater well for water supply of the rotation village of the mining and processing plant "Svetlovsky" in the Bodaibo district of the Irkutsk region. The electrical resistivity tomography is a common method for studying the upper part of a cross section and is widely used in mineral prospecting, geological mapping, engineering surveys, hydrological and environmental studies. The application of electrical resistivity tomography in these conditions will allow substantiating the location of hydrogeological wells and boreholes. **Aim.** Assessment of the geological and hydrogeological conditions of the area of work for the prospect of extracting groundwater for technical water supply for the needs of the rotational camp. **Objects.** Bedrocks, which are characterized by high resistance values and are aquicludes; permeable low-resistance zones that are water-bearing rocks. **Methods.** Ground-based geophysical surveys using electrical resistivity tomography; two-dimensional inversion of ERT data and their interpretation taking into account engineering and geological data of drilling and the GIS complex. As a result of the engineering and hydrogeological surveys performed using ground-based geophysical surveys by electrical resistivity tomography, it was established that the aquifer system of fissured rocks of the Imnyakh suite of the Proterozoic sediment complex (PR_{2-3im}) is represented by fissured limestones of various colours from grey to blueish, with bands of mica schist. Analysis of the study results showed that the thickness of the exposed sediments is up to 50 m, the groundwater level of the operating horizon is opened at depths from 21 to 28 m. They are covered with a complex of low-permeability sediments of thickness from 5 to 11 m that are presented by interbedding of dense grey limestones and black metasandstones.

Keywords: electrical resistivity tomography, electrical resistivity, inverse modeling, groundwater, flooded zone, geophysical well logging, water supply, aquiclude

For citation: Shoikhonova T.S., Shkiria M.S., Biryukov P.G., Dunyushin A.A., Bashkeev A.S. Engineering geophysical investigations using electrical resistivity tomography for groundwater exploration in the Bodaibo district of the Irkutsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 14–25. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4301

Введение

В статье рассматривается применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий для поиска подземных вод технического назначения в Бодайбинском районе Иркутской области.

Разведка и эксплуатация подземных вод, жизненно важного и необходимого ресурса, представляет собой непростую задачу в горных породах, которым свойственно неоднородное строение. Из широкого перечня наземных геофизических методов для поиска подземных вод в большинстве случаев используется электроразведка. Двумя основными методами электроразведки на постоянном токе являются вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электрическое профилирование (ЭП). Вышеперечисленные методы имеют некоторые ограничивающие условия применения в исследовании разреза, так как модель, полученная по результатам инверсии данных, имеет достаточно низкую разрешающую способность из-за недостаточного количества регистрируемых точек наблюдения. Благоприятными условиями для применения метода ВЭЗ является горизонтально-слоистая среда, которая на практике встречается достаточно редко при решении поисковых задач в реальных геологических ситуациях [1]. Методы ЭП дают информацию только на определенной глубине исследования.

Использование электротомографии позволяет регистрировать большее количество точек наблюдения за такой же промежуток времени в сравнении с методом ВЭЗ, что сказывается на результате

инверсии – модель удельного электрического сопротивления (УЭС) получается с большей детальностью [2]. Электротомография является универсальным и экономически эффективным методом поиска подземных вод в различных геологических условиях благодаря детальному расчленению разреза по параметру УЭС [3]. Инверсию данных методом электротомографии можно выполнять в рамках двумерных и трехмерных моделей. Это принципиально расширяет круг решаемых электроразведкой задач за счет исследования сред, значительно отличающихся от стандартных горизонтально-слоистых [4].

В традиционных методах электроразведки на постоянном токе обычно используются такие установки, как двухэлектродная, Веннера, Шлюмберже, дипольная и трёхэлектродная [5, 6]. Тип установки во многом зависит от цели работы, объекта исследования, геологии участка и чувствительности установки к вертикальным и латеральным вариациям распределения значений УЭС [7]. Измерения выполняются по профилям, затем зарегистрированные значения разностей потенциалов преобразуют в кривые зондирования или разрезы значений кажущихся сопротивлений, свидетельствующие об изменении сопротивлений в изучаемой среде. По результатам инверсии электроразведочных данных маркируются аномалии пониженного удельного электрического сопротивления, характеризующие наличие подземных вод, и детализируется геологическое строение исследуемой территории [8–10].

Электротомографические измерения выполняются, как правило, в тех случаях, когда требуется

изучение геологических разрезов со сложным строением [11, 12]. Водонасыщенные зоны характеризуются более низким УЭС, чем вмещающие породы, поэтому методы электроразведки, в данном случае электротомография, весьма перспективны для их поиска [13–16]. Работы этим методом проводились для оценки геолого-гидрогеологических особенностей наличия подземных вод технического назначения, а также подтверждения или опровержения наличия таликовой зоны и возможной локализации ее наиболее обводненной части. Задачей работ методом электротомографии являлось расчленение геологического разреза до глубины 100 м по сопротивлению пород, что дало возможность определения интервалов водопритока.

Комплекс поисково-оценочных работ включал в себя проведение геофизических исследований в скважинах (ГИС) и поисковое бурение скважин. Места заложения гидрогеологических скважин определялись исходя из предпосылки наличия или отсутствия таликовой зоны вблизи реки. Помимо рекогносцировочных маршрутных обследований на предмет проявлений выходов подземных вод на поверхность, как уже упоминалось выше, были проведены исследования методом электротомографии. После проведенных комплексов исследований на местности были выбраны точки бурения, наиболее близкие к локализации водовмещающих пород и в то же время к элементам рельефа, не мешающим буровым работам.

На территории, прилегающей к участку изысканий, достаточно активно ведутся открытые горные работы по добыче рудного сырья. При этом интенсивно используются химические реактивы, а рабочие поселки не всегда оборудуются как канализованием, так и водоотведением сточных вод. В связи с этим существует опасность загрязнения поверхностных водотоков как на этапе переработки сырья, так и по факту сброса сточных вод. Данные факторы совместно с ярко выраженной сезонностью водообильности водотоков отрицательно влияют на постоянство химического состава, его соответствие питьевым нормам и в целом могут внести элемент «неожиданности», например, при использовании новых реактивов. В связи с этим подземные воды обеспечивают достаточное постоянство химического состава благодаря их защищенности, а также инфильтрации воды через горные породы, в которых сорбируется часть потенциальных загрязнителей. Такое постоянство, даже в случае несоответствия качества воды питьевым нормативам, позволяет адекватно подобрать комплекс водоподготовки и минимизировать как затраты на нее, так и риски появления превышений по неучтенным показателям после нее.

Геологическое описание

Участок недр в гидрогеологическом отношении находится в границах Вачско-Хомолхинского гидрогеологического района Нечеро-Жуинской гидрогеологической складчатой области (рис. 1). Водоносные комплексы приурочены к таликовым зонам четвертичных и протерозойских отложений, пространственным вдоль поймы р. Жуи, и зонам повышенной трещиноватости протерозойских отложений (PR_{2+3im}), наиболее выраженной непосредственно под нижней границей многолетней мерзлоты, что связано с многократными ее изменениями.

Рифей-вендские осадочные отложения в районе изысканий слагают Маракано-Тунгусскую сложную синклиналь Мамско-Бодайбинского синклинория. В целом разрез отложений характеризуется чередованием в различной степени углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных формаций.

По литолого-стратиграфическим особенностям разреза, характеру переслаивания и соотношениям породных компонентов они подразделены на свиты, подсвиты и пачки. Залегания между стратиграфическими подразделениями согласные, переходы – постепенные. На большей части территории первично-осадочные породы, слагающие Маракано-Тунгусскую сложную синклиналь, изменены в условиях низких ступеней серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма.

Четвертичные отложения

Рыхлые четвертичные отложения широко распространены в пределах участка изысканий. Они представлены разновозрастным комплексом ледниковых, водно-ледниковых, аллювиальных и склоновых образований.

В целом верхнюю часть четвертичного разреза характеризуют современный галечный, валунно-галечный и песчаный аллювий русловой и пойменной фаций и комплекса надпойменных террас, глыбово-дресвяно-супесчаные элювиальные, делювиальные и солифлюкционные отложения. Ниже залегает мощный комплекс верхнечетвертичных образований патомского оледенения, который определяют водно- и озерно-ледниковые пески, супеси, галечники и илы в верхней части и несортированная глинисто-валунно-галечная морена – в нижней. Погребенный рельеф (глубокий тальвег, комплекс террас) сложен золотоносными аллювиальными галечниками, песками и суглинисто-щебнистым элювием. Общая мощность четвертичных отложений варьирует от 2–5 до 50–75 м.

Средний-верхний рифей

В районе работ среднерифейские отложения представлены бужуихтинской, угаханской, хомолхинской и имняхской свитами.

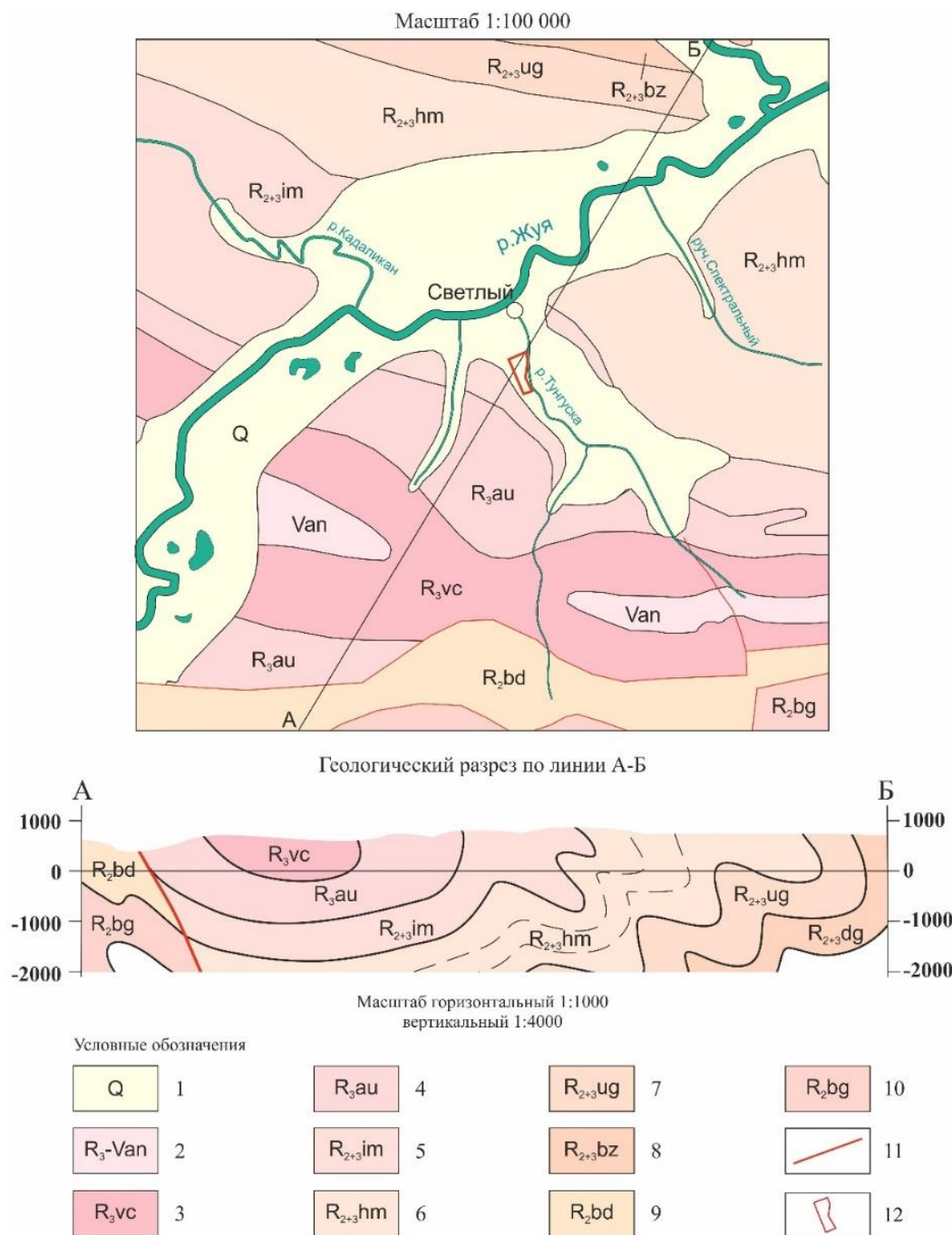


Рис. 1. Геологическое строение участка работ: 1 – Четвертичные отложения; 2 – Онангрская свита. Известковистые песчаники с прослоями сланцев и известняков; 3 – Вачская свита. Высокоуглеродистые кварцевые сланцы, графитистые кварцевые сланцы и метапесчаники; 4 – Аунакитская свита. Метапесчаники, песчаники, углеродистые сланцы, кварциты; 5 – Имняхская свита. Песчаники и метапесчаники, известковистые сланцы, известняки песчаные; 6 – Хомолхинская свита. Сланцы углеродистые, с прослоями песчаников; 7 – Угаханская свита. Переслаивающиеся известковистые сланцы и известняки мраморизированные; 8 – Бужуиктинская свита. Переслаивающиеся углеродистые металевролиты, метапесчаники, с прослоями известняков; 9 – Бодайбокская свита. Известняки; 10 – Бугориктинская свита. Метапесчаники, прослои сланцев; 11 – Тектонические контакты; 12 – Контур участка работ

Fig. 1. Geological structure of the exploration area: 1 – Quaternary deposits; 2 – Onangra suite. Calcareous sandstones with shale and limestone bands; 3 – Vacha suite. High carbon quartz schist, graphitic quartz schist and metasandstones; 4 – Aunakit suite. Metasandstone, sandstones, high carbon schist, quartzites; 5 – Imnyakh suite. Sandstones and metasandstones, calcareous shales, sandy limestones; 6 – Khomolkho suite. Carbonaceous shales with sandstone bands; 7 – Ugakhan suite. Interbedded calcareous shales and marbled limestones; 8 – Buzhuikhta suite. Interbedded carbonaceous metasiltstones, metasandstones with limestone bands; 9 – Bodaibokan suite. Limestones; 10 – Bugarikhta suite. Metasandstones, shale bands; 11 – Tectonic contacts; 12 – Boundaries of the exploration area

Бужуихтинская свита ($R_{2+3} bz$) представлена в северо-восточной части, смята в складки вместе с отложениями угаханской свиты. Сложена темно-серыми и серыми полевошпатокарцевыми, иногда известковистыми песчаниками, серыми и темными кварцево-серицитовыми и углистыми сланцами, присутствуют отдельные прослои углистых известняков. Мощность достигает 500 м.

Угаханская свита ($R_{2+3} uh$) вскрывается в крайней северо-восточной части района. Она сложена серыми и темно-серыми разнотекстурными известняками (70 %) с пакетами мощностью 5–15 м тонкопереслаивающихся темно-серых до черных углеродистых, слюдисто-кварцевых, известковистых и не известковистых алевроитовых сланцев. Мощность подсвиты 320–380 м.

Хомолхинская свита ($R_{2+3} hm$) широко распространена на изученной территории. Она является рудомещающей на золоторудных месторождениях Сухой Лог, Высочайший и характеризуется флишеидным разрезом. Свита расчленена на три подсвиты. В ее составе преобладают алевроитовые и пелитовые сланцы. Особенностью разреза свиты является ритмичное тонкое переслаивание однообразных темных углеродистых пород – кварцевых песчаников, алевроитовых и филлитовидных сланцев, свойственное нижней и верхней подсвитам.

Имняхская свита нерасчлененная ($R_{2+3} im$) составляет центральную часть района работ. В нижней части свиты преобладают пакеты тонкопереслаивающихся серых и зеленовато-серых карбонатных и не карбонатных слюдистых сланцев с прослоями различной мощности карбонатных метапесчаников и слюдистых известняков. В зоне повышенного метаморфизма (изограда биотита) для сланцев характерно появление значительного количества порфиробласт биотита и ильменита, в результате этого они приобретают пятнистый облик. В верхней части увеличивается доля прослоев и слоев светлоокрашенных песчаных, часто слюдистых известняков. Мощность свиты 600–750 м [17, 18].

Методика работ

Геофизические работы методом электротомографии проводились в августе 2022 г. в Бодайбинском районе Иркутской области в 170 км от г. Бодайбо (рис. 2). В условиях ограниченного объема работ было выполнено четыре профиля общей длиной 1210 м. Детальное строение верхней части разреза до глубин 70–100 м было получено по данным электротомографии, выполненной аппаратурой «Скала 64K15E» [19].

Электротомография – это электроразведочный комплекс, включающий в себя как методику полевых работ, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Данный метод основан

на применении многоэлектродных электроразведочных кос, подключаемых к аппаратуре, способной коммутировать токовые и измерительные электроды на произвольные выводы косы [20]. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же фиксированных на профиле электродов. Данная методика приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений по сравнению с обычным методом вертикальных электрических зондирований. Такой подход позволяет, с одной стороны, работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, а с другой – применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии [21–23].

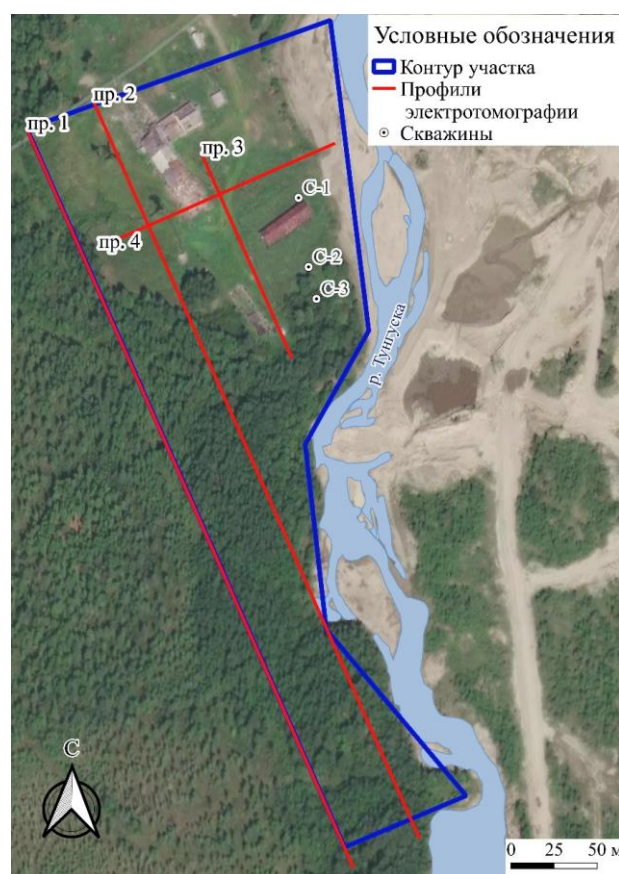


Рис. 2. Схема расположения профилей электротомографии

Fig. 2. Map of electrical resistivity tomography survey lines

Удельное электрическое сопротивление является параметром, который зависит от содержания воды в горной породе, ее пористости, электропроводности воды, типа минералов и температуры воды [24, 25]. Именно это определяет выбор метода электротомографии для поиска и локализации про-

нимаемых зон [26, 27]. Для наиболее распространенных осадочных, изверженных и метаморфических горных пород УЭС зависит от минерального состава, физико-механических и водных свойств горных пород, концентрации солей в подземных водах и в меньшей мере от их химического состава, а также от некоторых других факторов (температуры, глубины залегания, степени метаморфизма и др.) [28].

Метод электротомографии позволяет получить двумерную модель удельного электрического сопротивления верхней части разреза с высоким разрешением, учитывающую сложности геологического строения и топографию [29, 30]. Данный метод является наиболее распространенным и точным среди всех геофизических методов поиска подземных вод из-за большого диапазона значений УЭС, зависящего от условий насыщения горных пород подземными водами [31].

При проведении полевых измерений методом электротомографии использовалась прямая и обратная трехэлектродная установка, которая, так же, как и двухэлектродная, имеет хорошее горизонтальное покрытие и большую глубинность, сочетая это с помехоустойчивостью и высоким уровнем сигнала. При этом трехэлектродная установка, так же как и дипольная, имеет большую чувствительность к горизонтальным неоднородностям в исследуемом разрезе. Помимо прямой и обратной трехэлектродной установки использовалась установка Шлюмберже, которая обладает равной чувствительностью к вертикальным и горизонтальным границам и является компромиссным решением между установками Веннера и дипольной, а также характеризуется большей на 10 % глубинностью, чем у Веннера, и средним горизонтальным покрытием [32]. Расстояние между электродами было принято в 10 м. Выбор расстояния между электродами позволяет регулировать глубинность исследования и влиять на разрешающую способность [33]. Выходное напряжение составляло 200 В. Продолжительность импульса тока – 100 мс, паузы – 20 мс. Отсчеты брались на следующих временах 120, 140, 160 мс.

Результаты и их обсуждение

Инверсия данных выполнялась в программе ZondRes2d, которая предназначена для двумерной инверсии данных электротомографии методом сопротивлений и вызванной поляризации [34]. Задача инверсии заключается в сопоставлении модельных данных с наблюдаемыми для воссоздания геологической модели исследуемой среды. Из-за неполноты и зашумленности наблюдаемых данных решение обратной задачи может иметь множество решений [35].

Качество и достоверность результатов работы алгоритма автоматической двумерной инверсии зависело и от качества полевых данных, и от соответствия изучаемой геологической среды двумерной геоэлектрической модели, и от полноты использования априорной информации [36]. Известно, что при проведении автоматической инверсии данных электротомографии имеет место быть проблема завышения всех глубин. Данная проблема характерна в большей степени для контрастных разрезов, где идет чередование слоев высокого и низкого УЭС. Особенно сильно на увеличение глубинности влияет присутствие изоляторов в разрезе [37]. Модели удельного электрического сопротивления показывают резкий контраст между вмещающей породой и водоудерживающими пластами, особенно вблизи контакта двух разных геологических формаций.

По результатам двумерной инверсии данных, записанных комбинированной трехэлектродной установкой, были построены разрезы по профилям № 3 (рис. 3, а, б) и № 4 (рис. 3, в, г). На рис. 3, г показана проекция скважины № 1, располагающейся в 20 м от профиля № 4.

Геоэлектрический разрез представлен следующими элементами: супесями и суглинками с включением мелкообломочного материала со значениями УЭС 10–300 Ом·м; супесями с включением крупнообломочного материала до валунов со значениями УЭС 600–1500 Ом·м; водоносным слоем, представленным известняками трещинноватыми со значениями УЭС 200–400 Ом·м; плотными доломитами со значениями УЭС 2000–3000 Ом·м. Среднеквадратическое отклонение между наблюдаемыми и модельными данными составило 4 %.

На рис. 4 представлены разрезы по профилю № 4. Использование комбинированной трехэлектродной установки позволяет достичь наибольшей глубинности и разрешающей способности в отдельных геологических ситуациях [38]. Для повышения эффективности полевых наблюдений и уменьшения эквивалентности результатов инверсии наблюдаемых данных необходимо, по возможности, сравнивать полученные данные с данными, записанными другими типами электроразведочных установок. При сопоставлении результатов инверсии данных, зарегистрированных установками Шлюмберже и комбинированной трехэлектродной, установлено, что данные, записанные установкой Шлюмберже, имеют наименьшую глубинность. Кровля доломитов, отмеченная на рис. 4 пунктирной линией, завышена в среднем на 10 м относительно кровли доломитов, выделенной на стратиграфическом разрезе по ГИС.

Итогом интерпретации разрезов по параметру УЭС с учётом геологического строения являлось

выделение потенциальных зон, вероятно, содержащих подземные воды, что позволило определить несколько подходящих участков заложения поисково-разведочных скважин глубиной до 70 м. В них после бурения проведены опытно-фильтрационные работы.

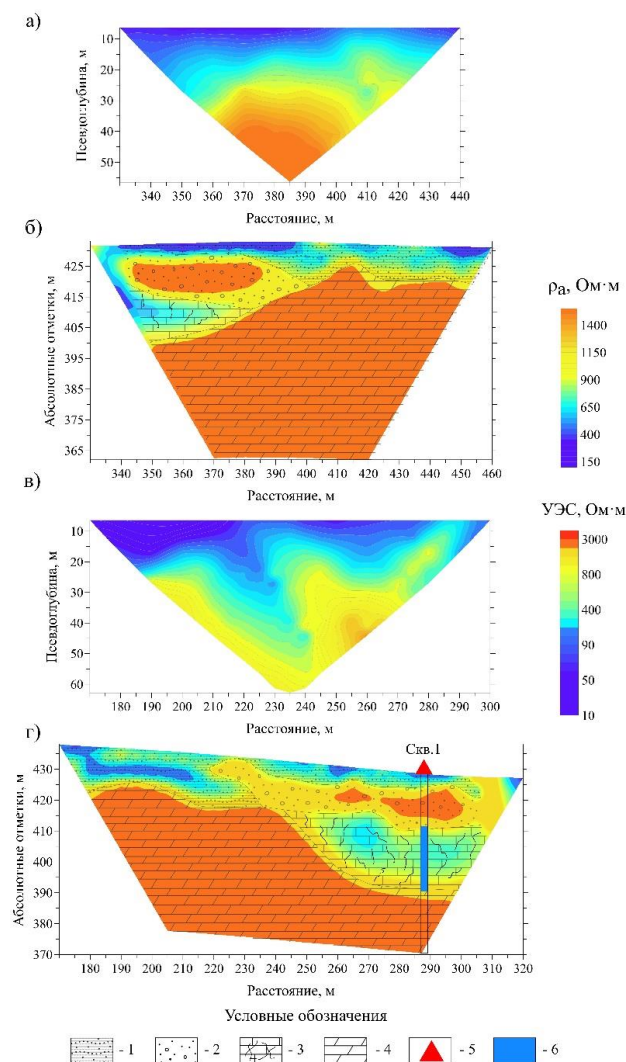


Рис. 3. Разрезы по профилю № 3: а) по параметру кажущегося сопротивления; б) по параметру УЭС; разрезы по профилю № 4: в) по параметру кажущегося сопротивления; г) по параметру УЭС. 1 – мелкообломочные супеси/суглинки; 2 – крупнообломочные супеси/валунники; 3 – известняки трещиноватые; 4 – доломиты плотные; 5 – проекция гидрогеологической скважины; 6 – обводненный слой, выделенный по данным ГИС

Fig. 3. Section of survey line 3: а) observed apparent resistivity data; б) electrical resistivity; section of survey line 4: в) observed apparent resistivity data; г) electrical resistivity. 1 – fine detrital loamy sands/loams; 2 – large detrital loamy sands/boulder gravels; 3 – fissured limestones; 4 – dense dolomites; 5 – hydrogeological well projection; 6 – watered layer selected based on geophysical well logging data

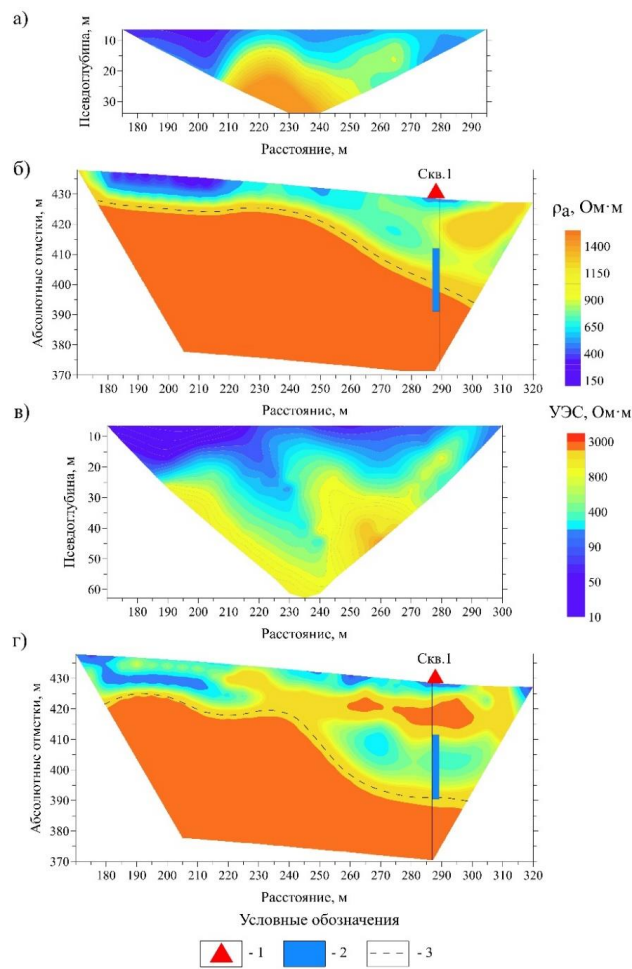


Рис. 4. Разрезы по профилю № 4: а) по параметру кажущегося сопротивления (установка Шлюмберже); б) по параметру УЭС (установка Шлюмберже); в) по параметру кажущегося сопротивления (трехэлектродная установка); г) по параметру УЭС (трехэлектродная установка). 1 – гидрогеологическая скважина; 2 – обводненный слой, выделенный по данным ГИС; 3 – кровля доломитов

Fig. 4. Section of survey line 4: а) observed apparent resistivity data (Schlumberger array); б) electrical resistivity (Schlumberger array); в) observed apparent resistivity data (three-electrode array); г) electrical resistivity (three-electrode array). 1 – hydrogeological well; 2 – watered layer selected based on geophysical well logging data; 3 – dolomite stratum surface (roof)

Таликовые зоны по результатам проведения работ методом электротомографии выявлены не были. Подземные воды сосредоточены в зонах повышенной трещиноватости протерозойских отложений (PR_{2+3im}).

Все три скважины во время бурения вскрыли водоносный горизонт, который в основном находится в карбонатных породах, сложенных трещиноватыми известняками. Поисковые скважины вы-

ставлялись на аномальных зонах, демонстрирующих хорошо выраженный контраст УЭС по отношению к вмещающим породам, а также с учетом элементов рельефа, не мешающих проведению буровых работ. Проектные скважины подтвердили результаты интерпретации разрезов по значению удельного электрического сопротивления.

По результатам бурения гидрогеологической скважины № 1 представлен следующими элементами:

- четвертичные аллювиальные и флювиогляциальные отложения. Верхняя часть разреза – с поверхности до глубины 10 м – представлена супесями и суглинками с редкими включениями мелкообломочного материала. С 12 м вскрываются грунтовые воды, тогда же разрез сменяется на супеси с обильными включениями средне- и крупнообломочных материалов до валунов с глубиной залегания до 17 м;
- слабопроницаемые отложения, представленные переслаиванием плотных известняков серого цвета и черных метапесчаников. Мощность слоя колеблется в пределах от 5 до 11 м;
- водоносный комплекс трещиноватых пород имнянской свиты протерозойского комплекса отложений (PR_{2-3im}), представлен трещиноватыми известняками от серых до голубоватых, с прослоями мусковитовых сланцев. Мощность вскрытых отложений составляет до 50 м, уровень подземных вод эксплуатационного горизонта вскрывается на глубинах от 21 до 28 м и устанавливается на глубине 10–11 м. В верхней части отложения представлены песчанистыми и слюдистыми известняками, плотными, серо-цветными. К концу вскрытого интервала наблюдается потемнение до светло-коричневых, значительное количество примеси биотита, плотные. По результатам проведенных опытно-фильтрационных работ средний коэффициент фильтрации водовмещающих отложений составляет 3,2 м/сут.

Геофизические исследования скважин проводились по всем трем скважинам и представлены комплексом методов: термометрия, метод кажущегося электрического сопротивления (КС) и кавернометрия (рис. 5).

По результатам термометрии температура в районе водопритока на уровне от 17 до 40 м повышалась на 1–1,5 °С, что говорит о стабильной фильтрации воды в зоне водопритока.

По полученным данным КС был выделен следующий литологический состав: песчано-глинистые валунно-галечные отложения со значениями УЭС 100–120 Ом·м; трещиноватые карбонатные отложения зоны водопритока, средние значения УЭС которых составляют 400 Ом·м; плотные карбонатные породы (доломиты) со значениями УЭС от 600 до 1000 Ом·м.

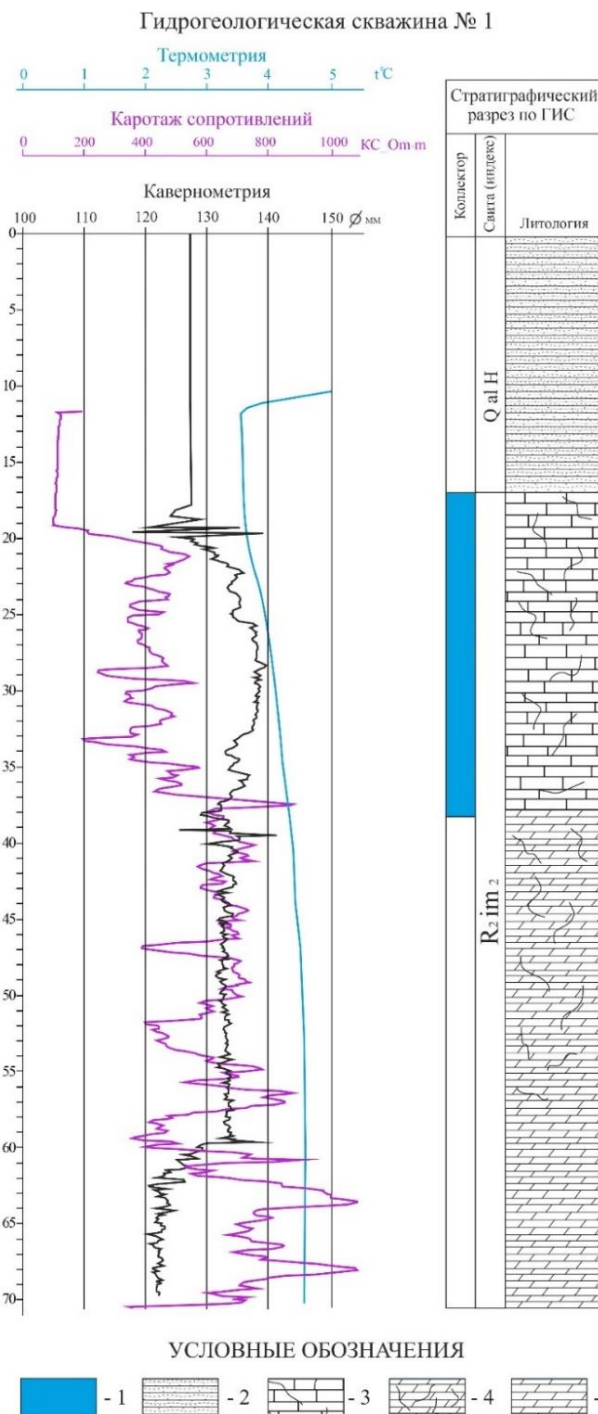


Рис. 5. Сводный планшет по скважине № 1: 1 – обводненный слой; 2 – четвертичные отложения; 3 – известняки трещиноватые; 4 – доломиты трещиноватые; 5 – доломиты плотные

Fig. 5. Summary panel for well No. 1: 1 – wet strata; 2 – quaternary deposits; 3 – fissured limestones; 4 – fissured dolomites; 5 – dense dolomites

По результатам кавернометрии выделен водопроницаемый интервал, представленный разрушенными породами в скважине в интервале от 20 до 38 м.

Отмечается, что искомый обводненный слой уверенно выделяется по данным всех трех проведенных методов ГИС. Исходя из данных по КС для обводненного слоя, средние значения УЭС, равные 400 Ом·м, совпадают с результатами инверсии данных электротомографии, где средние значения УЭС для обводненного слоя составляют 300–400 Ом·м.

Заключение

По результатам выполненных инженерных изысканий методом электротомографии, а также рекогносцировочных маршрутных обследований, был выделен перспективный участок для бурения гидрогеологических скважин. Была определена перспективная на водопроявление зона, характеризующаяся низкими значениями удельного электрического сопротивления. Гидрогеологические разрезы, построенные по данным буровых работ, и данные геофизических исследований скважин были сопоставлены с электроразведочными моделями,

что позволило получить достаточно полное понимание геологического строения участка работ. Проведенные исследования показали, что в комплексе с гидрогеологическими исследованиями метод электротомографии позволяет решить задачу оптимального распределения ограниченных объемов бурения и оценить геолого-гидрогеологические условия выделения интервалов водопритока.

Таким образом, в работе показаны возможности применения метода электротомографии для решения задач поиска подземных вод технического назначения на примере объекта, расположенного в Бодайбинском районе Иркутской области. При работе на подобных объектах метод электротомографии позволяет расчленять различные по составу слои, прослеживать их границы при отсутствии достаточного количества данных бурения, а также выявлять неоднородности в разрезе и обводненные трещиноватые зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits / P.H. Giao, S.G. Chung, D.Y. Kim, H. Tanaka // *Journal of Applied Geophysics*. – 2003. – Vol. 52. – P. 157–175.
2. Bhattacharya P.K., Patra H.P. Direct current geoelectric sounding: principles and interpretation. – Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1968. – Vol. 9. – 135 p.
3. Kumar D., Rao V.A., Sarma V.S. Hydrogeological and geophysical study for deeper groundwater resource in quartzitic hard rock ridge region from 2D resistivity data // *Journal of Earth System Science*. – 2014. – Vol. 123. – P. 34–40.
4. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред / А.А. Бобачев, М.Н. Марченко, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, А.В. Урусова, В.А. Шевнин // *Физика Земли*. – 1995. – № 12. – С. 79–90.
5. Applied geophysics / W.M., Telford L.P. Geldart, R.A. Sheriff, D.A. Keys. – London: Cambridge University Press, 1976. – 860 p.
6. Groundwater exploration in limestone–shale–quartzite terrain through 2D electrical resistivity tomography in Tadipatri, Anantapur district, Andhra Pradesh / D. Kumar, K. Rajesh, S. Mondal, T. Warsi, R. Rangarajan // *Journal of Earth System Science*. – 2020. – Vol. 129. – № 71. – P. 1–5.
7. 15 лет развития электротомографии в России / И.Н. Модин, А.А. Бобачев, Д.К. Большаков, В.А. Шевнин, М.Н. Марченко, К.Д. Ефремов // *Инженерная и рудная геофизика 2020: Материалы 16-ой научно-практической конференции совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020»*. – М.: Общество с ограниченной ответственностью «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2020. – Т. 2020. – С. 1–16.
8. Zhou B. Electrical resistivity tomography: a subsurface-imaging technique // *Applied geophysics with case studies on environmental, exploration and engineering geophysics* / Ed. by A.I. Kanly. – London, United Kingdom: InTechOpen, 2019. – P. 123–137. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/64562> (дата обращения 07.06.2023).
9. Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска / М.С. Шкиря, Ю.К. Ланкин, С.А. Терешкин, А.В. Лазурченко, Ю.А. Давыденко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 160–170.
10. Роль электротомографии и электромагнитных зондирований в поисково-оценочных работах для водоснабжения Озерного ГОКа / М.С. Шкиря, П.С. Бадминов, С.А. Терешкин, А.С. Башкеев, Ю.А. Давыденко // *Разведка и охрана недр*. – 2021. – № 12. – С. 26–34.
11. Построение объемной модели верхней части геологической среды по данным электротомографии для решения инженерно-геологических задач / И.Н. Модин, Д.К. Большаков, С.В. Бомкин, А.Д. Скобелев, К.И. Баранчук, К.Д. Ефремов, А.А. Пелевин, А.С. Репьев // *Геомодель 2015: Материалы 17-ой научно-практической конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа*. – Геленджик: Европейская ассоциация геологов и инженеров, 2015. – Т. 2015. – С. 25–30.
12. Dahlin T. On the automatization of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. – Lund: Lund University, 1993. – 187 p.
13. Hydrogeophysical tools for investigating groundwater storage in the subsurface of a karst system / A. Watlet, K. van Noten, T. Lecocq, J. Chambers, P. Meldrum, O. Francis, M. van Camp, O. Kaufmann // *Near Surface Geoscience: 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – Athens: European Association of Geoscientists & Engineers, 2014. – Vol. 2014. – P. 1–5.
14. Patella D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview // *7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. – Salvador: European Association of Geoscientists & Engineers, 2001. – P. 1–5.
15. Jones G., Sentenac P., Zielinski M. Fissure detection in flood embankments using electrical resistivity tomography // *Near Surface Geoscience 2012: 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. – Paris: European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. – P. 124–130.

16. Visualising groundwater flow using time-lapse electrical resistivity tomography / M. Karaoulis, W. Bakx, P. Doornenba, P. Kruiver, S. Rijpkema // 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – The Hague: European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. – Vol. 2019. – P. 1–5.
17. Иванов А.И. Отчет о результатах работ по объекту: «Поисково-оценочные работы на рудное золото на Светловском рудном поле (Иркутская область)». – Иркутск, 2009. – Т. 1. – 119 с.
18. Царегородцева М.И., Игнатова О.П., Карасева Е.Ф. Отчет с подсчетом запасов россыпного золота по правобережной террасе р. Жуя, между устьями руч. Бол. Тунгуска и руч. Спектральный, для открытого раздельного способа разработки по результатам геологоразведочных работ 2011 г. по состоянию на 20.12.2012 г. – Бодайбо, 2012. – 132 с.
19. Скала64K15 // Официальный сайт Конструкторского Бюро Электротометрии. – 2023. URL: <https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-64k15/> (дата обращения 05.06.2023).
20. Стойкин Т.А., Балков Е.В., Манштейн Ю.А. Опыт применения электротомографии для решения инженерно-геологических задач // Инженерная и рудная геофизика 2011: Материалы 7-ой научно-практической конференции и выставки. – М.: European Association of Geoscientists & Engineers, 2011. – С. 42–50.
21. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / А.А. Бобачев, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, В.А. Шевнин // Разведочная геофизика. Обзор. – М.: АОЗТ «Геоинформмарк», 1996. – Вып. 2. – 50 с.
22. Бортникова С.П., Ельцов И.Н., Борисенко Д.А. Возможности малоглубинной электротомографии при решении инженерно-геологических задач // Инженерная геофизика 2013: Материалы 9-ой международной конференции и выставки. – Геленджик: EAGE Publications BV, 2013. – Р. 36–41.
23. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации / А.А. Бобачев, А.А. Горбунов, И.Н. Модин, В.А. Шевнин // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
24. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. Applied Geophysics (2nd ed.). – New-York: Cambridge University Press, 1990. – 751 p.
25. Rein A., Hoffman R., Dietrich P. Influence of natural time-dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements // Journal of Hydrology. – 2004. – Vol. 285. – P. 215–232.
26. Санчаа А.М., Фаре А.Н., Шемелина О.В. Применение метода электротомографии для поиска водоносных горизонтов в геологических условиях восточной части Новосибирской области // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 10. – С. 90–105.
27. Fadilah T., Gross L., Schaa R. Estimation of aquifer properties using surface based electrical resistivity tomography // EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering. – Yogyakarta: European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. – Vol. 2018. – P. 1–5.
28. Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2.: региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 184 с.
29. Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies // A practical guide to 2D and 3D surveys. – 1999. – Vol. 2. – 70 p.
30. Kumar D., Mondal S., Warsi T. Deep insight to the complex aquifer and its characteristics from high resolution electrical resistivity tomography and borehole studies for groundwater exploration and development // Journal of Earth System Science. – 2020. – Vol. 129. – P. 1–15.
31. Kumari A., Kumar D., Warwade P. Application of multi-criteria decision making (MCDM) and electrical resistivity tomography (ERT) techniques for identification of groundwater recharge zone(s) in granitic hard rock aquifer // Journal of Earth System Science. – 2021. – Vol. 130. – № 81. – P. 1–17.
32. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 1. – С. 43–47.
33. Ostrowski S., Lasocki M., Pacanowski G. Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping // 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC. – Barcelona: European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. – P. 1–5.
34. Программа ZondRes2d // Zond Software. – 2023. URL: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (дата обращения 06.06.2023).
35. Riwayat A.I., Nazri M.A.A., Abidin M.H.Z. Application of electrical resistivity method (ERM) in groundwater exploration // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018. – Vol. 995. – № 1. – P. 012094.
36. Опыт применения электротомографии в геофизике / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн, А.К. Манштейн, В.А. Белобородов // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
37. Результаты электроразведочных работ методом электротомографии на правобережье р. Волга / В.А. Поликарпова, В.А. Куликов, А.А. Бобачев, А.Г. Яковлев // Инженерная и рудная геофизика 2021: Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки. – М.: Общество с ограниченной ответственностью «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2021. – С. 1–6.
38. Dahlin T. The development of electrical imaging techniques // Computers and Geosciences. – 2001. – № 27 (9). – P. 1019–1029.

Информация об авторах

Туяна Сергеевна Шойхонова, инженер-исследователь департамента геофизики Сибирской Школы Геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. tshoikhonova@geo.istu.edu; <https://orcid.org/0009-0007-1641-6085>

Михаил Сергеевич Шкиря, младший научный сотрудник департамента геофизики Сибирской Школы Геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. mshkiria@geo.istu.edu; <https://orcid.org/0000-0003-1570-0002>

Павел Геннадьевич Бирюков, инженер-исследователь департамента геофизики Сибирской Школы Геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. pbiriukov@geo.istu.edu; <https://orcid.org/0009-0006-0991-2972>

Алексей Алексеевич Дунюшин, инженер-гидрогеолог 1 категории ООО «ЭКОСТАНДАРТ "Технические Решения"», Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 37. Dunyushin.A@ecostandard.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7142-2158>

Аюр Саянович Башкеев, младший научный сотрудник департамента геофизики Сибирской Школы Геонаук Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. abashkeev@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-5456-5221>

Поступила в редакцию: 22.06.2023

Поступила после рецензирования: 22.09.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Giao P.H., Chung S.G., Kim D.Y., Tanaka H. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, vol. 52, pp. 157–175.
2. Bhattacharya P.K., Patra H.P. *Direct current geoelectric sounding: principles and interpretation*. Amsterdam, Elsevier Publ. Company, 1968. Vol. 9, 135 p.
3. Kumar D., Rao V.A., Sarma V.S. Hydrogeological and geophysical study for deeper groundwater resource in quartzitic hard rock ridge region from 2D resistivity data. *Journal of Earth System Science*, 2014, vol. 123, pp. 34–40.
4. Bobachev A.A., Marchenko M.N., Modin I.N., Pervago E.V., Urusova A.V., Shevnin V.A. New approaches to electric sounding of laterally inhomogeneous media. *Physics of the Earth*, 1995, no. 12, pp. 79–90. (In Russ.)
5. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.A., Keys D.A. *Applied geophysics*. London, Cambridge University Press, 1976. 860 p.
6. Kumar D., Rajesh K., Mondal S., Warsi T., Rangarajan R. Groundwater exploration in limestone–shale–quartzite terrain through 2D electrical resistivity tomography in Tadipatri, Anantapur district, Andhra Pradesh. *Journal of Earth System Science*, 2020, vol. 129, no. 71, pp. 1–5.
7. Modin I.N., Bobachev A.A., Bolshakov D.K., Shevnin V.A., Marchenko M.N., Efremov K.D. 15 years of development of electrical resistivity tomography in Russia. *Engineering and ore geophysics 2020. Proc. of the 16th scientific and practical conference together with the seminar "Engineering and ore geology 2020"*. Moscow, Limited Liability Company "EAGE GEOMODEL", 2020. Vol. 2020, pp. 1–16. (In Russ.)
8. Zhou B. Electrical resistivity tomography: a subsurface-imaging technique. *Applied geophysics with case studies on environmental, exploration and engineering geophysics*. Ed. A.I. Kanli. London, United Kingdom, InTechOpen, 2019. pp. 123–137. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/64562> (accessed 07 June 2023).
9. Shkirya M.S., Lankin Yu.K., Tereshkin S.A., Lazurchenko A.V., Davydenko Yu.A. Applying ground geophysical prospecting using the method of electrical resistivity tomography as part of engineering and geological surveys of a flooded area in one of the residential areas of Irkutsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 160–170. (In Russ.)
10. Shkirya M.S., Badminov P.S., Tereshkin S.A., Bashkeev A.S., Davydenko Yu.A. The role of electrical resistivity tomography and electromagnet sounding in search and assessment works for the water supply of Ozerny GOK. *Prospect and protection of mineral resources*, 2021, № 12, pp. 26–34. (In Russ.)
11. Modin I.N., Bolshakov D.K., Bomkin S.V., Skobelev A.D., Baranchuk K.I., Efremov K.D., Pelevin A.A., Repiev A.S. Construction of three-dimensional model top of the geological environment according electrical resistivity tomography for geotechnical problems. *Geomodel 2015. Proc. of the 17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development*. Gelendzhik, European Association of Geologists and Engineers, 2015. Vol. 2015, pp. 25–30. (In Russ.)
12. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 1996, no. 14, pp. 275–283.
13. Watlet A., Van Noten K., Lecocq T., Chambers J., Meldrum P., Francis O., Van Camp M., Kaufmann O. Hydrogeophysical tools for investigating groundwater storage in the subsurface of a karst system. *Near Surface Geoscience: 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Athens, European Association of Geoscientists & Engineers, 2014. Vol. 2014, pp. 1–5.
14. Patella D. Geophysical tomography in engineering geology: an overview. *7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Salvador, European Association of Geoscientists & Engineers, 2001. pp. 1–5.
15. Jones G., Sentenac P., Zielinski M. Fissure detection in flood embankments using electrical resistivity tomography. *Near Surface Geoscience 2012: 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Paris, European Association of Geoscientists & Engineers, 2012. pp. 124–130.
16. Karaoulis M., Bakx W., Doornenba P., Kruiver P., Rijpkema S. Visualising groundwater flow using time-lapse electrical resistivity tomography. *25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. The Hague, European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. Vol. 2019, pp. 1–5.
17. Ivanov A.I., Ageev Y.L., Pusenkov V.A., Kulikov E.G., Kalinina D.I., Klimansky A.V., Sinitskaya E.G., Kopyeva V.N., Kukhtina E.V. *Report on the results of work on the object "Search and evaluation work for ore gold on the Svetlovskoe ore field (Irkutsk region)"*. Irkutsk, 2009. Vol. 1, 119 p. (In Russ.)
18. Tsaregorodtseva M.I., Ignatyeva O.P., Karaseva E.F., Leskova L.I., Khalyavin V.S., Turanova A.V. *Report with calculation of placer gold reserves on the right bank terrace of the river Zhuya, between the mouths of the brook. Bol. Tunguska and the brook. Spectral, for an open separate method of development based on the results of geological exploration in 2011 as of 20.12.2012*. Bodaibo, 2012. 132 p. (In Russ.)

19. Scala 64K15E. *Official website Kbelectrometry*. (In Russ.) Available at: <https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-64k15/> (accessed 5 June 2023).
20. Stoikin T.A., Balkov E.V., Manstein Yu.A. Experience in using electrical resistivity tomography for solving engineering-geological problems. *Proc. of the 7th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics*. Moscow, European Association of Geoscientists & Engineers Publ., 2011. pp. 42–50. (In Russ.)
21. Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V., Shevnin V.A. Multielectrode electric sounding in conditions of horizontally inhomogeneous media. *Exploration Geophysics. Review*. Moscow, CJSC «Geoinformmark», 1996. Iss. 2, 50 p. (In Russ.)
22. Bortnikova S.P., Eltsov I.N., Borisenko D.A. Possibilities of shallow electrical resistivity tomography in solving engineering-geological problems. *Engineering geophysics 2013. Proc. of the 9th International conference and exhibition*. Gelendzhik, EAGE Publications BV, 2013. pp. 36–41. (In Russ.)
23. Bobachev A.A., Gorbunov A.A., Modin I.N., Shevnin V.A. ERT as the method of resistivity and induced polarization. *Instruments and systems of exploration Geophysics*, 2006, no. 2, pp. 14–17. (In Russ.)
24. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. *Applied geophysics* (2nd ed.). New-York, Cambridge University Press, 1990. 751 p.
25. Rein A., Hoffman R., Dietrich P. Influence of natural timedependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 285, pp. 215–232.
26. Sanchaa A.M., Fage A.N., Shemelina O.V. Application of electrical tomography to detecting aquifers in geological conditions of the eastern Novosibirsk Region. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2019, no. 10, pp. 90–105. (In Russ.)
27. Fadilah T., Gross L., Schaa R. Estimation of aquifer properties using surface based electrical resistivity tomography. *EAGE-HAGI 1st Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering*. Yogyakarta, European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. Vol. 2018, pp. 1–5.
28. Khmelevsky V.K. *Geophysical methods for studying the earth's crust. B. 2: regional, exploration, engineering and environmental geophysics*. Dubna, International University of Nature, Society and Man "Dubna", 1999. 184 p. (In Russ.)
29. Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *A practical guide to 2D and 3D surveys*, 1999, vol. 2, 70 p.
30. Kumar D., Mondal S., Warsi T. Deep insight into the complex aquifer and its characteristics from high-resolution electrical resistivity tomography and borehole studies for groundwater exploration and development. *Journal of Earth System Science*, 2020, vol. 129, pp. 1–15.
31. Kumari A., Kumar D., Warwade P. Application of multi-criteria decision making (MCDM) and electrical resistivity tomography (ERT) techniques for identification of groundwater recharge zone(s) in granitic hard rock aquifer. *Journal of Earth System Science*, 2021, vol. 130, no. 81, pp. 1–17.
32. Bobachev A.A., Modin I.N. Electrical resistivity tomography with standard electrical prospecting complexes. *Prospect and protection of mineral resources*, 2008, no. 1, pp. 43–47. (In Russ.)
33. Ostrowski S., Lasocki M., Pacanowski G. Electrical resistivity tomography as a tool in geological mapping. *72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC*. Barcelona, European Association of Geoscientists & Engineers, 2010. pp. 1–5.
34. Program ZondRes2D. *Official website Zond Software*. (In Russ.) Available at: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (accessed 5 June 2023).
35. Riwayat A.I., Nazri M.A.A., Abidin M.H.Z. Application of electrical resistivity method (ERM) in groundwater exploration. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2018, vol. 995, no. 1, pp. 012094.
36. Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A., Manstein A.K., Beloborodov V.A. Experience in the use of electrical resistivity tomography in geophysics. *Geophysics*, 2012, no. 6, pp. 54–63. (In Russ.)
37. Polikarpova V.A., Kulikov V.A., Bobachev A.A., Yakovlev A.G. The results of electrical exploration by the method of electrical tomography on the right bank of the river Volga. *Engineering and Mining Geophysics 2021: Proc. of the 17th scientific-practical conference and exhibition*. Moscow, Limited Liability Company "EAGE GEOMODEL", 2021. Vol. 2021, pp. 1–6. (In Russ.)
38. Dahlin T. The development of electrical imaging techniques. *Computers and Geosciences*, 2001, no. 27 (9), pp. 1019–1029.

Information about the authors

Tuyana S. Shoikhonova, Research Engineer, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. tshoikhonova@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0009-0007-1641-6085>

Mikhail S. Shkiria, Junior Researcher, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. mshkiria@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0003-1570-0002>

Pavel G. Biryukov, Research Engineer, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. pbiriukov@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0009-0006-0991-2972>

Alexey A. Dunyushin, Hydrogeologist of the 1st category, LLC "ECOSTANDART "Engineering solution", 37, Moika river embankment, Saint Petersburg, 191186, Russian Federation. Dunyushin.A@ecostandard.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7142-2158>

Ayur S. Bashkeev, Junior Researcher, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. abashkeev@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-5456-5221>

Received: 22.06.2023

Revised: 22.09.2023

Accepted: 19.04.2024