

УДК 550.3

Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием трехмерных программных средств

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

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики 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
04.04.2023;

получена
после доработки
04.05.2023;

принята к публикации
30.05.2023

Ключевые слова:

Горный Алтай,
Уймонская впадина,
электротомография,
геоэлектрические
разрезы, 2D инверсия,
3D инверсия

Определение строения межгорных впадин в сейсмоактивных районах на разных глубинах является важным для понимания этапов неотектонического формирования региона и оценки сейсмической опасности. На территории Уймонской впадины Горного Алтая в разные годы осуществлялись измерения глубинными методами электротомографии, такими как зондирования становлением поля и вертикальными электрическими зондированиями, однако для уточнения строения верхней части разреза, где наблюдаются выходы коренных пород на дневную поверхность, необходимо применение малоглубинных методов, например, электротомографии (ЭТ). Рассматриваются результаты интерпретации данных ЭТ с использованием 2D и 3D инверсии при изучении выходов пород фундамента в западной части впадины. С учетом априорной информации и полученных моделей было уточнено геологическое строение объекта исследования. По результатам интерпретации данных электротомографии с использованием программ двух-, трехмерной инверсии определено геоэлектрическое строение одного из выходов пород фундамента на дневную поверхность. Установлено погружение исследуемого объекта в западном направлении в сторону расположенного в непосредственной близости соседнего выхода пород баратальской свиты меньших размеров. Можно предположить, что эти два выхода соединяются на глубине 15–20 м и, видимо, являются одной структурой.

Для цитирования

Кузина З. Я. и др. 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

Structural features of the upper part of the section of the Gorniy Altai Uimon depression according to electrotomography data using 3D software

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

*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

Abstract

Received
04.04.2023;

received
in revised
04.05.2023;

accepted
30.05.2023

Key words:

Gorniy Altai,
Uimon depression,
electrical resistivity
tomography,
geolectrical sections,
2D inversion,
3D inversion

Determining the structure of intermountain depressions in seismically active regions at different depths is important for understanding the stages of neotectonic formation of the region and seismic hazard assessment. On the territory of the Uimon depression of the Altai Mountains in different years, measurements were carried out by deep methods of electrical exploration, such as sounding by the formation of the field and vertical electrical soundings. However, to clarify the structure of the upper part of the section, where bedrock outcrops are observed on the day surface, it is necessary to use shallow methods, for example, electrical tomography (ET). The paper discusses the results of ET data interpretation using 2D and 3D inversion when studying basement outcrops in the western part of the basin. Taking into account a priori information and the obtained models, the geological structure of the object of study has been refined. Based on the results of the interpretation of the data of electrotomography using programs of two- and three-dimensional inversion, the geoelectric structure of one of the outcrops of the basement rocks on the day surface has been determined. The immersion of the studied object in the western direction towards the adjacent outcrop of rocks of the Baratal Formation of smaller sizes located in the immediate vicinity has been established. It can be assumed that these two exits are connected at a depth of 15–20 m and, most likely, are one structure.

For citation

Kuzina, Z. Ya. et al. 2023. Structural features of the upper part of the section of the Gorniy Altai Uimon depression according to electrotomography data using 3D software. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 160–169. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169

Введение

Уймонская впадина, наряду с Чуйской и Курайской, относится к самым крупным отрицательным элементам неотектонической структуры Горного Алтая и при этом до последнего времени была недостаточно изучена геофизическими методами. Она расположена в центральной части Горного Алтая, с протяженностью вдоль субширотной оси около 35 км при средней ширине 15 км. Впадина ограничена на севере Теректинским хребтом, с юга – высочайшим в Сибири Катунским хребтом, в подножье которого протекает р. Катунь. В горном обрамлении впадины регулярно происходят землетрясения с магнитудами 4 и более, также выявлены палеоземлетрясения еще больших магнитуд непосредственно на ее территории, т. е. заселенная впадина находится в зоне повышенной сейсмической опасности (Деев, 2019).

В результате надвигания северного горного обрамления на впадину ее форму можно охарактеризовать как ассиметричную отрицательную структуру – полурампу (Деев и др., 2018). Глубинное строение осадочного чехла и кровли фундамента впервые было получено методами электромагнитных зондирований становлением поля в зоне (ЗСБ) и вертикальными электрическими зондированиями (ВЭЗ) (Деев и др., 2012; Санчаа и др., 2020). Работы выполнялись в два этапа. В 2011–2012 гг. по результатам интерпретации электромагнитных зондирований был выбран участок, на котором пробурена первая глубокая скважина. Литолого-стратиграфические данные этой скважины были использованы в качестве априорных при дальнейшей интерпретации данных геоэлектрики. После некоторого перерыва в 2018–2019 гг. работы методами ЗСБ и ВЭЗ были продолжены. По всему объему данных ЗСБ и ВЭЗ, полученных в разные годы, построены разрезы по профилям, карта глубин до опорного высокоомного горизонта. Из-за большого шага между пунктами глубинных измерений осталось неясным строение верхней части разреза, местами осложненное выходами коренных пород баратальской свиты (S_nbr) на дневную поверхность в западной и центральной частях впадины. Для уточнения приповерхностного строения был привлечен метод электротомографии (ЭТ).

В качестве объекта исследования выбран участок с одними из выходов отложений синийского комплекса, расположенный в западной части впадины (рис. 1). На выбранном участке в полевой сезон 2022 г. методом ЭТ с использованием аппаратуры "Скала-48" были получены данные по трем параллельным профилям. Обработка и интерпретация полевых данных квазиплощадной съемки электротомографии выполнялись с использованием программного комплекса моделирования и инверсии DiInSo, разработанного в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (ИНГТ СО РАН)¹ (Мариненко, 2020; DiInSo, 2021). Комплекс позволяет осуществлять двух- и трехмерное моделирование и инверсию.

Цель работы – построение геоэлектрических моделей выбранного участка с использованием трехмерных программ.

Материалы и методы

Геологические данные

Кайнозойские депрессии Горного Алтая – Чуйская, Курайская и Уймонская – формировались практически одновременно и имеют схожую историю осадконакопления и неотектоническое развитие. Вместе с тем у этих впадин наблюдается ряд различий, например, по общей мощности осадочного заполнения, строению краевых частей и по отдельным характеристикам литолого-стратиграфических комплексов.

В северной и центральной части Уймонской впадины существуют значительные конусы выноса рек Курунда, Кастахта, Теректа, Маргала и Чендек. В разрезе впадины присутствуют отложения протерозоя, синия, нижнего и среднего палеозоя и кайнозоя. Фундамент Уймонской впадины представлен теректинской свитой, включающей метаморфические сланцы, песчаники, мраморы. Выше залегают отложения баратальской свиты, предположительно синийского возраста (метаморфизованные диабазы, порфириды и их туфы), которые выходят на дневную поверхность в центральной и западной частях впадины. Предположительно выходами на дневную поверхность геологи считают фрагменты анти- и синклиналей баратальской свиты.

В 2013 г. на основе анализа геоэлектрических данных был выбран участок с относительно неглубоким залеганием фундамента – практически в центре котловины. Специалистами ОАО "Горно-Алтайская Экспедиция" была пробурена первая глубокая скважина, впервые вскрывшая разрез неоген-четвертичных отложений до 400 м, и определены следующие типы отложений: деллювиальные, аллювиальные, пролювиальные, озерные, ледниково-озерные и лессовидные, обладающие неоплейстоцен-голоценовым возрастом (см. табл.) (Русанов и др., 2017). По данным исследований скважины и электромагнитных методов осадочные отложения Уймонской впадины разделяют на два литологических комплекса, которые существенно отличаются по значениям удельного электрического сопротивления. Комплекс отложений туерьской свиты, характеризующийся низкими удельными сопротивлениями, выполнен преимущественно тонкозернистыми озерными отложениями неогенового возраста, которые накапливались в обстановках небольшого вертикального расчленения рельефа. Комплекс, перекрывающий туерьскую свиту, обладает достаточно высокими значениями сопротивлений. Он в существенной степени сложен грубозернистыми фациями четвертичного возраста. Зафиксированные резкий скачок сопротивлений и смена фаций свидетельствуют о возобновлении неотектонических орогенных процессов в Горном Алтае. Во время активизации горнообразовательных

¹ Программный комплекс Direct-Inverse-Solver (DiInSo). URL: <https://diinso.sourceforge.net>.

процессов морфологическая структура впадины видоизменяется: происходит преобразование от структуры пулл-апарт в рампы и полурампы (Деев и др., 2013; 2018).

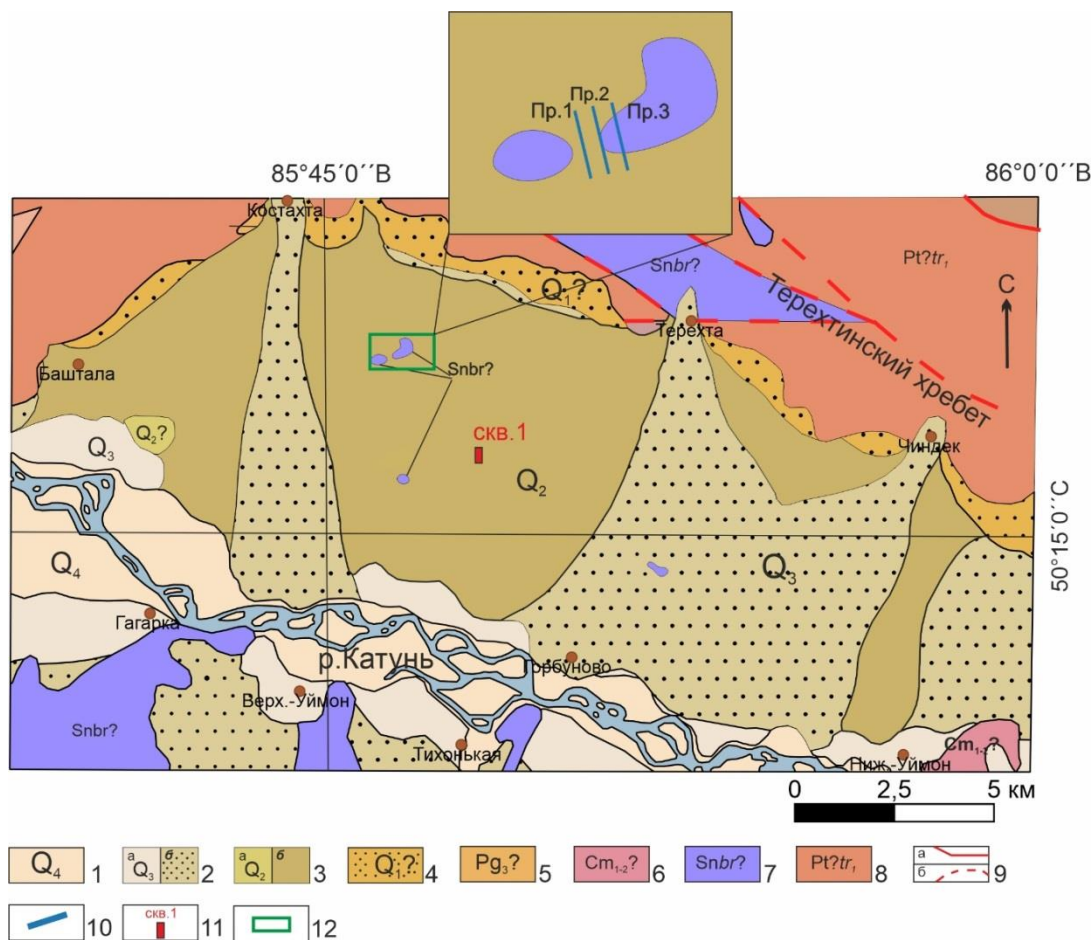


Рис. 1. Карта фактического материала исследуемого района. Карта построена с помощью программ QGIS и CorelDRAW²: 1 – современный отдел – аллювиальные галечники и пески; 2 – верхний отдел – ледниковые валунники и суглинки, водно-ледниковые галечники, аллювиальные галечники и пески, пролювиальные галечники, озерные галечники и гравийные суглинки (а – речные; б – делювиально-пролювиальные); 3 – средний отдел – ледниковые валунники, водно-ледниковые галечники и глины, аллювиальные галечники, пески и глины, озерные галечники, суглинки, пески (а – речные; б – озерно-болотные); 4 – нижний отдел (?) – делювиально-пролювиальные суглинки, глины, пески; 5 – палеогеновая система – Олигоцен (?), глины; 6 – кембрийская система – нижний-средний отделы (?), метаморфизованные порфириды, диабазовые порфириды, вариолиты и их туфы, филлиты, алевролиты, песчаники, кремнисто-глинистые сланцы; 7 – синий комплекс – баратальская (?) свита, метаморфизованные диабазы, порфириды и их туфы, кварц-полевошпатовые породы, метаморфизованные песчаники, метаморфические сланцы, мраморы, кварциты; 8 – протерозойская группа (?), теректинская свита, нижняя подсвита, метаморфические сланцы, сильно метаморфизованные песчаники, мраморы;

9 – тектонические контакты: а – достоверные; б – предполагаемые;

10 – профили электротомографии; 11 – скважина № 1; 12 – контур участка работ

Fig. 1. Map of the actual material of the study area. The map was built using the QGIS and CorelDRAW programs: 1 – modern department – alluvial pebbles and sands; 2 – upper section – glacial boulders and loams, water-glacial pebbles, alluvial pebbles and sands, proluvial pebbles, lake pebbles and gravel loams (a – river; b – deluvial-proluvial); 3 – middle section – glacial boulders, water-glacial pebbles and clays, alluvial pebbles, sands and clays, lake pebbles, loams, sands (a – river; b – lake-marsh); 4 – lower division (?) – deluvial-proluvial loams, clays, sands; 5 – Paleogene system – Oligocene (?), clays; 6 – Cambrian system – lower-middle sections (?), metamorphosed porphyrites, diabase porphyrites, variolites and their tuffs, phyllites, siltstones, sandstones, siliceous-clay shales; 7 – Blue complex – Baratalskaya (?) entourage, metamorphosed diabases, porphyrites and their tuffs, quartz-feldspar rocks, metamorphosed sandstones, metamorphic shales, marbles, quartzites; 8 – Proterozoic group (?) – Terekta formation, lower sub-formation. Metamorphic shales, highly metamorphosed sandstones, marbles; 9 – tectonic contacts: a – reliable; b – assumed; 10 – electrotomography profiles; 11 – well No. 1; 12 – outline of the work site

² Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200000. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV. Горно-Алтайск: объяснительная записка / сост. Е. С. Левицкий, С. Н. Баженова, А. В. Борцова и др. М. : Недра, 1964. 79 с. ; Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000 // Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV (Усть-Кокса): Объяснительная записка / сост. О. М. Попова и др. М. : Московский филиал ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2019.

Таблица. Геологический разрез скважины № 1 [по данным из (Русанов и др., 2017)]
Table. Geological section of well N 1 [based on (Rusanov et al., 2017)]

№ п/п	Описание пород	Индекс	Глубина подошвы слоя, м	Мощность слоя, м
1	Озерно-ледниковые (?) отложения: переслаивание глин, галечников, песков	lgQ _{III}	23	23
2	Ледниковые, флювиогляциальные и аллювиальные (?) отложения нерасчлененные: переслаивание валунного галечника, гравия, валунника, песка	g, f, aQ _{II}	207	184
3	Аллювиальные и пролювиальные (?) отложения башкауской свиты: переслаивание гравия, валунника, валунного галечника, песка, галечника	a, pQ _{II} bs	297	90
4	Озерно-аллювиальные (?) отложения бекенской свиты: переслаивание глины, галечника, песка галечно-гравийного	laQ _I bk	339	42
5	Озерные отложения туерькской свиты: алевроит, глина	N ₁₋₂ tr	400	61

Методика, аппаратура и интерпретация данных электротомографии

С целью уточнения строения в зоне одного из выходов баратальской свиты в западной части впадины была выполнена съемка по трем профилям методом электротомографии (рис. 1). Электротомография – это современный метод электроразведки, который относится к методам сопротивлений. Для него разработана методика полевых наблюдений, а также технология обработки и интерпретации данных. Особенностью данного метода является использование многоэлектродной аппаратуры, в которой электрод может быть как питающим, так и приемным при многократных измерениях. Такая методика значительно увеличивает производительность и разрешающую способность исследований методом сопротивлений (Бобачев и др., 1995).

Полевые данные ЭТ в Уймонской впадине получены с использованием аппаратуры "Скала-48", корпус которой включает в себя генератор, измеритель (избирательный милливольтметр) и коммутатор на электромеханических реле³ (Балков и др., 2012). В ходе измерений использовалась установка Шлюмберже, шаг между электродами составлял 5 м. Ориентация и расположение профилей выбрано таким образом, чтобы они проходили через выходы баратальской свиты и зону перехода от них к осадочному выполнению впадины. Квазитрехмерные измерения по системе профилей позволяют осуществить 3D инверсию. Длина каждого из профилей составляет 355 м, расстояние между ними выбрано в 100 м.

Многоэлектродный электроразведочный кабель (коса) разделяется на 2 сегмента. Для последовательного увеличения протяженности профиля используется нагоняющая расстановка сегментов этого кабеля. На рис. 2 приведен пример использования двух сегментов 24-электродного кабеля и "стрелочкой" обозначается перенос первого сегмента далее по профилю для продолжения измерений (Балков и др., 2012).

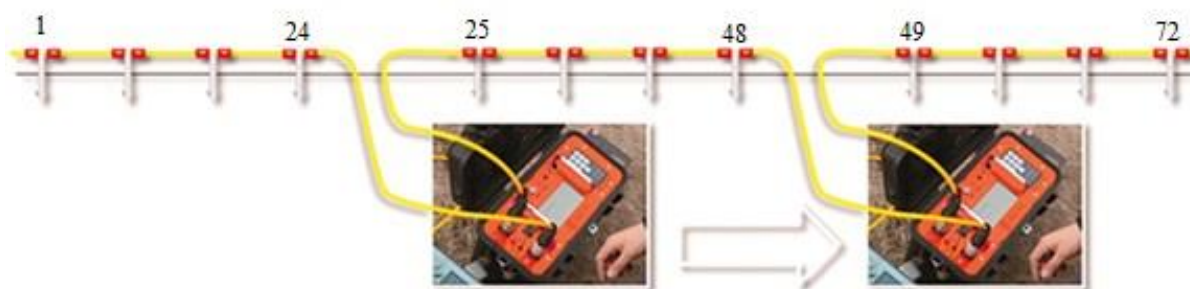


Рис. 2. Схема расположения двух сегментов 24-электродного электроразведочного кабеля и его подключение к станции (Балков и др., 2012)

Fig. 2. Layout of two segments of a 24-electrode electrical exploration cable and its connection to the station (Balkov et al., 2012)

³ Техническое описание и инструкция по эксплуатации "Скала-48" – аппаратура электроразведочная многоэлектродная. 2013–2019.

Первичная обработка полевых данных производилась с помощью программы RiPPP. Данная программа позволяет отфильтровать данные, просмотреть таблицу с параметрами установки и соответствующее распределение кажущихся сопротивлений, проанализировать профильные диаграммы и псевдоразрез. Пример распределения кажущегося сопротивления для профиля № 3 представлен на рис. 3. Уровень значений разности потенциалов составляет более 40 мВ, сила тока в питающих линиях от 40 до 400 мА. Точность измерения напряжения – 1 %.

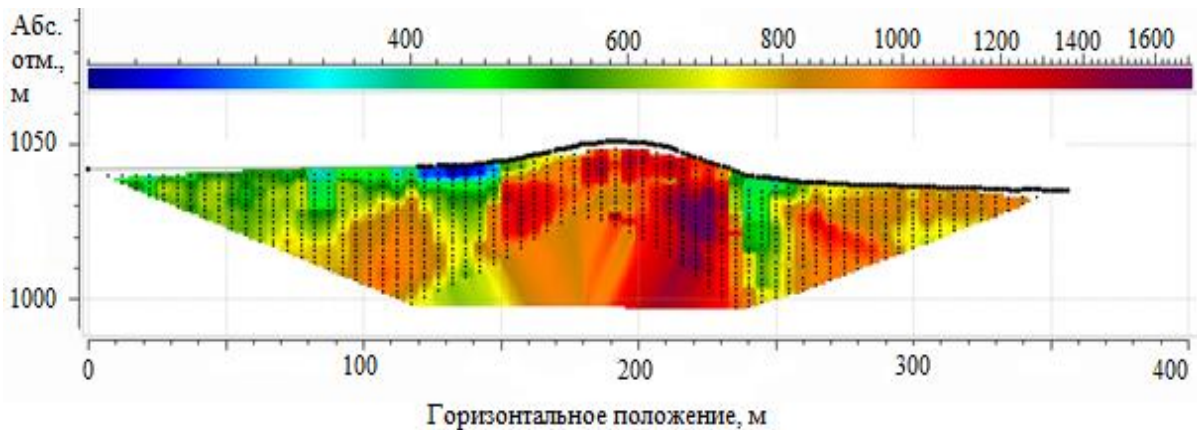


Рис. 3. Разрез кажущегося сопротивления по профилю № 3
Fig. 3. Section of apparent resistances according to profile N 3

Для двумерной и трехмерной инверсии использовался программный комплекс DiInSo, предназначенный для решения прямых 3D и обратных 2D/3D задач электротомографии (Версия 2.5 от 25.03.2022) (DiInSo, 2021). В процессе решения обратных задач (используется схема Гаусса – Ньютона) требуется построение сетки – треугольной в случае 2D и тетраэдральной – в случае 3D. Большинство функций и настроек в данной программе заданы и выполняются автоматически (в том числе генерация сетки), но есть удобная возможность их изменять в зависимости от поставленной задачи с целью получения наиболее приемлемого результата. Так, в нашем случае мы меняли параметр регуляризации, скорость роста ячеек с глубиной и ограничивали максимальный размер ячеек генерируемой сетки.

В работе подбирались следующие значения параметра регуляризации: 1, 20, 100, 500 и 1 000. При больших значениях параметра, таких как 500 и 1 000, геоэлектрические разрезы недостаточно контрастны и контуры аномалий излишне сглажены. Наиболее контрастный разрез наблюдается при использовании параметра регуляризации, равного 1, при этом контуры высокоомной аномалии сильно "изломаны". Оптимальные результаты были получены при использовании параметров регуляризации, равных 20 и 100 с невязками 7,76 и 10,43 % соответственно. Таким образом, в качестве компромиссного значения был выбран параметр регуляризации, равный 20. Также методом подбора выбрано максимальное значение роста ячеек, равное 100, которое позволяет сгенерировать достаточно густую сетку без больших затрат на объем оперативной памяти компьютера. Следует учитывать, что при измерениях по профилям наблюдаются существенные изменения рельефа, поэтому необходимо учитывать влияние топографии при расчете инверсии, что также можно указать в настройках данного ПО DiInso.

Результаты и обсуждение

Интерпретация полевых данных электротомографии

Геоэлектрические разрезы по профилям электротомографии № 1–3 получены по результатам 2D инверсии с помощью программы DiInSo (рис. 4).

По геологическим данным баратальская свита сложена метаморфическими породами, которые характеризуются повышенными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС). В частности, по результатам интерпретации данных электротомографии УЭС свиты получено в интервале от 1 000 до 2 200 Ом·м и более (зелено-красная цветовая гамма). На всех трех геоэлектрических разрезах штриховой линией были выделены контуры высокоомных аномалий, которые характеризуют вертикальные срезы блока коренных пород. Вмещающие породы со значениями УЭС до 700 Ом·м (синяя цветовая гамма) до глубин 40 м, учитывая данные скважин и исходя из значений УЭС, можно отнести к озерно-ледниковым и ледниковым отложениям, представленным галечниками, переслаиванием валунного галечника, гравия, валунника и песка.

Следует отметить, что на выбранной площади наблюдается два выхода баратальской свиты на поверхность. На расстоянии примерно 230 м от начала профиля № 1 прослеживается аномалия высоких значений сопротивлений шириной около 50 м, ее верхняя кромка находится на глубине ~5 м. Расположение профиля № 1 и локализация высокоомной аномалии в совокупности с данными геологической карты позволяют сделать предположение о возможном наличии "перемычки" между двумя выходами блоков коренных пород, т. е. их можно рассматривать как единый объект. На геоэлектрическом разрезе по профилю № 2 также наблюдается область повышенных значений сопротивлений, расположенная на расстоянии 180 м от начала профиля, шириной ~100 м и с верхней кромкой на глубине в 6–7 м. На дневную поверхность исследуемый блок выходит только в области профиля № 3, что выражено и в рельефе. Ширина высокоомной аномалии быстро увеличивается с глубиной и составляет 110 м на отметке ~40 м.

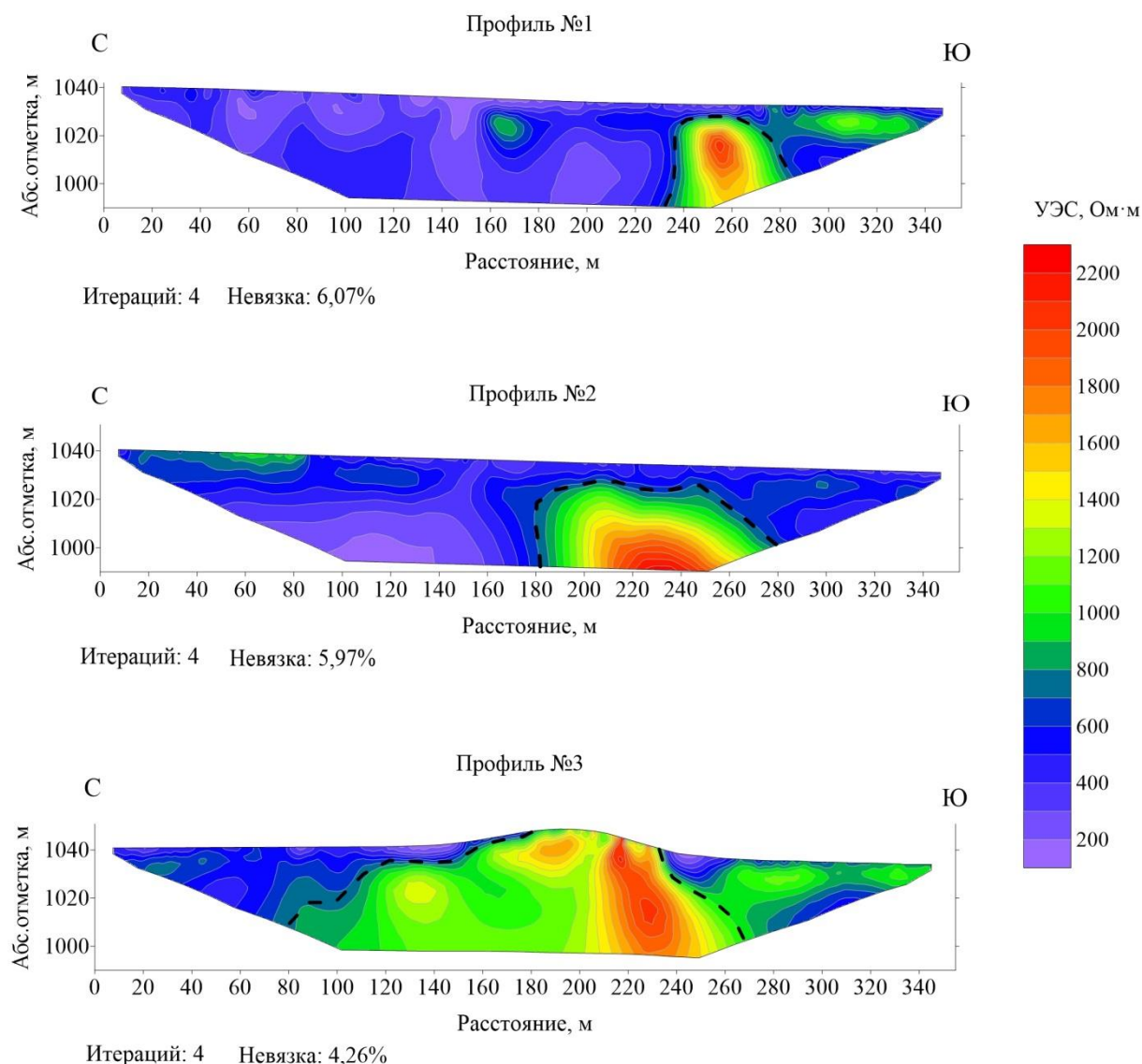


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по профилям № 1–3 по результатам двумерной инверсии (предполагаемые контуры выходов пород баратальской свиты отмечены черной штриховой линией)

Fig. 4. Geoelectric sections along profiles N 1–3 based on the results of a two-dimensional inversion (the estimated contours of outcrops of rocks of the Baratal Formation are marked with a black dashed line)

Далее была произведена 3D инверсия квази-площадных данных ЭТ. На рис. 5 представлены вертикальные срезы по линиям трех профилей трехмерной модели.

Сравнивая разрезы 2D инверсии и вертикальные срезы, полученные по результатам 3D инверсии (рис. 4, 5), можно отметить, что высокоомные аномалии совпадают по форме, но отличаются по значениям УЭС. По результатам 3D инверсии УЭС ниже, чем на разрезах 2D инверсии. Данная закономерность встречается в различных ПО, вероятнее всего, это не связано с алгоритмом инверсии в той или иной

программе, а объясняется различной геометрией задач. Объем изучаемой среды в 3D случае больше, чем в 2D, поэтому результаты получаются более сглаженными. Таким образом, значения сопротивлений, характеризующие метаморфические породы баратальской свиты, будут находиться в диапазоне примерно от 800–850 Ом·м до >2 000 Ом·м. Глубины залегания кровли высокоомных аномалий на вертикальных срезах по профилям № 1, 2 больше (достигают 10–15 м), чем на геоэлектрических разрезах 2D инверсии, горизонтальные размеры аномалий практически идентичны. Разрезы, приведенные на рис. 4 и 5, представлены в одной цветовой шкале с целью более достоверного сопоставления результатов.

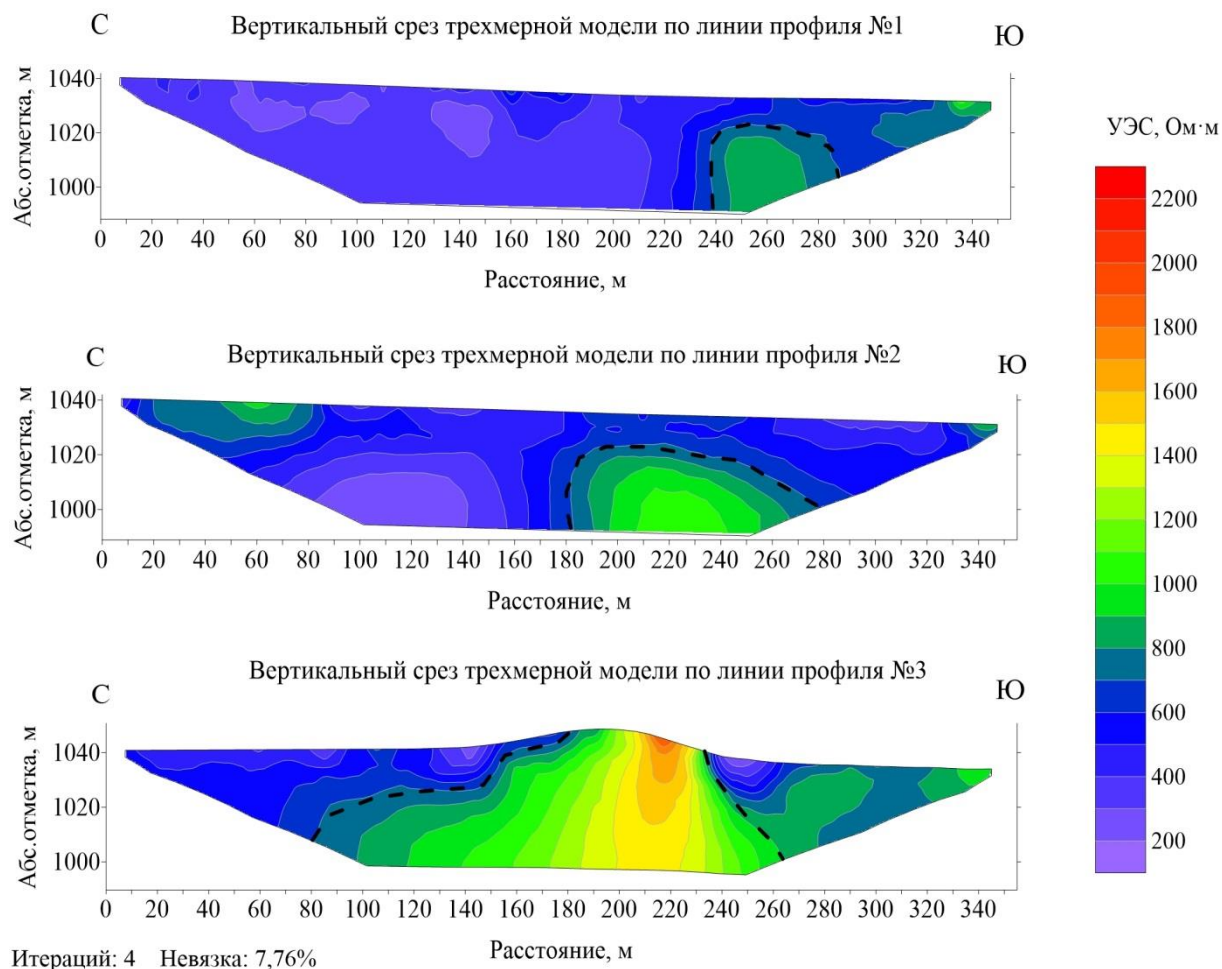


Рис. 5. Вертикальные срезы трехмерной модели по линиям профилей № 1–3

(предполагаемые контуры выходов пород баратальской свиты отмечены черной штриховой линией)

Fig. 5. Vertical sections of the 3D model along the lines of profiles N 1–3 (the estimated contours of the rock outcrops of the Baratal Formation are marked with a black dashed line)

Также по результатам 3D инверсии были построены горизонтальные срезы распределения УЭС на разных глубинах (рис. 6).

Анализируя горизонтальные срезы распределения УЭС на разных глубинах, можно сделать вывод, что на глубине 10 м в районе профилей № 1 и 2 не наблюдаются высокоомные аномалии (рис. 6). Продолжение блока коренных пород на глубину от непосредственного выхода на поверхность наблюдается на отметках глубин от 20 м и глубже. При интерпретации площадных данных стоит учитывать, что достаточно большое расстояние между профилями в 100 м может привести к проявлению ложных аномалий и к существенному сглаживанию результата. К наиболее информативным относятся срезы, полученные на глубинах 10, 20 и 30 м, так как на предельной глубине в 40 м для всех установок электротомографии объем данных существенно ограничен.

Трехмерная модель участка по результатам 3D инверсии представлена на рис. 7.

Основываясь на анализе представленных выше результатов, для выделения исследуемого объекта был выбран диапазон сопротивлений от 850 Ом·м до 2 000 Ом·м. Предположение о наличии "перемычки" между двумя соседними блоками выходов коренных пород подтверждается результатами трехмерной инверсии.

Достаточно массивный объем пород баратальской свиты выходит на поверхность вблизи профиля № 3, его кровля погружается в западном направлении, где в непосредственной близости от профиля № 1 наблюдается еще один выход этих пород. Для более точных выводов необходимо уменьшить шаг между профилями примерно в 2 раза. Также в южной части рис. 7 наблюдаются менее достоверные аномалии, связанные с большим шагом между профилями и, соответственно, недостатком полевых данных.

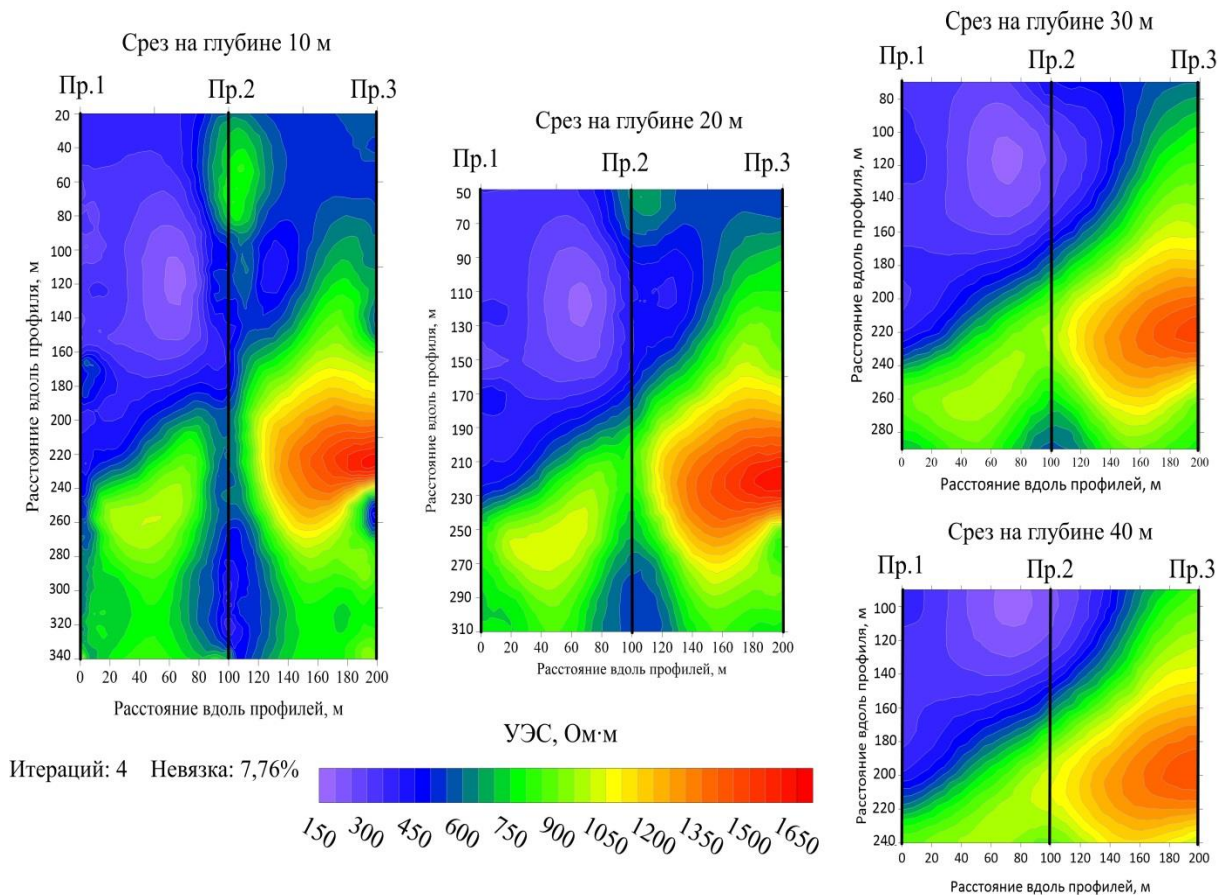


Рис. 6. УЭС на глубинах 10, 20, 30 и 40 м, построенные по результатам 3D инверсии
 Fig. 6. Resistivity at depths of 10, 20, 30 and 40 m plotted based on the results of 3D inversion

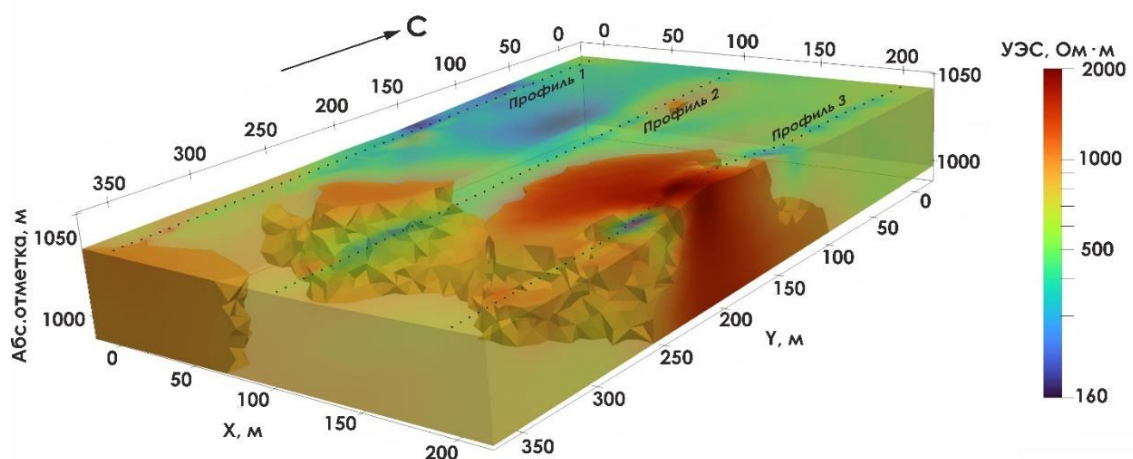


Рис. 7. Результат 3D инверсии площадных данных с выделенными структурами, предположительно приуроченными к породам баратальской свиты
 Fig. 7. The result of 3D inversion of areal data with identified structures presumably confined to the rocks of the Baratal Formation

Заключение

В полевой сезон 2022 г. в районе выходов на поверхность пород фундамента в Уймонской впадине были выполнены измерения методом электротомографии с целью определения их геоэлектрического строения.

По результатам интерпретации данных электротомографии с использованием программ двух-, трехмерной инверсии определено геоэлектрическое строение одного из выходов пород фундамента на дневную поверхность. Было установлено погружение исследуемого объекта в западном направлении в сторону расположенного в непосредственной близости соседнего выхода пород баратальской свиты меньших размеров. Таким образом, можно обоснованно предполагать, что эти два выхода соединяются на глубине 15–20 м и, скорее всего, являются одной структурой.

В полевом сезоне 2023 г. планируется продолжение исследований. Предполагается сгущение сети наблюдений путем уменьшения шага между профилями до 50 м; увеличение площади съемки в западном направлении. С целью верификации полученных моделей по результатам инверсии будет проведено численное трехмерное моделирование для сопоставления с полевыми данными. Кроме того, для уточнения строения зоны сочленения соседних выходов баратальской свиты будут выполнены вертикальные электрические зондирования в районе профиля № 1, с разносами установки, существенно превышающими максимальный разнос метода электротомографии для повышения глубинности исследования.

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

- Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К. [и др.]. Опыт применения электротомографии в геофизике // *Геофизика*. 2012. № 6. С. 54–63.
- Бобачев А. А., Марченко М. Н., Модин И. Н., Перваго Е. В. [и др.]. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // *Физика Земли*. 1995. № 12. С. 79–90.
- 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>. EDN: UBZWZT.
- Деев Е. В., Зольников И. Д., Гольцова С. В., Русанов Г. Г. [и др.]. Следы древних землетрясений в четвертичных отложениях межгорных впадин Центральной части Горного Алтая // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54, № 3. С. 410–423. EDN: PXLQVX.
- Деев Е. В., Зольников И. Д., Турова И. В. [и др.]. Палеоземлетрясения в Уймонской внутригорной впадине (Горный Алтай) // *Геология и геофизика*. 2018. Т. 59, № 4. С. 437–452. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20180402>. EDN: YWRNAO.
- 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. N 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* : сб. тез. докладов 16 науч.-практ. конф., Пермь, 14–18 сентября 2020 г. Москва : ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ, 2020. С. 100. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051125>.
- 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 Горного Алтая по данным нестационарных электромагнитных зондирований // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2020. Т. 43, № 3. С. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76>. EDN: JQJRBG.
- DiInSo : программа для ЭВМ / А. В. Мариненко № 2021662035 ; заявл. 13.07.2021 ; опубл. 21.07.2021.

References

- Balkov, E. V., Panin, G. L., Manstein, Yu. A., Manstein, A. K. et al. 2012. Electrotomography in Geophysics: Experience of application. *Geofizika*, 6, pp. 54–63. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Marchenko, M. N., Modin, I. N., Pervago, E. V. et al. 1995. New approaches to electrical sounding of horizontally inhomogeneous media. *Fizika zemli*, 12, pp. 79–90. (In Russ.)
- Deev, E. V. 2019. Zones of concentration of ancient and historical earthquakes of the Altai Mountains. *Fizika zemli*, 3, pp. 71–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019371-96>. EDN: UBZWZT. (In Russ.)

- Deev, E. V., Zolnikov, I. D., Goltsova, S. V., Rusanov, G. G. et al. 2013. Traces of ancient earthquakes in quaternary deposits of intermountain depressions of the Central part of the Altai Mountains. *Russian Geology and Geophysics*, 54(3), pp. 410–423. EDN: PXLQVX. (In Russ.)
- Deev, E. V., Zolnikov, I. D., Turova, I. V. et al. 2018. Paleozoic earthquakes in the Uymon intragonal depression (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 59(4), pp. 437–452. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20180402>. EDN: YWRNAO. (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. Coll. of articles *Engineering and Ore Geophysics 2020*. Perm, September 14–18, 2020, pp. 100. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051125>. (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*, 43(3), 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. Marinenko A. V. N 2021662035; application 13.07.2021; publ. 21.07.2021.

Сведения об авторах

Кузина Зоя Ярославовна – пр. Академика Коптюга, 3, 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, Россия, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, д-р геол.-минерал. 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.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник; 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>