

З. Я. Кузина^{1}, А. М. Санчаа¹, Н. Н. Неведрова¹*

Геоэлектрическое строение выходов коренных пород на дневную поверхность в Уймонской впадине на основе трехмерной инверсии и численного моделирования

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: z.kuzina@g.nsu.ru

Аннотация. В статье представлены результаты изучения геоэлектрического строения выходов пород фундамента в западной и центральной частях Уймонской впадины Горного Алтая методом электротомографии (ЭТ). В полевые сезоны с 2020 по 2023 гг. были проведены измерения по 13 профилям, 6 из которых, приурочены к выходу коренных пород, расположенному в западной части впадины, остальные 7 – к выходу коренных пород в центральной ее части. В статье представлены результаты трехмерной инверсии с учетом всех данных ЭТ для каждого из объектов исследования. Также представлены результаты трехмерного численного моделирования, выполненного с целью обоснования полученных моделей. Оценены вертикальные размеры выходов коренных пород и углы наклона границ исследуемого объекта.

Ключевые слова: электротомография, 3D инверсия, трехмерное моделирование, Горный Алтай, Уймонская впадина

Z. Y. Kuzina^{1}, A. M. Sanchaa¹, N. N. Nevedrova¹*

Goelectric structure of the outcrops of bedrock on the day surface in the Uimon depression based on three-dimensional inversion and numerical modeling

¹ The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
*e-mail: z.kuzina@g.nsu.ru

Abstract. The article presents the results of studying the goelectric structure of the basement rock outcrops in the western and central parts of the Uimon depression of the Gorny Altai by the method of electrical resistivity tomography (ERT). In the field seasons from 2020 to 2023, measurements were carried out on 13 profiles, 6 of which were timed to the outcrop of bedrock located in the western part of the depression, the remaining 7 – to the outcrop of bedrock in its central part. The article presents the results of a three-dimensional inversion considering all the ERT data for each of the objects of study. The results of three-dimensional numerical modeling performed to substantiate the obtained models are also presented. The vertical dimensions of the outcrops of the bedrock and the angles of inclination of the boundaries of the studied object are estimated.

Keywords: electrical resistivity tomography (ERT), 3D inversion, three-dimensional modeling, Gorny Altai, Uimon depression

Введение

Уймонская впадина расположена в центральной части Горного Алтая, с протяженностью вдоль субширотной оси около 35 км при средней ширине 15 км. Исследования комплексом методов геоэлектрики ВЭЗ и ЗСБ в Уймонской котловине проводились с 2011 по 2019 гг [7]. По результатам интерпретации данных глубинных методов геоэлектрики за разные годы была построена геоэлектрическая модель впадины, в которой не учитывались особенности верхней части разреза в виде выходов метаморфических пород ордовикского возраста на дневную поверхность [3]. Можно рассмотреть несколько предположений образования выходов коренных пород. По мнению специалистов-геологов – это либо обрывки верхушек антиклиналий, сдвинутые мощными 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. Таким образом, стало очевидным, что нужно привлекать в исследование метод электротомографии. На рис. 1 представлена схема расположения профилей ЭТ в Уймонской впадине.

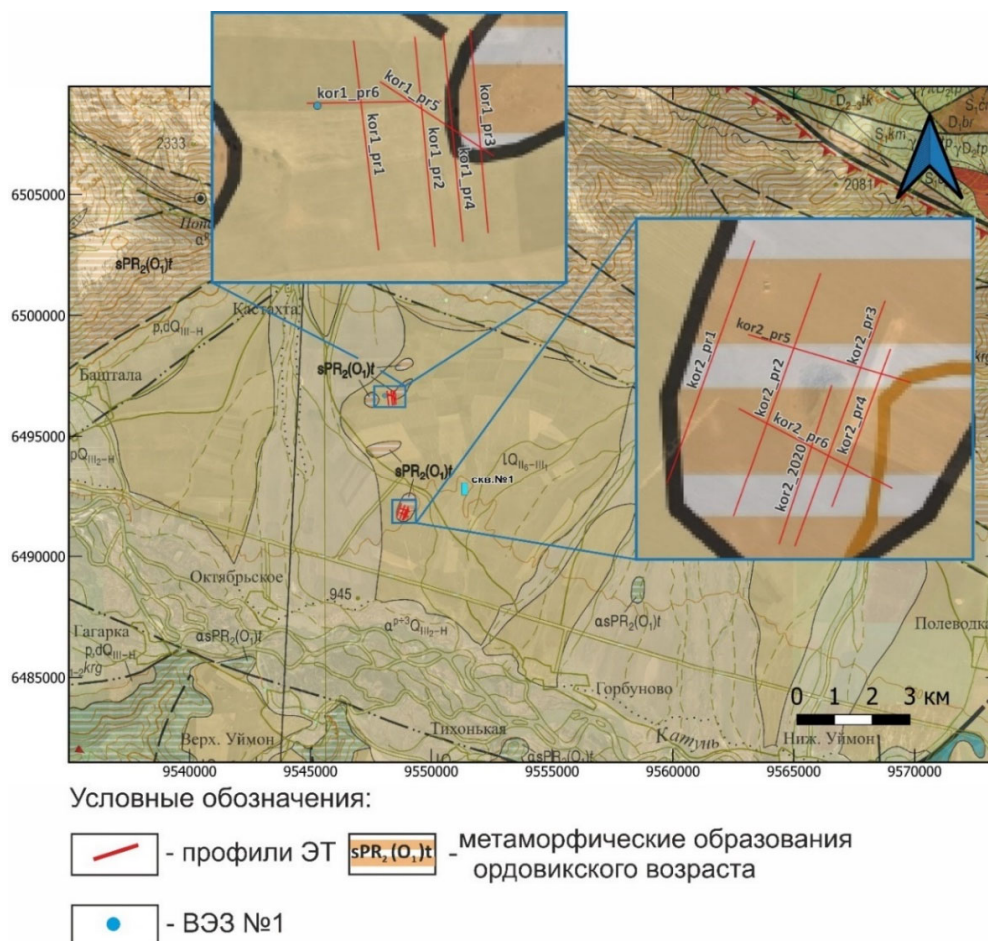


Рис. 1. Обзорная карта района работ в Уймонской впадине на подложке космоснимка и геологической карты (1:200 000) Уймонской впадины, созданная с использованием программных комплексов QGis и CoralDraw [2]

Методика, аппаратура и интерпретация данных электотомографии

Полевые данные ЭТ в Уймонской впадине получены с использованием аппаратуры “Скала-48” [1, 8]. В ходе измерений использовалась установка Шлюмберже, шаг между электродами составлял 5 метров. Профили kor1_pr1, 2, 3, 4, 5 и 6 приурочены к выходам на дневную поверхность метаморфических пород ордовикского возраста. За полевые сезоны 2021-2022 гг. было выполнено три параллельных профиля (pr1, 2 и 3) с шагом 100 метров. Для сбора данных использовалась нагоняющая установка с одной переключкой, в результате чего, было достигнуто непрерывное увеличение длин профилей до 355 метров. В полевой сезон 2023 года было выполнено измерение по профилю pr4, длиной 355 м, между pr2 и pr3, а также два секущих профиля длиной 235 м (pr5, pr6).

Профили kor2_pr1, 2, 3, 4, 5, 6 и kor2_2020 также приурочены к выходам на дневную поверхность метаморфических пород ордовикского возраста. За полевые сезоны 2021-2022 гг. было выполнено три параллельных профиля с длиной 355 м (pr1, 2 и 3) с шагом 100 метров. Остальные профили (pr4, 5, 6 и 2020) имеют длину 235 метров. Расположение профилей выбрано таким образом, чтобы со всех сторон наблюдаемого выхода коренных пород проследить характер его погружения на глубину.

Фильтрация полевых данных производилась с помощью программ RiPPP и Xeris. Для решения прямой и обратной задачи использовалась программа DiInSo [6]. Математическое моделирование в выбранной программе проводится в трехмерной области, которая задана с помощью тетраэдральной сетки. Для геометрического построения модели с последующей генерацией конечно-элементной сетки необходимо использовать стороннюю программу. В данной работе применялась программа GiD [9].

Результаты и обсуждения

Трехмерная модель западного участка по результатам трехмерной инверсии всех шести профилей представлена на рис. 2.

Полученная 3D модель, включающая высокоомный объект, расположенный во вмещающей среде более низкого УЭС, была взята за основу для трехмерного моделирования. Общая геометрия объекта оценивалась по результатам 3D инверсии полевых данных (рис. 2), геологической карты и космоснимка. Расположение и углы наклона границ вблизи профилей 1, 2 и 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 как с северного, так и с южного направлений [4]. В районе же третьего профиля наблюдается ассиметричное строение: с северного направления граница погружается под более пологим углом от дневной поверхности, около 25°, южная же боковая граница обладает углом падения 40-70°. Было построено несколько моделей для обоснования углов наклона вблизи профиля 3, вертикального размера объекта и учета рельефа дневной поверхности, который может влиять на результаты [5].

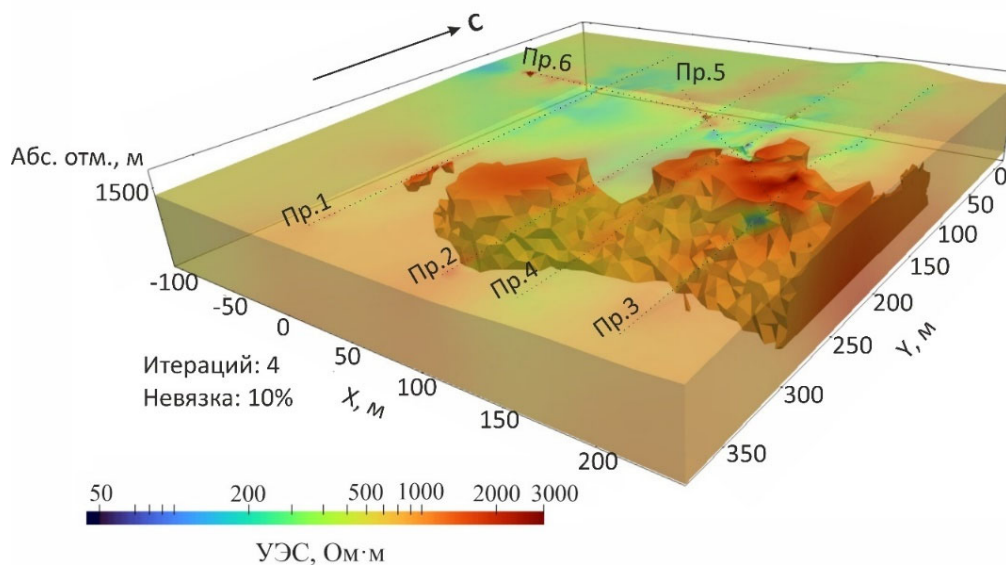


Рис. 2. Результат 3D инверсии полевых данных (с выделенными структурами с диапазоном УЭС 950–3000 Ом×м, предположительно приуроченными к породам фундамента)

По данным ЭТ по профилям в районе выхода коренных пород в центральной части впадины также была осуществлена 3D инверсия, по результатам которой были построены горизонтальные срезы распределения УЭС на глубинах 10, 20 и 30 метров (рис. 3). В центральной области каждого горизонтального среза прослеживается высокоомная (более 1000 Ом×м) аномалия, приуроченная, вероятнее всего, к породам фундамента, что согласуется с геологической картой и космоснимком. Описанная выше аномалия прослеживается в северном направлении, между профилями № 2 и № 3. Продолжение блока коренных пород на глубину в северном направлении наблюдается на отметках глубин от 15 м и глубже. Также, как и в случае с первым объектом, при интерпретации данных стоит учитывать, что расстояние между профилями № 2 и № 3 в 100 м может привести к «натягиванию» аномалий и к существенному сглаживанию результата. Также, анализируя построенные срезы на разных глубинах, можно сделать вывод о том, что исследуемый объект погружается на глубину субвертикально.

Получив предположения о строении объекта по результатам двумерной и трехмерной инверсии, следующим шагом интерпретации также было трехмерное численное моделирование.

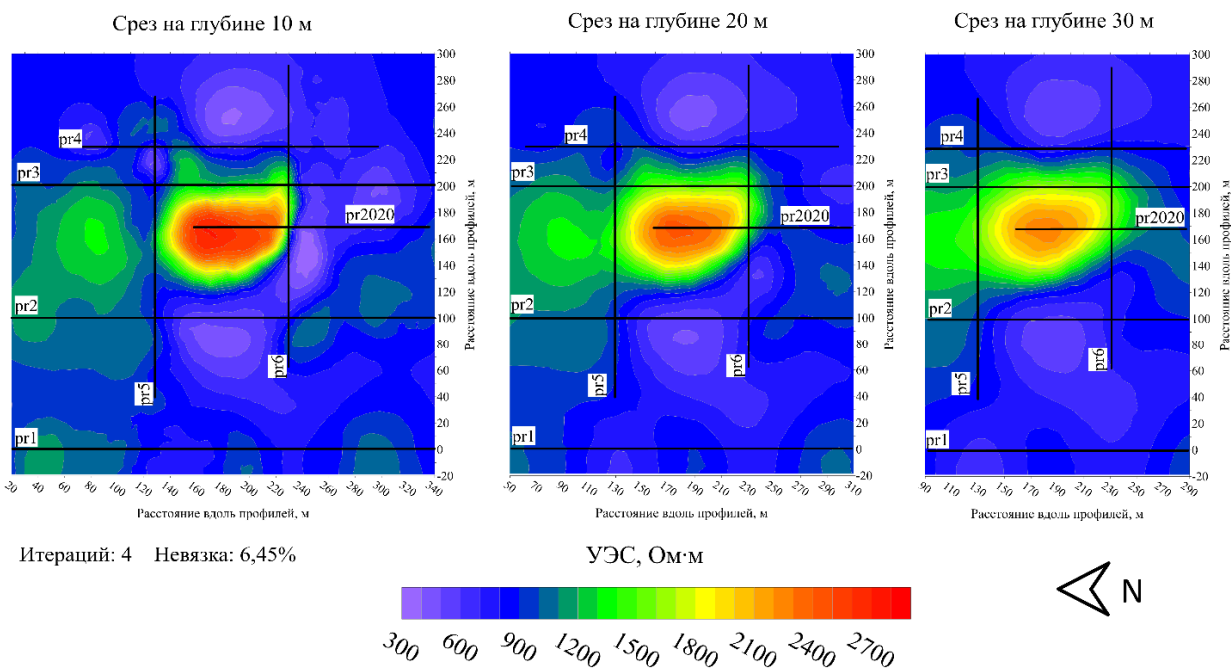


Рис. 3. УЭС на глубинах 10, 20 и 30 м, построенные по результатам 3D инверсии

Изначально, было построено несколько вариантов геометрии исследуемого объекта, в данной статье представлен оптимальный вариант. Построенная модель представлена на рис. 4.

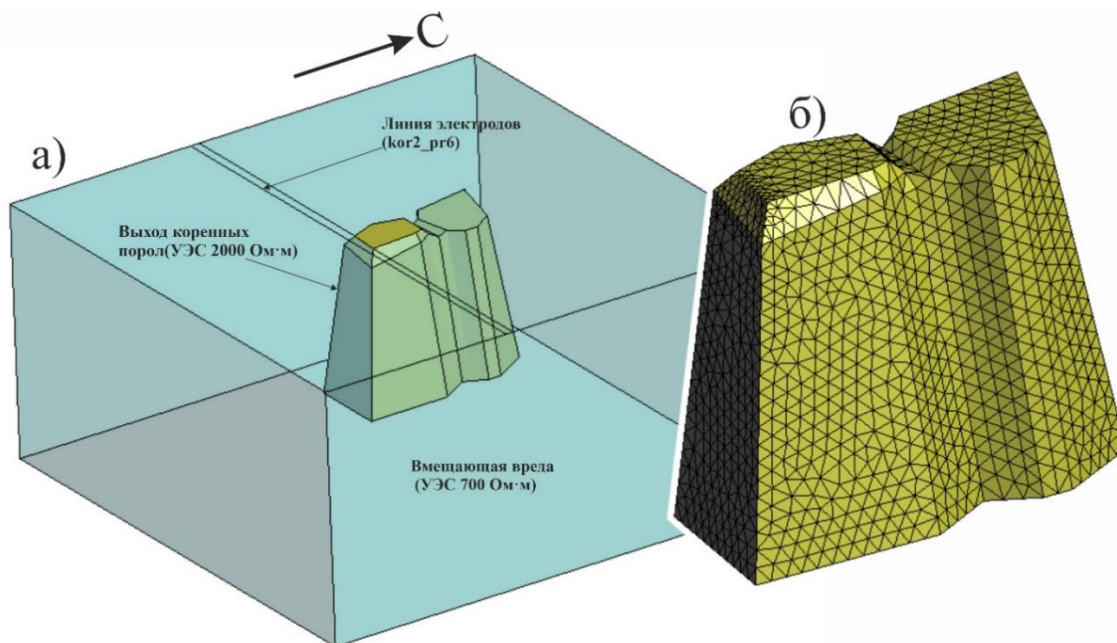


Рис. 4. Объект исследования в заданной области: показана построенная модель и линия электродов профиля № 6 (а); б – сгенерированная сетка с мелкостью разбиения 10 для объекта исследования

Для объекта № 2 также было построено две модели для обоснования вертикального размера объекта и учета рельефа дневной поверхности, который может влиять на результаты. Общие параметры, используемые при моделировании, следующие: мелкость разбиения сетки (на линии электродов – 2, на поверхностях и объеме объекта – 10 и среде – 50); область моделирования со сторонами 700 м × 700 м × 350 м; значение УЭС выхода коренных пород 2000 Ом×м, вмещающей среды – 700 Ом×м.

Модель 2.1 (изменяющийся параметр – вертикальный размер объекта).

В данном случае рассматривалось две модели с разным вертикальным размером объекта: 50 и 200 метров. На результатах трехмерной инверсии модельных данных визуальные отличия не заметны. Таким образом, была осуществлена двумерная инверсия модельных данных для профиля № 5, результаты которой качественно сопоставлялись с двумерной инверсией полевых данных (рис. 5).

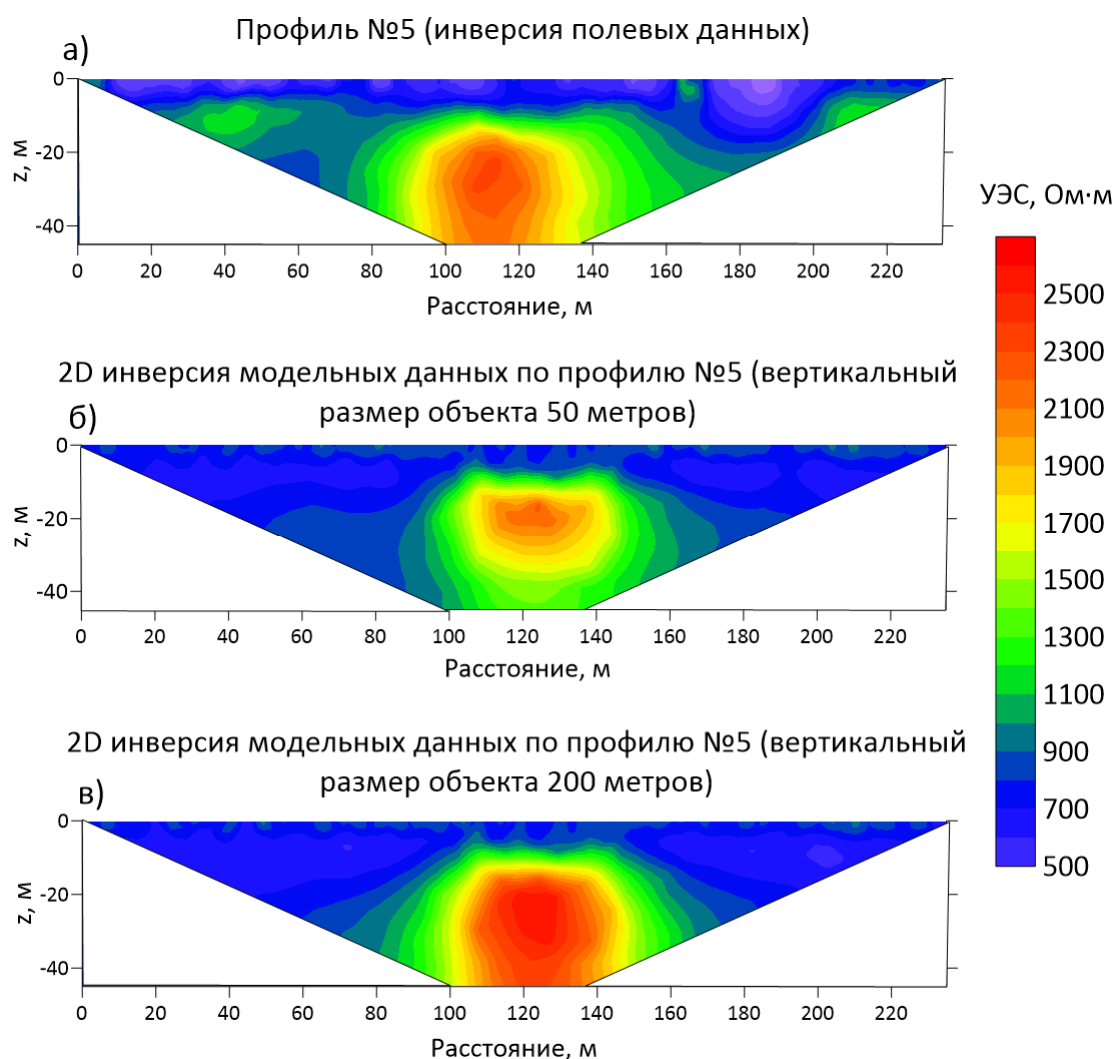


Рис. 5. Разрез 2D инверсии полевых данных - а; результаты 2D инверсии по профилю № 5 модельных данных с вертикальным размером объекта: б – до 50 м, в – до 200 м

Положение верхней кромки высокоомной аномалии на всех трех геоэлектрических разрезах расположена на глубине примерно 10 метров. Однако данная аномалия отличается по форме и характеру прослеживания на глубину. Так, на геоэлектрическом разрезе полевых данных, по изолинии 1300 Ом×м ширина высокоомной аномалии составляет порядка 80 метров, что не согласуется с результатом инверсии модельных данных, где вертикальный размер объекта 50 метров. При этом область со значениями УЭС более 1500 Ом×м на разрезе инверсии полевых данных имеет выдержанную ширину с увеличением глубины, что имеет большую визуальную согласованность с геоэлектрическим разрезом модельных данных, где вертикальный размер объекта составлял 200 метров.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что оба исследуемых объекта не являются приповерхностными неоднородностями, они обладают вертикальным размером большим глубины исследования. Скорее всего это объекты, уходящие на глубину более 50 м. Для объекта № 1 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. Также, выдвинуто предположение о том, что, так как объект № 1 прослеживается в западном направлении, в сторону находящегося в непосредственной близости выхода коренных пород меньших размеров, то они могут представлять собой одну геологическую структуру. Для объекта № 2 углы наклона данного выхода коренных пород близки к субвертикальному. Также наблюдается прослеживание объекта в северном направлении.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022–0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К., Белобородов В. А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика. – 2013. – № 6. – С. 54–63.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000 // Издание второе // Серия Горно-Алтайская. Лист М-45-XIV (Усть-Кокса): Объяснительная записка. / сост. О. М. Попова, В. И. Крупчатников, А. Л. Пономарев, Г. Г. Русанов, Е. А. Колпакова. – М. : Московский филиал ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 2019.
3. Деев.Е. В., Неведрова Н. Н., Русанов Г. Г., Санчаа А. М., Бабушкин С. М., Кречетов Д. В., Ельцов И. Н., Зольников И. Д. Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2012. – Т. 9. – № 1. – С. 15-23.
4. 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.
5. 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.

6. Программный комплекс Direct-Inverse-Solver (DiInSo). URL: <https://diinso.sourceforge.net>
7. 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.
8. Техническое описание и инструкция по эксплуатации “Скала-48” – аппаратура электроразведочная многоэлектродная. 2013-2019.
9. GiD. URL:<https://www.gidsimulation.com/> (дата обращения:31.01.2024).

© З. Я. Кузина, А. М. Санчаа, Н. Н. Неведрова, 2024