

З. Я. Кузина¹✉, А. М. Санчаа¹, А. Е. Шалагинов¹, И. О. Шапаренко¹

Обновленная геоэлектрическая модель серии выходов коренных пород Уймонской впадины по данным методов постоянного тока (ЭТ, ВЭЗ)

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская федерация
e-mail: KuzinaZY@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье представлены новые результаты изучения геоэлектрического строения серии выходов пород фундамента в западной и центральной частях Уймонской впадины Горного Алтая методами постоянного тока: электротомографии (ЭТ) и вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). В полевые сезоны с 2020 по 2023 года были проведены измерения по 13 профилям, 6 из которых, приурочены к выходу коренных пород, расположенному в западной части впадины (Объект №1), остальные 7 – к выходу коренных пород в центральной ее части (Объект №2) [4]. В полевой сезон 2024 года выполнен ряд дополнительных измерений по профилям ЭТ на этих объектах и проведены измерения на выходах коренных пород, расположенных между исследуемыми объектами, но ранее не исследованных. Кроме того, было выполнено 5 пунктов ВЭЗ, с целью определения геоэлектрического строения целевых объектов на больших глубинах. Была проведена двумерная инверсия данных для всех профилей 2024 года и построены геоэлектрические разрезы, а также трехмерная инверсия с учетом всех данных ЭТ для объекта исследования №1. Учитывая данные метода ВЭЗ, полученные ранее, а также новые пункты зондирования, была проведена одномерная интерпретация данных по профилю.

Ключевые слова: электротомография, ВЭЗ, 2D-3D инверсия, Горный Алтай, Уймонская впадина

Z. Y. Kuzina¹✉, A. M. Sanchaa¹, A. E. Shalaginov¹, I. O. Shaparenko¹

Updated geoelectric model of a series of bedrock outcrops in the Uimon depression based on direct current methods (ERT, VES)

¹The Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: KuzinaZY@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article presents new results from studying the geoelectric structure of a series of basement rock outcrops in the western and central parts of the Uimon Basin in the Altai Mountains using direct current methods: electrical resistivity tomography (ERT) and vertical electrical sounding (VES). During field seasons from 2020 to 2023, measurements were conducted along 13 profiles, six of which were associated with a bedrock outcrop in the western part of the basin (Site No. 1), while the remaining seven were tied to a bedrock outcrop in its central part (Site No. 2) [4]. In the 2024 field season, a series of additional ERT profile measurements were carried out at these sites, as well as measurements on previously unstudied bedrock outcrops located between the investigated sites. Additionally, five VES stations were completed to determine the geoelectric structure of the target sites at greater depths. Two-dimensional inversion of the data was performed for all 2024 profiles, and geoelectric cross-sections were constructed. A three-dimensional inversion incorporating all ERT data was also conducted for research Site No. 1. Taking into account previously obtained VES data, as well as new sounding stations, a one-dimensional interpretation of the profile data was carried out.

Keywords: electrical resistivity tomography (ERT), VES, 2D-3D inversion, 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 года [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 рисунке 1 представлена схема расположения профилей ЭТ и пунктов ВЭЗ в Уймонской впадине, используемых в данной работе.

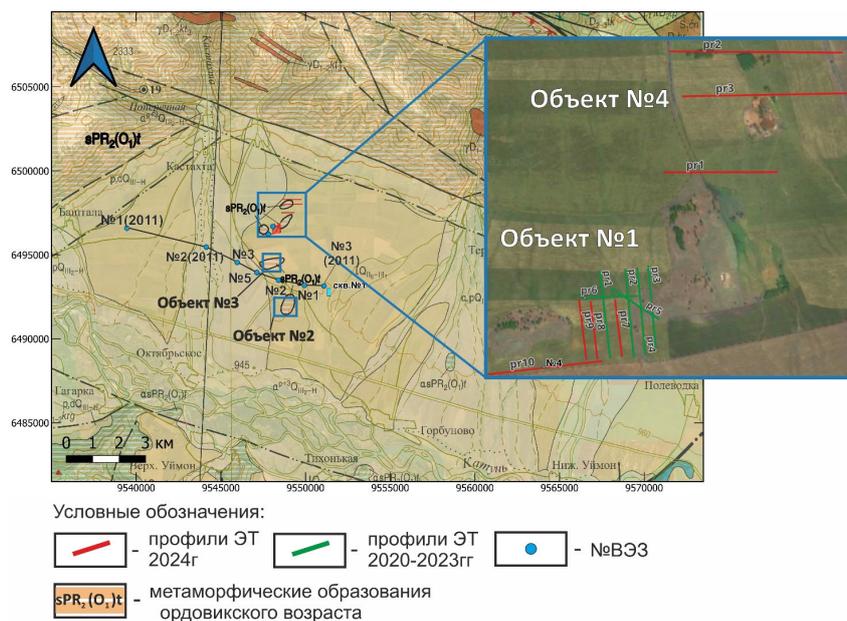


Рис. 1. Обзорная карта района работ в Уймонской впадине на подложке космоснимка и геологической карты (1:200 000) Уймонской впадины, созданная с использованием программных комплексов QGis и CoralDraw [2]

Методы и аппаратура для проведения работ

Полевые данные ЭТ в Уймонской впадине получены с использованием аппаратуры “Скала-48” [1] [8]. Использовалась установка Шлюмберже, 48 электро-

дов, шаг между электродами составлял 5 и 10 метров. Также применялась нагоняющая установка, с целью непрерывного увеличения длины профилей до 355 и 710 метров. Измерения методом ВЭЗ проводились также установкой Шлюмберже. Размеры питающей линии АВ/2 находятся в интервале значений 1.5–480 м. Для проведения измерений методом ВЭЗ использовался электроразведочный генератор Астра-100 и измеритель SGD-EET «MEDUSA».

Дополнительные профили на Объекте №1 (Профили 7, 8 и 9) были проведены с целью проверки предположения о его строении, как единого выхода коренных пород, соединяющегося с соседним выходом на западе более меньшего размера на некоторой глубине. Таким образом, была создана регулярная сеть из параллельных профилей с шагом 50 метров.

Для Объекта №4 использовался шаг между электродами 10 метров, с целью увеличения глубины исследования до 90 метров. Данные измерения были направлены на выявление характера погружения выхода коренных пород, а также возможное соединение Объекта №1 и №4 (pr1).

Расположение пунктов ВЭЗ №1, 2, 3 и 5 было выбрано таким образом, чтобы проследить наличие предполагаемой перемычки между Объектами №2 и №3, а также дополнить уже имеющийся профиль ВЭЗ субширотного простирания. В данной статье будет представлена интерпретация профиля ВЭЗ, состоящего из 7 пунктов зондирования.

Фильтрация полевых данных производилась с помощью программы Xeris.

Для решения обратной задачи использовались программы для ЭТ - DiInSo [6] и Res2D(3D)inv; для ВЭЗ – Zondip.

Результаты и обсуждения

Как отмечалось выше, для Объекта №1 по 7 параллельным профилям была проведена трехмерная инверсия и построены карты распределения УЭС по глубинам (рис. 2).

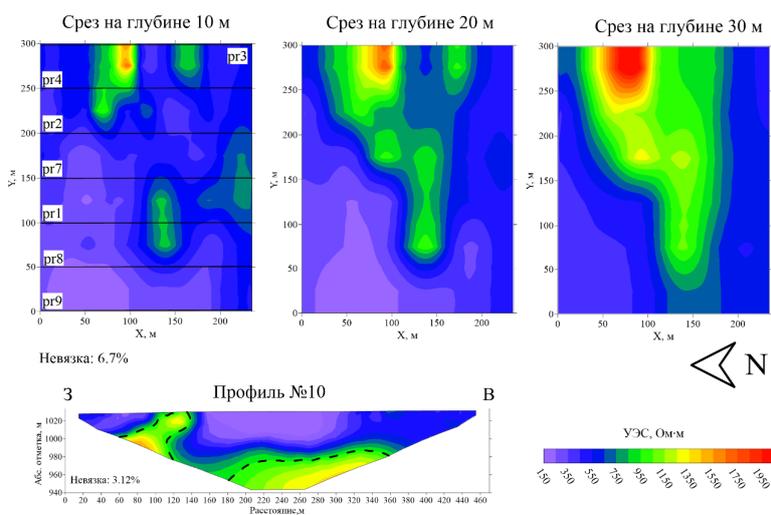


Рис. 2. УЭС на глубинах 10, 20 и 30 м, построенные по результатам 3D инверсии, а также геоэлектрический разрез по профилю №10

На рисунке 2 на всех трех срезах наблюдается ярко-выраженная высокоомная аномалия ($УЭС$ более $900 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), которая, вероятно, характеризует метаморфические образования ордовикского возраста. Данная аномалия протягивается в западном направлении, в сторону соседнего выхода коренных пород меньшего размера. Однако на профиле №9 (на рис. 2 $У = 0 \text{ м}$), расположенном в 35 метрах от соседнего выхода, высокоомная аномалия не прослеживается, что может указывать на крутой угол погружения его западной части или же ограниченной глубиной выбранной установки. Также была проведена двумерная инверсия по профилю №10 (рис. 2), который расположен вдоль южного окончания соседнего к Объекту №1 выхода коренных пород на расстоянии 65 метров от него. На геоэлектрическом разрезе штриховой линией выделена изолиния $900 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Аномалия высоких значений $УЭС$ прослеживается на отметках 180–360 метров от начала профиля, глубина залегания верхней кромки этой аномалии 40 метров. Данная аномалия может указывать на протяжение исследуемой структуры в южном направлении.

Результаты двумерной инверсии для трех профилей Объекта №4 представлены на рисунке 3.

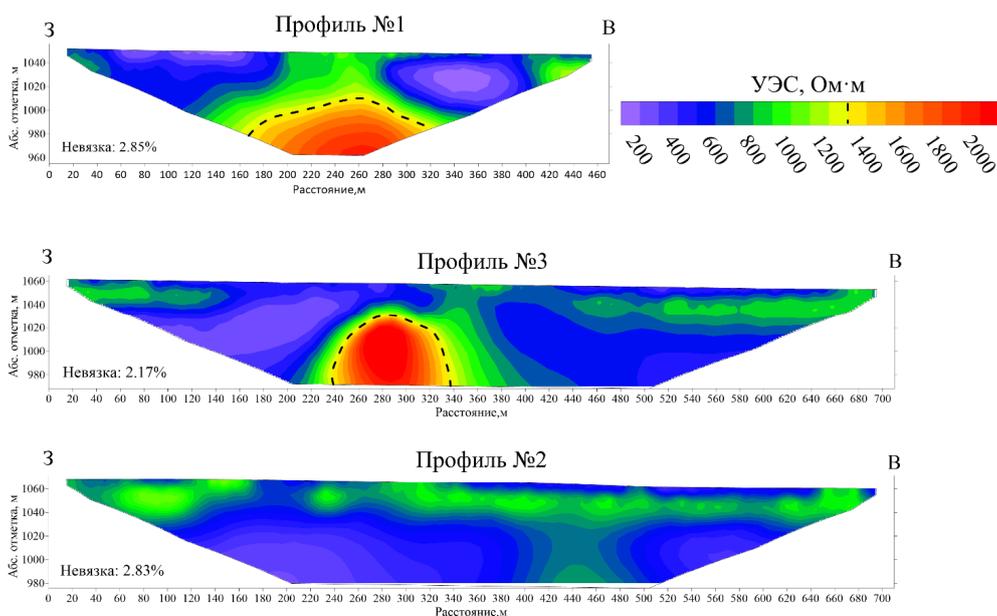


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы для Объекта №4 по профилям 1, 2 и 3. Штриховой линией обозначены предположительные контуры выхода коренных пород (по изолинии $1300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)

На профилях №1 и №3 выделены штриховой линией предполагаемые контуры метаморфических образований ордовикского возраста. Профиль №1 расположен на расстоянии 70 метров от Объекта исследования №1. На геоэлектрическом разрезе профиля №1 прослеживается высокоомная аномалия на расстояниях 160–320 метров от начала профиля. Сопоставляя местоположение этой аномалии с данными геологической карты и космоснимка, можно сделать предпо-

ложение, что видимый выход коренных пород №1 протягивается на север, в сторону еще одного выхода, вблизи которого был проведен профиль №3. На геоэлектрическом разрезе по профилю №3 также наблюдается аномалия повышенных значений УЭС на расстояниях 240–340 метров от начала профиля, которая, вероятно, характеризует метаморфические образования ордовикского возраста. Данное предположение согласуется с данными космоснимка. На геоэлектрическом разрезе по профилю №2 наблюдается горизонтально-слоистая среда. Таким образом, можно также предположить, что Объект №1 и №4 представляют собой единую геологическую структуру, которая протягивается на север в сторону горного обрамления.

Далее на основе имеющейся интерпретации по профилю ВЭЗ [7] был построен разрез с добавлением новых данных по четырем пунктам измерений, что позволило значительно уточнить геоэлектрическую модель за счет уменьшения расстояния между пунктами, которое составило менее 1 км. (рис.4).

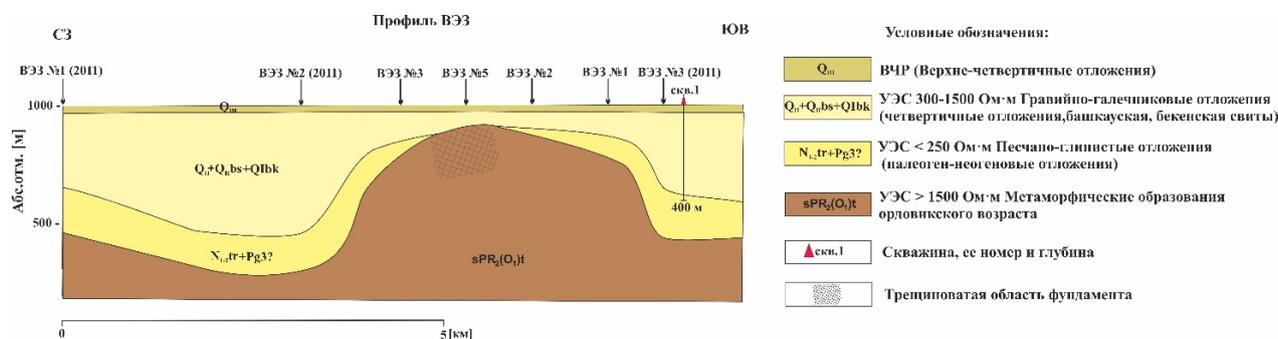


Рис.4. Геоэлектрический разрез по профилю ВЭЗ

Все геоэлектрические модели подобраны с погрешностью менее 5%. В моделях пунктов ВЭЗ №3–№5–№2–№1, которые располагаются между объектами №2 и №3, наблюдается локальное поднятие фундамента до абсолютных отметок 850 метров. По данным космоснимка, пункт ВЭЗ №5 расположен в 100 метрах от выхода коренных пород №3. Геоэлектрическая модель этого ВЭЗа не содержит выраженного низкоомного слоя, который, по данным бурения скважины, соответствует песчано-глинистым отложениям неогенового возраста. Также, значение УЭС пород фундамента занижены, относительно других пунктов, что может указывать на его трещиноватость в этой области. Данное поднятие фундамента может указывать на наличие перемычки между объектами №2 и №3.

Выводы

В статье представлены новые результаты изучения геоэлектрического строения выходов пород фундамента в западной и центральной частях Уймонской впадины Горного Алтая, полученные методами электротомографии (ЭТ) и вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ). Обработка данных включала двумерную инверсию данных ЭТ всех профилей 2024 года, трехмерную инверсию данных ЭТ на Объекте №1 и одномерную интерпретацию профиля ВЭЗ с учетом новых и ранее полученных данных. Результаты исследований выявили

наличие высокоомных аномалий для Объекта №1 УЭС > 900 Ом·м, для Объекта №4 УЭС > 1300 Ом·м, интерпретируемых как метаморфические образования ордовикского возраста. Трехмерная инверсия для Объекта №1 показала возможную связь между основным выходом коренных пород и соседним выходом на западе, хотя на некоторых профилях эта связь не прослеживается, что может указывать на крутой угол залегания или нехватки глубины исследования. Полагаясь на результаты двумерной инверсии по профилям для Объекта №4, можно предположить продолжение метаморфических структур в северном направлении, а также его соединение на глубине с Объектом №1. На разрезе по профилю ВЭЗ выявлено локальное поднятие фундамента на пунктах ВЭЗ №3–№5–№2–№1 до абсолютных отметок около 850 метров. Полученные результаты поддерживают гипотезу о тектоническом происхождении выходов коренных пород, связанных, вероятно, с внутривпадинными перемычками. Проведенные исследования вносят важный вклад в понимание геологического строения Уймонской впадины и могут быть использованы при геологическом картировании и поисковых работах в данном регионе.

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., Санчаа А.М., Неведрова Н.Н. Геоэлектрическое строение выходов коренных пород на дневную поверхность в Уймонской впадине на основе трехмерной инверсии и численного моделирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – СГУГиТ – Новосибирск – том Т. 2 – № 2 – С. 138–145 – 2024
5. 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 [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336, № 2. – 2025.
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.

© З. Я. Кузина, А. М. Санчаа, А. Е. Шалагинов, И. О. Шапаренко, 2025