

УДК 550.370, 556
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4348
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Оценка возможности поиска подземных вод методом электротомографии по данным численного моделирования в условиях, осложненных многолетнемерзлыми породами (на примере территории восточной части Республики Бурятия)

А.В. Лазурченко✉, Т.С. Шойхонова, М.С. Шкиря, А.Ю. Белова, С.А. Терешкин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, г. Иркутск

✉alazurchenko@geo.istu.edu

Аннотация. Актуальность. Подземные воды являются основным источником производственно-технического водоснабжения горнодобывающих объектов. Геологическое строение исследуемых площадей бывает осложнено различными факторами, которые затрудняют поиск и локализацию подземных вод. В связи с этим часто в комплекс поисково-разведочных работ включают геофизические исследования электроразведочными методами, перед проведением которых необходимо обосновать применение выбранного метода для решения поставленных задач путем выполнения численного моделирования. **Цель:** обосновать применение метода электротомографии на поиск подземных вод с учетом осложняющих факторов в виде многолетнемерзлых пород, таликов и разломной зоны путем численного моделирования. **Объекты:** геологическая среда, представленная породами четвертичной системы и многолетнемерзлыми породами меловых отложений Зазинской межгорной впадины, разломная зона, таликовые зоны. **Методы:** решение прямой задачи электроразведки, решение обратной задачи электроразведки, наземные геофизические исследования методом электротомографии. **Результаты.** На основании выполненного численного моделирования показано, что применение метода электротомографии целесообразно при поиске подземных вод на площади, осложненной различными факторами: многолетнемерзлыми породами, таликами и разломной зоной. По результатам решения прямых и обратных задач электроразведки на примере выполненных в 2020 г. производственных работ в Еравнинском районе Республики Бурятия показано, что электротомографические исследования трехэлектродной установкой с шагом по профилю 5 м, успешно заверенные буровыми работами, позволяют достоверно оконтурить перспективные зоны водопритока. Эти зоны, характеризующиеся низкими значениями удельного электрического сопротивления, на данной площади приурочены к таликовым зонам, питание которых поступает за счет теплового потока с недр земли.

Ключевые слова: численное моделирование, прямая задача электроразведки, обратная задача электроразведки, электротомография, удельное электрическое сопротивление, подземные воды, талики, разломная зона, многолетнемерзлые породы

Для цитирования: Оценка возможности поиска подземных вод методом электротомографии по данным численного моделирования в условиях, осложненных многолетнемерзлыми породами (на примере территории восточной части Республики Бурятия) / А.В. Лазурченко, Т.С. Шойхонова, М.С. Шкиря, А.Ю. Белова, С.А. Терешкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 7. – С. 81–95. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4348

UDC 550.370, 556
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4348

Evaluation of the possibility of searching for groundwater using electrical resistivity tomography based on the data of numerical modelling in complicated permafrost conditions (the case of the territory in the eastern part of the Republic of Buryatia)

A.V. Lazurchenko✉, T.S. Shoikhonova, M.S. Shkiria, A.Yu. Belova, S.A. Tereshkin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

✉alazurchenko@geo.istu.edu

Abstract. Relevance. Groundwater is the main source of industrial and technical water supply for mining facilities. The geological structure of the studied areas can be complicated by various factors that make it difficult to search for and localize groundwater. In this regard, electrical geophysical prospecting methods are often included in the complex of prospecting and exploration works, before which it is necessary to justify the application of the chosen method for solving the problems by performing numerical modelling. **Aim.** To substantiate the use of electrical resistivity tomography for the search for groundwater, taking into account complicating factors, including perennially frozen rocks, taliks, and fault zone, by numerical modelling. **Objects.** Geological environment represented by Quaternary system rocks and permafrost rocks of Cretaceous sediments of the Zazinskaya intermontane area, fault zone, talik zones. **Methods.** Solution of the direct problem, solution of the inverse problem, ground geophysical surveys using electrical resistivity tomography. **Results.** Based on the performed numerical modelling, it is shown that the use of electrical resistivity tomography is expedient when searching for groundwater in the area characterized by various factors: permafrost, talik, and a fault zone. Based on the results of solving direct and inverse problems of electrical survey, using field works performed in 2020 in the Eravninsky district of the Republic of Buryatia as an example, it is shown that pole-dipole arrays in electric resistivity survey with electrode distance of 5 m, successfully confirmed by drilling operations, allow us to reliably delineate the potential zones of water inflow. These zones, characterized by low values of electrical resistivity, in this area, are related to talik zones, which are powered by heat flow from the bowels of the earth.

Keywords: numerical experiment, direct problem of electrical survey, inverse problem of electrical survey, electrical resistivity tomography, electrical resistivity, groundwater, talik, fault zone, permafrost rocks

For citation: Lazurchenko A.V., Shoikhonova T.S., Shkiria M.S., Belova A.Yu., Tereshkin S.A. Evaluation of the possibility of searching for groundwater using electrical resistivity tomography based on the data of numerical modelling in complicated permafrost conditions (the case of the territory in the eastern part of the Republic of Buryatia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 7, pp. 81–95. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4348

Введение

В статье рассматривается возможность поиска подземных вод методом электротомографии по данным численного моделирования в условиях, осложненных многолетнемерзлыми породами.

Подземные воды являются одним из основных источников водоснабжения и представляют собой ценный естественный ресурс [1], и потребность в них неоспорима, что обусловлено хозяйственно-питьевыми нуждами человека [2]. Воды технического назначения необходимы для водоснабжения вахтовых поселков, горно-обогатительных комбинатов и других объектов горнодобывающей инфраструктуры. Источниками питания таких вод являются, прежде всего, атмосферные осадки, поверхностные воды, подтоки из других водоносных горизонтов, а также таяние сезонно-талого слоя [3].

Особый интерес вызывают талики, приуроченные к разломным зонам, в связи с наличием постоянного источника питания за счет теплового потока, поступающего из недр земли [4].

Среди всех геофизических методов электрические и электромагнитные методы являются наиболее популярными при разведке подземных вод из-за тесной связи между электропроводностью и некоторыми гидрогеологическими свойствами водоносного горизонта (например, пористостью, глинистостью, минерализацией подземных вод и степенью водонасыщения) [5]. Одним из наиболее известных электроразведочных методов является электротомография, широко применяемая во всем мире при решении различных задач, от промышленных (например, поиск полезных ископаемых) до экологических (мониторинг оползней, деградации

вечной мерзлоты и др.). Его эффективность была успешно подтверждена многочисленными исследованиями [6–13]. Метод электротомографии является подходящим инструментом для исследования распределения удельного сопротивления незамерзших отложений (например, талика и криопэга), а также для изучения и определения положения вечной мерзлоты [14].

Однако перед проведением любого геофизического исследования требуется доказательство целесообразности его применения при решении поставленных задач на рассматриваемом участке работ. Решение прямой задачи позволяет определить, возможно ли обнаружение искомого объекта в текущей геологической ситуации с помощью используемого геофизического метода, а также выбрать оптимальные параметры системы измерений для ее решения, оценить уровень сигнала и разрешающую способность выбранной системы наблюдений [15].

Для априорной модели использовались геологические данные по Еравнинской площади [16] и результаты поисково-оценочных гидрогеологических работ, включавшие в себя электроразведку методами электротомографии, электромагнитных зондирований и вызванной поляризации (ЭМЗ-ВП), а также гидрогеологические исследования и бурение, выполненные в 2020 г. в долине реки Зазы в Еравнинском районе Республики Бурятия. Комплекс работ проводился для обеспечения производственно-технического водоснабжения объектов Озерного ГОКа, находящегося на территории Республики Бурятия, с целью выявления перспективности месторождения напорных подмерзлотных вод межгорного артезианского бассейна р. Зазы [17].

Геологическое описание

Участок исследования расположен в Зазинской межгорной впадине, морфологически представляющей собой линейно вытянутую депрессию, обрамленную невысокими горными хребтами. Структура Зазинской впадины может быть представлена как глубокий грабен в блоке кристаллического фундамента, сопряженного с севера и юга с крупными разломами.

В геологическом строении территории принимают участие пермские, юрские и меловые отложения (рис. 1). Их перекрывают образования неоплейстоцена и отложения голоцена. Интрузивные образования на площади работ представлены пермскими отложениями Бичурского комплекса.

Исследуемая территория находится на южной окраине площади распространения криолитозоны с максимальной мощностью до 200 м.

В гидрогеологическом отношении поисковая площадь входит в состав Зазинского артезианского бассейна, вытянутого в северо-восточном направ-

лении. Гидрогеологические условия бассейна довольно сложные, особенности их формирования связаны с наличием мощной толщи мезозойских отложений в Зазинской впадине, повсеместным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), широким развитием разрывных нарушений и тектонически ослабленных зон.

Питание подмерзлотных вод происходит в основном за счет регионального стока из кристаллических пород горного оформления и частично по таликам, приуроченным к разрывным нарушениям. Разгрузка подземных вод осуществляется подземным стоком по зонам региональных разломов и слоям с повышенными коллекторскими свойствами в подрусловые талики. Частично разгрузка происходит в виде наледей на поверхности вблизи зон тектонических разломов.

Таким образом, на формирование подземных вод площади существенное влияние оказывают: сплошное развитие ММП, климат, рельеф и геолого-структурные особенности района.

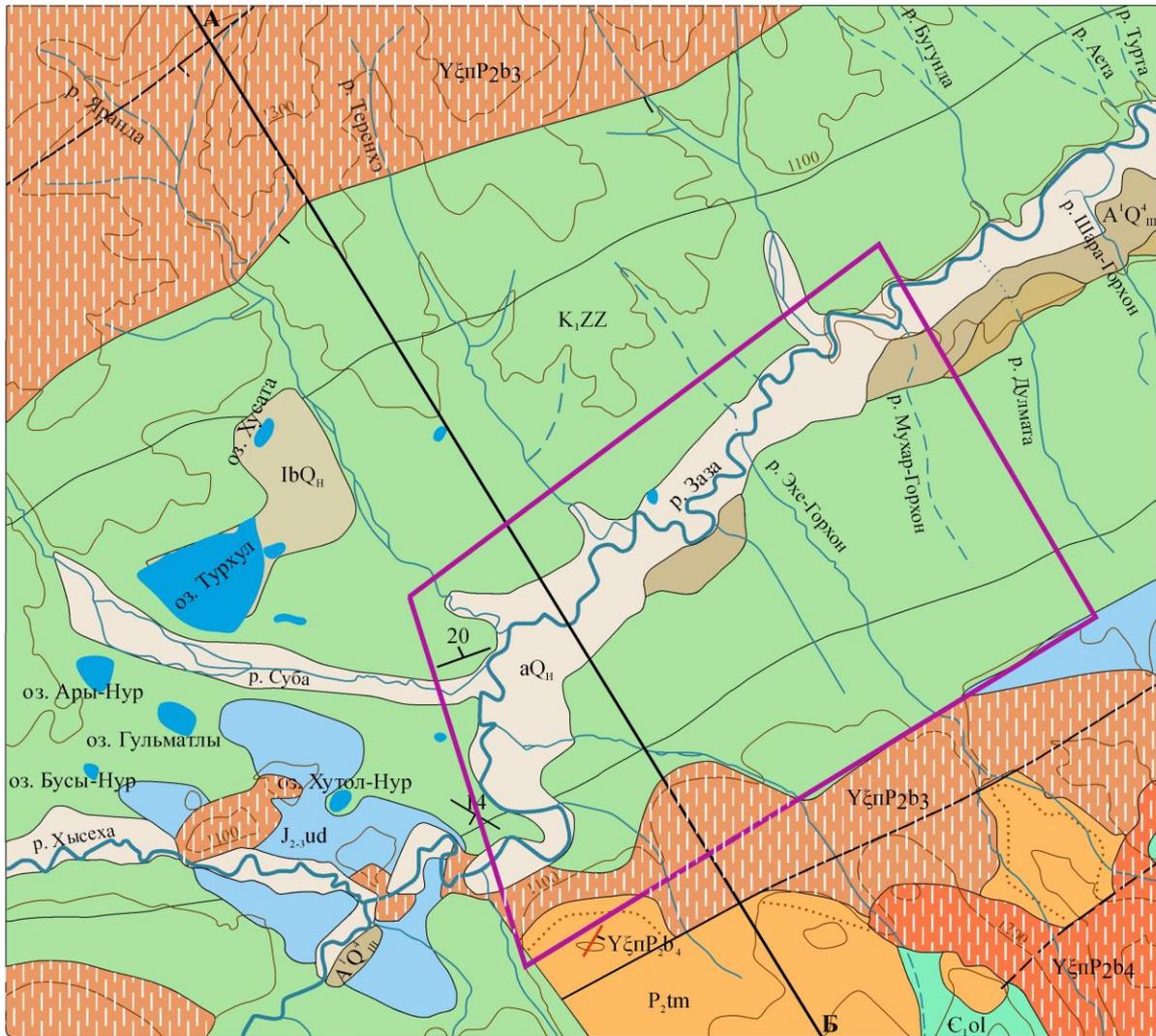
Методы и теория

Связь между геофизическими данными и свойствами недр Земли обеспечивается процессами моделирования, то есть решением прямых и обратных задач [18]. Моделирование необходимо для выбора оптимальной методики производства геофизических исследований и оценки возможности применения данных методов для решения поставленных задач [19].

Сущность моделирования сводится к аппроксимации разведываемых объектов априорными моделями, являющимися телами простой геометрической формы (шар, столб, цилиндр, пласт и др.) или сложной формы с разными контрастностями их физических свойств по сравнению с окружающей средой. Для выбранных моделей выполняется решение прямых задач с помощью численного моделирования [20].

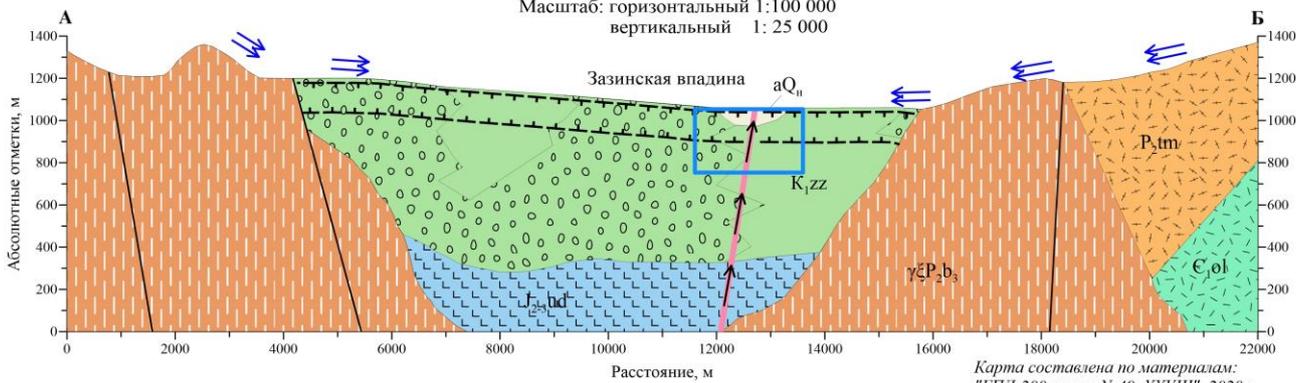
Прямая задача геофизики состоит в определении аномальных параметров физических полей по известным геометрическим характеристикам и физическим свойствам. Верификация моделирования выполняется путем решения обратной задачи (определение геометрических параметров по полученным геофизическим данным) на основе преобразования результатов решения прямой задачи к входным данным программы инверсии и в конечном итоге получения геоэлектрического разреза. Полученные результаты инверсии напрямую сравниваются с исходной моделью [21]. Решение прямой задачи однозначно, в то время как решение обратной задачи, как правило, множественно и неустойчиво [22].

Масштаб 1:100 000



Геологический разрез по линии АБ

Масштаб: горизонтальный 1:100 000
 вертикальный 1: 25 000



Карта составлена по материалам:
 "ГПД-200 листа N-49_XXVIII", 2020 г.
 Условные обозначения 15, 20, 22, 23 и 25
 вынесены Шойхоновой Т.С., 2023 г.

Условные обозначения

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
23	24	25								

Из многообразия геофизических методов в состав поисково-оценочных работ на поиск подземных вод в большинство технических заданий стандартно включена электроразведка методами сопротивления, основывающимися на дифференциации горных пород по удельному электрическому сопротивлению (УЭС) [23]. Они позволяют надежно картировать обводненные зоны, характеризующиеся пониженными значениями сопротивления.

Электротомография – передовой и широко используемый геофизический метод визуализации недр, применяемый в области гражданского строительства, экологических исследований, гидрологических исследований, разведки полезных ископаемых, а также археологического картирования [24]. Эта технология, объединяющая принципы зондирования и профилирования, позволяет получить наиболее плотную сеть площадных наблюдений и, соответственно, значительно увеличить детальность исследования приповерхностных отложений мощностью до десятков метров в зависимости от используемой установки и характеристик разреза. По результатам измерений этим методом можно получить такие важные характеристики разломных зон, как положение и, предположительно, наклон сместителя, характерные интервалы удельного сопротивления.

При выполнении прямого моделирования применялась комбинация прямой и обратной трехэлектродной установок, а также установка Шлюмберже. Использование прямой и обратной трехэлектродной установки позволяет обеспечить наибольшую глубинность и разрешающую способность среди стандартных установок, совмещая это с помехоустойчивостью и высоким уровнем сигнала. Установка Шлюмберже обладает одинаковой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам, являясь компромиссом между установками Веннера и дипольной, глубинностью на 10 % большей, чем у Веннера, и средним горизонтальным покрытием [25].

При проведении электротомографии в Республике Бурятия использовалась 16-ти канальная электроразведочная станция «Скала-64» [26]. Применялась прямая трехэлектродная установка с выносным электродом Тх на расстоянии 1 км. Расстояние между электродами было принято в 5 м. Оно выбиралось как наиболее оптимальное для требуемой глубинности исследования и разрешающей способности [27]. Выходное напряжение составило 204 В. Продолжительность импульса тока – 80 мс, паузы – 20 мс.

Рис. 1. Геологическое строение участка работ: 1 – аллювиальные (aQ_n) русловые и пойменные отложения. Галька, пески, валуны; 2 – озерные, озерно-болотные (lbQ_n) пески, суглинки, глины, илы, торфяники, сапропели; 3 – аллювий первой ($a^1Q^{4_{III}}$) террасы рек. Пески, супеси, галечники, валуны; 4 – аллювий второй ($a^2Q^{3_{III}}$) террасы рек. Пески, супеси, галечники, валуны; 5 – Зазинская свита (K_{1zz}). Песчаники, алевролиты, аргиллиты, битуминозные сланцы, мергели, фосфатно-сидеритовые породы. В прибортовых частях впадины – Эндодинская свита (K_{1en}). Конгломераты, конглобрекци, гравелиты; 6 – Удинская свита не расчлененная (J_{2-3ud}). Трахиандезитобазальты, трахиандезиты, трахиты, их туфы, ингимбриты, туффиты, гравелиты, песчаники, алевролиты, аргиллиты; Бичурский комплекс габбро-монокит-гранитовый (7, 8): 7 – четвертая фаза: гранитосиенит-порфиры; 8 – третья фаза (γP_2b_3): граниты и лейкограниты умереннощелочного, местами нормального ряда, граносиениты; 9 – Тамирская свита (P_2tm). Трахириолиты, трахиродациты, их туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты; 10 – Олдындинская свита (ϵ_{1ol}). Андезиты, андезибазальты, дациты, риолиты, трахибазальты и их туфы, песчаники, алевролиты, известняки; 11 – зона контактовых роговиков, мощность которой не выдерживается в масштабе карты; Разрывные нарушения (12–15): 12 – сбросы главные достоверные; 13 – второстепенные достоверные; 14 – второстепенные предполагаемые; 15 – разломная зона; литология (16–19): 16 – трахириолиты; 17 – трахиандезитобазальты, трахибазальты; 18 – риолиты; 19 – конгломераты; прочие обозначения (20–25): 20 – тепловой поток; 21 – наклонное залегание слоистости (цифра – угол падения); 22 – региональный сток из кристаллических пород горного обрамления; 23 – зона многолетнемерзлых пород; 24 – граница лицензионного участка; 25 – контур для построения упрощенных геологических моделей

Fig. 1. Geological structure of the exploration area: 1 – alluvial (aQ_n) channel and flood-plain deposits. Pebbles, sands, boulders; 2 – lacustrine, lacustrine-boggy (lbQ_n) sands, loams, clays, silts, peat beds, sapropels; 3 – alluvium of the first ($a^1Q^{4_{III}}$) river terrace. Sands, sandy loams, pebbles, boulders; 4 – alluvium of the second ($a^2Q^{3_{III}}$) river terrace. Sands, sandy loams, pebbles, boulders; 5 – Zazinskaya suite (K_{1zz}). Sandstones, aleurolites, argillites, bituminous shales, marls, phosphate-silerite rocks. In the cutoff parts of the cavity, there is the Endodinskaya suite (K_{1en}). Conglomerates, conglobreccias, gravelstones; 6 – undissected Udinskaya suite (J_{2-3ud}). Trachyandesitebasalts, trachyandesites, trachytes, their tuffs, ingimbrites, tuffites, gritstones, sandstones, aleurolites, argillites; Bichurskiy complex gabbro-monocyte-granite (7, 8): 7 – fourth phase: granitosyenite-porphiry; 8 – third phase (γP_2b_3): granites and leucogranites of a moderately alkaline, sometimes normal line, granosyenites; 9 – Tamirskaya suite (P_2tm). Trachyrhyolites, trachyrodacites, their tuffs, tuff sandstones, tuff aleurolites; 10 – Oldyndinskaya suite (ϵ_{1ol}). Andesites, andesibasalts, dacites, rhyolites, trachybasalts and their tuffs, sandstones, aleurolites, limestones; 11 – zone of contact hornfels, the thickness of which is not maintained on the scale of the map; fractures (12–15): 12 – main reliable faults; 13 – minor reliable faults; 14 – minor supposed faults; 15 – fault zone; lithology (16–19): 16 – trachyrhyolites; 17 – trachyandesitebasalts, trachybasalts; 18 – rhyolites; 19 – conglomerates; other designations (20–25): 20 – heat flow; 21 – oblique bedding (number – dip angle); 22 – regional runoff from crystalline rocks of the mountain margins; 23 – permafrost zone; 24 – lease boundary; 25 – contour for making simplified geological models

Результаты и их обсуждение

На первом этапе решения прямых задач электроразведки были составлены две упрощенные геоэлектрические модели. За основу формирования упрощенных моделей был взят опорный геологический профиль и результаты ранее проведенных работ на Еравнинской площади. Модели состоят из двух слоев: первый слой – меловые отложения, сложенные переслаиванием аргиллитов и алевролитов со значениями сопротивления 200 Ом·м, и второй слой – перекрывающие их породы четвертичной системы, представленные гравийно-галечными отложениями со значениями сопротивления 1000 Ом·м (рис. 2).

Модель А осложнена сплошными ММП, которые делятся на два температурных режима: низкотемпературная мерзлота (температура которой близка к $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ с сопротивлением 1500 Ом·м) и высокотемпературная (температура которой близка к $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ с сопротивлением 800 Ом·м). Модель В осложнена прерывистыми ММП, имеющими значения УЭС 1500 Ом·м.

Перед проведением моделирования требуется обоснование параметров удельного электрического сопротивления (УЭС), заданных для искомым объектов [28]. В данном исследовании такими объек-

тами являются разломная зона и талики. Их значения сопротивления, используемые в моделях, задавались на основе расчетов зависимости Арчи–Дахнова [29, 30].

По гидрогеологическим данным минерализация подземных вод исследуемой территории составляет 0,6–0,7 г/л [31]. УЭС воды может быть оценено по формуле [32]:

$$\rho_{\text{В}} = 8.4/M,$$

где M – минерализации воды (г/л). Диапазон сопротивления подземных вод равен 10–15 Ом·м. Далее, воспользовавшись формулой Арчи–Дахнова, было рассчитано УЭС водонасыщенных пород:

$$\rho_{\text{В.П}} = P_{\text{П}}\rho_{\text{В}}$$

$$P_{\text{П}} = ak_{\text{П}}^{-m},$$

где $\rho_{\text{В.П}}$ – УЭС водовмещающей породы; $\rho_{\text{В}}$ – УЭС воды; $P_{\text{П}}$ – параметр пористости; a – «литологический» коэффициент, изменяющийся от 0,8 до 1; $k_{\text{П}}$ – коэффициент пористости (для песчаников равен 0,5); m – коэффициент цементации, зависящий от извилистости пор и принимающий значения от 1,3 до 3 (для песков и рыхлых песчаников $m=1,3$, для сильно сцементированных пород $m=3$).

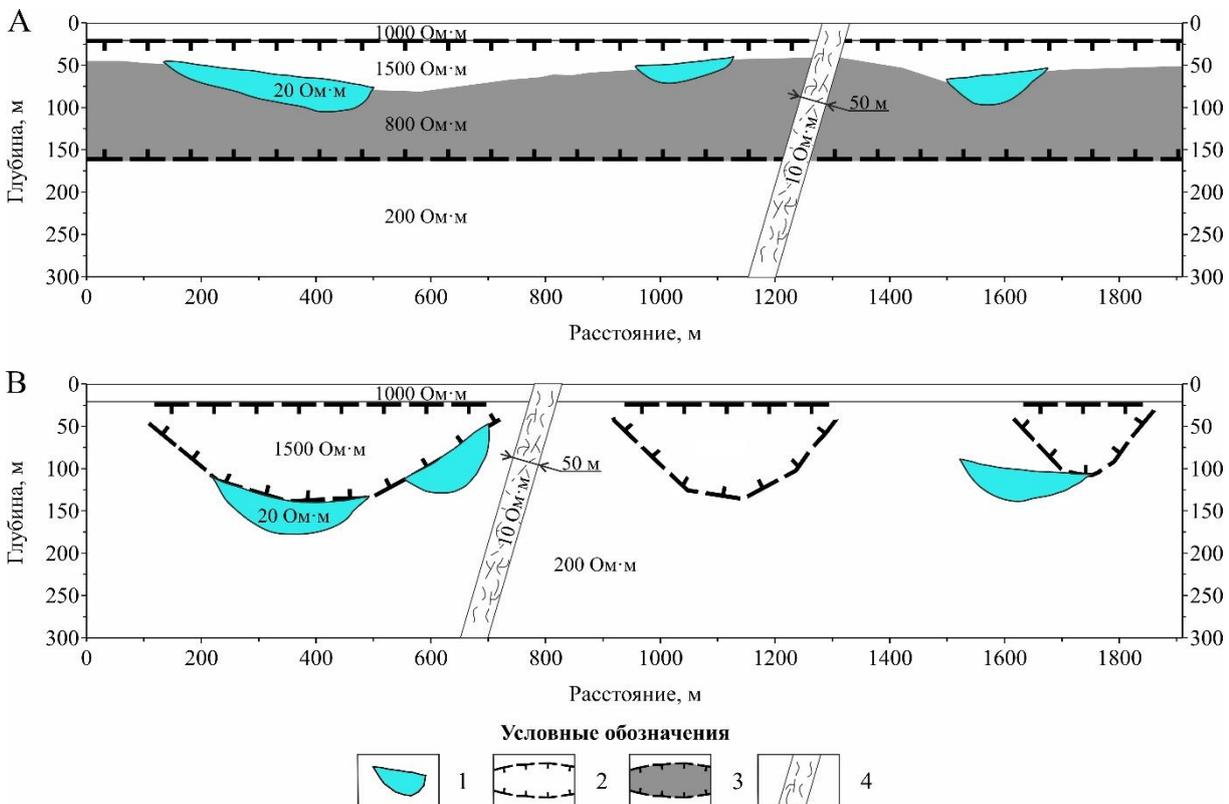


Рис. 2. Геоэлектрические модели со сплошной мерзлотой (А) и с прерывистой мерзлотой (В): 1 – таликовая зона; 2 – высокотемпературные ММП; 3 – низкотемпературные ММП; 4 – разломная зона

Fig. 2. Geoelectric models with continuous permafrost (A) and discontinuous permafrost (B): 1 – talik zone; 2 – high-temperature permafrost; 3 – low-temperature permafrost; 4 – fault zone

Приняв коэффициент пористости, равным 0,8 [33], было рассчитано УЭС водовмещающей породы. Полученные значения сопротивления, 10 Ом·м для разлома и 20 Ом·м для таликов, были использованы при последующих расчетах.

Численное моделирование выполнялось в программном обеспечении ZondRes2D [34]. Все расчеты проводились для двух типов электроразведочных установок: совмещенной прямой и обратной трехэлектродной и установки Шлюмберже. В параметрах геометрии установки задавались: количество электродов, равное 64, и сдвиг электроразведочной косы на 32 электрода. Шаг между пикетами был равен 5 и 10 м, и число сдвигов, равное 10 или 4 в зависимости от шага. Инверсия для комбинации прямой и обратной трехэлектродной установки с шагом 5 м выполнялась до глубины 150 м и для шага 10 м – до глубины 200 м. Глубинность инверсии при установке Шлюмберже с шагом 5 и 10 м составила 105 и 165 м соответственно.

К факторам, осложняющим модель, относятся: изменение геометрии объектов, в частности мощность таликов, с вариативностью 20–30, 40–50 и 80–90 м; наличие или отсутствие разломной зоны и ее угол наклона; вариативность значений УЭС ММП. Всего применялось три варианта величин значений УЭС в зависимости от температурного режима ММП (таблица): вариант № 1 – значения по априорным данным, полученным в результате полевых наблюдений; варианты № 2, 3 – теоретически заданные значения для моделирования. Такой широкий диапазон значений сопротивления обусловлен температурой, наличием льда, а также геологической обстановкой [35]. Связь между температурными режимами и значениями УЭС объясняется тем, что для высокотемпературных многолетнемерзлых толщ характерны пониженные значения УЭС, и наоборот [36]. Для данной площади характерны значения 0,4 °С для высоких температур и, следовательно, для более низких –2,5 °С.

Таблица. Значения сопротивления для разных температурных режимов ММП

Table. Resistivity values for different temperature regimes of permafrost

Вариант Variant	Значения сопротивления высокотемпературной толщи ММП Resistivity values of the high-temperature permafrost	Значения сопротивления низкотемпературной толщи ММП Resistivity values of the low-temperature permafrost
	Ом·м/ohm·m	
1	800	1500
2	2400	4500
3	8000	15000

Всего было построено порядка 70 моделей с различными комбинациями параметров сопротивления и осложняющих факторов (например, модель со сплошной мерзлотой, наличием разломной зоны, таликами мощностью 80–90 м и значениями УЭС 2400 и 4500 Ом·м). Среднеквадратическое отклонение между синтетическими данными и данными, полученными по результатам моделирования, для обеих моделей составило 0,5 %.

На основе результатов решения прямой задачи электроразведки была выполнена верификация полученных данных путем решения обратной задачи электроразведки и сделаны четыре блока выводов.

Первый рассматриваемый блок выводов связан со значениями УЭС ММП. Одной из наших задач являлось дифференцирование ММП по температурам. Для модели В толщина ММП была расчленена на два равных по мощности слоя с вариантами УЭС № 1 и № 2. Шаг между электродами был равен 5 и 10 м. После проведения численных расчетов для обеих установок было выявлено, что определить наличие разнотемпературных ММП не является возможным. Это связано с недостаточной чувствительностью метода для расчленения ММП по температуре в данной геологической ситуации.

Следующей задачей являлось рассмотрение влияния значений УЭС на результирующие разрезы. При моделировании использовались обе модели – А и В – с тремя вариантами значений сопротивления и с шагом между электродами 5 и 10 м. На рис. 3 представлены результаты моделирования трехэлектродной установки с шагом между электродами 10 м и вариантами значений сопротивления № 1 и № 2 для модели А. Видно, что на разрезах с низкими значениями УЭС для варианта № 1 (рис. 3, а, б) сплошная мерзлота прослеживается непрерывно, что соответствует заданной модели. В то время как для варианта № 2 с более высокими значениями УЭС (рис. 3, с, д) мерзлая толща в местах с небольшой мощностью прерывается. Вероятнее всего, при расположении высокоомного объекта между двумя объектами с более низкими значениями УЭС сплошная мерзлота выделяется как прерывистая, что не соответствует заданной геологической ситуации. Такая ситуация может привести к неверному истолкованию результатов при интерпретации данных (например, ложное предположение о наличии разлома).

Следующий блок выводов связан с таликовыми зонами. Основными задачами являлись оценка возможности определения наличия таликов, их положения по глубине, а также мощности. Для выполнения численного моделирования, как и в предыдущем блоке, использовались две модели – А и В. Моделирование производилось для двух установок с шагом между электродами 5 и 10 м. В результате было

установлено, что кровля таликовых зон отбивается надежно при сплошной мерзлоте. А при расположении таликов под прерывистой мерзлотой определение их наличия затруднительно. Надежное определение мощности таликов по результатам решения

обратной задачи электроразведки не является возможным. Однако при увеличении их мощности низкоомная область аномалии таликовых зон значительно расширяется, при этом зависимость от значений УЭС и мощности толщи ММП отсутствует.

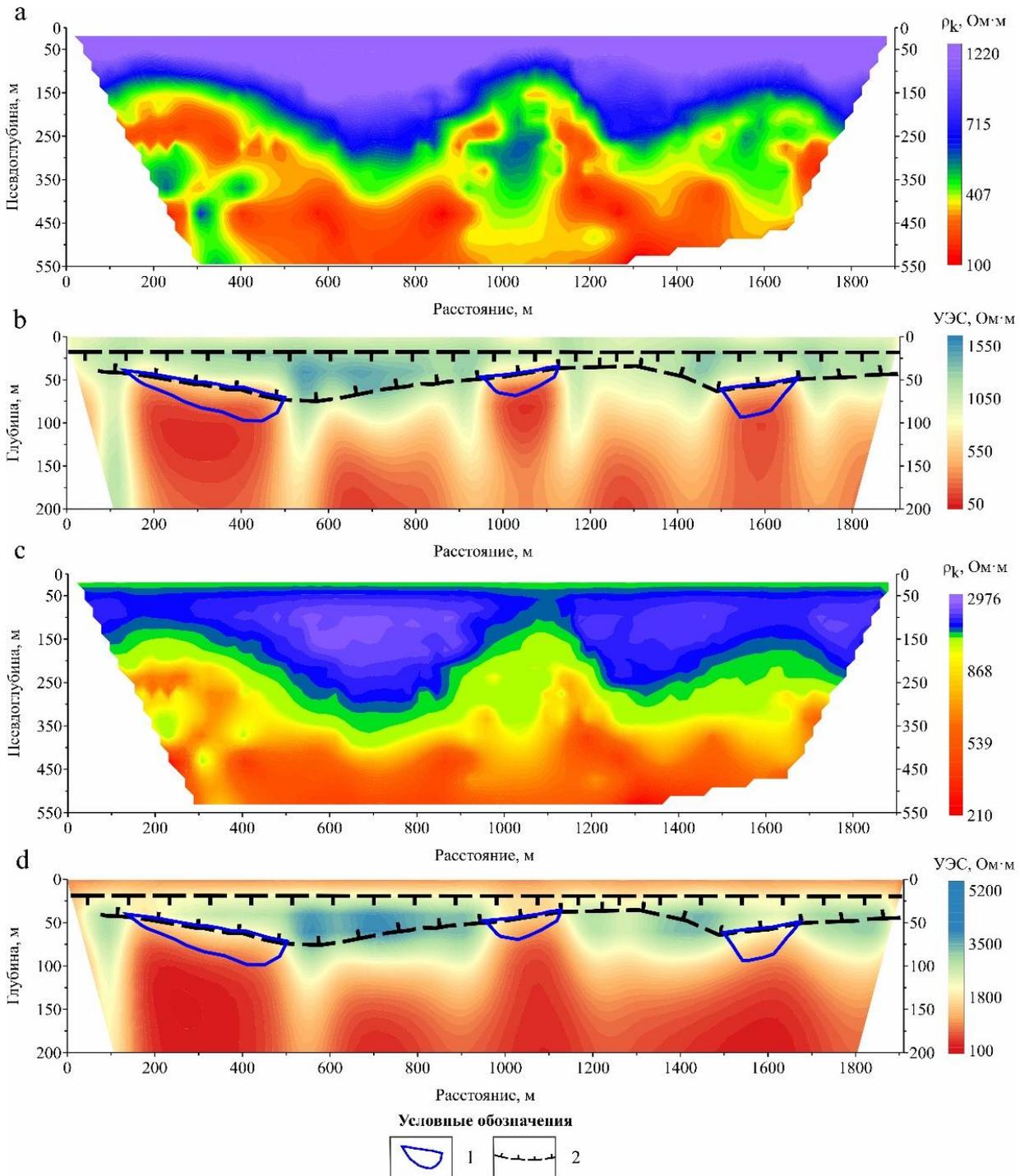


Fig. 3. Results of solving the direct and inverse problems of electrical resistivity survey for a pole-dipole array with electrode distance of 10 m and resistivity values variant no. 1 (a and b respectively), variant - no. 2 (c and d respectively) for model A: 1 – contour of talik zones; 2 – permafrost zone

В качестве примера представлены результаты решения прямых и обратных задач электроразведки для трехэлектродной установки с шагом между электродами 10 м для модели А (рис. 4). При численном моделировании рассматривалось изменение мощности таликов от 20–30 м (рис. 4, а, б) до 80–90 м (рис. 4, с, д). На рисунках видно, что при мощности таликов 80–90 м низкоомная аномалия таликовых зон больше, чем при 20–30 м.

В третьем блоке выводов рассматривалась возможность определения наличия или отсутствия разломной зоны и ее угол наклона. Численное мо-

делирование моделей А и В выполнялось для обеих установок с шагом между электродами 5 и 10 м. При моделировании с учетом осложняющих факторов, описанных выше, в большинстве моделей использовался угол наклона разломной зоны от дневной поверхности около 80°. Для сравнения некоторые модели были рассчитаны также с углом 45°. Результаты решения как прямых, так и обратных задач электроразведки показали, что метод электротомографии уверенно определяет наличие разломной зоны, но угол наклона достоверно определить затруднительно.

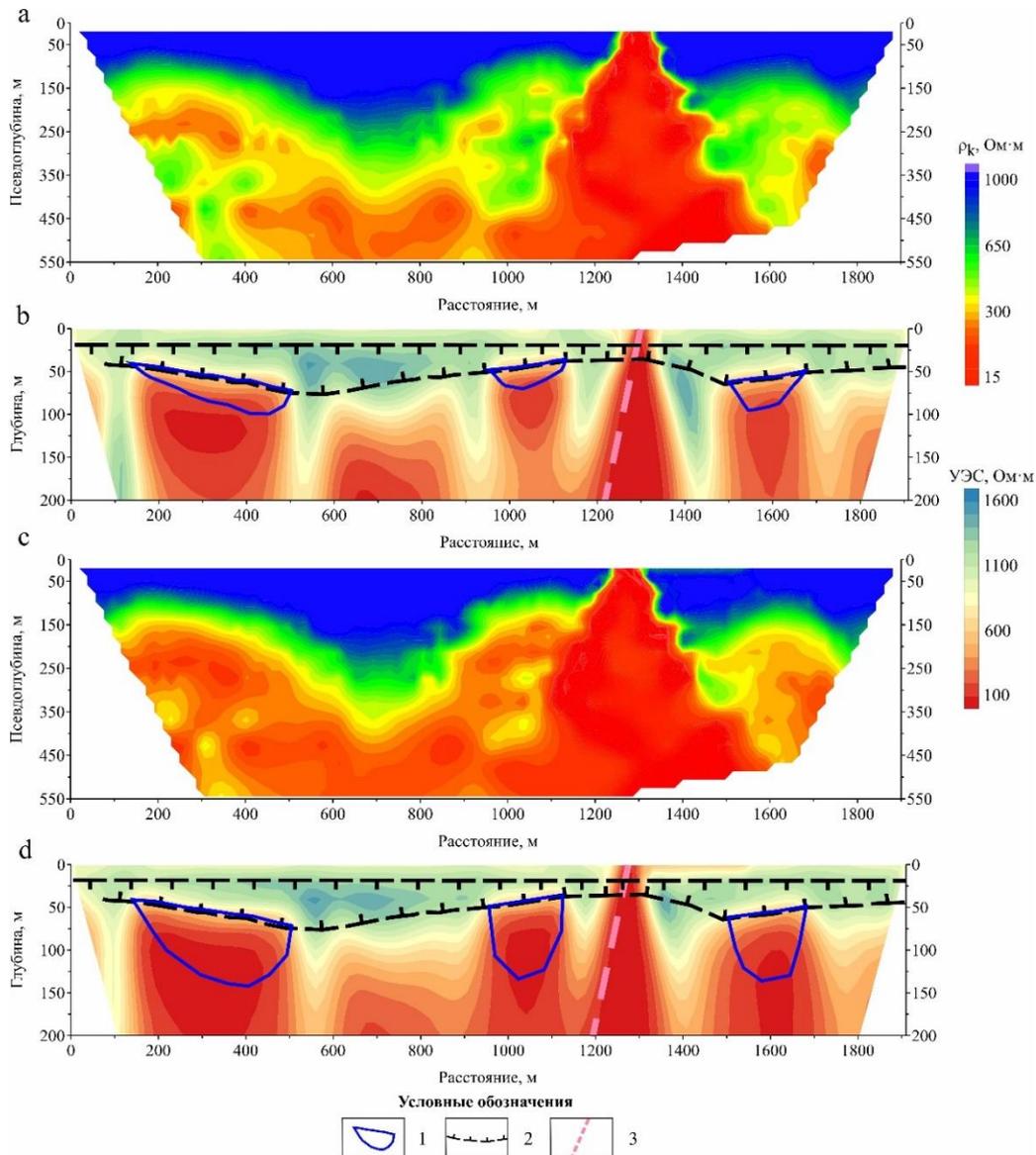


Рис. 4. Результаты решения прямой и обратной задачи электроразведки для трехэлектродной установки с шагом 10 м и варианта значений сопротивлений № 1 с мощностью таликов 20–30 м (а и б соответственно) и 80–90 м (с и д соответственно) для модели А с наличием разломной зоны: 1 – контур таликовых зон; 2 – зона ММП; 3 – разломная зона

Fig. 4. Results of solving the direct and inverse problems of electrical survey for a pole-dipole array with electrode distance of 10 m and resistivity value variant no. 1 with a talik thickness of 20–30 m (a and b respectively) and 80–90 m (c and d respectively) for model A with a fault zone: 1 – contour of talik zones; 2 – permafrost zone; 3 – fault zone

В заключительном блоке выводов рассматривались задачи определения оптимальной геометрии установки. После проведения моделирования с изменением различных параметров установок, а также внесения различных осложняющих факторов, было выявлено влияние геометрии установки на результаты инверсии. При использовании комбинации прямой и обратной трехэлектродной установки на результатах решения обратной задачи электроразведки модели А возникают «затяжки» (в данном контексте подразумеваются некоторые высокоомные субвертикальные структуры, оконтуривающие таликовые зоны) (рис. 5), и при интерпретации полученных разрезов данный факт необходимо учитывать. При моделировании установки

Шлюмберже таких структур не возникает. Влияние шага между электродами также необходимо учитывать, так как при его уменьшении «затяжки» выражены менее контрастно.

В 2020 г. в долине р. Зазы проводились наземные геофизические работы методом электротомографии с целью поиска подземных вод для обеспечения производственно-технического водоснабжения объектов Озерного ГОКа.

При электротомографических измерениях использовалась прямая трехэлектродная установка с выносным электродом Тх на 1 км и с шагом между электродами 5 м. Тип установки и расстояние между электродами выбирались исходя из результатов предварительного численного моделирования.

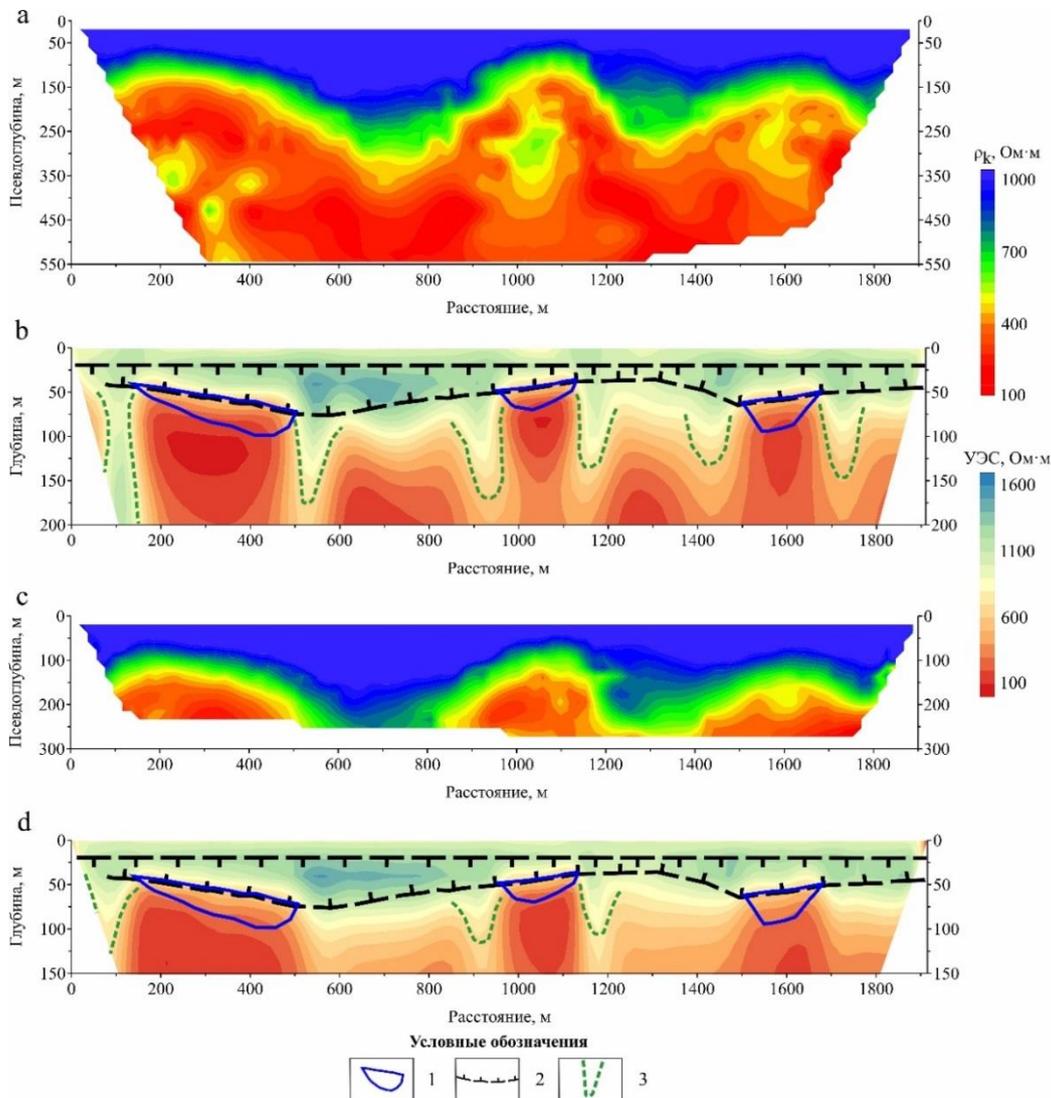


Рис. 5. Результаты решения прямой и обратной задачи электроразведки для трехэлектродной установки с шагом 5 м (а и b соответственно) и 10 м (с и d соответственно) для модели А: 1 – контур таликовых зон; 2 – зона ММП; 3 – высокоомные субвертикальные структуры, оконтуривающие таликовые зоны

Fig. 5. Results of solving the direct and inverse problems of electrical survey for a pole-dipole array with electrode distance of 5 m (a and b respectively) and 10 m (c and d respectively) for model A: 1 – contour of talik zones; 2 – permafrost zone; 3 – high-resistivity subvertical structures outlining the talik zones

На рис. 6 представлены: разрез кажущегося сопротивления (рис. 6, *a*), полученный по результатам съёмки методом электротомографии; разрезы по УЭС, полученные в результате решения одномерной (рис. 6, *b*) и двумерной (рис. 6, *c*) обратных задач электроразведки; схематический геологический разрез, построенный по данным бурения (рис. 6, *d*), по одному из профилей на участке работ.

По результатам решения обратной двумерной задачи электроразведки на разрезах выделен высокоомный контур зоны ММП мощностью 20–30 м, относящийся к сплошному типу распространения мерзлоты. Также были оконтурены зоны низких значений УЭС, предположительно, являющиеся таликами. По зонам таликов выбирались места заложения скважин и в результате буровых работ был выявлен водоносный горизонт на интервале глубин от 74 до 95 м.

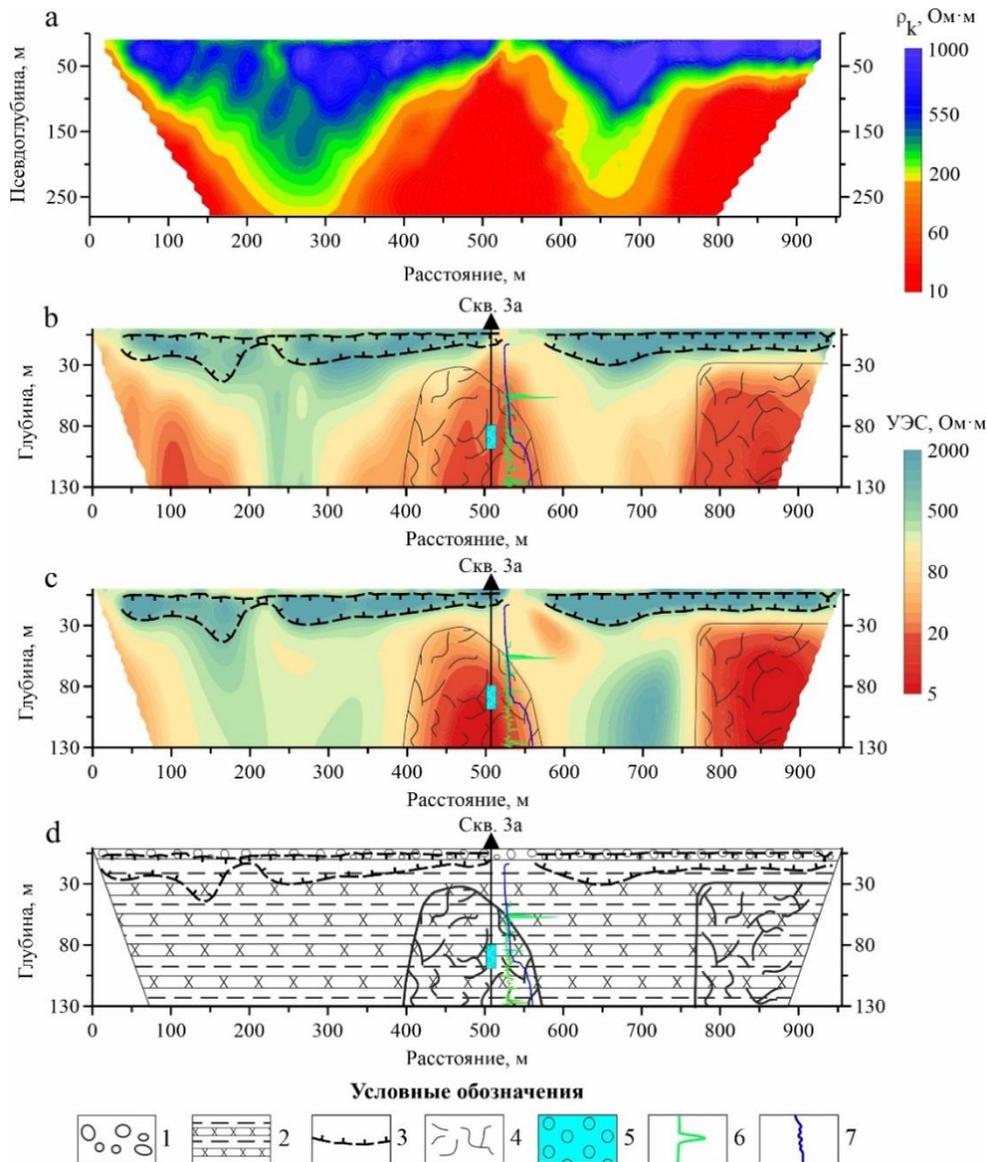


Рис. 6. Разрезы по профилю № 5: *a*) по параметру кажущегося сопротивления; *b*) по параметру УЭС на основе решения одномерной обратной задачи электроразведки; *c*) по параметру УЭС на основе решения двумерной обратной задачи электроразведки; *d*) схематический геологический разрез, составленный по данным бурения. 1 – валунно-галечные отложения; 2 – переслаивание аргиллитов и алевролитов; 3 – зона ММП; 4 – зона трещиноватости; 5 – обводненный интервал; 6 – кривая каротажа сопротивления; 7 – кривая термометрии

Fig. 6. Sections along profile no. 5: *a*) by the apparent resistivity parameter; *b*) by the electrical resistivity parameter based on the solution of a one-dimensional inverse problem of electrical survey; *c*) by the electrical resistivity parameter based on the solution of a two-dimensional inverse problem of electrical survey; *d*) schematic geological section based on drilling data. 1 – boulder-pebble deposits; 2 – interbedding of argillites and aleurolite; 3 – permafrost zone; 4 – fracture zone; 5 – watering interval; 6 – electrical resistivity logging curve; 7 – thermometry curve

Заключение

По результатам выполненного численного моделирования были сделаны выводы о возможности применения метода электротомографии на поиск подземных вод с учетом осложняющих факторов. Каждый фактор по отдельности был рассмотрен на основе двух упрощенных геоэлектрических моделей. Так, было установлено, что многолетнемерзлая толща не может быть надежно дифференцирована по температурам из-за их малого контраста. По оценке возможности определения наличия таликов, их положения по глубине, а также мощности, был сделан вывод о том, что кровля таликовых зон отбивается надежно при сплошной мерзлоте, в то время как под прерывистой мерзлотой определение их наличия затруднительно. Надежное определение мощности таликов по результатам решения обратной задачи электроразведки не является возможным. Также результаты решения как прямых, так и обратных задач электроразведки показали, что метод электротомографии уверенно определяет наличие разломной зоны, но угол наклона достоверно определить затруднительно.

Таким образом, выполненное численное моделирование показало, что для картирования подземных вод в данной геологической обстановке рекомендуется применение метода электротомографии с шагом по профилю 5 м. При необходимости достижения большей глубины исследований межэлектродное расстояние может быть увеличено до 10 м.

Результаты наземных геофизических работ 2020 г. в долине р. Заы показали эффективность применения электротомографических исследований прямой трехэлектродной установкой с шагом между электродами 5 м на поиск подземных вод при наличии осложняющих геологических факторов в виде многолетнемерзлых пород, таликов и разломной зоны. Путем решения одномерной и двумерной обратных задач электроразведки были околтурены перспективные на водопоявление зоны, характеризующиеся низкими значениями УЭС, которые были успешно заверены буровыми работами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrical resistivity tomography for delineating groundwater potential zones in fractured metasedimentary rocks, Lesser Himalayas, Pakistan / M. Farooq, U.B. Nisar, S. Khan, T. Jalees, M.R. Mughal, L. Ali, T. Ahmed // *Journal of Earth System Science*. – 2022. – Vol. 131. – № 2. – P. 1–14.
2. 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.
3. Сидорова Л.П., Низамова А.Ф. Подземные воды – важнейший регулятор пресной воды. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 146 с.
4. Романовский Н.Н. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения // *Вестник Московского университета. Серия геол.* – 1972. – № 1. – С. 23–34.
5. Goldman M., Neubauer F.M. Groundwater exploration using integrated geophysical techniques // *Surveys in geophysics*. – 1994. – Vol. 15. – P. 331–361.
6. Электротомография на отработанных россыпных месторождениях золота / П.С. Осипова, В.В. Оленченко, А.С. Калганов, А.В. Чекрыжов // *Инженерная и рудная геофизика 2022: Сборник материалов 18-ой научно-практ. конф. и выставки.* – Геленджик, 05–08 сентября 2022. – М.: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2022. – С. 406–410.
7. Lapenna V., Perrone A. Time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT) for landslide monitoring – recent advances and future directions // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – № 3. – P. 1–16.
8. Distribution and degradation processes of isolated permafrost near buried oil pipelines by means of electrical resistivity tomography and ground temperature monitoring: a case study of Da Xing'anling Mountains, Northeast China / G. Wu, G. Li, Y. Cao, D. Chen, S. Qi, F. Wang, K. Gao, Q. Du, X. Wang, H. Jing, Z. Zhang // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – № 3. – P. 1–24.
9. Hydrological connectivity in a permafrost tundra landscape near Vorkuta, North-European Arctic Russia / N. Tananaev, V. Isaev, D. Sergeev, P. Kotov, O. Komarov // *Hydrology*. – 2021. – Vol. 8. – № 3. – P. 1–15.
10. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site / J.E. Chambers, O. Kuras, P.I. Meldrum, R.D. Ogilvy, J. Hollands // *Geophysics*. – 2006. – Vol. 71. – № 6. – P. B231–B239.
11. Saad R., Nawawi M.N.M., Mohamad E.T. Groundwater detection in alluvium using 2-D electrical resistivity tomography (ERT) // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. – 2012. – Vol. 17. – P. 369–376.
12. Noel M., Xu B. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study // *Geophysical Journal International*. – 1991. – Vol. 107. – № 1. – P. 95–102.
13. Alshehri F., Abdelrahman K. Groundwater resources exploration of Harrat Khaybar area, northwest Saudi Arabia, using electrical resistivity tomography // *Journal of King Saud University-Science*. – 2021. – Vol. 33. – № 5. – P. 1–7.
14. Exploring the capabilities of electrical resistivity tomography to study subsea permafrost / M. Arboleda-Zapata, M. Angelopoulos, P.P. Overduin, G. Grosse, B.M. Jones, J. Tronicke // *The Cryosphere*. – 2022. – Vol. 16. – № 10. – P. 1–34.
15. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексование геофизических методов. 2-е изд. испр. и доп. – М.: ВНИИГеосистем, 2012. – 346 с.
16. Платов В.С. ГДП-200 листа N-49-XXVIII (Еравнинская площадь). – Улан-Удэ: ГИН СО РАН БФ ФБУ «ТФГИ по СФО», 2013. – 460 с.

17. Роль электротомографии и электромагнитных зондирований в поисковооценочных 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.
18. Pace F., Santilano A., Godio A. A review of geophysical modeling based on particle swarm optimization // *Surveys in Geophysics*. – 2021. – Vol. 42. – № 3. – P. 505–549.
19. Моделирование данных сейсмотомографии и электротомографии для песчано-глинистого разреза с наличием приповерхностных скоплений газа / Н.В. Куликова, С.М. Данильев, Н.Н. Ефимова, А.И. Куликов // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 2 (44). – С. 26–30.
20. Шеин А.Н., Потапов В.В. Математическое моделирование в разведочной геофизике. – Чита: ЗабГУ, 2017. – 125 с.
21. Обзор артефактов инверсии данных электротомографии для антропогенных форм рельефа при геотехническом мониторинге / П.А. Казначеев, Р.А. Жостков, Д.А. Ушаков, И.Н. Модин, М.К. Турарова // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: Мат-лы Общеросс. научно-практ. конф. – М., 15 марта 2021. – М.: Геомаркетинг, 2021. – С. 145–152.
22. Новиков П.В. Решение прямых и обратных задач электромагнитных зондирований на персональном компьютере. – М.: МГРИ, 2019. – 44 с.
23. Шапаренко И.О., Суродина И.В., Неведрова Н.Н. Трёхмерное моделирование для обоснования результатов электротомографии // Труды Международной конференции «Вычислительная математика и математическая геофизика». – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2018. – С. 401–406.
24. A review of electrical resistivity tomography applications in underground imaging and object detection / J.D. Ducut, M. Alipio, P.J. Go, R. Concepcion II, R.R. Vicerra, A. Bandala, E. Dadios // *Displays*. – 2022. – Vol. 73. – P. 102208.
25. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн, А.К. Манштейн, В.А. Белобородов // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
26. Скала 64K15E // Официальный сайт Конструкторского Бюро Электротометрии. – 2023. URL: <https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-64k15/> (дата обращения 09.07.2023).
27. 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.
28. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. – М.: Недра, 1987. – 192 с.
29. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. – М.: Недра, 1975. – 343 с.
30. Archie G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // *Transactions of the AIME*. – 1942. – Vol. 146. – № 01. – P. 54–62.
31. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шенькман Б.М. Естественные ресурсы подземных вод юга Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1976. – 125 с.
32. Хмельвской 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.
33. Геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия территории листов №48-137-А, Б: отчет о геолого-гидрогеологической и инженерно-геологической съемках масштаба 1:50000 в 1961–1964 гг. в 3х т. / Л.А. Сироткин, Б.Л. Шурыгин, Б.М. Шенькман, М.И. Серебренников, В.К. Васильева. – Иркутск: Академия наук СССР СО ИЗК, 1964. – Т. 1. – 900 с.
34. Программа ZondRes2d // Zond Software. – 2023. URL: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (дата обращения 10.07.2023).
35. Об электропроводности многолетнемерзлых горных пород / В.Н. Захаренко, Ю.К. Краковецкий, В.П. Парначев, Л.Н. Попов // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 359. – С. 182–187.
36. Ефремова Д.Н., Оленченко В.В., Гораявчева А.А. Двумерная геоэлектрическая модель широтной зональности многолетнемерзлых толщ // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 3. – С. 102–107.

Информация об авторах

Антон Витальевич Лазурченко, инженер департамента геофизики «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. alazurchenko@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>

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>

Анастасия Юрьевна Белова, младший научный сотрудник департамента геофизики «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. abelova@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-7015-6049>

Станислав Андреевич Терешкин, младший научный сотрудник департамента геофизики «Сибирской Школы Геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. stereshkin@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8828-9771>

Поступила: 08.08.2023

Прошла рецензирование: 12.09.2023

Принята к публикации: 23.05.2024

REFERENCES

1. Farooq M., Nisar U.B., Khan S., Jalees T., Mughal M.R., Ali L., Ahmed T. Electrical resistivity tomography for delineating groundwater potential zones in fractured metasedimentary rocks, Lesser Himalayas, Pakistan. *Journal of Earth System Science*, 2022, vol. 131, no. 2, pp. 1–14.
2. 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.
3. Sidorova L.P., Nizamova A.F. *Groundwater is the most important regulator of fresh water*. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2016. 146 p. (In Russ.)
4. Romanovskiy N.N. Talik in the area of permafrost and the scheme of their subdivision. *Bulletin of Moscow University. Series geol*, 1972, no. 1, pp. 23–34. (In Russ.)
5. Goldman M., Neubauer F.M. Groundwater exploration using integrated geophysical techniques. *Surveys in geophysics*, 1994, vol. 15, pp. 331–361.
6. Osipova P.S., Olenchenko V.V., Kalganov A.S., Chekryzhov A.V. Electrical resistivity tomography at worked-out alluvial gold deposits. *Engineering and ore geophysics 2022. Collection of materials of the 18th scientific and practical conference and exhibition*. Moscow, September 05–08, 2022. Moscow, LLC «EAGE GEOMODEL» Publ., 2022. pp. 406–410. (In Russ.)
7. Lapenna V., Perrone A. Time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT) for landslide monitoring: Recent advances and future directions. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 1–16.
8. Wu G., Li G., Cao Y., Chen D., Qi S., Wang F., Gao K., Du Q., Wang X., Jing H., Zhang Z. Distribution and degradation processes of isolated permafrost near buried oil pipelines by means of electrical resistivity tomography and ground temperature monitoring: a case study of Da Xing'anling Mountains, Northeast China. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 1–24.
9. Tananaev N., Isaev V., Sergeev D., Kotov P., Komarov O. Hydrological connectivity in a permafrost tundra landscape near Vorkuta, North-European Arctic Russia. *Hydrology*, 2021, vol. 8, no. 3, pp. 1–15.
10. Chambers J.E., Kuras O., Meldrum P.I., Ogilvy R.D., Hollands J. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, 2006, vol. 71, no. 6, pp. B231–B239.
11. Saad R., Nawawi M.N.M., Mohamad E.T. Groundwater detection in alluvium using 2-D electrical resistivity tomography (ERT). *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, vol. 17, pp. 369–376.
12. Noel M., Xu B. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophysical Journal International*, 1991, vol. 107, no. 1, pp. 95–102.
13. Alshehri F., Abdelrahman K. Groundwater resources exploration of Harrat Khaybar area, northwest Saudi Arabia, using electrical resistivity tomography. *Journal of King Saud University-Science*, 2021, vol. 33, no. 5, pp. 1–7.
14. Arboleda-Zapata M., Angelopoulos M., Overduin P.P., Grosse G., Jones B.M., Tronicke J. Exploring the capabilities of electrical resistivity tomography to study subsea permafrost. *The Cryosphere*, 2022, vol. 16, no. 10, pp. 1–34.
15. Nikitin A.A., Khmelevskoy V.K. *Integration of geophysical methods*. Moscow, VNIIGeosistem Publ., 2012. 346 p. (In Russ.)
16. Platov V.S. *GDP-200 sheet N-49-XXVIII (Eravinskaya area)*. Ulan-Ude, GIN SB RAS BF FBU «TFGI in the Siberian Federal District» Publ., 2013. 460 p. (In Russ.)
17. Shkirya M.S., Badminov P.S., Tereshkin S.A., Bashkeev A.S., Davydenko Yu.A. The role of electrical resistivity tomography and electromagnetic sounding in search and assessment works for the water supply of Ozerny GOK. *Prospect and protection of mineral resources*, 2021, no. 12, pp. 26–34. (In Russ.)
18. Pace F., Santilano A., Godio A. A review of geophysical modeling based on particle swarm optimization. *Surveys in Geophysics*, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 505–549.
19. Kulikova N.V., Danilyev S.M., Efimova N.N., Kulikov A.I. Modeling of seismic tomography and electrical tomography data for a sandy-clay section with near-surface gas accumulations. *Monitoring. Science and technology*, 2020, no. 2 (44), pp. 26–30. (In Russ.)
20. Shein A.N., Potapov V.V. *Mathematical modeling in exploration geophysics*. Chita, ZabGU Publ., 2017. 125 p. (In Russ.)
21. Kaznacheev P.A., Zhostkov R.A., Ushakov D.A., Modin I.N., Turarova M.K. Review of artifacts of electrotomography data inversion for anthropogenic landforms in geotechnical monitoring. *Study of hazardous natural processes and geotechnical monitoring in engineering surveys*. Moscow, March 21, 2021. Moscow, Geomarketing Publ., 2021. pp. 145–152. (In Russ.)
22. Novikov P.V. *Solving direct and inverse problems of electromagnetic soundings on a personal computer*. Moscow, MGRI Publ., 2019. 44 p. (In Russ.)
23. Shaparenko I.O., Surodina I.V., Nevedrova N.N. Three-dimensional modeling to substantiate the results of electrotomography. *Proc. of the International Conference. Computational Mathematics and Mathematical Geophysics*. Novosibirsk, ICM&MG Publ., 2018. pp. 401–406. (In Russ.)
24. Ducut J.D., Alipio M., Go P.J., Concepcion II R., Vicerra R.R., Bandala A., Dadios E. A review of electrical resistivity tomography applications in underground imaging and object detection. *Displays*, 2022, vol. 73, p. 102208.
25. Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A., Manstein A.K., Beloborodov V.A. Electrotomography: equipment, technique and application experience. *Geophysics*, 2012, no. 6, pp. 54–63. (In Russ.)
26. Scala 64K15E. *Official website Kbelectrometry*. (In Russ.) Available at: <https://kbelectrometry.ru/catalog/skala-64k15/> (accessed 9 July 2023).

27. 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.
28. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modeling in exploration geophysics*. Moscow, Nedra Publ., 1987. 192 p. (In Russ.)
29. Dakhnov V.N. *Geophysical methods for determining reservoir properties and oil and gas saturation of rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1975. 343 p. (In Russ.)
30. Archie G.E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 1942, vol. 146, no. 01, pp. 54–62.
31. Pinneker E.V., Pisarsky B.I., Shenkman B.M. *Natural groundwater resources in the south of Eastern Siberia*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1976. 125 p. (In Russ.)
32. 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" Publ., 1999. 184 p. (In Russ.)
33. Sirotkin L.A., Shurygin B.L., Shenkman B.M., Serebrennikov M.I., Vasiliev V.K. *Geological, hydrogeological and engineering-geological conditions of the territory of sheets No. 48-137-A, B: report on geological-hydrogeological and engineering-geological surveys at a scale of 1:50000 in 1961–1964*. In 3 vol. Irkutsk, Academy of Sciences of the USSR SO IZK Publ., 1964. Vol. 1, 900 p. (In Russ.)
34. Program ZondRes2D. *Zond Software*. (In Russ.) Available at: <http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/> (accessed 10 July 2023).
35. Zakharenko V.N., Krakovetsky Yu.K., Parnachev V.P., Popov L.N. On the electrical conductivity of permafrost rocks. *Bulletin of the Tomsk State University*, 2012, no. 359, pp. 182–187. (In Russ.)
36. Efremova D.N., Olenchenko V.V., Goreyavcheva A.A. Two-dimensional geoelectric model of latitudinal zonality of permafrost. *Interexpo Geo-Siberia*, 2018, vol. 3, pp. 102–107. (In Russ.)

Information about the authors

Anton V. Lazurchenko, Engineer, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. alazurchenko@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>

Tuyana S. Shoikhonova, Engineer-Researcher, 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>

Anastasia Yu. Belova, Junior Researcher, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. abelova@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-7015-6049>

Stanislav A. Tereshkin, Junior Researcher, Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russian Federation. stereshkin@geo.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8828-9771>

Received: 08.08.2023

Revised: 12.09.2023

Accepted: 23.05.2024