

*З. Я. Кузина<sup>1\*</sup>, А. М. Санчаа<sup>1</sup>, Н. Н. Неведрова<sup>1</sup>*

## **Применение различных комплексов интерпретации данных электротомографии для изучения верхней части разреза Уймонской впадины**

<sup>1</sup> 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 геоэлектрические характеристики выходов пород баратальской свиты на дневную поверхность в западной части Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии (ЭТ). С целью выбора оптимальной программы 2D-3D инверсия проводилась с помощью трех программных комплексов: Res2D(3D)inv, ZonRes2D(3D) и DiInSo. По результатам интерпретации с использованием упомянутых выше программ определено геоэлектрическое строение верхней части разреза в области выходов коренных пород до глубин в несколько десятков метров. На геоэлектрических разрезах и срезях трехмерной модели исследуемый объект отражается зонами повышенных значений удельного электрического сопротивления.

**Ключевые слова:** геоэлектрическое строение, электротомография, Горный Алтай, Уймонская впадина

*Z. Y. Kuzina<sup>1\*</sup>, A. M. Sanchaa<sup>1</sup>, N. N. Nevedrova<sup>1</sup>*

## **Application of various complexes of interpretation of ERT data to study the upper part of the section of the Uimon depression**

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\*e-mail: z.kuzina@g.nsu.ru

**Abstract.** The article presents the geoelectric characteristics of rock outcrops of the Baratalsky formation on the day surface in the western part of the Uimon depression of the Gorny Altai according to electrotomography (ERT). In order to select the optimal 2D-3D program, the inversion was carried out using three software packages: Res2D(3D)inv, ZonRes2D(3D) and DiInSo. According to the results of interpretation using the programs mentioned above, the geoelectric structure of the upper part of the section in the area of outcrops of bedrock to depths of several tens of meters was determined. On geoelectric sections and sections of the three-dimensional model, the object under study is reflected by zones of increased values of electrical resistivity.

**Key words:** geoelectric structure, electrotomography (ERT), 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, ЗСБ, электротомография) в Уймонской котловине начаты в 2011 году и продолжаются по настоящее

время. По результатам интерпретации за разные годы построена глубинная геоэлектрическая модель впадины, но поскольку шаг между пунктами измерений был достаточно большим, остается неясным строение неоднородной верхней части разреза, где на поверхность выходят коренные породы баратальской свиты синийского комплекса [1]. Начиная с 2020 года, в районе этих выходов выполняются измерения методом ЭТ с целью построения геоэлектрических моделей. На рис. 1 представлена схема расположения профилей ЭТ на участке с двумя выходами баратальской свиты в западной части впадины. На этом участке в полевой сезон 2022 г. методом ЭТ с использованием аппаратуры «Скала-48» были получены данные по трем параллельным профилям. Обработка и интерпретация полученных квазиплощадных данных осуществлялась с помощью трёх программных комплексов двух-трехмерной инверсии с целью сопоставления геоэлектрических моделей и выбора оптимальной программы для повышения достоверности интерпретации.

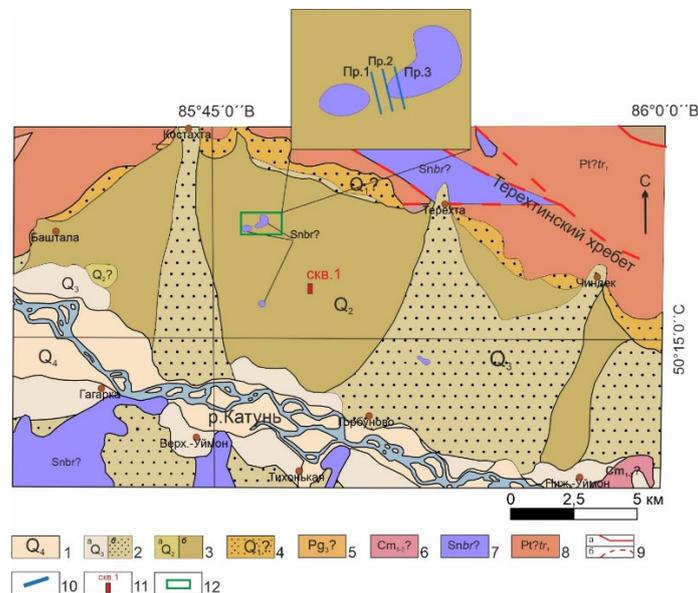


Рис. 1. Карта фактического материала исследуемого района. Карта построена с помощью программ QGIS и CorelDRAW [2][3]

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 порфириты, диабазовые порфириты, вариолиты и их туфы, филлиты, алевролиты, песчаники, кремнисто-глинистые сланцы; 7-синийский комплекс. Баратальская (?) свита. Метаморфизованные диабазы, порфириты 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

## ***Геолого-геофизическая изученность***

Глубинное строение осадочного чехла и кровли фундамента впервые было получено методами электромагнитных зондирований становлением поля (ЗСБ) и вертикальными электрическими зондированиями [4]. 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 разрезы 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 объёму 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 (*Snbr*) на дневную поверхность в западной и центральной частях впадины. Для уточнения приповерхностного строения был привлечен метод элетротомографии (ЭТ) [5].

### ***Методика, аппаратура и интерпретация данных элетротомографии***

Полевые данные ЭТ в Уймонской впадине получены с использованием аппаратуры «Скала-48» с установкой Шлюмберже и шагом между электродами в 5 метров [1, 6]. 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, а расстояние между ними выбрано 100 м.

Фильтрация полевых данных производилась с помощью программы RiPPP. Для двумерной и трехмерной инверсии использовались три разные программы. Рассмотрим кратко характеристики каждой из них.

Программа ZondRes2D(3D) предназначена для двумерной (трехмерной) интерпретации данных элетротомографии и вызванной поляризации. При минимизации в решении обратных задач используется метод наименьших квадратов с регуляризацией. В результате решения обратной задачи получаем распределение сопротивления в каждой ячейке сетки. В ZondRes2D есть возможность выбрать алгоритм, благодаря которому будет решаться обратная задача. Опытным путем было принято решение использовать метод наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора (Smoothness constrained). При решении обратной задачи с этим алгоритмом контрастность модели не минимизируется. По результатам инверсии получается гладкое и устойчивое распределение параметров [7].

Вторая используемая программа двумерной инверсии – Res2D(3D)inv. Решение обратной задачи основано на методе наименьших квадратов с ограничением гладкости. Двумерная модель, используемая этой программой, делит полупространство на ряд прямоугольных блоков. Цель работы программы состоит в опре-

делении сопротивлений прямоугольных блоков, дающих псевдоразрез кажущихся сопротивлений, максимально совпадающий с полевыми измерениями [8].

Третья программа – DiInSo, разработанная в ИНГГСО РАН [5]. Решение обратной задачи в программе DiInSo основано на методе конечных элементов. Самым распространенным методом решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), который используется в программе по умолчанию, является метод сопряженных градиентов. Минимизация функционала данных и расчетного функционала осуществляется по схеме Гаусса-Ньютона [5]. Большинство функций и настроек в данной программе заданы и выполняются автоматически, но есть удобная возможность их изменять в зависимости от поставленной задачи с целью получения наиболее приемлемого результата. Так, в нашем случае изменялся параметр регуляризации и ограничивался размер ячеек. Были использованы параметры скорости увеличения размеров ячеек с глубиной 34 (средняя скорость) и максимального размера ячеек (ограничение роста значения площади/объема ячейки с глубиной) – 100. Параметр регуляризации равный 20 выбран методом подбора, так как он обеспечивает достаточно точное восстановление геометрии объектов исследования и более достоверные данные по значениям сопротивлений. Также методом подбора выбрано максимальное значение для ячеек равное 100, которое позволяет сгенерировать достаточно густую сетку без больших затрат на объем оперативной памяти компьютера. 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.

Одно из немаловажных отличий программы DiInSo от ZondRes2D(3D) и Res2D(3D)inv заключается в том, что применяются треугольные (2D) и тетраэдральные (3D) сетки.

### *Результаты инверсии*

По данным, полученным на каждом из трёх профилей, была выполнена двумерная инверсия с использованием трех описанных выше программ. Пример сравнения геоэлектрических разрезов в единой шкале по профилю № 3 приведен на рис. 2.

Все три полученных разреза в целом схожи по геометрии объектов исследования. На всех разрезах можно выделить группу высокоомных объектов, которую можно отнести к породам баратальской свиты, по-видимому, трещиноватых, неоднородных. Но в то же время, имеются явные отличия в значениях сопротивлений, что, скорее всего, связано с различными алгоритмами инверсии, встроенными в каждую из программ. Кроме того, на первом разрезе область высоких сопротивлений разделена относительно низкоомной вертикальной зоной, что может быть связано с «вытягиванием» инверсии в области, где недостаточно данных. Кроме того, возможно влияют особенности учета рельефа с помощью программы Res2Dinv, из-за которых сетка деформируется и возникают ложные аномалии.

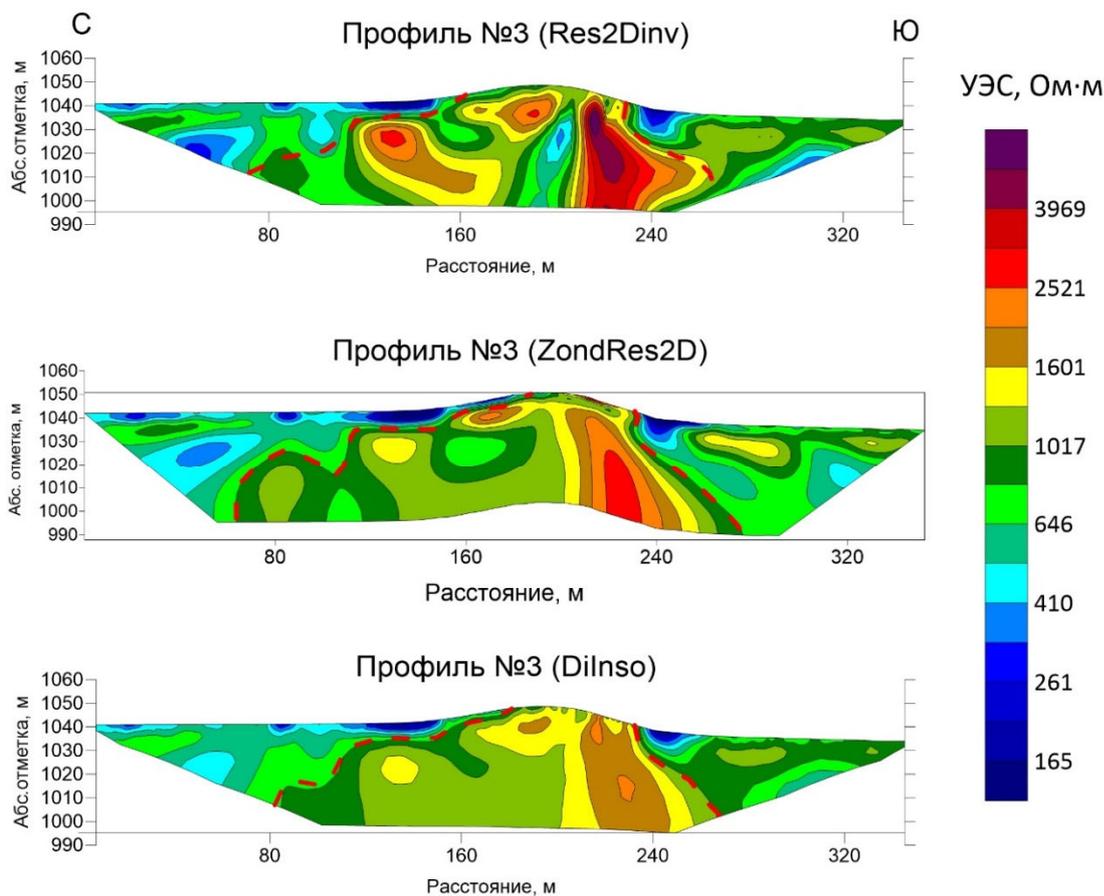


Рис.2. Геоэлектрические разрезы по профилю № 3, полученные в трёх программах. Штрих-пунктирной линией обозначены предположительные контуры выходов пород баратальской свиты

Наиболее явно выраженные границы выходов отложений баратальской свиты можно проследить на разрезе, полученном с помощью программы DiInso. Предполагаемые контуры блока пород свиты отмечены на рис. 2 штрих-пунктиром.

По квазиплощадным данным ЭТ также с использованием трех программ была выполнена 3D инверсия и построены горизонтальные срезы распределения УЭС на разных глубинах (10, 20, 30 и 40 м). К наиболее информативным относятся срезы, полученные на глубинах 10, 20 и 30 м, так как на предельной глубине в 40 м объём данных существенно ограничен ввиду используемой установки. На рис. 3 для примера показаны срезы на глубине 20 м, полученные по результатам 3D инверсии в разных программах.

На всех трех срезах наблюдается высокоомная область, скорее всего, приуроченная к коренным породам баратальской свиты. По данным геологической карты наблюдается два выхода пород этой свиты на дневную поверхность (расстояние между ними около 500 м). Скорее всего, эти два выхода образуют единый объект на глубине, но пока имеющаяся сеть наблюдений недостаточна для окончательного вывода. Требуется дополнительные измерения между профилями.

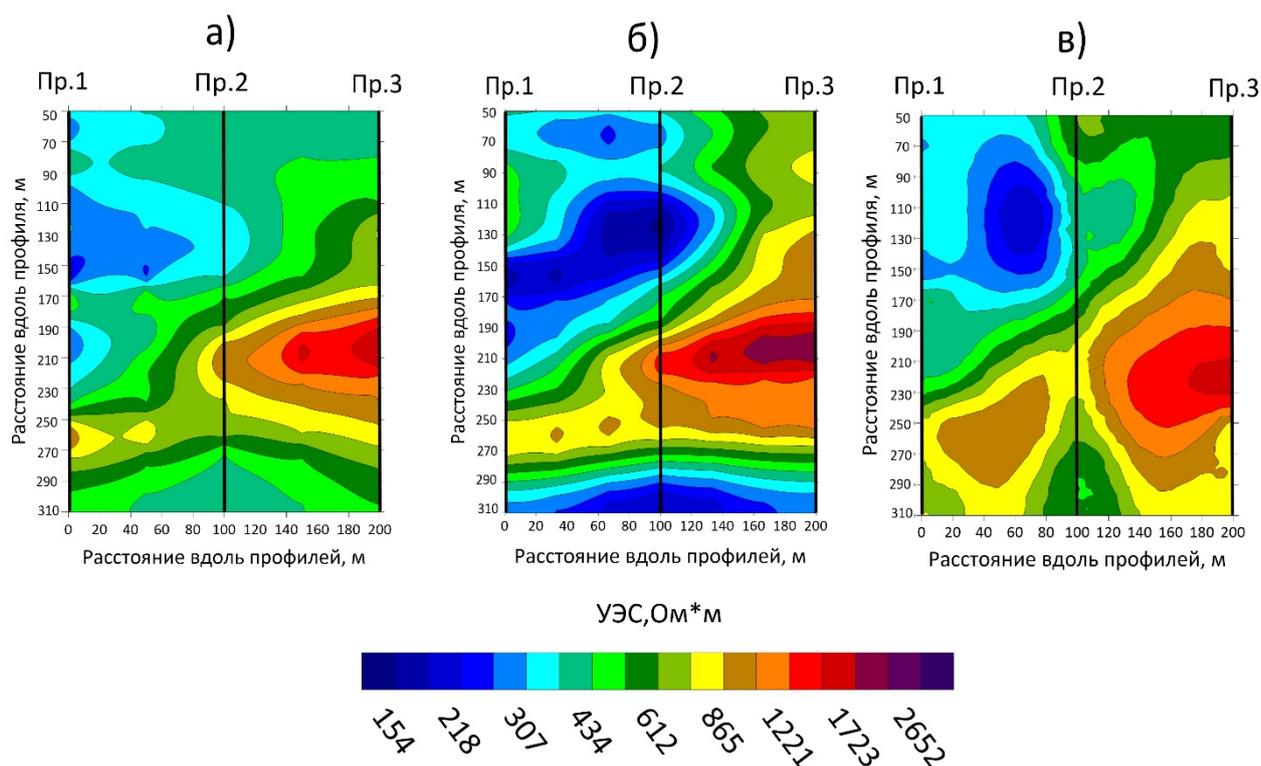


Рис.3. Распределение УЭС на глубинах 20 м по результатам 3D инверсии с использованием программ: а) Res3Dinv, б) ZonRes3D, в) DiInSo

### **Выводы**

По результатам интерпретации данных электротомографии с использованием трёх программ двух- трехмерной инверсии определены геоэлектрические характеристики пород баратальской свиты, выходящих на дневную поверхность в западной части Уймонской впадины. Породы свиты характеризуются высокими значениями УЭС (более 1000 Ом·м) относительно вмещающей среды (менее 500 Ом·м). Анализ результатов, полученных по трём программам инверсии данных ЭТ, позволяет сделать вывод о том, что есть различия в результатах инверсий, аномалии, соответствующие баратальской свите, отличаются по форме и интервалу значений УЭС. То же самое можно сказать и о вмещающей среде. В дальнейшем предполагается сгущение сети наблюдений, что очевидно позволит улучшить результаты инверсий в разных программах и выполнить более корректное их сопоставление.

### **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. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. 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.
3. 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. – 199 с.
4. 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.
5. Программный комплекс Direct-Inverse-Solver (DiInSo). URL: <https://diinso.sourceforge.net>
6. 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.
7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации «Скала-48» – аппаратура электроразведочная многоэлектродная. – 2019. – 14 с.
8. Loke M.H. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. – 2001. – 216 p.

© З. Я. Кузина, А. М. Санчаа, Н. Н. Неведрова, 2023