

УДК 550.3

Геоэлектрическая модель выхода пород фундамента на дневную поверхность в Уймонской впадине Горного Алтая на основе численного трехмерного моделирования

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

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
22.12.2023;

получена
после доработки
12.02.2024;

принята к публикации
15.02.2024

Ключевые слова:

Уймонская впадина,
электротомография,
геоэлектрические
разрезы,
численное
моделирование
2D-инверсия,
3D-инверсия

Для цитирования

В западной части Уймонской впадины Горного Алтая в полевой сезон 2023 г. проведены измерения методом электротомографии по трем профилям для уточнения строения участка с выходами пород фундамента на дневную поверхность. В ходе исследования получены результаты трехмерной инверсии с учетом новых данных электротомографии, построена уточненная геоэлектрическая модель участка исследования. Для верификации полученной модели выполнено численное 2D- и 3D-моделирование, с помощью которого обоснованы геометрические размеры и удельные электрические сопротивления выходов коренных пород; показано влияние рельефа дневной поверхности на геоэлектрические разрезы в условиях горных районов со значительными перепадами высот на поверхности земли. Определение строения впадин необходимо для понимания этапов неотектонического формирования Уймонской впадины и всего региона, а также для оценки сейсмической опасности территории Горного Алтая. В ходе дальнейших исследований можно проследить объект на большую глубину (~100 м) с использованием трехэлектродной установки электротомографии или альтернативной аппаратуры с увеличенным размером измерительно-генераторного кабеля.

Кузина З. Я. и др. Геоэлектрическая модель выхода пород фундамента на дневную поверхность в Уймонской впадине Горного Алтая на основе численного трехмерного моделирования. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-52-60>.

Geoelectric model of the exposure of basement rocks to the surface in the Uimon depression of Gorny Altay based on three-dimensional numerical modeling

Zoia Ya. Kuzina, Nina N. Nevedrova, Aydisa M. Sanchaa*

*The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia;
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Article info

Received
22.12.2023;

received
in revised
12.02.2024;

accepted
15.02.2024

Key words:

Gorny Altai,
Uimon depression,
electrotomography,
geoelectrical sections,
2D inversion,
3D inversion

Abstract

In the western part of the Uimon depression of the Altai Mountains, during the 2023 field season, additional measurements were carried out using electrical tomography along three profiles to clarify the structure of the area with basement rocks exposed to the surface. During the study, the results of three-dimensional inversion were obtained taking into account new electrical tomography data, and a refined geoelectric model of the study area was constructed. To verify the resulting model, 2D and 3D numerical modeling was performed with the help of which the geometric dimensions and electrical resistivity of bedrock outcrops were justified. The influence of the daytime surface topography on geoelectric sections in mountainous regions with significant differences in elevation on the earth's surface has been shown. Determining the structure of the depressions is necessary to understand the stages of neotectonic formation of the Uimon depression and the entire region, as well as to assess the seismic hazard of the Altai Mountains. In the course of further research, it is possible to trace the object to a greater depth (~100 m) using a three-electrode electrical tomography installation or alternative equipment with an increased size of the measuring-generator cable.

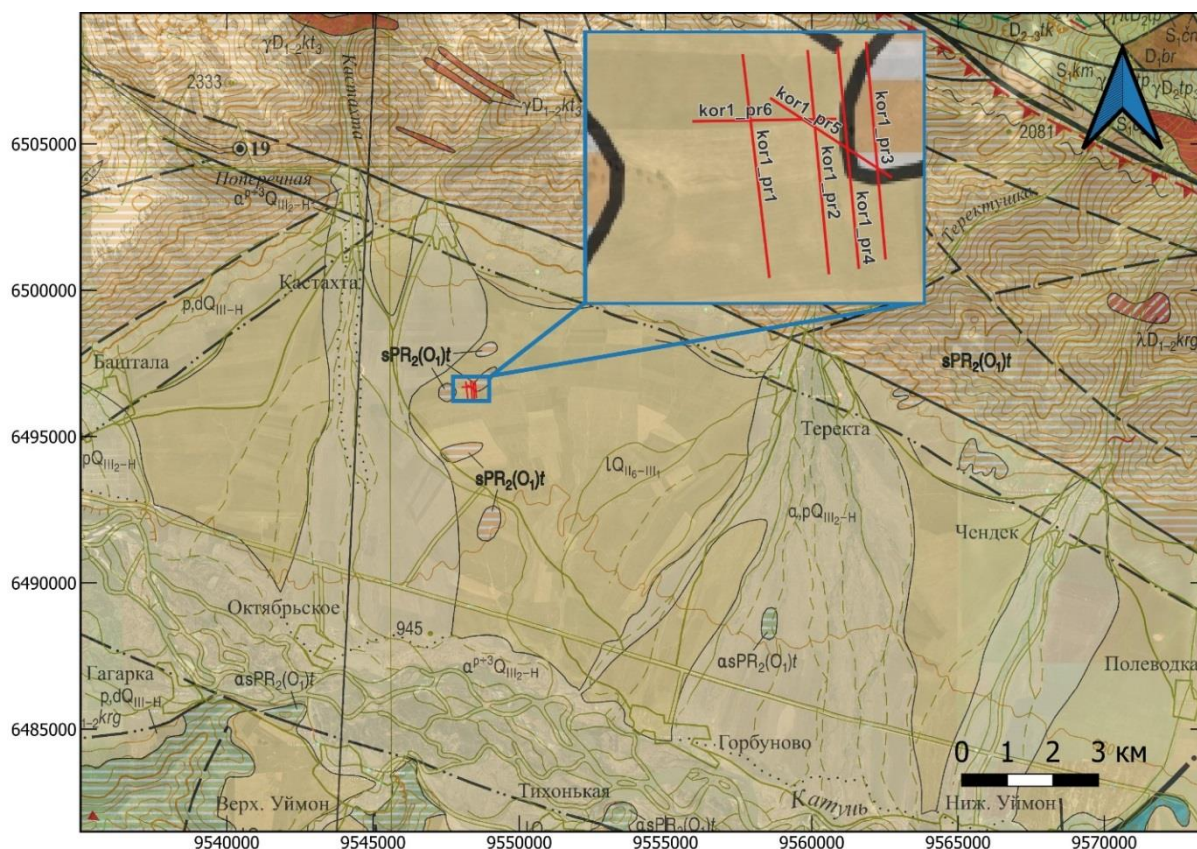
For citation

Kuzina, Z. Ya. et al. 2024. Geoelectric model of the exposure of basement rocks to the surface in the Uimon depression of Gorny Altay based on three-dimensional numerical modeling. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 52–60. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-52-60>.

Введение

Уймонская впадина является одним из крупнейших кайнозойских осадочных бассейнов Горного Алтая; ее размер составляет 35×15 км. По данным наземной электроразведки, Уймонская впадина имеет сложное разломно-блоковое строение. Глубина до фундамента впадины, по результатам интерпретации зондирований становлением электромагнитного поля, превышает 1 км (Деев и др., 2012; Санчаа и др., 2020). При этом на дневной поверхности в Уймонской впадине обнаружено несколько выходов коренных пород, соотнесенных с породами фундамента, представленных метаморфическим комплексом отложений ордовикского возраста. Представление о строении таких выходов было получено в 2020 г. методом электротомографии (ЭТ), однако остается открытым вопрос о том, как они образовались, поэтому необходимы дополнительные полевые данные.

Настоящая статья является продолжением исследований, результаты которых опубликованы в работе (Кузина и др., 2022), где представлены геоэлектрические модели участка с выходами пород фундамента на дневную поверхность в западной части Уймонской впадины по результатам двух- и трехмерной инверсии полевых данных электротомографии, полученных по параллельным профилям 1–3. Уймонская впадина является заселенной территорией (присутствуют фермерские хозяйства, многочисленные поля сельхозугодий, в том числе в районе объектов исследования), поэтому не всегда есть возможность проложить необходимое число профилей измерений в намеченных местах. В полевой сезон 2023 г. удалось добавить измерения еще по трем по профилям (4–6). На рис. 1 представлено местонахождение участка исследования и схема размещения профилей электротомографии за два года наблюдений на подложке геологической карты масштабом 1:200 000.



Условные обозначения:

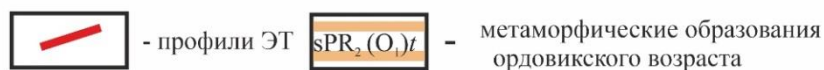


Рис. 1. Обзорная карта района работ в Уймонской впадине на подложке геологической карты и космоснимка (1 : 200 000) впадины, созданная с использованием программных комплексов QGis и CoralDraw. Выделен участок исследования; на врезке показано размещение профилей электротомографии

Fig. 1. An overview map on the substrate of the geological map (1 : 200,000) and of the Uimon depression satellite image created in QGis and CoralDraw. The study area is highlighted and the inset shows the placement of electrical tomography profiles

В вертикальных срезах трехмерной геоэлектрической модели, по данным электротомографии предшествующих работ 2020 г., выделяется высокоомное образование, соответствующее выходам коренных пород, во вмещающих (более низкоомных) осадочных отложениях, что хорошо согласуется с априорными материалами. По геологическим данным, метаморфические породы ордовикского возраста характеризуются повышенными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС). Но, как известно, обратная задача электроразведки некорректна и может иметь несколько решений, поэтому в 2023 г. был выполнен следующий этап исследования.

Цель представленной работы включает уточнение геоэлектрического строения в зоне выхода отложений коренных пород на основе дополнительных измерений и верификацию геоэлектрической модели, полученной в результате трехмерной инверсии и с помощью численного трехмерного моделирования.

В немногих научных работах используется численное трехмерное моделирование с применением данных электротомографии в связи с трудоемкостью этого метода. Следует отметить, например, работу (Павлова, 2014), в которой представлены результаты трехмерного моделирования при сравнении эффектов высокоомной неоднородности на основе данных двух- и трехмерной систем измерения, а также оценивается влияние трехмерных продольных неоднородностей на данные двумерной профильной электротомографии. В зарубежной литературе особое внимание уделяется вопросам влияния рельефа на данные электротомографии (Lu et al., 2015; Penz et al., 2013).

Материалы и методы

Фактическим материалом для исследования являлись данные электротомографии, полученные по системе профилей в 2020 и 2023 гг. На участке исследования проложено 4 параллельных и 2 секущих профиля, местоположение которых выбрано исходя из особенностей местности, размещения сельхозугодий. Измерения были выполнены с помощью аппаратуры "Скала-48", разработанной в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Панин, 2009). В ходе измерений применялась установка Шлюмберже с шагом между электродами 5 м, что обеспечило необходимую детальность. В 2023 г. длина профилей 5 и 6 составляла 235 м, профиля 4 (нагоняющего) – 355 м. Первичная обработка полевых данных производилась с использованием программы RiPPP; инверсия осуществлялась с помощью программы DiInSo (Мариненко, 2020; DiInSo..., 2021).

На первом этапе интерпретации получена геоэлектрическая модель участка с выходом коренных пород в результате трехмерной инверсии комплекса измерений, проведенных в течение 2 лет. Трехмерная модель, а также разрез 2D-инверсии по профилю 3 представлены на рис. 2. В полученной трехмерной модели выделяется высокоомное образование, соответствующее кореннику, а по двумерному разрезу можно определить углы наклона его боковых границ.

По геологическим данным, породы фундамента впадины, соответствующие метаморфическим отложениям ордовикского возраста¹, характеризуются повышенными значениями удельного сопротивления в интервале 900–3 000 Ом·м по сравнению с неоднородными вмещающими породами осадочного заполнения, значения УЭС которых достигают 500–700 Ом·м; согласно скважинным данным породы осадочного заполнения представлены озерно-ледниковыми и ледниковыми отложениями: валунным галечником, гравием, валунником, песком (Русанов и др., 2017).

Полученная 3D-модель, включающая высокоомный объект, расположенный во вмещающей среде более низкого УЭС, взята в качестве основы трехмерного моделирования. Общая геометрия объекта оценивалась по результатам 3D-инверсии полевых данных (рис. 2, а), геологической карты и космоснимка.

¹ Государственная геологическая карта Российской Федерации масштабом 1:200 000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV (Усть-Кокса). Объяснительная записка [Электронный ресурс] / А. М. Попова, В. И. Крупчатников, А. Л. Пономарев и др. ; Минприроды России, Роснедра, Сибнедра, АО "Горно-Алтайская экспедиция". М. : Московский филиал "ВСЕГЕИ", 2019. 271 с.

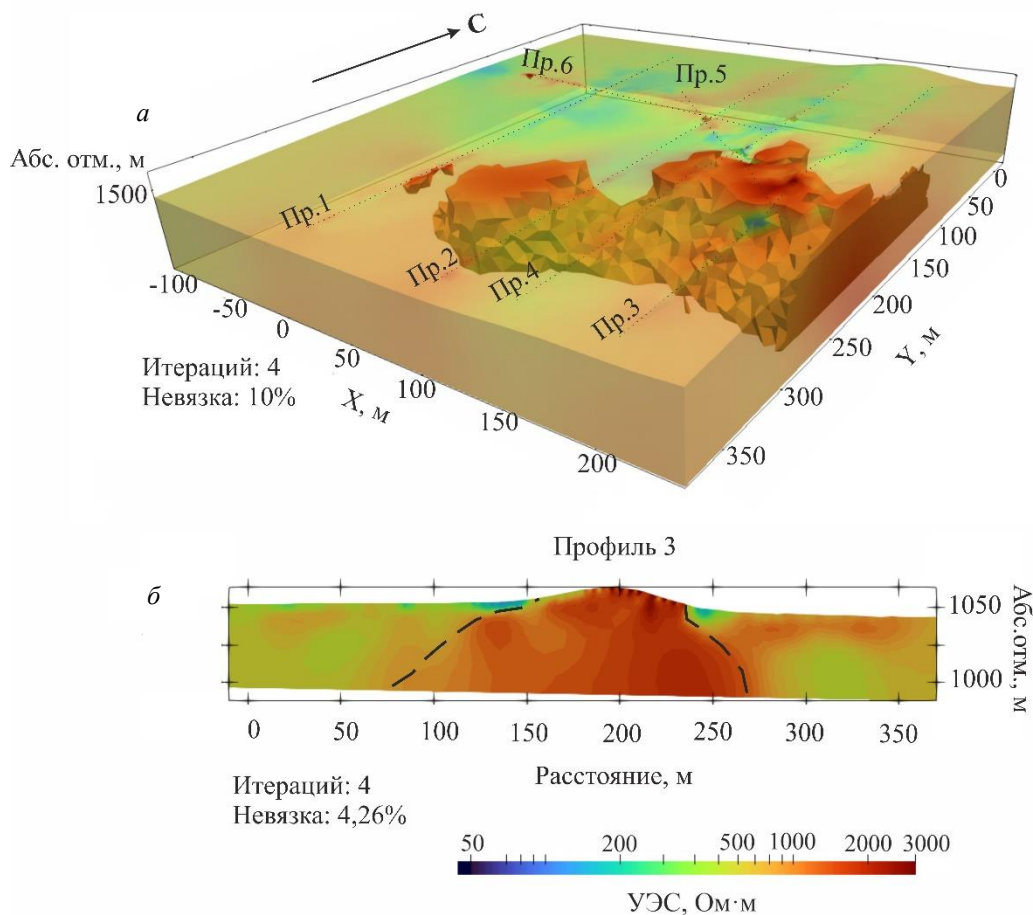


Рис. 2. Результат 3D-инверсии полевых данных; выделен объем среды, УЭС которой составляет 925–3 000 Ом·м (а) и разрез 2D-инверсии по профилю 3 (б)
Fig. 2. The result of 3D inversion of field data; *a* – the volume of the medium is highlighted with electrical resistivity range of 925–3 000 ohm·m; *b* – geoelectric sections along profile 3 according to the results of 2D inversion

Для трехмерного моделирования также использована программа DiInSo (версия 2.5 от 25.04.2023)², а для построения сеток – программа GiD. Математическое моделирование осуществлялось в трехмерной области, которая задана с помощью тетраэдральной сетки. Для геометрического построения модели с последующей генерацией конечно-элементной сетки необходимо использовать "стороннюю" программу (применена программа GiD). Изначально определен тип задачи, заданный двумя файлами (характеристики материалов и граничные условия). Область моделирования определена границами, которые отнесены на такое расстояние от источников тока, при котором значения электрического поля будут малы: выбрана область со сторонами 1 400×1 400×350 м. На границах области, за исключением границы воздух – земля, заданы нулевые граничные условия Дирихле. Материалам присвоены объемы двух объектов: вмещающим отложениям и коренным породам (рис. 3, а). Геометрическое построение модели осуществлено последующим составлением фигур из точек, линий, поверхностей и затем объемов. Также в модель включены узлы, соответствующие положению электродов. Для уменьшения вычислительных мощностей прямая задача решена для каждого профиля. Конечным этапом работы программы GiD являлась генерация тетраэдральной сетки с заданной ранее мелкостью разбиения. Различным объектам сетки (линиям, поверхностям и объемам) можно присвоить разную мелкость разбиения, т. е. разный размер. Это означает, что вблизи этих объектов сгенерированные элементы (тетраэдры) будут примерно такого размера. Размер здесь понимается как средняя длина ребра соответствующего элемента сетки.

В настоящей работе мелкость разбиения задавалась в двух вариантах:

- 1) на линии электродов – 2; поверхностях и объеме объекта – 10; в среде – 50;
- 2) на линии электродов – 2; поверхностях и объеме объекта – 5; в среде – 10.

² Программный комплекс Direct-Inverse-Solver (DiInSo). URL: <https://diinso.sourceforge.net>.

Пример сетки (мелкость разбиения 10) для объекта исследования представлен на рис. 3, б.

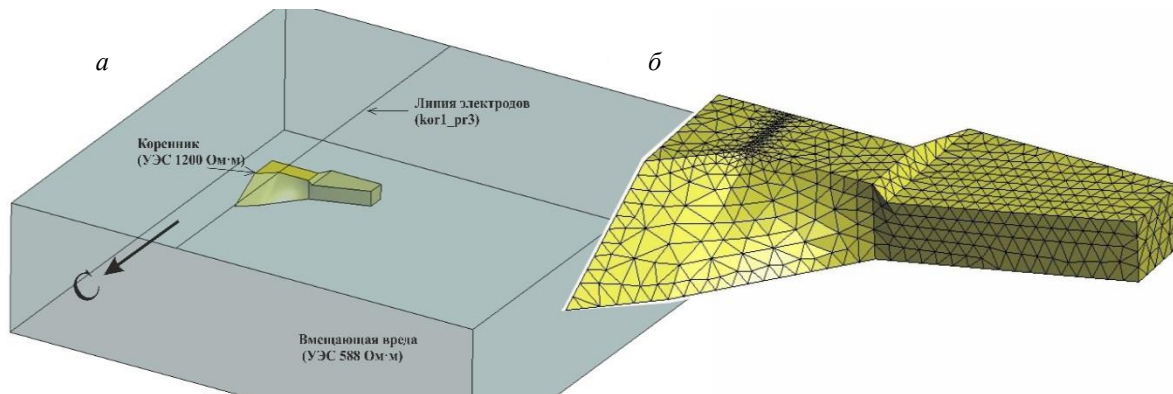


Рис. 3. Объект исследования в заданной области: а – построенная модель и линия электродов профиля 3; б – сгенерированная сетка (мелкость разбиения 10) для объекта исследования

Fig. 3. The object of study in the given area: а – the constructed model; б – the generated grid with a fineness of division 10 for the object

Перед началом решения прямой задачи для программы DiInSo указаны входные данные (УЭС вмещающей среды и коренника), а также сгенерированный файл, который содержит координаты множества положений электродов установок по профилю измерений посредством электротомографии. Затем подгружена сетка и сгенерирована матрица для решения прямых задач. В результате решения прямой задачи в папке с сеткой сформированы файлы для проведения 2D- и 3D-инверсий; подобраны параметры инверсий (мелкость разбиения, контрастность, параметр регуляризации). Файл для трехмерной инверсии собран по результатам трехмерного моделирования всех профилей. Разрезы 2- и 3-мерной инверсий модельных данных сопоставлены с результатами двумерной и трехмерной инверсий полевых данных электротомографии.

Результаты и обсуждение

В ходе расчетов рассмотрены две модели. Модель 1 выбрана для верификации углов наклона боковых границ коренника.

Модель 1. УЭС объекта (выхода коренных пород) составляет 2 000 Ом·м, УЭС вмещающей среды – 588 Ом·м; размеры области моделирования: 1 400×1 400×350 м. Вертикальный размер объекта без учета рельефа равен 50 м, что соответствует глубинности исследования методом ЭТ в геоэлектрических условиях Уймонской впадины. Расположение и углы наклона границ вблизи профилей 1–3 подбирались на основе результатов 2D-инверсии полевых данных; положение верхней кромки объекта в области профилей 1 и 2 – на глубине 10 м, субвертикальный наклон границ прослеживается как с северного, так и с южного направлений. Для профиля 3 рассматривались три варианта положения южной боковой границы объекта: наклонная граница – под углами 50 и 70° от дневной поверхности; вертикальная – под углом 90°. На севере участка граница на профиле 3 погружается под более пологим углом от дневной поверхности (25°), а для южной боковой границы угол примерно равен 50°. Модельные расчеты выполнены по данным, полученным на профилях 1–3.

На предыдущем этапе интерпретации подобраны оптимальные параметры инверсии для решения поставленной задачи: ограничение максимального размера ячейки составляло 100, ограничение глубины исследования – 45 м, использовалась функция усиления контрастности. В полученных геоэлектрических моделях выделяется высокоомный объект в более проводящей вмещающей среде. УЭС высокоомного объекта находится в диапазоне 850–3 200 Ом·м. Результаты трехмерной инверсии модельных данных представлены в виде срезов по линиям профилей на рис. 4.

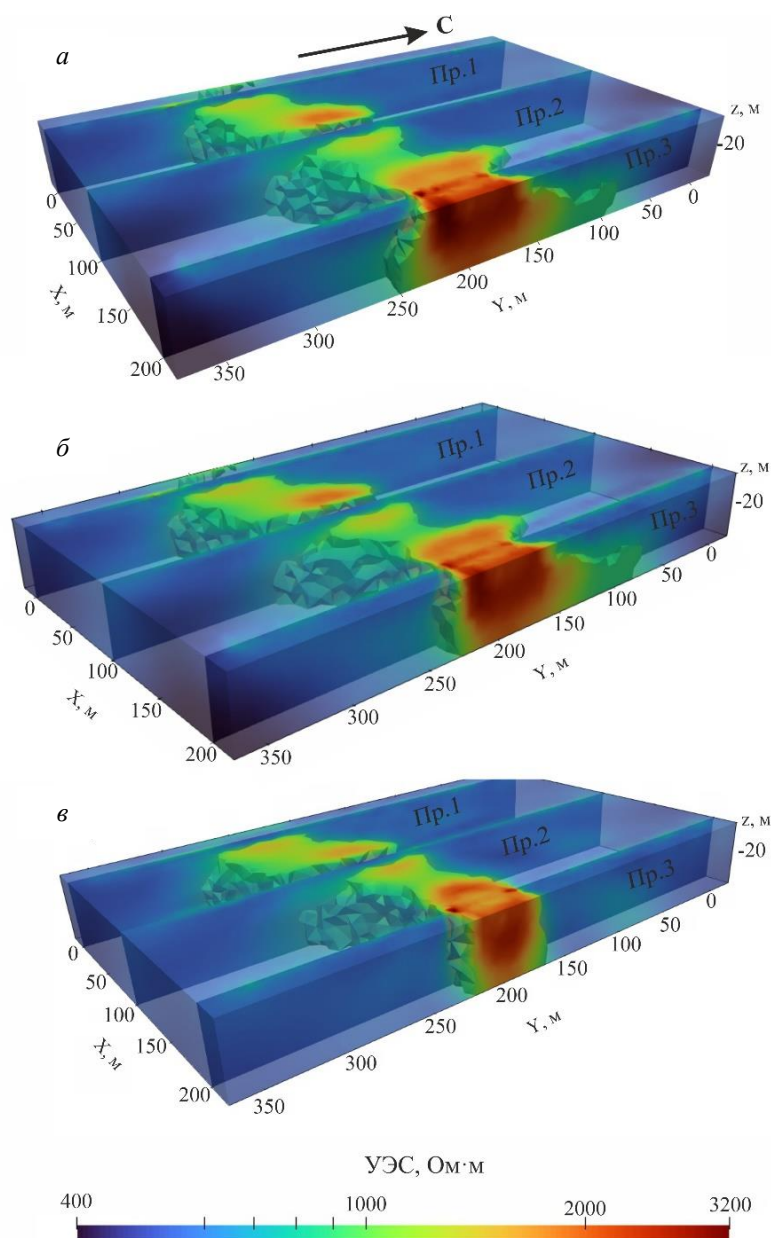


Рис. 4. Результаты 3D-инверсии модельных данных; выделены вертикальные 2D-срезы трехмерной модели по линии профилей, УЭС высокоомного объекта в диапазоне 850–3 200 Ом·м: *a* – наклон южной границы 50°; *б* – наклон южной границы 70°; *в* – вертикальный наклон границ
Fig. 4. Results of 3D inversion of the model data: vertical 2D sections along the profiles (distance along the profiles, $m = 0, 100, 200$ m), the volume of the medium is highlighted, with electrical resistivity range of 850–3 200 ohm·m: *a* – the slope of the southern border is 50°; *б* – the slope of the southern border is 70°; *в* – the vertical slope of the borders

В результирующей модели отражается изменение углов наклона боковых границ коренника. Исходя из данных, полученных в ходе моделирования, и их сопоставления с 3D-инверсией полевых данных (рис. 2), сделан вывод о том, что наклон боковых южных границ объекта близок к 50°.

Последующие модели выбраны для верификации вертикального размера коренника и учета рельефа дневной поверхности, который может влиять на результаты. Выраженный рельеф наблюдается на профиле 3, поэтому выполнено двумерное моделирование с учетом высотных отметок (модель 2).

Модель 2. УЭС объекта (коренника) составляет 2 000 Ом·м, УЭС вмещающей среды – 588 Ом·м. Угол наклона границы коренника от дневной поверхности на разрезе по профилю 3 на севере более пологий (~25°), угол наклона южной боковой границы соответствует ~50°. С указанными параметрами модели расчеты выполнены для двух вариантов вертикального размера коренника: до глубины 50 и 100 м. Параметры инверсии модельных данных включали ограничения максимального размера ячейки (50 м) и глубинности исследования (45 м).

Результаты двумерной инверсии модельных и полевых данных по профилю 3 представлены на рис. 5. Разрезы 2D-инверсии полевых данных получены с невязкой в 4 %.

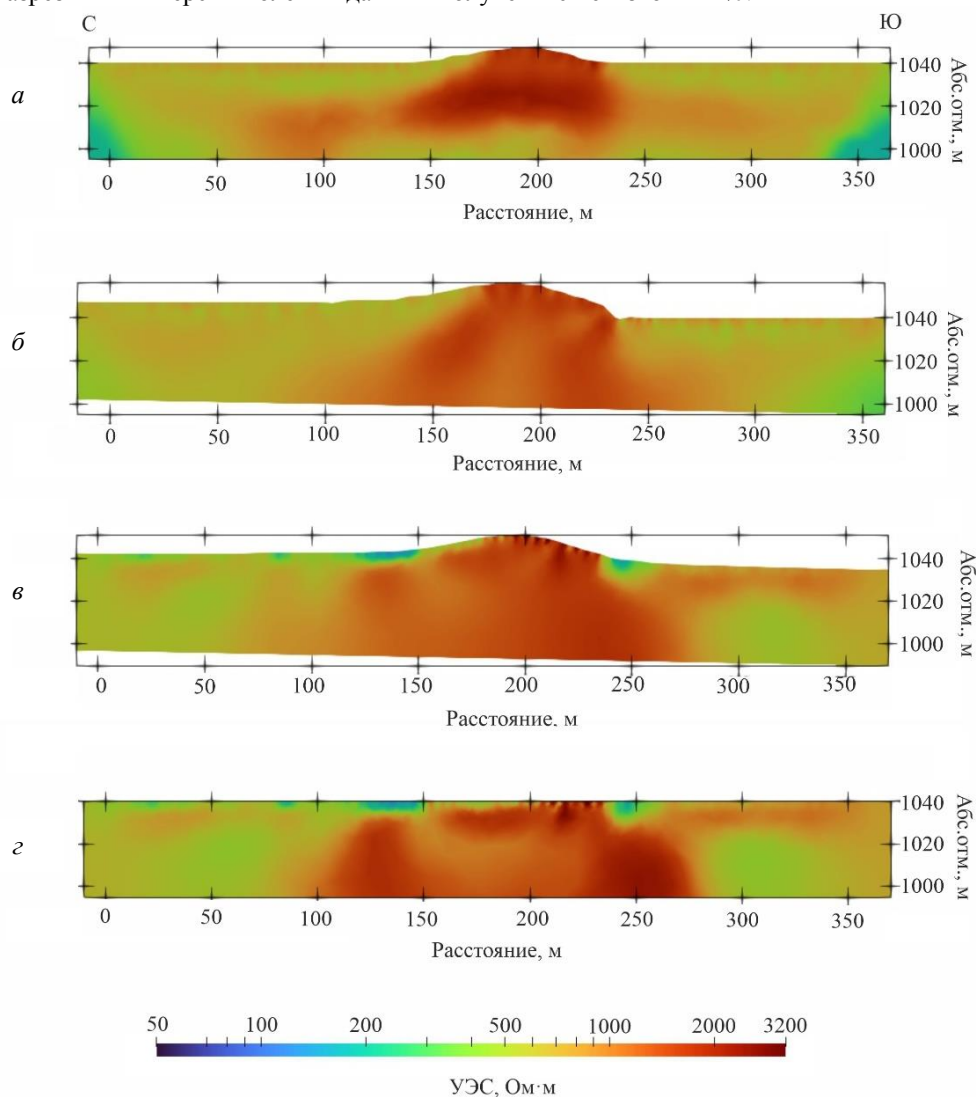


Рис. 5. Результаты 2D-инверсии модельных данных по профилю 3 объекта, имеющего вертикальный размер до 50 (а) и 100 м (б);

разрез 2D-инверсии полевых данных с учетом рельефа (в), без учета рельефа (г)

Fig. 5. Results of 2D inversion of model data for profile 3 of the object with a vertical size of up to 50 (a) and 100 m (б); section of 2D inversion of field data taking into account the relief (в), without taking into account the relief (г)

При сопоставлении разрезов двумерной инверсии модельных и полевых данных следует отметить, что высокоомная аномалия от объекта, вертикальный размер которого составляет 50 м, прослеживается лишь до глубины 30 м, что не соответствует результатам инверсии полевых данных (рис. 5, в). Таким образом, заданного вертикального размера коренника, равного 50 м, недостаточно; исследуемый объект не является подповерхностной неоднородностью, имеющей небольшие вертикальные размеры: это объект, уходящий на глубину более 50 м.

Кроме того, можно сделать выводы о возможном влиянии рельефа. На полученных разрезах его влияние наблюдается в появлении зоны пониженных значений УЭС коренника (менее 1 000 Ом·м), что согласуется с публикацией (Баранчук и др., 2018), в которой идет речь о существенном влиянии рельефа на данные электротомографии. В статье (Lu et al., 2015) также оценивается влияние рельефа в зависимости от угла наклона; в статье (Penz et al., 2013) показано, как потенциал зависит от формы рельефа и положения электродов. Без учета рельефа на геоэлектрическом разрезе (рис. 5, г) описанная выше зона становится более явной, она пролеживается с севера на юг от точки перегиба в рельефе к центру объекта. Следует отметить, что в центральной части разреза объем данных ограничен в связи с использованием нагоняющей установки, что может приводить к появлению ложных аномалий. Вместе с тем на разрезах, полученных при инверсии полевых данных с учетом рельефа, также видны низкоомные

приповерхностные аномалии у основания возвышенности, которые отсутствуют на разрезах инверсии модельных данных. Этот факт может указывать на то, что небольшие по размеру приповерхностные низкоомные аномалии не связаны с влиянием рельефа, а обусловлены геологическим строением (наличием в разрезе локальных зон проводящих и/либо обводненных осадков), что не было учтено в рассмотренных моделях.

Заключение

В 2023 г. получены новые полевые данные электротомографии на участке исследования в Уймонской впадине. В результате трехмерной инверсии объема данных ЭТ за 2020 и 2023 гг. по шести профилям построена уточненная геоэлектрическая 3D-модель участка с выходами коренных пород на дневную поверхность. Трехмерное численное моделирование, 3D-инверсия модельных и полевых данных, их сопоставление были выполнены для верификации полученной трехмерной модели. В результате уточнены и обоснованы геометрические размеры, интервалы значений УЭС коренника и вмещающих неоднородных осадочных отложений. Кроме того, с помощью модельных расчетов обоснованы углы наклона боковых границ объекта. На профиле 3 угол боковой границы на севере пологий и составляет 25° , а на юге – 50° . На профилях 1 и 2 наблюдаются боковые границы, близкие к вертикальным.

С помощью численного 2D-моделирования оценен вертикальный размер коренника, который составляет более 50 м, а также определено влияние рельефа дневной поверхности на измерения электротомографии. Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- выходы на земную поверхность коренных пород фундамента не являются приповерхностной неоднородностью, их вертикальный размер превышает 50 м;
- влияние рельефа дневной поверхности проявляется на разрезах электротомографии в виде артефакта (зоны пониженных значений УЭС в кореннике), которая отсутствует при исследовании с учетом рельефа. В данном случае аномальное понижение сопротивлений высокоомного объекта небольшое, но в случае значительных перепадов высот этот эффект может привести к ложным выводам о строении указанного объекта.

В ходе дальнейших исследований можно проследить объект на большую глубину (~100 м) с использованием трехэлектродной установки электротомографии или альтернативной аппаратуры с увеличенным размером измерительно-генераторного кабеля.

Благодарности

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Баранчук К. И., Модин И. Н., Муканова Б. Г., Миргаликызы Т. М. Влияние рельефа на данные электрической томографии // Инженерные изыскания в строительстве : материалы 2-й общерос. науч.-практ. конф. молодых специалистов, Москва, 27 апреля 2018 г. М. : Геомаркетинг, 2018. С. 89–95. EDN: VSZGQK.
- Деев Е. В., Неведрова Н. Н., Русанов Г. Г., Санчаа А. М. [и др.]. Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. № 1. С. 15–23. EDN: OWCSOJ.
- Мариненко А. В. Программный комплекс DiInSo для решения прямых и обратных задач электротомографии в нестандартных постановках // Инженерная и рудная геофизика. 2020 : тез докл. 16-й науч.-практ. конф., Пермь, 14–18 сентября 2020 г. Пермь, 2020. С. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051125>. EDN: ZGRXQY.
- Павлова А. М. Применение малоглубинной электроразведки для изучения трехмерно неоднородных сред : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 128 с.
- Панин Г. Л. Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений "Скала-48" // Инженерная и рудная геофизика 2009 : тез. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Геленджик, 26–30 апреля 2008 г. Геленджик, 2009.
- Русанов Г. Г., Деев Е. В., Зольников И. Д., Хазин Л. Б. [и др.]. Опорный разрез неоген-четвертичных отложений в Уймонской впадине (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 8. С. 1220–1233. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20170809>. EDN: ZFHWTV.
- Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Бабушкин С. М. Строение Уймонской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2020. № 3(43). С. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76>. EDN: JQJRBG.
- DiInSo : св-во рег. программ для ЭВМ / А. В. Мариненко, № 2021662035; заявл. 13.07.2021; опубл. 21.07.2021. ; зарег. 21.07.2021.

Lu De-B., Zhou Qi-Y., Junejo S. A., Xiao An-L. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion // *Pure and Applied Geophysics*. 2015. Vol. 172. P. 1531–1546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1015-4>.

Penz S., Chauris H., Donno D., Mehl C. Resistivity modelling with topography // *Geophysical Journal International*. 2013. Vol. 194, Iss. 3. P. 1486–1497. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt169>.

References

Baranchuk, K. I., Modin, I. N., Mukanova, B. G., Mirgalikyzy, T. M. 2018. The influence of relief on electrical tomography data. Proceedings of the 2 All-Russian scientific and practical conference of young specialists *Engineering surveys in construction*, Moscow, 27 April, 2018. Moscow, pp. 89–95. EDN: VSZGQK. (In Russ.)

Deev, E. V., Nevedrova, N. N., Rusanov, G. G., Sanchaa, A. M. et al. 2012. New data on the structure of the Uymon depression (Gorny Altai). *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 1, pp. 15–23. EDN: OWCSOJ. (In Russ.)

Marinenko, A. V. 2020. DiInSo software package for solving direct and inverse problems of electrotomography in non-standard formulations. Abstracts of the 16 Scientific and Practical Conference and Exhibition *Engineering and Ore Geophysics 2020*, Perm, 14–18 September, 2020, Perm, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051125>. EDN: ZGRXQY. (In Russ.)

Pavlova, A. M. 2014. Application of shallow electrical prospecting to study three-dimensionally heterogeneous environments. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)

Panin, G. L. 2009. Multielectrode equipment for resistance methods "Syber-48". Proceedings of 5 Intern. conf. *Engineering and Ore Geophysics*, Gelendzhik, 26–30 April, 2008. Gelendzhik. (In Russ.)

Rusanov, G. G., Deev, E. V., Zolnikov, I. D., Khazin, L. B. et al. 2017. Reference section of Neogene-quaternary deposits in the Uimon depression (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 58(8), pp. 1220–1233. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20170809>. EDN: ZFHWTV. (In Russ.)

Sanchaa, A. M., Nevedrova, N. N., Babushkin, S. M. 2020. The structure of the Uymon depression according to nonstationary electromagnetic sounding data. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 3(43), pp. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76>. EDN: JQJRBG. (In Russ.)

DiInSo: Certificate of state registration of a computer program. A. V. Marinenko N 2021662035; application 13.07.2021; publ. 21.07.2021. Byul. N 8. (In Russ.)

Lu, De-B., Zhou, Qi-Y., Junejo, S. A., Xiao, An-L. 2015. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion. *Pure and Applied Geophysics*, 172, pp. 1531–1546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1015-4>.

Penz, S., Chauris, H., Donno, D., Mehl, C. 2013. Resistivity modelling with topography. *Geophysical Journal International*, 194(3), pp. 1486–1497. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt169>.

Сведения об авторах

Кузина Зоя Ярославовна – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, инженер; e-mail: z.kuzina@g.nsu.ru

Zoia Ya. Kuzina – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Engineer; e-mail: z.kuzina@g.nsu.ru

Неведрова Нина Николаевна – пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, д-р геол.-мин. наук, гл. науч. сотрудник; e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Nina N. Nevedrova – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Dr Sci. (Geology & Miner.), Chief Researcher; e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Санчаа Айдиса Михайловна – пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотрудник, зав. лабораторией; e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Aydisa M. Sanchaa – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Leading Researcher; e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>