



## ГЕОФИЗИКА

Научная статья  
УДК 550.370+556  
EDN: KXUIBU  
DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-4-400-416



## Методика применения электротомографии при поиске подземных вод в условиях распространения многолетнемерзлых пород на примере Бодайбинского района Иркутской области

Т.С. Шойхонова<sup>a,✉</sup>, М.С. Шкиря<sup>b</sup>, П.Г. Бирюков<sup>c</sup>

<sup>a,c</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** В настоящее время в связи с растущим спросом на новые объекты водоснабжения возникает необходимость поиска новых источников подземных вод. Поскольку бурение скважин отличается высокой стоимостью и имеет экологические риски, актуальным становится применение геофизических методов, в частности электроразведки. Электротомография позволяет детально изучить геологическое строение и свойства водоносных горизонтов, однако четкие рекомендации для проведения электротомографических исследований при поиске подземных вод в различных геологических условиях отсутствуют. Для повышения точности и эффективности геофизических работ предлагается выполнение математического моделирования данных электротомографии, позволяющего оценить чувствительность метода и возможные ошибки измерений, а также обеспечить наиболее точные результаты. Целью проведенного исследования являлось формирование оптимальной методики поиска подземных вод посредством электротомографии в условиях распространения многолетнемерзлых пород в Бодайбинском районе, включающей рассмотрение возможных условий залегания подземных вод и математическое моделирование для оценки влияния мерзлых пород на полученные данные. Численное моделирование подтвердило эффективность использования указанного метода в районах, осложненных многолетнемерзлыми породами. Обводненные трещиноватые зоны, характеризующиеся пониженными значениями удельного электрического сопротивления, надежно идентифицировались на всех полученных данных моделирования. Результаты решения прямых и обратных задач электроразведки, сопоставленные с данными производственных работ 2020 г. в Республике Бурятия и 2022 г. в Иркутской области, показали, что электротомографические исследования, успешно подтвержденные бурением, позволяют с высокой достоверностью выделить продуктивный обводненный горизонт.

**Ключевые слова:** электротомография, численное моделирование, подземные воды, многолетнемерзлые породы

**Для цитирования:** Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Бирюков П.Г. Методика применения электротомографии при поиске подземных вод в условиях распространения многолетнемерзлых пород на примере Бодайбинского района Иркутской области // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 400–416. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-400-416>. EDN: KXUIBU.

## GEOPHYSICS

## Original article

## Methodology of using electrical tomography in groundwater exploration in permafrost conditions on example of Bodaibo district, Irkutsk region

Tuyana S. Shoykhonova<sup>a,✉</sup>, Mikhail S. Shkiryayev<sup>b</sup>, Pavel G. Biryukov<sup>c</sup>

<sup>a,c</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** Growing current demand for new water supply sources determines the need to search for new sources of groundwater. Since well drilling is expensive and environmentally risky, it is becoming relevant to use geophysical methods, in particular electrical exploration. Electrical resistivity tomography allows a detailed study of geological structure and properties of aquifers, but there are no clear recommendations for conducting electrical resistivity tomography studies when searching for groundwater in various geological conditions. To improve the accuracy and efficiency of geophysical works, it is proposed to perform mathematical modeling of electrical resistivity tomography data, which allows to assess the method sensitivity and possible measurement errors as well as to ensure the most accurate results. The purpose of the conducted study is to develop an optimal technique for groundwater exploration using electrical resistivity tomography in the conditions of permafrost.

© Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Бирюков П.Г., 2024



distribution in the Bodaibo district. The technique takes into consideration possible groundwater occurrence conditions and includes mathematical modeling to assess the impact of permafrost on the data obtained. Numerical modeling has proved the efficiency of the method in permafrost areas. Water-flooded fractured areas characterized by low values of specific electrical resistance have been reliably identified in all obtained modeling data. The results of solving direct and inverse problems of electrical exploration compared with the data of production works performed in 2020 in the Republic of Buryatia and in 2022 in the Irkutsk region have shown that electrical tomographic studies, which were successfully confirmed by drilling, make it possible to identify a productive water-flooded horizon with a very high degree of confidence.

**Keywords:** electrical resistivity tomography, numerical modeling, groundwater, permafrost

**For citation:** Shoykhonova T.S., Shkirya M.S., Biryukov P.G. Methodology of using electrical tomography in groundwater exploration in permafrost conditions on example of Bodaibo district, Irkutsk region. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):400-416. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-400-416>. EDN: KXUIBU.

## Введение

В настоящее время проблема обеспечения водой для промышленных и бытовых нужд – одна из наиболее актуальных в России и других странах мира. В связи с ростом населения и увеличением потребления возникла необходимость поиска новых источников подземных вод. В особенности данная проблема затрагивает Иркутскую область, которая является одним из ведущих регионов, обладающих значительным промышленным потенциалом. В связи с активной разработкой и открытием большого количества золоторудных месторождений в Бодайбинском районе (например, Сухой Лог), актуальной задачей является строительство горно-обогатительных комбинатов, требующих значительных объемов воды, используемых как в процессе производства, так и для обеспечения бытовых нужд рабочего персонала.

Несмотря на то что бурение скважин является традиционным методом поиска и добычи подземных вод, высокая стоимость и потенциальные экологические риски заставляют искать альтернативные методы. Комплекс геолого-разведочных работ, включающий геофизические исследования, становится все более востребованным при решении гидрогеологических задач. Геофизика позволяет получить предварительную информацию о геологическом строении, наличии или отсутствии водоносных горизонтов, минимизируя количество буровых работ и сокращая затраты на этапе поисково-оценочных работ [1].

Среди всех геофизических методов одним из часто применяемых при разведке подземных вод является электроразведка, в частности метод электротомографии [2, 3]. Он используется в различных геологических обстановках благодаря возможности детального расчленения разреза по параметру удельного электрического сопротивления (УЭС) [4], однако требования к указанной методике, кото-

рые могли бы регламентировать необходимый масштаб и детальность съемки при поиске подземных вод в той или иной геологической ситуации, на данный момент отсутствуют.

Для достижения максимальной эффективности и минимизации затрат перед проведением геофизических работ необходимо провести моделирование, то есть решить прямую и обратную задачи. Оно выполняется для оценки эффективности и целесообразности применения в текущей геологической обстановке выбранного геофизического метода при поиске объекта изучения [5]. Решение прямой и обратной задач электроразведки позволит лучше понять принципы работы многоэлектродных методик, изучить чувствительность и разрешающую способность различных установок к заданной модели среды [6], а также заранее предсказать возможные помехи и ошибки измерений, в итоге повысив точность и надежность полученных результатов [7].

Таким образом, проведенное исследование было направлено на формирование оптимальной методики на начальном этапе поиска подземных вод методом электротомографии в условиях распространения многолетнемерзлых пород (ММП) на примере Бодайбинского района Иркутской области посредством математического моделирования с целью обеспечения водными ресурсами объектов промышленности и населенных пунктов. Задачами являлись определение возможных условий залегания подземных вод в условиях распространения ММП и выполнение математического моделирования для оценки влияния распространения ММП на данные, полученные методом электротомографии при поиске обводненных трещиноватых зон.

## Материалы и методы исследования

Бодайбинский район территориально относится к Байкало-Патомскому нагорью, рас-



положенному в пределах северо-восточной части Сибирской платформы в Забайкалье [8] и представляющему собой уникальный геологический объект, отличающийся сложным тектоническим строением и разнообразным минеральным составом. В его пределах сформировано Светловское рудное поле, которое является одним из наиболее перспективных золоторудных районов России.

Байкало-Патомское нагорье – крупная морфоструктура на севере Байкальской горно-складчатой системы. Его основными орографическими элементами являются гольцовые массивы и короткие хребты, ориентированные в различных направлениях. Внутренняя часть нагорья, вытянутая в северо-восточном направлении, понижена (Чая-Жуинская депрессия) и отличается от окружающей территории меньшими абсолютными и относительными высотами. В морфологии и строении речных долин отмечаются чередование узких порожистых, крутосклонных участков с расширенными заболоченными, нередко террасированными (р. Витим, Мама, Большая Чуя, Большой Патом, Жуя и др.) участками, наличие переуглубленных долин, особенно характерное для внутренней депрессии. Нагорье сложено преимущественно докембрийскими образованиями, представленными архейскими гнейсами и метаморфическими породами, перекрытыми рифей-вендскими осадочными толщами.

В районе исследований рифей-вендские осадочные отложения формируют Маракано-Тунгусскую сложную синклиналь, часть Мамско-Бодайбинского синклинория, которая формирует основную структуру Светловского рудного поля, сложенного осадочно-метаморфизованными отложениями ныгринской и бодайбинской серий. Разрез характеризуется чередованием углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных формаций, разделенных на три серии: балаганахскую, ныгринскую и бодайбинскую. Залегание пород согласное, переходы постепенные. Породы, залегающие в пределах территории, подвергались региональному метаморфизму: на большей части наблюдается серицит-хлоритовая субфация зеленосланцевой фации, а в западной (бассейн р. Маракан) и восточной (бассейн р. Большой Тунгуски) – биотит-хлоритовая субфация зеленосланцевой фации и эпидот-амфиболитовая (зона граната, дистена) фация.

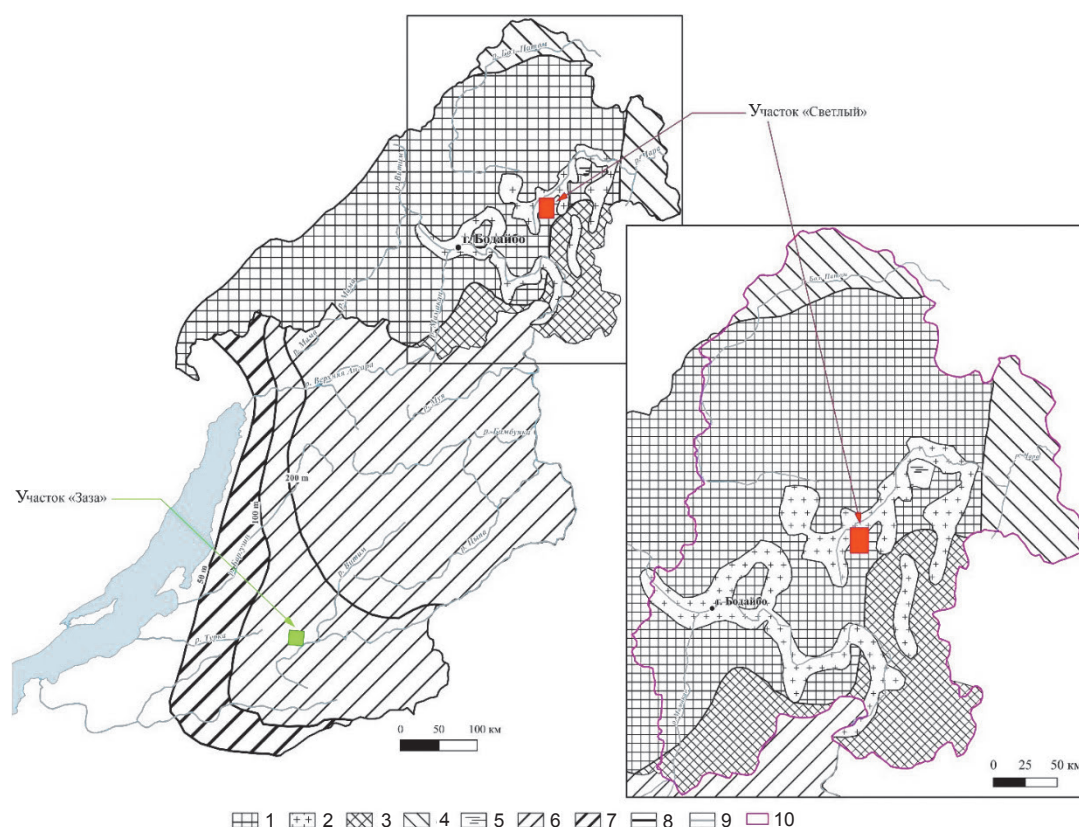
Рассмотренный в ходе проведенной работы участок относится к провинции ММП в Саяно-Байкальской горноскладчатой зоне и Витимо-Патомском нагорье [9]. Для данной области характерно крупное островное распространение ММП в эрозионных долинах, сложенных мощной толщей аллювиальных и ледниковых отложений. Максимальная мощность мерзлоты в этом районе достигает 100 м (рис. 1).

ММП в долинах рек Витимо-Патомского нагорья имеют островной характер. Мерзлыми являются в основном рыхлые отложения, мощность которых составляет 20–60 м, достигая иногда 140–150 м (долина руч. Тахтыкан-Берикан в системе р. Энгажимо).

В гидрогеологическом отношении нагорье является типичным криогидрогеологическим массивом [9]. Выделяются поровые и порово-пластовые воды рыхлых отложений, трещинно-пластовые и трещинно-карстовые воды осадочно-метаморфических пород, трещинно-жильные воды зон тектонических нарушений в метаморфических и изверженных породах. На площадях развития ММП выделяются надмерзлотные и подмерзлотные воды большинства перечисленных видов. Наибольшей водообильностью обладают горизонты и комплексы трещинно-карстовых и трещинно-жильных вод.

Территория исследованного участка отличается сложным строением, что обусловлено наличием водоупорных массивов метаморфических пород, разбитых тектоническими зонами дробления. Метаморфические породы прорваны интрузиями гранитов, в пределах которых образована водоносная зона трещиноватости. Сверху метаморфические и магматические породы частично перекрыты рыхлыми аллювиальными и моренными (флювиогляциальными) образованиями. На склонах и водоразделах толща пород промерзла на значительную глубину. В соответствии с гидрогеологическим районированием участок находится в границах Нечеро-Жуинского артезианского бассейна Витимо-Патомской гидрогеологической складчатой области [8]. На рассматриваемой площади выделяются следующие гидрогеологические подразделения:

- водоносный комплекс современных и четвертичных отложений;
- водоносная зона трещиноватости протерозойских метаморфизованных пород.



**Рис. 1. Ситуационный план распространения многолетнемерзлых пород района исследования [8, 9]:**

1 – область с массивами многолетнемерзлых пород и островами таликов в средне- и высокогорной части; 2 – область с крупными островами многолетнемерзлых пород в древних эрозионных долинах, сложенных мощной толщей аллювиальных и ледниковых отложений; 3 – область сплошного распространения многолетнемерзлых пород в гольцово-таежной части с редкими небольшими таликами под крупными озерами и руслами рек; 4 – область многолетнемерзлых пород с крупными спорадическими таликами; 5 – крупные заболоченные массивы; 6 – область сплошного распространения многолетнемерзлых пород с мощностью до 200 м в долинах; 7 – переходный тип распространения многолетнемерзлых пород (от островного к сплошному); 8 – изолинии максимальных мощностей многолетнемерзлых пород (в отрицательных формах рельефа, в метрах); 9 – реки; 10 – контур Бодайбинского района

**Fig. 1. Site plan of permafrost rock distribution in the area under investigation [8, 9]:**

1 – area with permafrost massifs and talik islands in the mid- and high-altitude part; 2 – area with large islands of permafrost rocks in ancient erosive valleys composed of the thick layers of alluvial and glacial deposits; 3 – area of continuous distribution of permafrost rocks in the bold mountain-taiga part with rare small taliks under large lakes and riverbeds; 4 – area of permafrost rocks with large sporadic taliks; 5 – large swamped massifs; 6 – area of continuous distribution of permafrost rocks with the thickness of up to 200 m in valleys; 7 – transitional type of permafrost distribution (from insular to continuous); 8 – isolines of maximum permafrost thickness (in negative relief forms, in meters); 9 – rivers; 10 – Bodaibo district contour

Водоносный комплекс современных и нерасчлененных четвертичных отложений включает в себя как надмерзлотные воды, так и воды таликов. Водоносная зона трещиноватости протерозойских метаморфизованных пород включает в себя подмерзлотные воды. Согласно гидрогеологическому описанию, полученному по результатам изысканий на соседних участках (например, Леприндо (порядка 11 км на запад)), основные запасы сосредоточены:

– в подрусловых таликах в четвертичных отложениях, распространенных вдоль водотоков

(участок работ – р. Жуя и ее притоки); мощность обводненных четвертичных отложений по фоновым данным составляет в среднем 10–20 м, они располагаются в таликовых зонах, простирающихся на удаление до 200 м от русла;

– в зонах повышенной трещиноватости протерозойских отложений, наиболее выраженных непосредственно под нижней границей многолетней мерзлоты, что связано с многократными ее изменениями; мощность трещиноватых зон варьирует от 10 до 50 м (по данным бурения скважин на соседних месторождениях подземных вод).



Моделирование является важным этапом планирования полевых геофизических работ, так как позволяет оценить применимость выбранных геофизических методов для решения поставленной геологической задачи, определить оптимальные параметры измерений, а также спрогнозировать уровень сигнала и разрешающую способность системы наблюдений [10]. Решение прямых задач с помощью математического моделирования позволяет определить аномальные параметры физических полей по известным геометрическим характеристикам и физическим свойствам объекта [11]. Верификация результатов осуществляется путем решения обратной задачи, которая заключается в определении геометрических параметров по полученным геофизическим данным. Процесс решения обратной задачи включает преобразование результатов прямой задачи к входным данным программы инверсии и последующее получение геоэлектрического разреза. Результаты инверсии сравниваются с исходной моделью.

В поисково-оценочных работах, осуществляемых при разведке подземных вод, часто используется электроразведка методами сопротивлений, основанная на различии в УЭС горных пород, что позволяет надежно картировать обводненные зоны, характеризующиеся низкими значениями сопротивления [12]. Электротомография – метод, объединяющий принципы зондирования и профилирования и позволяющий получить детальную информацию о приповерхностных отложениях мощностью в первые сотни метров [13], в основе которого лежит принцип введения электрического тока в землю через систему электродов, расположенных на поверхности, и последующего измерения возникающего электрического потенциала [14]. Различия в значениях электрического сопротивления различных типов пород, их влажности, солености и других физических свойств позволяют создать детальную картину геологического строения.

Математическое моделирование осуществлялось в программном комплексе ZondRes2D. Входными данными являлись такие изменяемые параметры, как геометрические размеры объектов, их мощность, глубина залегания целевого объекта и значения УЭС.

Для инверсии данных электротомографии в ZondRes2D используются два основных ал-

горитма – Оссам [15] и Focused [16]. Их выбор обусловлен эффективностью и способностью решать специфические задачи моделирования, которые связаны с получением гладких и интерпретируемых моделей. Указанные алгоритмы эффективно справляются с задачей, минимизируя количество резких переходов в модели, которые могут быть вызваны шумом в данных или неоднозначностью интерпретации. Кроме того, Оссам и Focused обладают устойчивостью к шуму в данных и позволяют получать решения, согласующиеся с геологическими представлениями.

Помимо использованных при решении прямых и обратных задач алгоритмов инверсии, в программном обеспечении ZondRes2D используются также Marquardt [17], Blocks [18], Smoothness constrained [19], однако в процессе исследования было принято решение не применять их в связи с некоторыми особенностями алгоритмов. Так, Marquardt, эффективный для решения нелинейных задач, не обладает сильными свойствами регуляризации, что может привести к получению результирующих моделей с резкими переходами и большей вероятностью возникновения артефактов инверсии, следовательно, к сложности в их интерпретации. Blocks ориентирован на поиск блочных моделей, что в подавляющем большинстве геологических ситуаций невозможно. Кроме того, алгоритм требует большого количества итераций для поиска решения, что делает процесс ресурсозатратным. Smoothness constrained менее гибкий и может оказаться неэффективным, если требуется учесть априорную информацию о геологии. Недостатками выбранных для проведения исследования алгоритмов можно назвать возникновение слишком гладких моделей при использовании процедуры Оссам, которые не отражают детали геологии, и ресурсозатратность Focused, особенно при обработке больших наборов данных.

В процессе моделирования применялись комбинированные прямая и обратная трех-электродные установки, а также установка Шлюмберже. Первые, имея высокую помехоустойчивость, обеспечивают максимальную глубинность и разрешающую способность среди стандартных. Вторая, демонстрируя одинаковую чувствительность к горизонтальным и вертикальным границам, представляет собой компромиссный вариант между дипольной и установкой Веннера. Ее глубинность



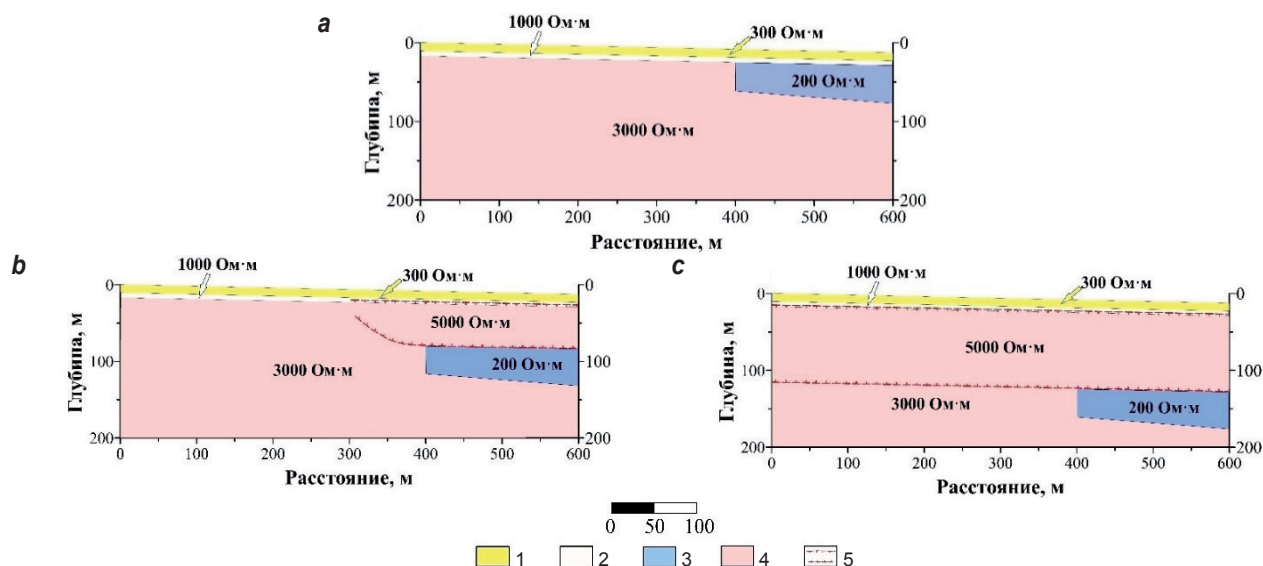
превосходит установку Веннера на 10 %, при этом обеспечивая среднее горизонтальное покрытие [20]. Кроме того, установка Шлюмберже использовалась как контрольная для заверки результатов моделирования трехэлектродной установкой.

В качестве подтверждения эффективности применения указанного метода при поиске подземных вод в работе использовались два практических примера. Первый – результаты электроразведочных работ, проводившихся в 2020 г. в Еравнинском районе Республики Бурятии на участке работ «Заза» с целью поиска подземных вод при строительстве горно-обогатительного комбината «Озерный» [21]. Объем выполненных работ составил 6 профилей общей протяженностью 4600 м. Применялась комбинированная трехэлектродная установка с выносным электродом Тх на расстоянии 1 км. Расстояние между электродами составило 5 м, выходное напряжение – 204 В, продолжительность импульса тока – 80 мс, паузы – 20 мс. При проведении электротомографии в Республике Бурятии использовалась 16-канальная электроразведочная станция «Скала-64». Вторым практическим примером являются электротомографические исследования, направленные на поиск вод технического водоснабжения при стро-

ительстве горно-обогатительного комбината «Светловский», проводились в 2022 г. в Бодайбинском районе Иркутской области [22]. В условиях ограниченного объема работ было выполнено четыре профиля общей длиной 1210 м. При исследовании использовалась 15-канальная аппаратура «Скала 64К15». Выходное напряжение составляло 200 В, продолжительность импульса тока – 100 мс, паузы – 20 мс. Отсчеты брались на следующих временах: 120, 140, 160 мс.

### Результаты исследования и их обсуждение

За основу для выполнения математического моделирования были взяты геологический профиль и материалы ранее проведенных электроразведочных работ в Бодайбинском районе [22]. В результате изучения литературных источников и имеющихся данных были составлены три упрощенные геоэлектрические модели, состоящие из трех слоев: первый – верхние четвертичные отложения, включающие в себя супеси и суглинки с включениями мелкообломочного материала со значениями УЭС 300 Ом·м; второй слой – перекрывающие их супеси с включением крупнообломочного материала до валунов со значениями УЭС 1000 Ом·м; третий – плотные известняки со значениями УЭС 3000 Ом·м (рис. 2). Целе-



**Рис. 2. Упрощенные геологические модели с отсутствием многолетнемерзлых пород (а), с наличием прерывистой (б) и сплошной (с) зоны многолетнемерзлых пород:**

1 – мелкообломочные супеси/суглинки; 2 – крупнообломочные супеси/валуны;  
3 – обводненная трещиноватая зона; 4 – известняки плотные; 5 – зона многолетнемерзлых пород

**Fig. 2. Simplified geological models without permafrost rocks (a), with discontinuous (b) and continuous (c) permafrost areas:**

1 – fine detrital sandy loams/loams; 2 – coarse sandy loams/boulders;  
3 – water-flooded fractured zone; 4 – dense limestones; 5 – permafrost area



вым объектом являлась обводненная трещиноватая зона (ОТЗ), представленная трещиноватыми известняками со значениями УЭС 200 Ом·м (см. рис. 2, а), расположенная под вторым слоем.

На следующем этапе моделирования был введен такой фактор, как ММП. Для второй модели (см. рис. 2, б) геологический разрез был осложнен прерывистыми ММП, в то время как третья (см. рис. 2, с) характеризовалась наличием сплошных ММП. Значение УЭС для зоны ММП в этих двух моделях – 5000 Ом·м. В обеих моделях (см. рис. 2, б, с) искомый объект расположен под толщей ММП.

Первым этапом при непосредственной работе в ZondRes2D являлось задание начальных параметров геометрии установки: количество электродов – 64, сдвиг электроразвешенной косы на 32 электрода относительно исходного положения. Шаг между пикетами был равен 10 м, общая длина профиля – 630 м (составляет одну полную раскладку приемных кос аппаратуры «Скала 64К15»). Оптимальная длина профиля обусловлена достаточной разрешающей способностью метода с учетом преобладания на территории мало-размерных целевых объектов. Инверсия для комбинации прямой и обратной трехэлектродных установок выполнялась до глубины 150 м. Максимальная глубинность исследования для установки Шлюмберже составила 100 м.

Параметрами, которые менялись при моделировании, являлись:

- геометрия объектов, в частности мощность с вариативностью 20 и 50 м, а также длина 100, 200 м и сплошной слой по профилю под слоем сплошных ММП (длина – 630 м);
- вариативность значений мощности прерывистых ММП (50 и 100 м);
- значение УЭС ММП (3200, 3500, 4000 и 5000 Ом·м).

Варианты значений УЭС ММП брались согласно априорным данным, полученным в результате полевых наблюдений в Республике Бурятия с учетом теоретических значений для моделирования [23]. Вариативность изменений значений сопротивления ММП часто бывает обусловлена их температурой, наличием льда, а также геологической обстановкой [24].

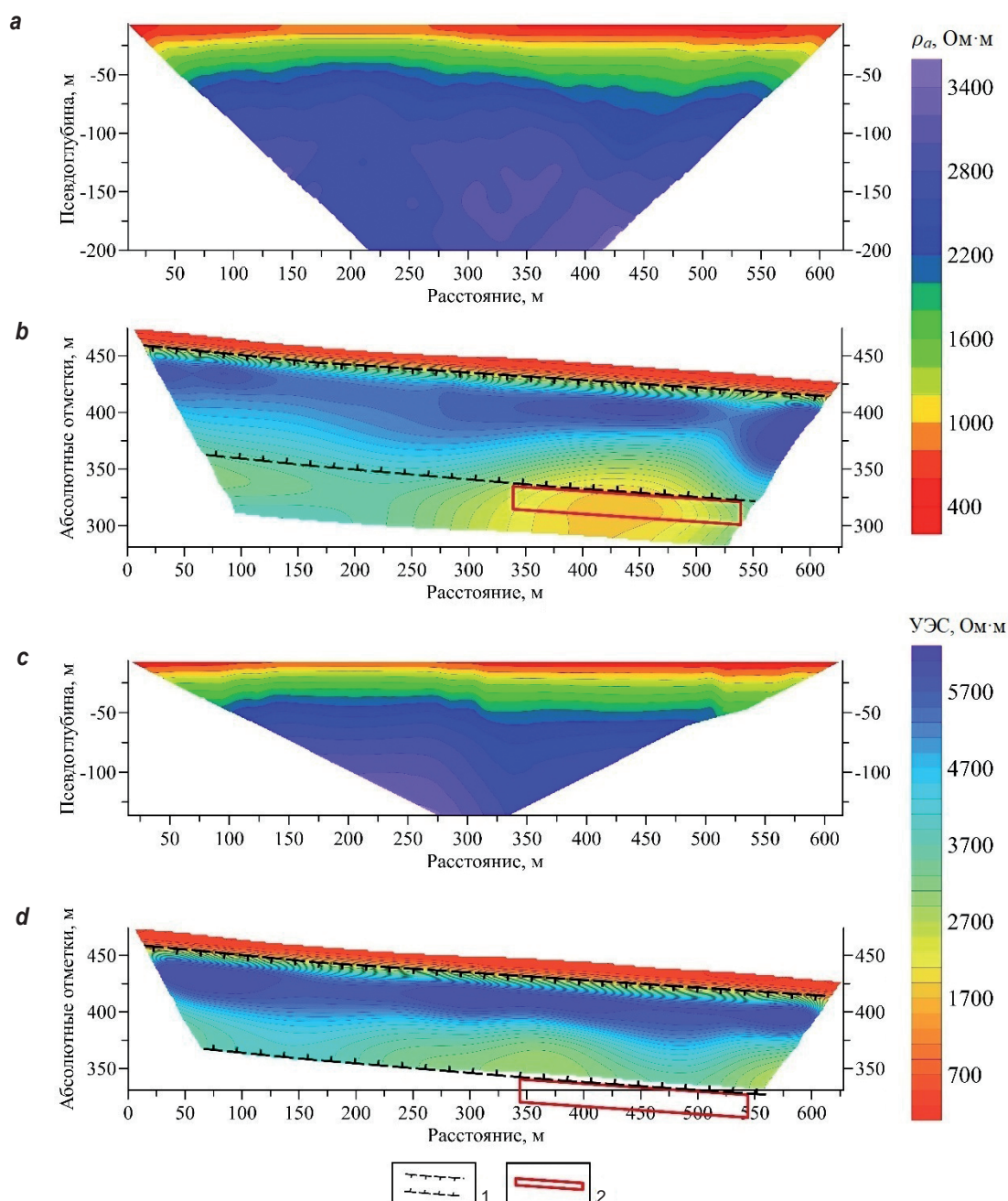
Всего было построено 40 моделей с различными комбинациями параметров сопротивления, мощностей объекта и типов ММП.

Среднеквадратическое отклонение между синтетическими и полученными по результатам моделирования данными составило 0,5 %. Результаты, полученные в ходе решения прямой задачи электротомографии, были заверены путем решения обратной задачи, и на основании конечных данных сделаны четыре блока выводов.

В первом блоке рассматривалась возможность выделения обводненной трещиноватой зоны при наличии слоя сплошных или прерывистых ММП. Для этого были проведены численные расчеты для моделей, представленных на рис. 2, б, с, после чего сделаны выводы. Для модели, изображенной на рис. 2, с, где слой ММП является сплошным, были рассмотрены варианты с размерами объекта 20×200 и 50×200 м, а также сплошным слоем ОТЗ. Результаты решения обратной задачи показали, что применение трехэлектродной установки позволяет определить наличие обводненной зоны всех рассмотренных вариантов. Применение же установки Шлюмберже изначально оценивалось как неэффективное при условии наличия слоя сплошных ММП с мощностью 100 м, так как ограничения установки по глубине исследования составило 100 м (рис. 3). Выполненное моделирование для модели, представленной на рис. 2, б (где присутствует прерывистый слой ММП), показало, что используемые установки позволяют выделить объект любых размеров (от 20×100 до 50×200 м), за исключением варианта модели с мощностью ММП 100 м и размерами 20×100 м, где объект на разрезе проявлен слабо.

УЭС ММП на разрезах, полученных в результате моделирования, характеризуется повышенными значениями. Например, при сопротивлении, равном 5000 Ом·м, ММП выделяются на результирующих разрезах максимальными значениями УЭС, заданными в ПО в настройках инверсии при выборе диапазона значений сопротивления.

Второй блок выводов посвящен особенностям выделения ОТЗ на геоэлектрических разрезах при отсутствии ММП (см. рис. 2, а). Для данной модели рассматривались объекты, размеры которых составляли 20×100 м (а также объект размером 50×200 м), которые опускали на глубину 50 м относительно их начального расположения в заданных моделях. Установлено, что объект любых размеров из применяемых в текущем моделировании



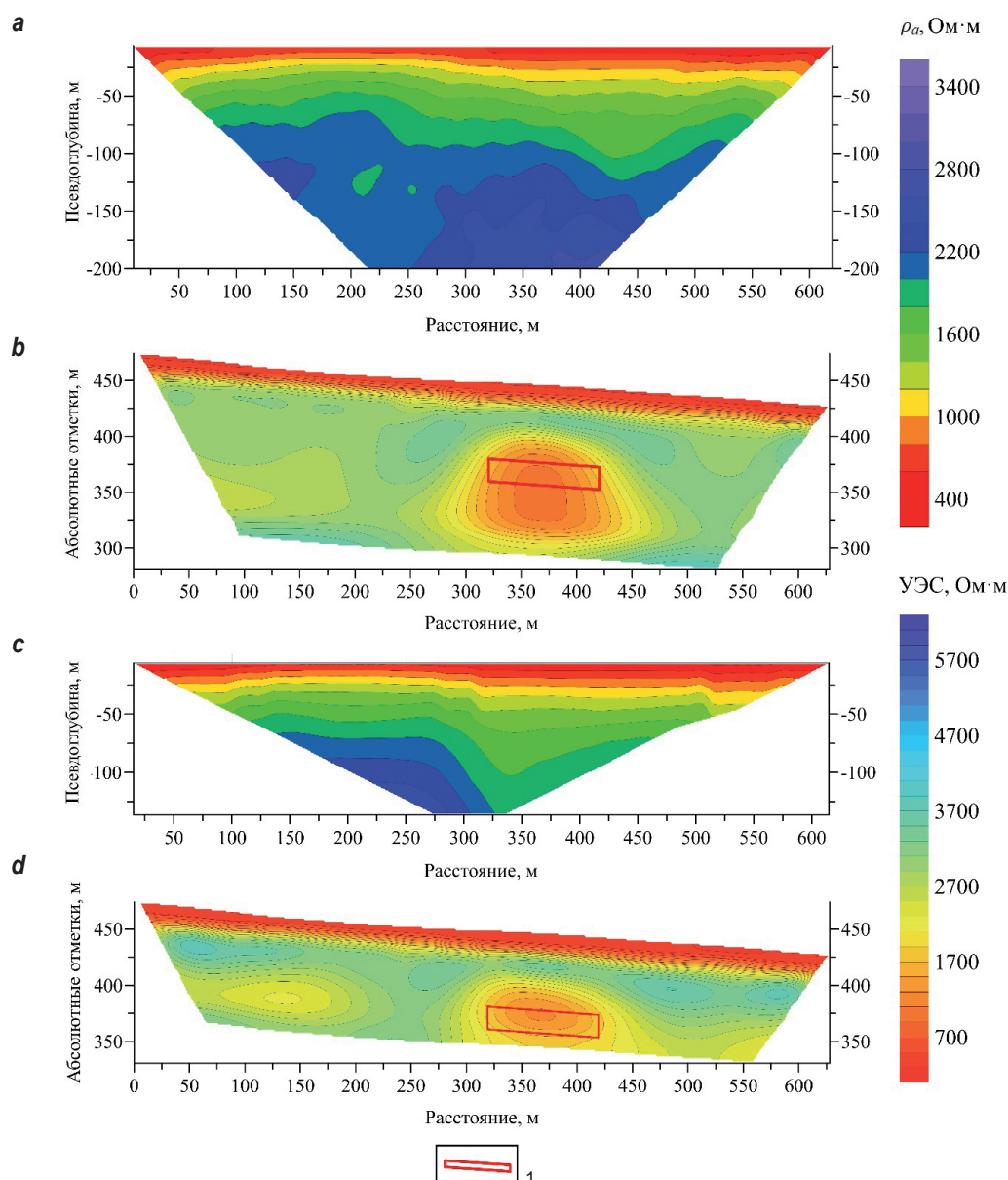
**Рис. 3. Результаты решения прямой и обратной задач электроразведки для трехэлектродной установки (а, б) и установки Шлюмберже (с, д) при условии, что размеры объекта составляют 20×200 м, мощность сплошных многолетнемерзлых пород – 100 м:**  
1 – многолетнемерзлые породы; 2 – контур объекта

**Fig. 3. Results of solving direct and inverse electrical exploration problems for a three-electrode installation (a, b) and Schlumberger installation (c, d) provided that dimensions of the object are 20×200 m, continuous permafrost rock thickness is 100 m:**  
1 – permafrost rocks; 2 – object contour

(от 20×100 до 50×200 м) ярко контрастирует по параметру УЭС на фоне вмещающих пород, что позволяет уверенно его оконтурить (рис. 4). Если он небольшой (20×100 м), то на фоне вмещающих высокоомных пород аномалия на разрезе отображается большими размерами, чем сам объект, поэтому при геологической интерпретации можно

определить геометрию объекта. Объекты же размером 50×200 м хорошо локализируются, отображаемая мощность на разрезах составляет порядка 50–55 м (при заданной 50 м).

В третьем блоке выводов описывается возможность определения мощности слоя ММП и обводненной трещиноватой зоны. На всех



**Рис. 4. Результаты решения прямой и обратной задач электроразведки для трехэлектродной установки (а, б) и установки Шлюмберге (с, д) при условии, что объект 20×100 м опущен на 50 м относительно начально заданной глубины, диапазон удельного электрического сопротивления – 10–4000 Ом·м:**

1 – контур объекта

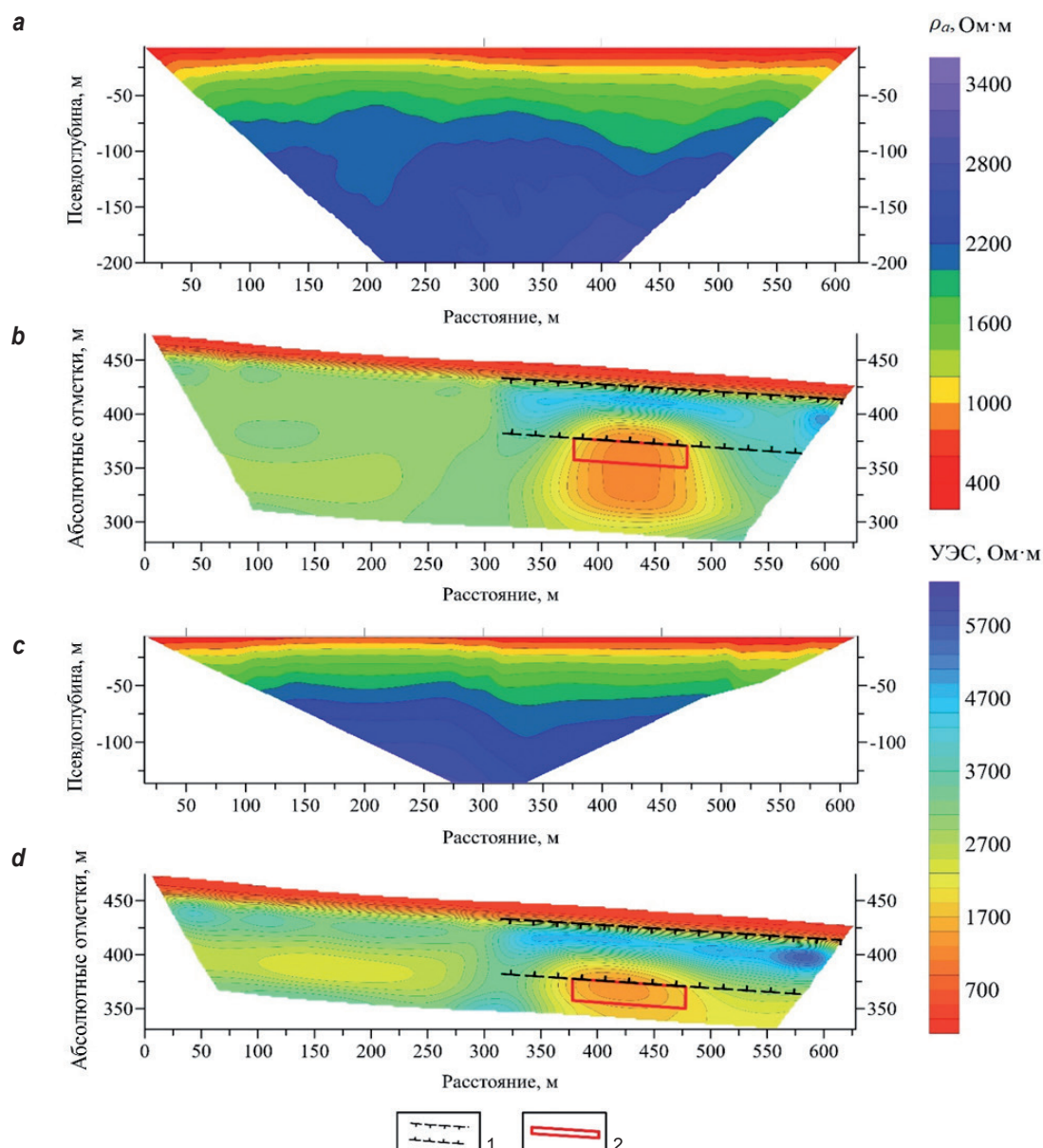
**Fig. 4. Results of solving the direct and inverse electrical exploration problems for the three-electrode installation (a, b) and Schlumberger installation (c, d) provided that 20×100 m object is lowered by 50 m relative to the initially specified depth, the range of electrical resistance is 10–4000 Ohms·m:**

1 – object contour

разрезах мощность и прерывистых, и сплошных ММП (при наличии объекта под подошвой слоя ММП) отмечается меньшими, чем изначально заданные, размерами, в некоторых случаях отображаясь вполуполовину меньше под объектом. Пределы изменения значений мощности ММП представлены от 35 до 25 м для заданной (50 м) и от 70 до 35 м при мощности ММП, составляющей 100 м. Чем больше размеры ОТЗ, расположенного под подошвой

ММП, тем меньше размеры расположенных над объектом ММП. У края разреза по инверсии толща ММП отражается своей заданной мощностью, но при интерпретации реальных полученных в результате наблюдения данных есть большая вероятность неверного истолкования рассматриваемой картины (так называемый краевой эффект) (рис. 5, б, д).

В заключительном блоке выводов анализировались параметры оптимизации геоме-



**Рис. 5. Результаты решения прямой и обратной задач электроразведки для трехэлектродной установки (а, б) и установки Шлюмберже (с, д), при условии, что размеры объекта составляют 20×100 м, удельное электрическое сопротивление многолетнемерзлых пород – 4000 Ом·м):**

1 – многолетнемерзлые породы; 2 – контур объекта

**Fig. 5. Results of solving the direct and inverse electrical exploration problem for a three-electrode installation (a, b) and Schlumberger installation (c, d), provided that object dimensions are 20×100 m, electrical resistivity of permafrost rocks is 4000 Ohms·m:**

1 – permafrost rocks; 2 – object contour

трической конфигурации установки электротомографии (трехэлектродная комбинированная и установка Шлюмберже). Математическое моделирование с вариацией геометрических параметров и учетом осложняющего фактора в виде ММП позволило установить корреляционную зависимость между геометрией установки и точностью результатов обратного решения (инверсии) между собой на предмет эффективности применения в данной геологической ситуации.

На разрезах, полученных по результатам моделирования трехэлектродной установкой, обводненные трещиноватые зоны уверенно выделяются. Однако стоит отметить, что мощность ОТЗ превышает изначально заданные значения, тем самым способствуя неверному определению глубины залегания и мощности объекта при геологической интерпретации. На разрезах, полученных по результатам моделирования установкой Шлюмберже, появляются ложные аномальные объ-



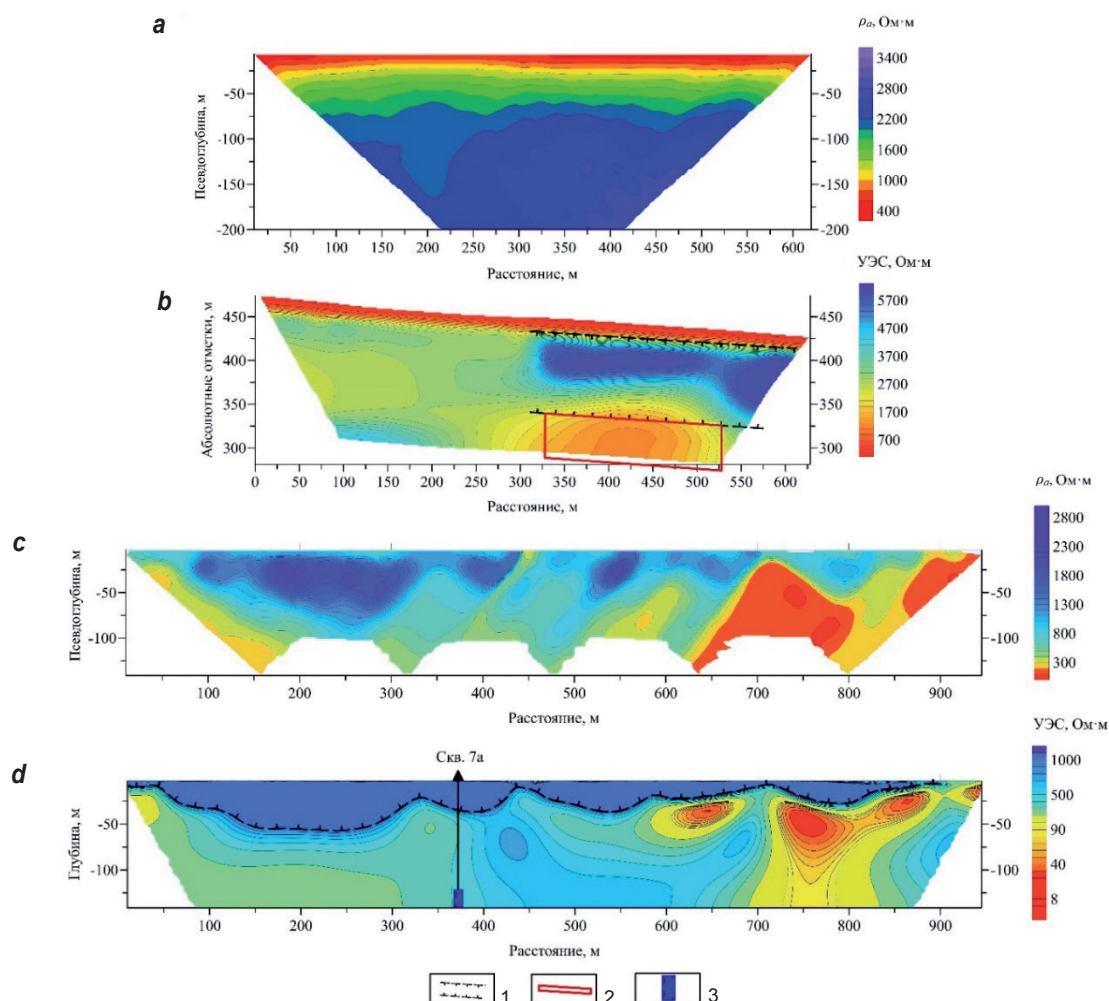
екты (артефакты инверсии), что также может привести к неверному истолкованию геологической ситуации. Для подтверждения гипотезы о том, что количество итераций напрямую влияет на изменение размеров объекта и появление ложных аномалий, проведено дополнительное исследование, в ходе которого было установлено, что при малом количестве итераций (1–2) алгоритм не обнаруживает решения. С большим количеством итераций (начиная с 3), помимо появляющегося на разрезах искомого объекта, появляется и артефакт инверсии. С увеличением размера ОТЗ аномалия от ложного объекта увеличивается. На разрезах, полученных по результатам моделирования трехэлектродной установкой, вмещающие породы не отображаются однородным массивом по параметру УЭС. Причина, вероятно, заключается в значительной разнице по значениям сопротивлений между целевым объектом и вмещающими горными породами (см. рис. 5). При работах, проводимых методом электротомографии, данную особенность необходимо учитывать в процессе геологической интерпретации.

Установлено, что при наличии высокоомного перекрывающего экрана (ММП) нижележащие слои характеризуются более высокими значениями УЭС, чем в действительности. Данный эффект отмечен на всех разрезах, полученных по результатам моделирования. Несмотря на небольшие размеры объектов (20×100 м), контрастные относительно вмещающей среды характеризуются более высокими значениями УЭС, чем изначально заданные в параметрах модели. При интерпретации данных, полученных в ходе полевых работ, необходимо учитывать, что реальные значения УЭС горных пород будут ниже, чем значения УЭС, являющиеся результатом инверсии. Более точный интервал значений сопротивлений можно получить по данным геофизических исследований скважин или лабораторных исследований физических параметров образцов горных пород.

Рассмотрим в качестве примера результат инверсии данных электротомографии с участка в Бодайбинском районе [22]. Искомая обводненная зона отобразилась на разрезах со значениями УЭС 400 Ом·м, в то время как по данным каротажа значение УЭС трещиноватых известняков варьировалось в пределах 200 Ом·м. Вероятно, что значения УЭС вмещающих пород ниже, чем полученные по результатам инверсии наблю-

денных данных электротомографии, так как по данным моделирования у всех слоев в результате решения обратных задач отмечаются завышенные значения УЭС по сравнению с заданными по данным геофизических исследований скважин. На основании этого установлено, что геологическую интерпретацию данных электротомографии допустимо выполнять на качественном уровне, так как завышение значений УЭС наблюдается по всему исследуемому разрезу.

В качестве второго примера разберем практический опыт применения электротомографии при поиске и оценке подземных вод в Еравнинском районе Республики Бурятия [21]. На рис. 6, *d* показан результат инверсии по одному из профилей. По данным электротомографии отчетливо выделяется толща ММП в верхней части разреза мощностью от 10 до 50 м и характеризующаяся значениями УЭС, составляющими 1000–1200 Ом·м. В результате опытно-фильтрационных работ [25] и поисково-оценочного бурения был вскрыт продуктивный комплекс нижнемеловых отложений на глубине 117,5 м, вскрытая мощность которого составила 82,5 м [26]. Обводненные породы представлены сильнотрещиноватыми переслаивающимися отложениями аргиллитов, песчаников и алевролитов. При геологической интерпретации данных электротомографии было установлено и подтверждено математическим моделированием (см. рис. 6, *b*), что вмещающие породы не отображаются в разрезе как однородная среда. В данном примере они представлены переслаивающимися отложениями песчаников и алевролитов. Неоднородное распределение значений по параметру УЭС вмещающих пород и продуктивного горизонта связано с влиянием контрастных по УЭС объектов (ММП и ОТЗ). В данном случае местоположение поисково-оценочной скважины задавалось по комплексу геологических, гидрогеологических и геофизических данных. Низкоомная зона (см. рис. 6, *d*) в интервале от 600 до 950 м вероятнее всего характеризует ОТЗ и наиболее приближена к ее истинным значениям по параметру УЭС. Разброс значений сопротивлений продуктивного комплекса в диапазоне от первых Ом·м до первых сотен Ом·м связан с глубиной залегания кровли ОТЗ, варьирующейся по мощности перекрывающей толщи ММП, а также особенностями используемых математических алгоритмов инверсии.



**Рис. 6. Сравнение результатов моделирования с результатами полевых работ 2020 г. на Еравнинской площади с применением трехэлектродной установки:**

*a – результат решения прямой задачи электроразведки; b – результат решения обратной задачи электроразведки; c – разрез по параметру кажущегося сопротивления; d – разрез по параметру удельного электрического сопротивления на основе решения двумерной обратной задачи электроразведки*

*1 – многолетнемерзлые породы; 2 – контур объекта; 3 – обводненный интервал*

**Fig. 6. Comparison of simulation results and results of field works conducted in 2020 on Yeravninskaya area using a three-electrode installation:**

*a – result of solving the direct problem of electrical exploration; b – result of solving the inverse problem of electrical exploration; c – section by apparent resistivity parameter; d – section by specific electrical resistance parameter based on the solution of a two-dimensional inverse problem of electrical exploration*

*1 – permafrost rocks; 2 – object contour; 3 – water-flooded interval*

### Закключение

В рамках проведенного исследования были рассмотрены три различные модели расположения подземных вод в зависимости от типа распространения ММП. Значения УЭС вмещающей толщи известняков и многолетнемерзлой толщи были выбраны на основании априорных данных, полученных в результате полевых наблюдений в Республике Бурятия и на основе табличных значений. Всего было построено 40 моделей с различными комбинациями параметров сопротивления, мощностей объекта и типом ММП.

В первом наборе моделей слой ММП отсутствовал. В данном случае обводненная трещиноватая зона контрастно выделялась на фоне высокоомных вмещающих пород. При наименьших моделируемых размерах искомого объекта (20×100 м) решение обратной задачи дает искаженное представление о таких его качественных параметрах, как размер и значение УЭС, завышая их в 4–5 раз. При увеличении размера объекта точность определения качественных параметров линейно возрастает.

Второй набор моделей включает высокоомный приповерхностный слой, характеризую-



ющий сплошное распространение ММП, присутствие которых в качестве осложняющего фактора в данной геологической обстановке повышает точность определения геометрических параметров ОТЗ в исследуемой среде по сравнению с полным отсутствием этого слоя. Такая особенность связана со сглаживающими параметрами алгоритма инверсии. Наличие в исследуемом разрезе как низкоомного, так и высокоомного объектов позволяет используемому математическому алгоритму инверсии компенсировать широкий диапазон распределения сопротивлений и сохранить контрастные границы между объектами. Тем не менее при наличии высокоомного перекрывающего экрана (ММП) значения УЭС нижележащих слоев завышаются на 600–800 Ом·м. Данный эффект был отмечен на всех разрезах, полученных в результате моделирования.

Третий набор моделей характеризовался прерывистым распространением многолетнемерзлой толщи. На разрезах, полученных по результатам моделирования трехэлектродной установкой, обводненные трещиноватые зоны уверенно выделяются. В то же время стоит отметить, что мощность объекта превышает изначально заданные значения, тем самым способствуя неверному определению глубины залегания и мощности объекта при геологической интерпретации. На разрезах, полученных по результатам моделирования установкой Шлюмберже, появляются ложные аномальные объекты (артефакты инверсии), что также может привести к неверному истолкованию геологической ситуации.

По результатам проведенных работ было установлено, что комбинированная прямая и обратная трехэлектродная установка является наиболее информативной для определения геометрических параметров ММП и выделения обводненных трещиноватых зон Бодайбинского района. Рекомендовано применение шага между электродами, составляющего 10 м.

Эффективность применения описанной выше методики была подтверждена результатами наземных электротомографических работ, проводившихся в 2020 г. в долине р. Зазы, и исследований, которые велись в 2022 г. в долине р. Жуи. На основе решения двумерной обратной задачи электроразведки были оконтурены перспективные водонасыщенные участки, характеризующиеся низкими значениями УЭС. На участке работ в долине р. Зазы четко выделялись зоны обводненных разломов с трещинно-жильными подмерзлотными водами, наличие которых было заверено последующими бурением и опытно-фильтрационными работами.

Предложенная методика может быть использована в сходных геологических условиях. Водонасыщенные трещиноватые зоны проявляются в геоэлектрических разрезах в виде пониженных значений УЭС на фоне высокоомных вмещающих пород. Присутствие многолетнемерзлой толщи может быть причиной искажений геометрических параметров искомых объектов и их значений УЭС в результатах процедуры инверсии, что необходимо учитывать при геолого-гидрогеологической интерпретации.

#### Список источников

1. Шкиря М.С., Ланкин Ю.К., Терешкин С.А., Лазурченко А.В., Давыденко Ю.А. Применение наземных геофизических исследований методом электротомографии в составе инженерно-геологических изысканий подтапливаемой территории одного из жилых районов г. Иркутска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 160–170. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3766>. EDN: EKMNKE.
2. Thiagarajan S., Rai S.N., Kumar D., Manglik A. Delineation of groundwater resources using electrical resistivity tomography // Arabian Journal of Geosciences. 2018. Vol. 11. Iss. 9. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3562-y>.
3. 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. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-90-105>. EDN: RFYERA.
4. 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. Iss. 3. P. 531–543. <https://doi.org/10.1007/s12040-014-0408-1>.
5. Белова А.Ю., Башкеев А.С., Давыденко Ю.А., Зайцев С.В., Ольховский И.В., Гулин В.Д. Оценка чувствительности электроразведочных БПЛА-систем для решения инженерно-геологических задач // Инженерная и рудная геофизика 2023: сб. материалов 19-й науч.-практ. конф. и выставки (г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г.). СПб.: Изд-во ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2023. С. 485–491. EDN: MZBOOV.



6. Бурденко А.А., Бобачев А.А. Трехмерное моделирование электрических полей от тел произвольной формы методом интегральных уравнений // *Геоэвразия-2024. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес: сб. трудов VII Междунар. геол.-геофиз. конф. (г. Москва, 12–14 марта 2024 г.)*. Тверь: Изд-во ООО «ПолиПРЕСС», 2024. С. 297–300. EDN: BZIHLY.
7. Башкеев А.С. Трофимов И.В., Бухалов С.В., Давыденко Ю.А., Паршин А.В., Прохоров Д.А. [и др.]. Оценка чувствительности технологии БПЛА-МПП с двумя вариантами генераторного контура (петля и линия) на примере объектов палеодолитного типа // *Инженерная и рудная геофизика 2023: сб. материалов 19-й науч.-практ. конф. и выставки (г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г.)*. СПб: СПб.: Изд-во ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2023. С. 492–500. EDN: CRXZCF.
8. Ткачук В.Г., Иванилова Р.Ф., Иванов И.Н. *Гидрогеология СССР. Т. XIX. Иркутская область*. М.: Недра, 1968. 496 с.
9. Шевченко В.К., Лахтина О.В., Хазанов В.С., Труш Н.И., Боярский О.Г., Максимова Л.Н. [и др.]. *Геокриология СССР. Горные страны юга СССР*. М.: Недра, 1989. 358 с.
10. Tso C.H.M., Kuras O., Wilkinson P.B., Uhlemann S., Chambers J.E., Meldrum Ph.I., et al. Improved characterisation and modelling of measurement errors in electrical resistivity tomography (ERT) surveys // *Journal of Applied Geophysics*. 2017. Vol. 146. P. 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.009>.
11. Рыскин М.И. Физико-геологическое моделирование как основа геологической интерпретации комплекса геофизических данных // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Науки о Земле»*. 2014. Т. 14. № 1. С. 87–96. EDN: TBRYRV.
12. 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. Iss. 5. P. 101468. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101468>.
13. Куликов В.А., Бобачев А.А., Яковлев А.Г. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300–400 м // *Геофизика*. 2014. № 2. С. 39–46. EDN: SECXBL.
14. Ducut Ju.D., Alipio M., Go Ph.J., Concepcion Il R., Vicerra R.R., Bandala A., et. al. A review of electrical resistivity tomography applications in underground imaging and object detection // *Displays*. 2022. Vol. 73. P. 102208. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2022.102208>.
15. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*. 1987. Vol. 52. Iss. 3. P. 289–300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>.
16. Portniaguine O., Zhdanov M.S. Focusing geophysical inversion images // *Geophysics*. 1999. Vol. 64. Iss. 3. P. 874–887. <https://doi.org/10.1190/1.1444596>.
17. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963. Vol. 11. Iss. 2. P. 431–441. <https://doi.org/10.1137/0111030>.
18. Olayinka A.I., Yaramanci U. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion // *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 45. Iss. 2. P. 63–81. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00019-7).
19. Englert A., Kemna A., Zhu J.F., Vanderborght J., Vereecken H., Yeh T.C.J. Comparison of smoothness-constrained and geostatistically based cross-borehole electrical resistivity tomography for characterization of solute tracer plumes // *Water Science and Engineering*. 2016. Vol. 9. Iss. 4. P. 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.01.002>.
20. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Опыт применения электротомографии в геофизике // *Геофизика*. 2012. № 6. С. 54–63. EDN: RZDIMJ.
21. Лазурченко А.В., Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Белова А.Ю., Терешкин С.А. Оценка возможности поиска подземных вод методом электротомографии по данным численного моделирования в условиях, осложненных многолетнемерзлыми породами (на примере территории восточной части Республики Бурятия) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335. № 7. С. 81–95. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4348>. EDN: OIUUYI.
22. Шойхонова Т.С., Шкиря М.С., Бирюков П.Г., Дунюшин А.А., Башкеев А.С. Инженерно-геофизические исследования методом электротомографии при поиске подземных вод в Бодайбинском районе Иркутской области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335. № 6. С. 14–25. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/6/4301>. EDN: ATZVUU.
23. Ефремова Д.Н., Оленченко В.В., Гореевцева А.А. Двумерная геоэлектрическая модель широтной зональности многолетнемерзлых толщ // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 3. С. 102–107. <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-3-102-107>. EDN: PIWRJD.
24. Захаренко В.Н., Краковецкий Ю.К., Парначев В.П., Попов Л.Н. Об электропроводности многолетнемерзлых горных пород // *Вестник Томского государственного университета*. 2012. № 359. С. 182–187. EDN: OZOSEJ.
25. Аузина Л.И., Ланкин Ю.К. Особенности проведения опытно-фильтрационных исследований в районах развития пластов с двойной пористостью // *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 116–124. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124>. EDN: NNSOYJ.
26. Шкиря М.С., Бадминов П.С., Терешкин С.А., Башкеев А.С., Давыденко Ю.А. Роль электротомографии и электромагнитных зондирований в поисково-оценочных работах для водоснабжения Озерного ГОКа // *Разведка и охрана недр*. 2021. № 12. С. 26–34. EDN: ZFPGZD.

## References

1. Shkiria 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;333(11):160-170. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/11/3766>. EDN: EKMNKE.

2. Thiagarajan S., Rai S.N., Kumar D., Manglik A. Delineation of groundwater resources using electrical resistivity tomography. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018;11(9):1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3562-y>.

3. 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;10:90-105. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-90-105>. EDN: RFYERA.

4. 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;123(3):531-543. <https://doi.org/10.1007/s12040-014-0408-1>.

5. Belova A.Y., Bashkeev A.S., Davydenko Yu.A., Zaitsev S.V., Olkhovsky I.V., Gulin V.D. Evaluation of the sensitivity of electrical exploration uav systems for solving engineering and geological problems. In: *Inzhenernaya i rudnaya Geofizika 2023: sb. materialov 19-i nauch.-prakt. konf. i vystavki = Engineering and Ore Geophysics 2023: collected materials of the 19<sup>th</sup> scientific and practical conference and exhibition*. 15–19 May 2023, Saint Petersburg. Saint Petersburg: EAGE Geomodel'; 2023, p. 485-491. (In Russ.). EDN: MZOB0V.

6. Burdenko A.A., Bobachev A.A. Three-dimensional modeling of electric fields from arbitrary shape bodies by the integral equation method. In: *Geoevraziya-2024. Geologorazvedochnye tekhnologii: nauka i biznes: sb. trudov VII Mezhdunar. geol.-geofiz. konf. = GeoEurasia-2024. Geological exploration technologies: science and business: collected works of the 7<sup>th</sup> International geological and geophysical conference*. 12–14 March 2024, Moscow. Tver: PoliPRESS; 2024, p. 297-300. (In Russ.). EDN: BZIHLY.

7. Bashkeev A.S., Trofimov I.V., Bukhalov S.V., Davydenko Yu.A., Parshin A.V., Prohorov D.A., et al. The sensitivity evaluation of the UAV-TEM technology with two variants of the generator circuit (loop and line) on the example of paleovalley objects. In: *Inzhenernaya i rudnaya Geofizika 2023: sb. materialov 19-i nauch.-prakt. konf. i vystavki = Engineering and Ore Geophysics 2023: collected materials of the 19<sup>th</sup> scientific and practical conference and exhibition*. 15–19 May 2023, Saint Petersburg. Saint Petersburg: EAGE Geomodel'; 2023, p. 492-500. (In Russ.). EDN: CRXZCF.

8. Tkachuk V.G., Ivanilova R.F., Ivanov I.N. *Hydrogeology of the USSR. V. 19*. Moscow: Nedra; 1968, 496 p. (In Russ.).

9. Shevchenko V.K., Lakhtina O.V., Khazanov V.S., Trush N.I., Boyarskii O.G., Maksimova L.N. *Geocryology of the USSR. Mountain countries of the south of the USSR*. Moscow: Nedra; 1989, 358 p. (In Russ.).

10. Tso C.H.M., Kuras O., Wilkinson P.B., Uhlemann S., Chambers J.E., Meldrum Ph.I., et al. Improved characterisation and modelling of measurement errors in electrical resistivity tomography (ERT) surveys. *Journal of Applied Geophysics*. 2017;146:103-119. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.009>.

11. Riskin M.I. Physical and geological modeling as a basis of geological interpretation of geophysical data complex. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*. 2014;14(1):87-96. (In Russ.). EDN: TBRYRV.

12. 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;33(5):101468. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101468>.

13. Kulikov V.A., Bobachev A.A., Yakovlev A.G. Applications of electrical resistivity tomography in deep mining prospecting. *Journal Geophysics*. 2014;2:39-46. (In Russ.). EDN: SECXBL.

14. Ducut Ju.D., Alipio M., Go Ph.J., Concepcion II R., Vicerra R.R., Bandala A., et.al. A review of electrical resistivity tomography applications in underground imaging and object detection. *Displays*. 2022;73:102208. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2022.102208>.

15. Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*. 1987;52(3):289-300. <https://doi.org/10.1190/1.1442303>.

16. Portniaguine O., Zhdanov M.S. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*. 1999;64(3):874-887. <https://doi.org/10.1190/1.1444596>.

17. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963;11(2):431-441. <https://doi.org/10.1137/0111030>.

18. Olayinka A.I., Yaramanci U. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent re-sistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysics*. 2000;45(2):63-81. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00019-7).

19. Englert A., Kemna A., Zhu J.F., Vanderborght J., Vereecken H., Yeh T.C.J. Comparison of smoothness-constrained and geostatistically based cross-borehole electrical resistivity tomography for characterization of solute tracer plumes. *Water Science and Engineering*. 2016;9(4):274-286. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.01.002>.

20. Baikov E.V., Panin G.L., Manshteyn Yu.A., Manshteyn A.K., Belorodov V.A. Electrotomography – in the geophysics. *Journal Geophysics*. 2012;6:54-63. (In Russ.). EDN: RZDIMJ.

21. Lazurchenko A.V., Shokhonova 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;335(7):81-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/7/4348>. EDN: OIUUYI.

22. Shokhonova 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;335(6):14-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/6/4301>. EDN: ATZVUU.



23. Efremova D.N., Olenchenko V.V., Goreyavcheva A.A. Two-dimensional geoelectric model of the width zonality of permafrost. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018;3:102-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-3-102-107>. EDN: PIWRJD.

24. Zakharenko V.N., Krakovetskiy Yu.K., Parnachev V.P., Popov L.N. On conductivity of permafrost. *Tomsk State University Journal*. 2012;359:182-187. (In Russ.). EDN: OZOSEJ.

25. Auzinaа L.I., Lankin Yu.K. Features of ground inflow testing in the areas of double porosity aquifer development. *Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):116-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-116-124>. EDN: NNSOYJ.

26. Shkiryа M.S., Badminov P.S., Tereshkin S.A., Bashkeev A.S., Davydenko Yu.A. The role of electrotomography and electromagnetic sounding in prospecting and evaluation work for Ozerny Ore Dressing Plant water supply. *Prospect and protection of mineral resources*. 2021;12:26-34. (In Russ.). EDN: ZFPGZD.

#### Информация об авторах / Information about the authors



**Шойхонова Туяна Сергеевна,**

младший научный сотрудник департамента геофизики,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальных исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,

✉ [tshoikhonova@geo.istu.edu](mailto:tshoikhonova@geo.istu.edu)

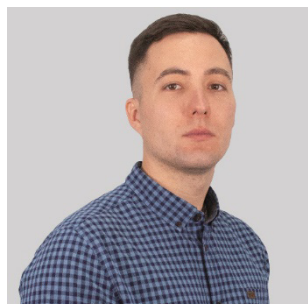
<https://orcid.org/0009-0007-1641-6085>

**Tuyana S. Shoykhonova,**

Junior Researcher of the Geophysics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,

✉ [tshoikhonova@geo.istu.edu](mailto:tshoikhonova@geo.istu.edu)

<https://orcid.org/0009-0007-1641-6085>



**Шкиря Михаил Сергеевич,**

независимый исследователь,  
г. Новосибирск, Россия,

[shkiryа.ms@gmail.com](mailto:shkiryа.ms@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-1570-0002>

**Mikhail S. Shkiryа,**

Independent Researcher,  
Novosibirsk, Russia,

[shkiryа.ms@gmail.com](mailto:shkiryа.ms@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0003-1570-0002>



**Бирюков Павел Геннадьевич,**

инженер-исследователь,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальных исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,

[pbiriukov@geo.istu.edu](mailto:pbiriukov@geo.istu.edu)

<https://orcid.org/0009-0006-0991-2972>

**Pavel G. Biryukov,**

Research Engineer,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,

[pbiriukov@geo.istu.edu](mailto:pbiriukov@geo.istu.edu)

<https://orcid.org/0009-0006-0991-2972>

#### Вклад авторов / Contribution of the authors

Т.С. Шойхонова – разработка методологии, валидация результатов, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

М.С. Шкиря – разработка концепции, курирование данных, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

П.Г. Бирюков – проведение исследования, формальный анализ.



Tuyana S. Shoykhonova – methodology, validation, writing – original draft, writing – review & editing.  
Mikhail S. Shkiryayev – conceptualization, data curation, writing – review & editing.  
Pavel G. Biryukov – investigation, formal analysis.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 14.11.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 10.12.2024.