

УДК 550.837.31+550.8.05
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4604
Шифр специальности ВАК: 1.6.9

Строение участков с выходами пород фундамента в Уймонской впадине Горного Алтая по данным наземной электроразведки с использованием трехмерного моделирования

Н.Н. Неведрова, З.Я. Кузина, А.М. Санчаа✉

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук, Россия, г. Новосибирск*

✉SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена существенным развитием туристической инфраструктуры на территории Горного Алтая, связанной со строительством гостиниц, новых коммуникаций, дорог, а также с реконструкцией имеющейся. В связи с этим актуальны задачи поиска, разведки и доразведки месторождений строительных материалов, рудных полезных ископаемых геофизическими методами. Знания о строении верхней части разреза необходимы для картирования водоносных горизонтов с целью бурения гидрологических скважин. Кроме того, поскольку Горный Алтай относится к территориям высокой сейсмоопасности, важно выделение сейсмогенерирующих разломных структур для корректного сейсморайонирования. *Цель:* уточнение глубинного и приповерхностного строения Уймонской впадины методами электроразведки. Исследования геоэлектрического строения впадины начаты в 2011 г. глубинными зондированиями становлением электромагнитного поля и вертикальными электрическими зондированиями. В 2018 г. был добавлен метод электротомографии на нескольких участках впадины для построения детальных моделей верхней части разреза. Глубины до фундамента по данным зондирования становлением электромагнитного поля и вертикального электрического зондирования в западной и центральной части впадины вдали от горного обрамления достигают 500 м, а в восточной части – до 1 км, при этом на ряде участков наблюдаются выходы на дневную поверхность коренных пород, строение и происхождение которых до сих пор непонятно. *Результаты.* Представлены геоэлектрические модели по данным электротомографии одного из участков с выходом коренных пород, для верификации и уточнения которых выполнено численное трехмерное моделирование. По результатам метода электротомографии установлено, что наблюдаемые на дневной поверхности выходы коренных пород не являются подповерхностной высокоомной неоднородностью небольшого размера. Это объект, уходящий на глубину более чем на 45 м с наклонными и субвертикальными боковыми границами. Согласование результатов всех использованных методов – зондирования становлением электромагнитного поля, вертикального электрического зондирования и электротомографии – позволило обосновать модели общего геоэлектрического строения участка исследования и предположить существование протяженной внутривпадинной перемычки в западной части впадины, частично выходящей на поверхность. Эти результаты могут быть полезны не только для решения указанных прикладных задач, но и важны специалистам геологических направлений при рассмотрении этапов формирования впадины, что относится к фундаментальным проблемам геодинамики, структурной геологии и неотектоники всего Горного Алтая.

Ключевые слова: Горный Алтай, Уймонская впадина, наземная электроразведка, электротомография, геоэлектрическое строение, численное трехмерное моделирование, инверсия

Благодарности: Работа выполнена в рамках темы НИР FWZZ-2022-0025 Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Для цитирования: Неведрова Н.Н., Кузина З.Я., Санчаа А.М. Строение участков с выходами пород фундамента в Уймонской впадине Горного Алтая по данным наземной электроразведки с использованием трехмерного моделирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4604

UDC 550.837.31+550.8.05

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4604

Structure of areas with basement rocks outcrops in the Uimonskaya depression of the Gorniy Altay based on electrical survey data using three-dimensional modeling

N.N. Nevedrova, Z.Ya. Kuzina, A.M. Sanchaa✉

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

✉SanchaaAM@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. Significant development of tourist infrastructure in the Gorniy Altai, associated with the construction of hotels, campsites, guest houses, new communications, roads, as well as the reconstruction of existing ones. In this relation the tasks of search, exploration and additional exploration of deposits of building materials, ore minerals by geophysical methods are relevant. Knowledge about the structure of the upper part of the section is required for mapping aquifers in order to drill demanded hydrological wells. In addition, since Gorniy Altai belongs to the territories of high seismic hazard, it is important to identify seismic-generating fault structures for correct seismic zoning. **Aim.** To clarify the deep and near-surface structure of the Uimonskaya depression using electrical exploration methods. Studies of the geoelectric structure of the depression began in 2011 with depth soundings by transient electromagnetic and vertical electric soundings. In 2018, an electrotomography method was added in several areas of the trough to build detailed models of the upper part of the section. Depths to the basement according to transient electromagnetic and vertical electric soundings data in the western and central part of the depression, away from the mountain frame, reach 500 m, and in the eastern part – up to 1000 m, and in some areas there are bedrock outcrops on the day surface, the structure and origin of which are still unclear. **Results.** The paper presents geoelectric models based on the data of the electrotomography method of one of the sites with bedrock outcrops, for verification and refinement of which numerical three-dimensional modeling was performed. According to the results of the electrotomography method, it was established that the bedrock outcrops observed on the day surface are not a subsurface high resistivity heterogeneity of small size. It is an object going to a depth of more than 45 m with inclined and subvertical lateral boundaries. Harmonization of the results of all used methods – transient electromagnetic, vertical electric soundings and electrotomography – allowed substantiating the models of the general geoelectric structure of the study area and assuming the existence of an extended intermountain cofferdam in the western part of the trough, partially extending to the surface. These results can be useful not only for solving the above-mentioned applied problems, but also important for specialists of geological directions when considering the stages of formation of the depression, which refers to the fundamental problems of geodynamics, structural geology and neotectonics of the entire Gorniy Altai.

Keywords: Gorniy Altai, Uimonskaya depression, electrical survey, electrical tomography, geoelectrical structure, numerical three-dimensional modeling, inversion

Acknowledgements: The work was funded by project FWZZ-2022-0025 of the A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Nevedrova N.N., Kuzina Z.Ya., Sanchaa A.M. Structure of areas with basement rocks outcrops in the Uimonskaya depression of the Gorniy Altay based on electrical survey data using three-dimensional modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4604

Введение

Горный Алтай как часть внутриконтинентального орогена характеризуется присутствием горных хребтов с высотами, достигающими 4,5 тыс. м, и многочисленных внутригорных рамповых впадин. Эта горная страна относится к территориям высокой сейсмоопасности, что определяется наличием сейсмогенерирующих структур, инициирующих землетрясения разной магнитуды, включая крупные, разрушительные [1]. В связи с этим актуальны исследования строения впадин для выделения активных разломов: внутривпадинных и на

границах с горным обрамлением. Кроме того, практически в каждой из впадин разведаны либо прогнозируются месторождения полезных ископаемых, а также присутствуют полные разрезы континентальных осадочных отложений кайнозоя, важные для изучения четвертичной истории геологического развития всего региона. Уймонская впадина является одной из крупнейших заселенных межгорных впадин Горного Алтая, но при этом наименее изучена.

Полевые работы в Уймонской впадине методами наземной электроразведки с контролируемыми

источниками были начаты в 2011 г. и включали измерения методами зондирования становлением поля (ЗСБ) и вертикальных электрических зондирования (ВЭЗ). Ранее на этой территории геофизические измерения не проводились, что отчасти связано с географическим положением впадины, её труднодоступностью. Уймонская впадина, в отличие от Чуйской и Курайской депрессий, находится в стороне от основной дорожной магистрали – Чуйского тракта, и добраться туда можно через сложный горный перевал. По результатам интерпретации этих методов получены первые представления о её глубинном строении [2]. Местоположение глубокой скважины с забоем в 400 м, впервые пробуренной на территории впадины в 2013 г., было выбрано по данным ЗСБ. Скважиной были вскрыты неоген-четвертичные отложения, в которых неоген представлен верхнемиоценовыми тонкозернистыми озерными отложениями туерьской свиты, обладающей низкими удельными электрическими сопротивлениями (УЭС). Верхний перекрывающий комплекс мощностью в 300 м сложен грубозернистыми фациями четвертичного возраста (бекенская, башкауская свиты, озерно-ледниковые отложения), характеризующимися высокими значениями сопротивлений [3]. Получено очень хорошее согласование стратиграфических границ литологических комплексов по скважинным данным с результатами ЗСБ. Невязка между границами, полученными двумя разными методами, составила менее 5 % [4].

После некоторого перерыва электроразведочные работы были возобновлены в 2018 г. с использованием метода ЗСБ с размером генераторной петли 500×500 м и добавлением электротомографии (ЭТ) на нескольких участках впадины для изучения приповерхностных структур. По результатам интерпретации всего объема данных ЗСБ и ВЭЗ за разные годы были построены глубинные геоэлектрические модели впадины, результаты представлены в нескольких публикациях [4, 5].

Строение верхней части депрессии осложняется выходами на дневную поверхность коренных пород фундамента, представленных метаморфическими породами ордовикского возраста ($sPR_2(O_1)t$). На участках выходов этих пород в полевые сезоны с 2020 по 2023 гг. были выполнены измерения методом ЭТ по системе профилей в западной и центральной частях Уймонской впадины. В текущей статье исследуются измерения, приуроченные к выходам пород фундамента в западной части депрессии (рис. 1). Строение таких участков до сих пор было непонятно. Можно рассмотреть несколько предположений образования выходов коренных пород. По мнению специалистов-геологов, это либо обрывки вершушек антиклиналий, сдвинутые мощ-

ными тектоническими движениями, либо верхняя часть антиклинальных складок кровли фундамента, поднятая на дневную поверхность в местах его относительно неглубокого залегания во время резкой активизации орогенных процессов в четвертичном периоде, которая образует внутривпадинную перемычку [6].

Первые модели строения участков с выходами коренников в западной части впадины представлены в работе [7] на основе интерпретации данных ЭТ с использованием двух-, трехмерной инверсии данных. В рамках данного исследования с целью верификации и уточнения строения таких участков будет представлена геоэлектрическая модель по данным ЭТ, обоснованная трехмерным численным моделированием, и варианты её согласования с глубинными геоэлектрическими моделями. На схеме фактического материала показаны измерения методами электроразведки в Уймонской впадине, включающие системы профилей ЭТ на участках выходов пород фундамента и ближайшие к ним пункты ЗСБ (рис. 1). Схема построена с использованием информационной системы QGIS. Полевые данные и результаты интерпретации ЗСБ будут привлечены для обоснования моделей ЭТ и общего геоэлектрического строения участков исследования.

В настоящее время в Уймонской впадине стремительно развиваются туристические направления, с чем связано строительство инфраструктуры (гостиниц, баз отдыха, кемпингов и пр.). Поэтому актуальны поиски и разведка месторождений строительных материалов и доразведка имеющихся. Востребовано изучение строения верхней части разреза в связи с картированием водоносных горизонтов для бурения новых гидрологических скважин. Необходимо также отметить, что во впадине прогнозируется большеобъемная золотоносная россыпь [8], что требует обоснования геофизическими технологиями. Кроме того, актуальность исследования заключается в решении фундаментальных проблем – построенные модели с использованием комплекса методов электроразведки (ЗСБ, ВЭЗ, ЭТ) позволят продвинуться в понимании геологических этапов формирования впадины, что важно для задач геодинамики, структурной геологии, неотектоники всего Горного Алтая.

Аппаратура, программные средства и результаты по данным электротомографии

Для уточнения строения приповерхностных особенностей, описанных выше, был использован метод ЭТ. Особенностью данного метода является применение многоэлектродной аппаратуры, в которой электрод может быть как питающим, так и приемным при многократных измерениях.

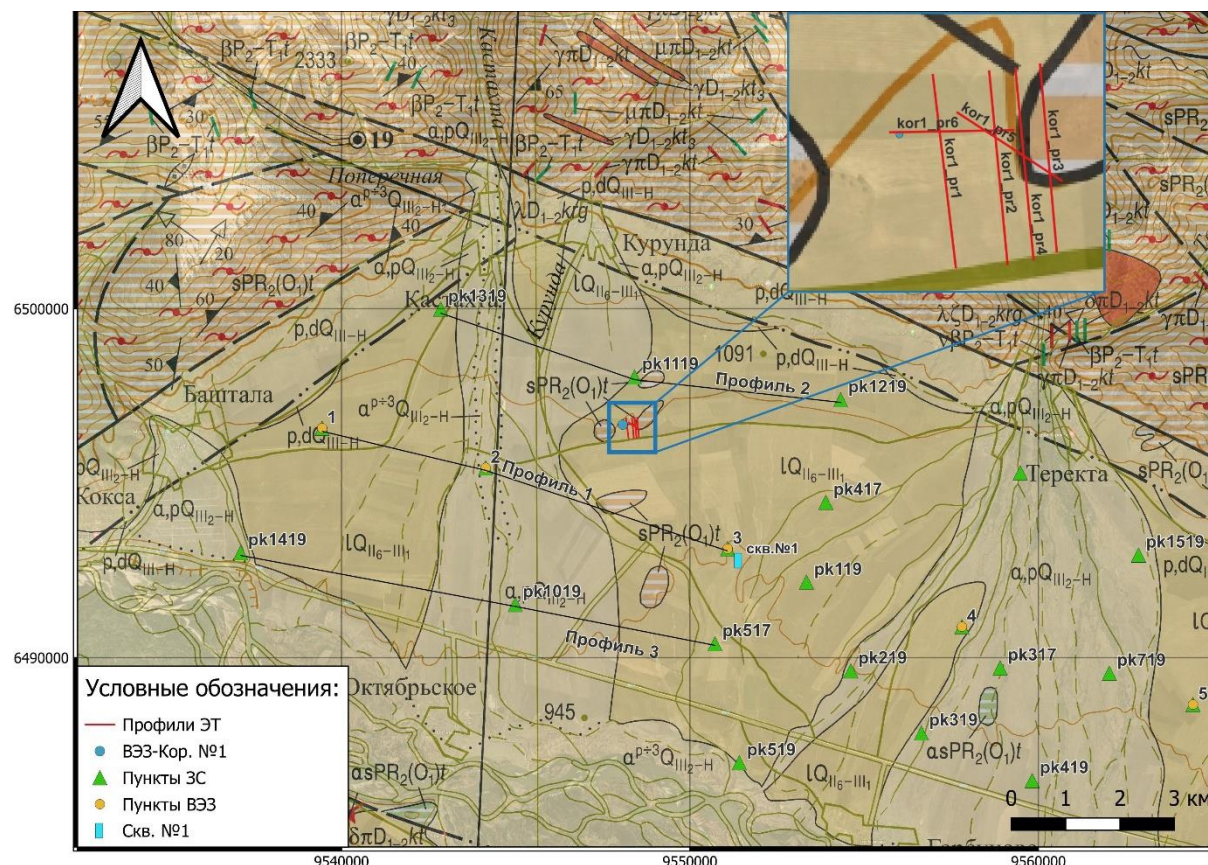


Рис. 1. Обзорная схема на подложке рельефа и геологической карты (1:200000) [6, 9] западной части Уймонской впадины, созданная в QGIS

Fig. 1. Overview scheme on the underlying relief and geologic map (1:200000) [8, 9] of the western part of the Uimonskaya depression, created in QGIS

Такая методика значительно увеличивает производительность и разрешающую способность исследований методом сопротивлений. Высокая плотность наблюдений по профилю позволяет производить двумерную интерпретацию, то есть изучать более сложные модели сред, отличных от горизонтально-слоистых, коим является исследуемый выход пород фундамента.

Полевые данные ЭТ получены с использованием современной аппаратуры «Скала-48», разработанной в ИНГГ СО РАН. Была выбрана установка Шлюмберже, 48 электродов, так как она обеспечивает одинаково хорошую чувствительность к вертикальным и горизонтальным границам [10], шаг между электродами составлял 5 м. Измерения выполнены по четырем параллельным профилям (1, 2, 3, 4) с использованием нагоняющей расстановки (roll along) для нужной длины профиля [10] и двум секущим (5, 6) с одной расстановкой электродов.

Результаты инверсии данных ЭТ позволяют определить геоэлектрическое строение участков верхней части разреза до глубины около 50 м. На первом этапе интерпретации была получена геоэлектрическая модель коренника на основе трех-

мерной инверсии данных (рис. 2). Инверсия была выполнена с учетом рельефа, который может влиять на результаты исследований [11, 12] в программе DiInSo (Версия 2.5 от 25.04.2023) [13, 14]. В процессе решения обратных задач (используется схема Гаусса–Ньютона) требуется построение тетраэдральной сетки, в отличие от широкоизвестной программы Res3dinv, в которой используется прямоугольная [15, 16]. Поскольку межгорные впадины имеют сложное геоэлектрическое строение, модель точнее разбивается тетраэдральной сеткой. В программе есть удобная возможность изменять параметры инверсии в зависимости от поставленной задачи с целью получения наиболее приемлемого результата, например, что в конкретном случае важнее – установить геометрию объекта или его сопротивление. Так, в нашем случае мы меняли параметр регуляризации, скорость роста ячеек с глубиной и ограничивали максимальный размер ячеек генерируемой сетки. Как известно, обратная задача некорректна и может иметь множество решений, поэтому для заверки полученных моделей применяют численное моделирование, как двумерное, так и трехмерное, как, например, в работах

[17, 18]. Таким образом, следующим этапом интерпретации было численное моделирование. Общая геометрия объекта оценивалась по результатам трехмерной инверсии и космоснимка; размеры выхода коренных пород, углы наклона предположительных его границ вблизи профилей 1, 2 и 3 оценивались по результатам двумерной инверсии полевых данных. Исходя из привязки к геологическим данным породы фундамента представлены метаморфическими образованиями ордовикского возраста [19], характеризующимися повышенными значениями удельного сопротивления (1000–2000 Ом·м) по сравнению со вмещающими породами осадочного заполнения впадины (до 700 Ом·м), представленными озерно-ледниковыми и ледниковыми отложениями – валунным галечником, гравием, валунником и песком [7]. Основываясь на вышесказанном, при формировании моделей были выбраны следующие значения УЭС: для выхода коренных пород – 2000 Ом·м, для вмещающей среды – 588 Ом·м.

Математическое моделирование, выполненное также с использованием программы DiInSo, осуществляется в трехмерной области, которая задана с помощью тетраэдральной сетки. В выбранном программном комплексе нет встроенной функции генерации сетки, таким образом, данный шаг выполняется в сторонней программе. Программный комплекс DiInSo поддерживает форматы следующих генераторов сеток: GiD, SALOME, NetGen и Gmsh, пользователь может выбрать одну из пере-

численных выше программ по собственным предпочтениям. Для геометрического построения модели с последующей генерацией конечно-элементной сетки в данной работе применялась программа GiD [20]. В качестве примера на рис. 3, а показана модель, в которую входит объект исследования во вмещающей однородной среде с линией размещения электродов по профилю 3 (рис. 3, а) и отдельно сам объект (коренные породы) с сеткой (рис. 3, б). Мелкость разбиения задавалась следующим образом: на линии электродов – 2, на поверхностях и объеме объекта – 10 и в среде – 50. Под мелкостью разбиения понимается размер элементов (линий, поверхностей, объемов). Размер здесь – это средняя длина ребра соответствующего элемента сетки.

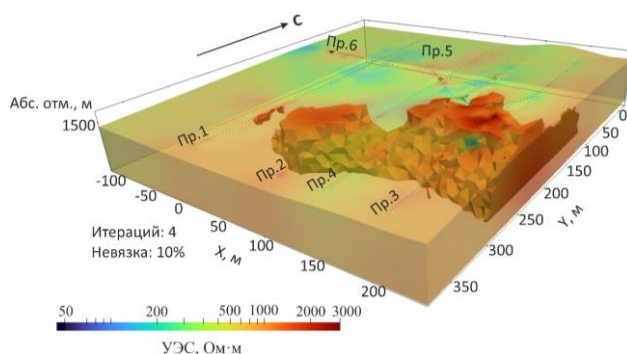


Рис. 2. 3D-инверсия полевых данных

Fig. 2. 3D inversion of field data

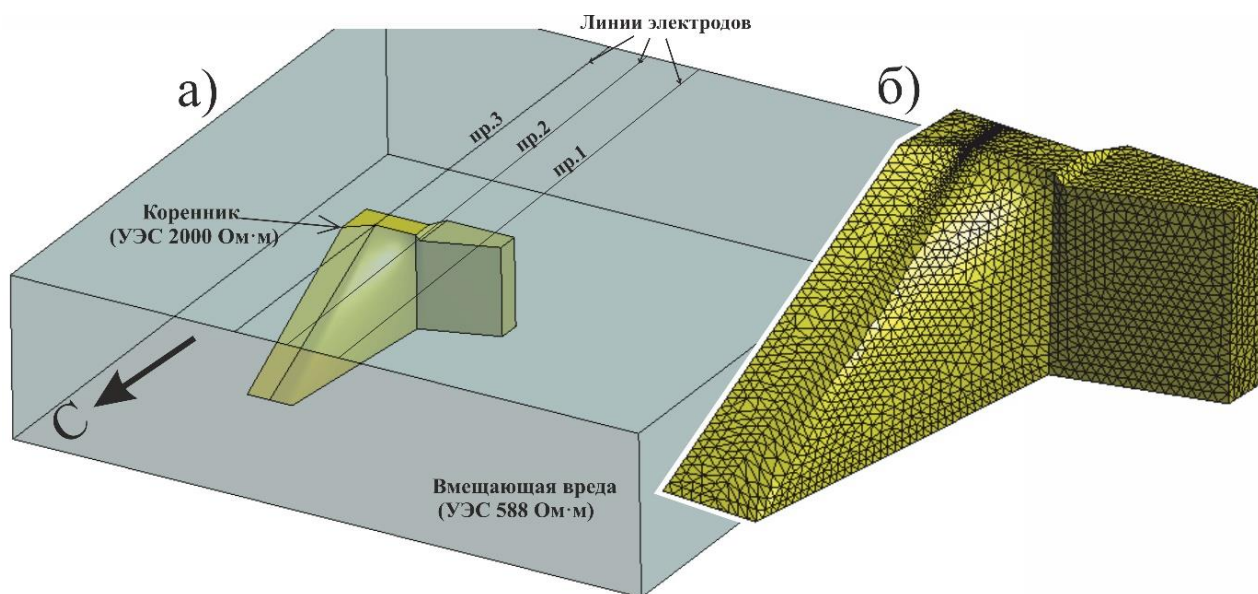


Рис. 3. а) модель № 1, построенная в программе GiD; б) фрагмент объекта-коренника с тетраэдральной сетью разбиения с мелкостью 5

Fig. 3. а) model no. 1 built in GiD program; б) fragment of a basement rock object with a tetrahedral partitioning network with fineness 5

Прямая задача рассчитывалась для каждого из профилей в отдельности с целью уменьшения времени расчета. В результате решения прямой задачи формируются файлы для проведения 2D- и 3D-инверсии. Геоэлектрические двумерные и трехмерные разрезы модельных данных далее сопоставляются с результатами двумерной и трехмерной инверсий полевых данных. На данном этапе исследования сравнение осуществляется качественным путем, визуальной оценкой. В будущем планируется выполнение численного сравнения результатов двумерной инверсии модельных и полевых данных.

На первом этапе моделирования было рассмотрено несколько моделей для верификации углов наклона боковых границ выхода коренных пород в области третьего профиля, по результатам которого были сделаны следующие предположительные выводы: боковые грани объекта наклонные и в районе профиля 3 угол наклона составляют с южной стороны 50° , а с северной – 25° . В области размещения профилей 1 и 2 границы коренника субвертикальные.

Также высокоомная аномалия имеет направленность в западном направлении, где в непосредственной близости расположен выход коренных пород меньшего размера. Таким образом, можно сделать предположение о том, что эти два выхода пород фундамента представляют собой одну структуру. Для подтверждения данного факта требуются дополнительные полевые измерения.

В рамках данной статьи моделирование осуществлялось для оценки вертикального размера исследуемого объекта, учитывая описанные выше выводы.

Общими параметрами двух моделей являются: УЭС вмещающей среды – $588 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, УЭС объекта (коренника) – $2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; размер области моделирования – $1400 \times 1400 \times 350 \text{ м}$; углы наклона боковых границ объекта в районе профиля 3 – 50° , а для северной границы – 25° , в областях 1 и 2 профилей углы субвертикальные.

Для осуществления инверсии модельных данных использовались следующие одинаковые параметры: ограничение максимального размера ячейки – 100, ограничение глубины исследования – 45 м, добавлено усиление контрастности.

Изменяющимся параметром является вертикальный размер исследуемого объекта.

Для Модели № 1 вертикальный размер объекта составляет 50 м. Для Модели № 2 вертикальный размер объекта составляет 200 м. Результаты трехмерной инверсии модельных данных представлены на рис. 4, а, б.

Анализируя получившиеся результаты трехмерной инверсии для двух разных моделей, можно отметить ряд отличий. Так, для модели № 2 выделяемый объем среды в районе профилей 2 и 3 получился больше относительно результата инверсии для модели № 1 с учетом одинакового диапазона УЭС, что качественно имеет большую согласованность с трехмерной инверсией полевых данных (рис. 3). Также в области профиля 3 для модели № 2 наблюдаемая высокоомная аномалия более уверенно прослеживается на глубину, что визуально больше согласуется с инверсией полевых данных.

Исходя из полученных результатов и качественного их сопоставления с полевыми данными можно сделать вывод, что боковые грани объекта наклонные и в районе профиля 3 составляют угол наклона с южной стороны 50° , а с северной – 25° . Самая северная граница объекта имеет более пологий угол, скорее всего, есть соединение с более северным выходом коренных пород. Для выяснения этого факта требуются дополнительные полевые измерения. В области размещения профилей 1 и 2 границы коренника субвертикальные. Кроме того, вертикальный размер объекта-коренника больше глубины исследования методом ЭТ, и можно считать, что это не подповерхностная неоднородность, имеющая небольшие размеры, а объект, уходящий на глубину более 45 м.

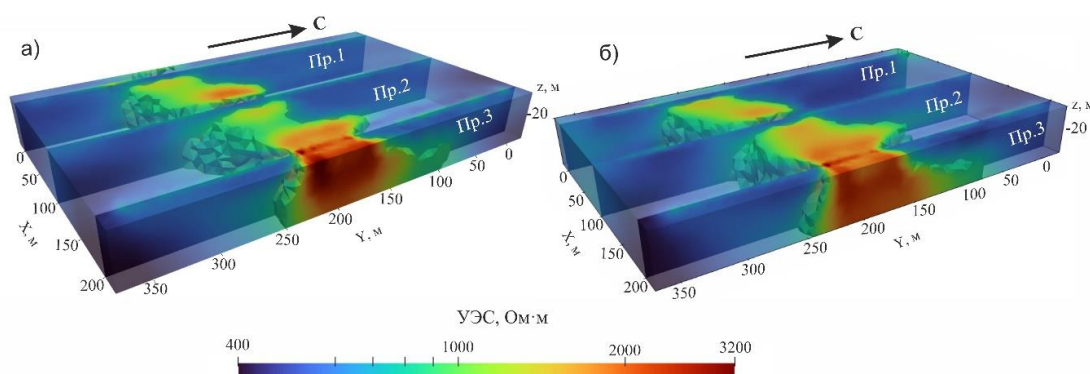


Рис. 4. Результат 3D-инверсии модельных данных, выделен объем среды, с диапазоном УЭС $>900 \text{ Ом}\cdot\text{м}$: а) модель 1; б) модель 2

Fig. 4. Result of 3D inversion of model data, the volume of the medium is highlighted, with a range of electrical resistivity $>900 \text{ ohm}\cdot\text{m}$: а) model 1; б) model 2

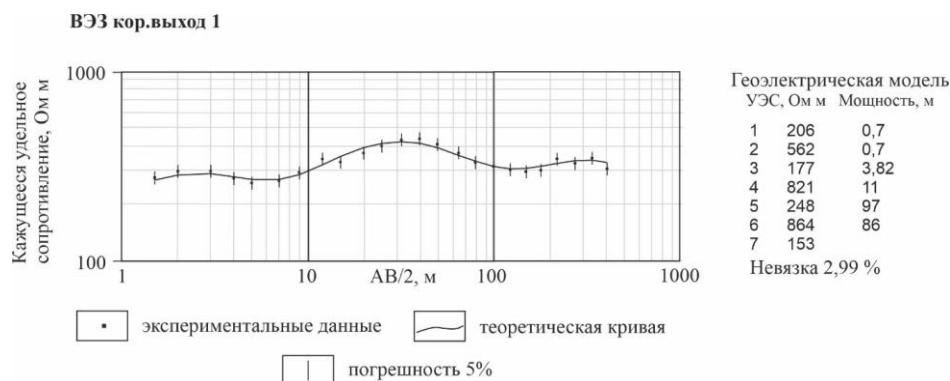


Рис. 6. Кривая ВЭЗ и геоэлектрическая модель

Fig. 6. VES curve and geoelectric model

На основе результатов метода ЭТ можно пере-
 рассмотреть геоэлектрическую модель в пункте ЗСБ
 1119, который расположен наиболее близко к рас-
 сматриваемому объекту. Из двух эквивалентных гео-
 электрических моделей с одной и той же погрешно-
 стью (2,99 %), где УЭС и мощности слоев остались
 прежними, но глубина до кровли фундамента в одной
 модели определена на глубине 886 м, а в другой – на
 186 м, выбрана модель с глубиной до кровли фунда-
 мента на глубине 186 м. Эквивалентная вторая мо-
 дель обоснована присутствием небольших характер-
 ных искажений кривой ЗСБ на поздних временах,
 которые обусловлены неоднородностью опорного
 горизонта (фундамента), для первой модели мы пы-
 тались их учесть введением 6-го проводящего гори-
 зонта. Вариант обновленного геоэлектрического раз-
 реза по второму профилю ЗСБ представлен на рис. 7.

Заключение

По результатам проведенных работ представле-
 на геоэлектрическая модель участка в Уймонской
 впадине с выходами коренных пород на дневную
 поверхность по данным ЭТ, обоснованная трех-
 мерным численным моделированием. Установлено,
 что вертикальный размер объекта-коренника боль-
 ше глубины исследования метода ЭТ, и можно счи-

тать, что это не подповерхностная неоднородность,
 имеющая небольшие размеры, а объект, уходящий
 на глубину более 45 м с наклонными боковыми
 границами. Далее рассмотрены варианты согласо-
 вания разноточных геоэлектрических моделей
 по данным ЭТ, ЗСБ и ВЭЗ. Совместный анализ ре-
 зультатов всех использованных методов позволяет
 верифицировать строение верхней части разреза
 участка исследования и предложить ещё один ва-
 риант его глубинного строения.

Учитывая тот факт, что в западной части впади-
 ны присутствуют еще несколько аналогичных
 участков, вытянутых цепочкой с севера на юг
 (рис. 1), вполне вероятно предположить, что
 наблюдаемые на дневной поверхности выходы ко-
 ренных отложений фиксируют видимую часть про-
 тяженной внутривпадинной перемычки.

На выходах пород фундамента, расположенных
 южнее участка исследования, рассмотренного в
 этой статье, также проводятся исследовательские
 работы методом ЭТ. Совместный анализ всего объ-
 ёма данных метода ЭТ, возможно, заставит пере-
 рассмотреть структурные и геодинамические особен-
 ности строения и кайнозойской эволюции Уймон-
 ской котловины.

Профиль 2

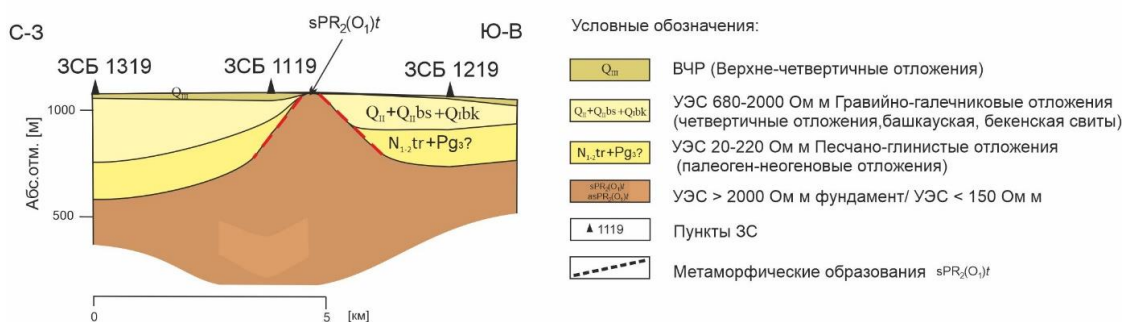


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю ЗСБ

Fig. 7. Geoelectric section along the TEM profile

Полученные результаты могут быть интересны специалистам-геологам в решении фундаментальных проблем, связанных со строением и геодинамикой алтайских впадин. Практическая значимость изучения строения верхней части разреза востребована в связи с

картированием водоносных горизонтов для бурения новых гидрологических скважин, которых крайне не хватает местному населению, а также для поиска и разведки прогнозируемых месторождений рудных полезных ископаемых, строительных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деев Е.В. Зоны концентрации древних и исторических землетрясений Горного Алтая // Физика Земли. – 2019. – № 3. – С. 71–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019371-96>.
2. Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) / Е.В. Деев, Н.Н. Неведрова, Г.Г. Русанов, А.М. Санчаа, С.М. Бабушкин, Д.В. Кречетов, И.Н. Ельцов, И.Д. Зольников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 15–23.
3. Опорный разрез неоген-четвертичных отложений в Уймонской впадине (Горный Алтай) / Г.Г. Русанов, Е.В. Деев, И.Д. Зольников, Л.Б. Хазин, И.В. Хазина, О.Б. Кузьмина // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58 – № 8. – С. 1220–1233.
4. Геоэлектрическое строение Уймонской впадины по данным наземной геоэлектрики / А.М. Санчаа, Н.Н. Неведрова, И.О. Шапаренко, А.Е. Шалагинов, С.М. Бабушкин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология»: Материалы XV международной научной конференции. – Новосибирск, 24–26 апреля 2019. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 137–144.
5. Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М. Строение Уймонской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – Т. 43. – № 3. – С. 66–76. DOI: 10.20403/2078-0575-2020-3-66-76.
6. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV (Усть-Кокса). – М.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2019.
7. Кузина З.Я., Неведрова Н.Н., Санчаа А.М. Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием трехмерных программных средств // Вестник МГТУ. – 2023. – Т. 26. – № 2. – С. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169.
8. Бутвиловский В.В., Аввакумов А.Е., Гутак О.Я. Рассыпная золотоносность гор юга Западной Сибири. Историко-геологический обзор и оценка возможностей. – Новокузнецк: КузГПА, 2011.
9. Геологическая библиотека GeoKniga. URL: <https://www.geokniga.org/maps/30425> (дата обращения: 31.01.2024)
10. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн, А.К. Манштейн, В.А. Белобородов // Геофизика. – 2013. – № 6. – С. 54–63.
11. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion / D.B. Lu, Q.Y. Zhou, S.A. Junejo et al. // Pure Appl. Geophys. – 2015. – Vol. 172. – P. 1531–1546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1015-4>.
12. Resistivity modelling with topography / S. Penz, H. Chauris, D. Donno, C. Mehl // Geophysical Journal International. – 2013. – Vol. 194. – № 3. – P. 1486–1497. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt169>.
13. DiInSo: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662035; заявл. 13.07.2021; опубл. 21.07.2021.
14. Мариненко А.В., Элов М.И., Оленченко В.В. Программный комплекс DiInSo для решения прямых и обратных задач электротомографии в нестандартных постановках // Инженерная и рудная геофизика 2020: Тезисы докладов 16-й научно-практической конференции и выставки. – Пермь, 14–18 сентября 2020. – С. 1–9.
15. Loke M.H., Dahlin T. A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion // Journal of Applied Geophysics. – 2002. – Vol. 49. – № 3. – P. 149–162.
16. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion // Geophysical Prospecting. – 1996b. – № 44. – P. 499–523.
17. Torrese P., Pilla G. 1D-4D electrical and electromagnetic methods revealing fault-controlled aquifer geometry and saline water uprising // Journal Hydrology. – 2021. – Vol. 600. – P. 126568
18. Torrese P. Subsurface structure of the proposed Sirente meteorite crater: insights from ERT synthetic modelling // Acta Geodaetica et Geophysica. – 2022. – Vol. 57. – P. 563–587.
19. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV (Усть-Кокса). Объяснительная записка / А.М. Попова, В.И. Крупчатников, А.Л. Пономарев, Г.Г. Русанов, Е.А. Колпакова. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019. – 271 с.
20. GiD. URL: <https://www.gidsimulation.com/> (дата обращения: 31.01.2024).

Информация об авторах

Нина Николаевна Неведрова, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Зоя Ярославовна Кузина, инженер, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; z.kuzina@g.nsu.ru

Айдиса Михайловна Санчаа, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3; SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Поступила в редакцию: 04.03.2024

Поступила после рецензирования: 11.04.2024

Принята к публикации: 28.11.2024

REFERENCES

1. Deev E.V. Concentration zones of ancient and historical earthquakes of the Altai Mountains. *Physics of the Earth*, 2019, no. 3, pp. 71–96. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019371-96>.
2. Deev E.V., Nevedrova N.N., Rusanov G.G., Sanchaa A.M., Babushkin S.M., Krechetov D.V., Eltsov I.N., Zolnikov I.D. New data on the structure of the Uimonskaya depression (Mountain Altai). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 15–23. (In Russ.)
3. Rusanov G.G., Deev E.V., Zolnikov I.D., Khazin L.B., Khazina I.V., Kuzmina O.B. Reference section of Neogene-Quaternary sediments in the Uymonskaya Depression (Gorny Altai). *Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 8, pp. 1220–1233. (In Russ.)
4. Sanchaa A.M., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O., Shalaginov A.E., Babushkin S.M. Geoelectric structure of Uimonskaya depression according to ground geoelectric data. *Interexpo GEO-Siberia – Subsoil use. Mining. Directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economics. Geoecology. Proc. of the XV International Scientific Conference*. Novosibirsk, April 24–26, 2019. Novosibirsk, INGG SB RAS Publ., 2019. Vol. 2, no. 2, pp. 137–144. (In Russ.)
5. Sanchaa A.M., Nevedrova N.N., Babushkin S.M. Structure of the Uimonskaya Depression according to the data of non-stationary electromagnetic soundings. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2020, vol. 43, no. 3, pp. 66–76. (In Russ.) DOI: [10.20403/2078-0575-2020-3-66-76](https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76).
6. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. second ed. Gorno-Altayskaya series. Sheet M-45-XIV (Ust-Koksa)*. Moscow, VSEGEI Publ., 2019. (In Russ.)
7. Kuzina Z.Ya., Nevedrova N.N., Sanchaa A.M. Features of the structure of the upper part of the Uymonskaya section of the Uymonskaya depression of the Altai Mountains according to the data of electrotomography using three-dimensional software. *Vestnik MSTU*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 160–169. (In Russ.) DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169).
8. Butvilovsky V.V., Avvakumov A.E., Gutak O.Y. *Placer gold-bearing mountains of the south of Western Siberia. Historical and geological review and assessment of opportunities*. Novokuznetsk, KuzGPA, 2011. 241 p. (In Russ.)
9. *Geological library GeoKniga*. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/maps/30425> (accessed 31 January 2024).
10. Balkov E.V., Panin G.L., Manstein Yu.A., Manstein A.K. Electrotomography: Equipment, methodology and application experience. *Geofizika*, 2013, vol. 6, pp. 54–63. (In Russ.)
11. Lu D.B., Zhou Q.Y., Junejo S.A. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion. *Pure Appl. Geophys.*, 2015, vol. 172, pp. 1531–1546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1015-4>.
12. Penz S., Chauris H., Donno D., Mehl C. Resistivity modelling with topography. *Geophysical Journal International*, 2013, vol. 194, no. 3, pp. 1486–1497. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt169>.
13. *DiInSo: Certificate of state registration of computer program*, no. 2021662035, 2021. (In Russ.)
14. Marinenko A.V., Epov M.I., Olenchenko V.V. DiInSo software package for solving direct and inverse problems of electrotomography in non-standard formulations. *Engineering and Ore Geophysics 2020. Abstracts of the 16th Scientific and Practical Conference and Exhibition*. Perm, September 14–18, 2020. pp. 1–9. (In Russ.)
15. Loke M.H., Dahkin T. A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, vol. 49, no. 3, pp. 149–162.
16. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 1996b, no. 44, pp. 499–523.
17. Torrese P., Pilla G. 1D-4D electrical and electromagnetic methods revealing fault-controlled aquifer geometry and saline water uprising. *Journal Hydrology*, 2021, vol. 600, 126568.
18. Torrese P. Subsurface structure of the proposed Sirente meteorite crater: insights from ERT synthetic modelling. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2022, vol. 57, pp. 563–587.
19. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. second ed. Gorno-Altayskaya series. Sheet M-45-XIV (Ust-Koksa)*. Explanatory note by A.M. Popova, V.I. Krupchatnikov, A.L. Ponomarev, G.G. Rusanov, E.A. Kolpakova. Moscow, Moscow branch of VSEGEI Publ., 2019. 271 p. (In Russ.)
20. *GiD*. Available at: <https://www.gidsimulation.com/> (accessed 31 January 2024).

Information about the authors

Nina N. Nevedrova, Dr. Sc., Chief Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Zoya Ya. Kuzina, Engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; z.kuzina@g.nsu.ru

Aydisa M. Sanchaa, Cand. Sc., Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; SanchaaAM@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Received: 04.03.2024

Revised: 11.04.2024

Accepted: 28.11.2024