

## ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Пушкарев П.Ю.

*Геологический факультет МГУ, Москва, Ленинские горы 1,  
pavel\_pushkarev@list.ru*

### Реферат

Электромагнитные методы геофизики, использующие естественное либо искусственные поля, эффективны при изучении геотермальных зон на глубинах от первых сотен метров до нескольких километров. Чаще всего геотермальные зоны приурочены к тектонически активным областям, где разрез в основном слагают магматические и метаморфические горные породы, обладающие высоким сопротивлением. На этом фоне ярко проявляются проводящие аномалии, природа которых связана с гидротермальной активностью. Эти аномалии могут возникать вследствие образования глинистых минералов, обводнения трещиноватых горных пород или, на больших глубинах, частичного плавления вещества. Геоэлектрические разрезы, полученные в Исландии, в Италии и на Камчатке, демонстрируют яркие примеры таких аномалий.

**Ключевые слова:** аномалии электропроводности, геотермальные зоны, электромагнитные зондирования

## ELECTROMAGNETIC EXPLORATION OF GEOTHERMAL RESOURCES

Pushkarev P.Yu.

*Faculty of Geology of MSU, Moscow, Leninskie Gory 1, pavel\_pushkarev@list.ru*

### Abstract

Electromagnetic methods of geophysics, using natural or controlled source, are efficient in geothermal zones exploration at depths from a few hundred meters to several kilometers. Geothermal zones often correspond to active tectonic areas, where resistive igneous and metamorphic rocks prevail. Against this background, conductive anomalies, the nature of which is associated with hydrothermal activity, are clearly manifested. These anomalies can arise due to the formation of clay minerals, water saturation of fractured rocks, or, at great depths, partial melting. Resistivity cross-sections obtained in Iceland, Italy, and Kamchatka display vivid examples of such anomalies.

**Keywords:** conductivity anomalies, geothermal zones, electromagnetic soundings

### Введение

Геотермальные ресурсы представляют собой экологически чистый источник энергии. Извлекаемые из земли термальные воды применяются для отопления жилых, а также промышленных и сельскохозяйственных производственных помещений, а пар – для выработки электроэнергии. Распределение геотермальных ресурсов по регионам неравномерно, наиболее пер-

спективные области характеризуются повышенными тепловыми потоками и в основном приурочены к тектонически активным зонам.

Предпосылки применения методов электромагнитного (ЭМ) зондирования для изучения геотермальных ресурсов связаны с частым присутствием в геотермальных зонах специфических аномалий удельного электрического сопротивления (УЭС). Их природа может быть связана с определённой гидротермальной минерализацией, обводнённостью горных пород и их частичным плавлением.

Основным геофизическим методом исследования геотермальных ресурсов является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Он отличается большой глубиной и использует естественное поле, что обуславливает небольшой размер установки и, как следствие, минимальные стоимость работ и урон для окружающей среды. Но вблизи источников ЭМ помех (населённые пункты, линии электропередачи, электрифицированные железные дороги) приходится применять метод частотного зондирования с контролируемым источником (ЧЗ или CSAMT). При изучении верхней части разреза часто применяется метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ).

Если при изучении осадочных бассейнов, строение которых хорошо описывает горизонтально-слоистая модель среды, широко применяется 1D интерпретация, то при исследовании геотермальных зон, для которых характерны горизонтально-неоднородные структуры, в итоге чаще всего строятся 2D и даже 3D модели. Ниже, помимо небольшого обзора геоэлектрических моделей геотермальных зон, мы по ходу также рассмотрим некоторые вопросы интерпретации данных МТЗ.

### **Геотермальная зона Хенгил (Исландия)**

Исландия расположена на оси срединно-океанического рифта, на границе Северо-Американской и Евразийской литосферных плит. В результате очень высокой вулканической активности практически весь остров сложен базальтами.

Методы ЗСБ и МТЗ здесь активно применяются для изучения геотермальных ресурсов [Eysteinnsson *at al.*, 2004]. В результате исследований в наиболее разогретых зонах обнаружен проводящий слой, залегающий в основном на глубинах в первые сотни метров. Его природа связана с появлением при температурах свыше 100 °С глинистых минералов гидротермального происхождения с низким УЭС. При дальнейшем повышении температуры до 230 °С происходят новые преобразования, и проводящие минералы разрушаются. Таким образом, над высокотемпературными очагами возникают характерные проводящие «шапки». На глубинах в несколько километров выявлен второй проводящий слой, по-видимому, связанный с плавлением горных пород и/или возникновением рассолов магматического происхождения. И если верхний проводник может характеризовать разогрев в прошлом, то нижний связан с современными процессами.

Геотермальная зона Хенгил расположена в рифтовой зоне на юго-западе Исландии. Она частично обеспечивает Рейкьявик электричеством и горячей водой. Увеличение эксплуатации геотермальных ресурсов здесь является актуальной задачей.

В геотермальной зоне Хенгил было выполнено более 150 зондирований МТЗ по неравномерной площадной сети [Пушкарев и др., 2007]. Анализ полученных данных показал, что на высоких частотах, которым отвечают глубины до нескольких сотен метров, изучаемую среду можно с достаточной точностью аппроксимировать горизонтально-слоистыми моделями. На низких частотах, обеспечивающих большую глубинность исследования, выделяется двумерная структура с простираем в вдоль оси рифта.

Для построения предварительной геоэлектрической модели применялась сглаживающая 1D инверсия эффективного импеданса по программе *Ossam1D* [Constable et al., 1987]. На полученных разрезах выделяются два упомянутых выше проводящих слоя. При этом наиболее проводящие области верхнего проводника как бы спроецировались на нижний, что даёт основание для предположения об искажении информации о глубинных структурах неоднородностями верхней части разреза.

Для исследования этой проблемы и для оценки эффективности методов инверсии в таких условиях были выполнены моделирование и инверсия синтетических МТ данных [Pushkarev, Ivanova, 2012]. Построенная для этих целей 3D модель геотермальной зоны включает два вытянутых проводника, соотношение их длины и ширины составляет примерно 3:1. В фоновом разрезе они вырождаются в два тонких проводящих слоя в диапазонах глубин 0.2 – 0.3 и 7 – 8 км. Вмещающие высокоомные горные породы (литосфера) подстилаются проводящей астеносферой. Синтетические МТ данные были рассчитаны с помощью программы 3D моделирования.

Результаты 1D и 2D инверсии модельных данных по двум профилям: «центральному», пересекающему проводящие объекты вблизи центров, и «боковому», пересекающему их вблизи краёв, представлены на рис. 1. 1D инверсия эффективного импеданса по упомянутой выше программе *Ossam1D* верно восстановила структуру приповерхностного проводника, но исказила структуру глубинного. 2D инверсия поперечного и продольного импедансов и типпера по программе *REBOCC* [Siripunvaraporn, Egbert, 2000] дала достоверную информацию о глубинном проводнике и глубине до астеносферы.

Полученные результаты иллюстрируют, к каким погрешностям приводит применение 1D инверсии при наличии в разрезе приповерхностной и глубинной горизонтально-неоднородных зон. Отметим, что соотношение длины и ширины этих зон оказалось благоприятным для 2D инверсии. Очевидно, в более сложных условиях и она может привести к большим погрешностям, а правильный результат обеспечит лишь 3D инверсия.

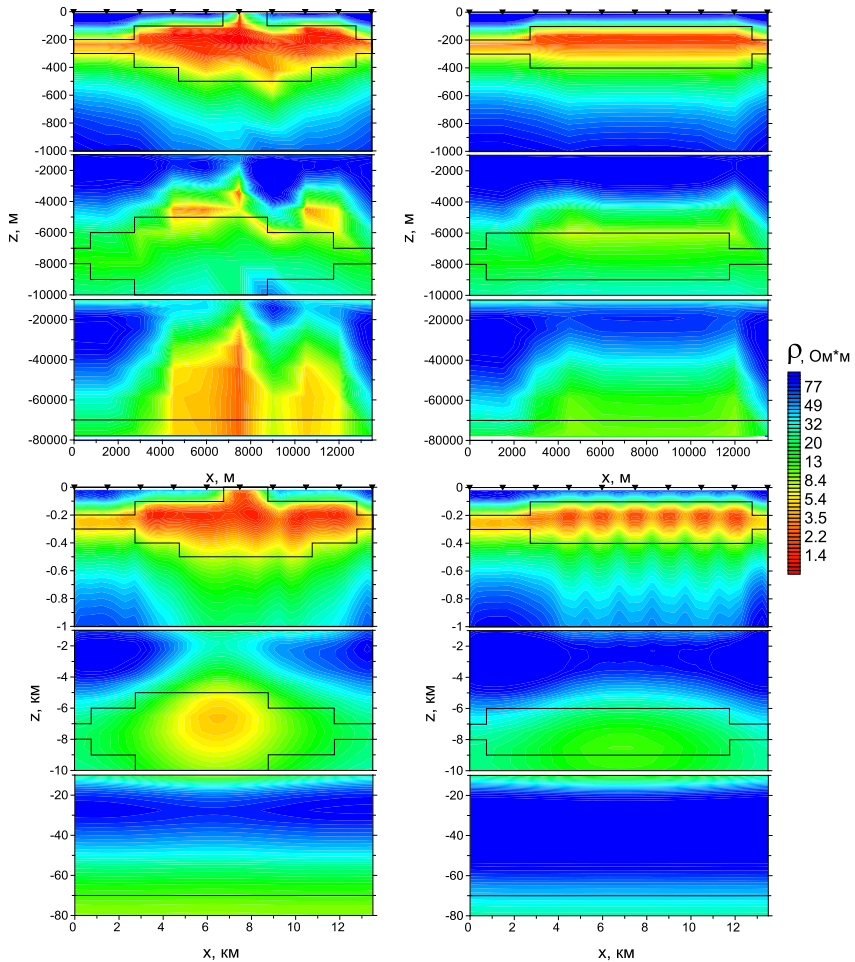


Рис. 1. Результаты инверсии (геоэлектрические разрезы)  
 слева – по «центральному», справа – по «боковому» профилю,  
 вверху – 1D инверсия по программе Ossam1D, внизу – 2D по программе REBOCC.  
 Чёрные линии показывают истинное положение границ.

Вернёмся к исследованиям геотермальной зоны Хенгил. С учётом выводов рассмотренного модельного исследования нами была выполнена 2D

инверсия данных МТЗ по программе REBOCC [Sumarokova, 2017]. Наиболее интересный результат получен для нижнего проводника, предположительно связанного с плавлением горных пород. Он по результатам 2D инверсии разделен на две параллельные ветви, что подтверждается разрезами на соседних профилях и согласуется с косвенными результатами других геолого-геофизических исследований. Таким образом, рифтовая зона здесь представляет из себя достаточно сложную и широкую структуру, охватывающую гору Хенгил с обеих сторон. Это показывает существенный геотермальный потенциал этой зоны.

### Геотермальная зона Лардерелло-Травале (Италия)

Север Италии относится к сегменту Сердиземноморского складчатого пояса, разделяющему Евразийскую и Африканскую литосферные плиты. Здесь расположена геотермальная зона Лардерелло-Травале, известная тем, что в 1904 году в ней был получен первый опыт применения геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии.

Повышенные температуры недр здесь связаны с внедрением интрузии в позднем миоцене, в период тектонического растяжения. До 1970-х годов эксплуатировался резервуар термальных вод в карбонатных породах на глубинах до 1.5 км. По мере его истощения, во-первых, была начата повторная закачка воды в нагнетательные скважины и, во-вторых, переход к эксплуатации глубинного резервуара, расположенного в метаморфическом комплексе. Это обусловило актуальность геофизических исследований разреза до глубин в несколько километров [Gianelli et al., 1997].

В геотермальной зоне Лардерелло-Травале были проведены площадные наблюдения методом МТЗ в 60 точках [Manzella et al., 2006], при этом базовая точка располагалась на острове Сардиния, что позволило снизить влияние локальных промышленных помех. Влияние приповерхностных неоднородностей было подавлено способом пространственной фильтрации кривых МТЗ. Выполненные оценки размерности среды показали, что на больших периодах преобладают 2D эффекты. Результаты двухмерной инверсии данных по одному из профилей показаны на рис. 2.

Верхняя часть разреза, в основном до глубины 1 км [на правом конце профиля чуть больше] сложена осадочными горными породами. Ниже залегает метаморфический комплекс, аномалии пониженного УЭС в котором хорошо коррелируют с показанными зелеными линиями разломами, предполагаемыми по другим геолого-геофизическим данным. Этот результат свидетельствует об их насыщении термальными водами, что представляет интерес с точки зрения эксплуатации геотермальных ресурсов. Существенное понижение УЭС происходит на глубине 5 км, где проходит сейсмическая граница «К-horizon», ниже которой усиливается затухание сейсмической энергии. Вероятно, на этих глубинах происходит переход от более хрупкой к более пластичной земной коре.

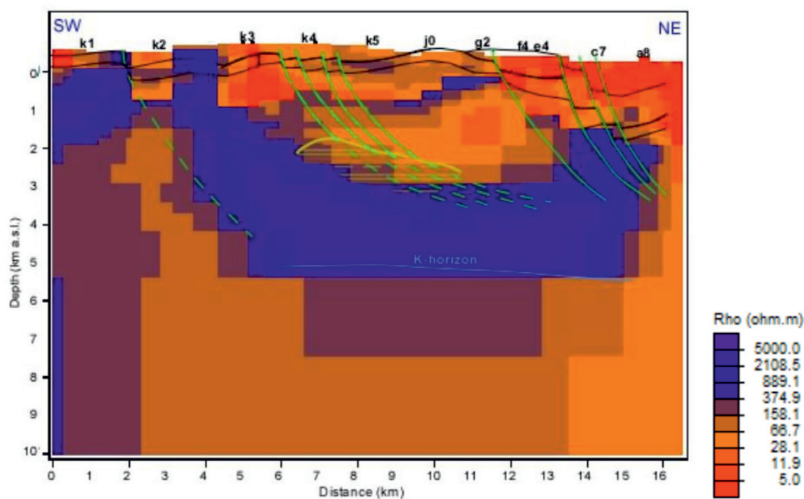


Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю в геотермальной зоне «Лардерелло-Травале». 2D инверсия продольного и поперечного импедансов [Manzella et al., 2006].

### Мутновское месторождение парогидротерм

Полуостров Камчатка, тектонически относящийся к Тихоокеанскому складчатому поясу, перспективен с точки зрения использования геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии. Здесь с 1966 года функционирует Паужетская ГеоЭС (геотермальная электростанция), а с 1999 и 2003 годов – Верхне-Мутновская ГеоЭС и мощная Мутновская ГеоЭС. Глубинное строение Камчатки исследовалось с помощью геофизических методов, среди которых важную роль играл метод МТЗ [Мороз, 1991].

На юго-востоке Камчатки, в районе Мутновского месторождения парогидротерм, выполнено более 360 МТ-зондирований [Нурмухамедов и др., 2010]. По системе профилей выполнена 2D инверсия МТ-данных с учётом берегового эффекта. В результате объединения результатов по профилям построена 3D геоэлектрическая модель.

Разрез геоэлектрической модели с его геолого-гидрогеологической интерпретацией приведён на рис. 3. В верхней части, под высокоомными вулканогенно-терригенными отложениями, залегают водонасыщенный горизонт туфогенной алнейской серии (1-5-10 Ом·м). На глубине свыше 1 км ближе к северо-западному краю разреза прослеживается глубинный резервуар в ахотенской толще (1-20 Ом·м). Наконец, на глубинах свыше 4 км в юго-восточной части разреза выделяется низкоомный высокотемпературный очаг.

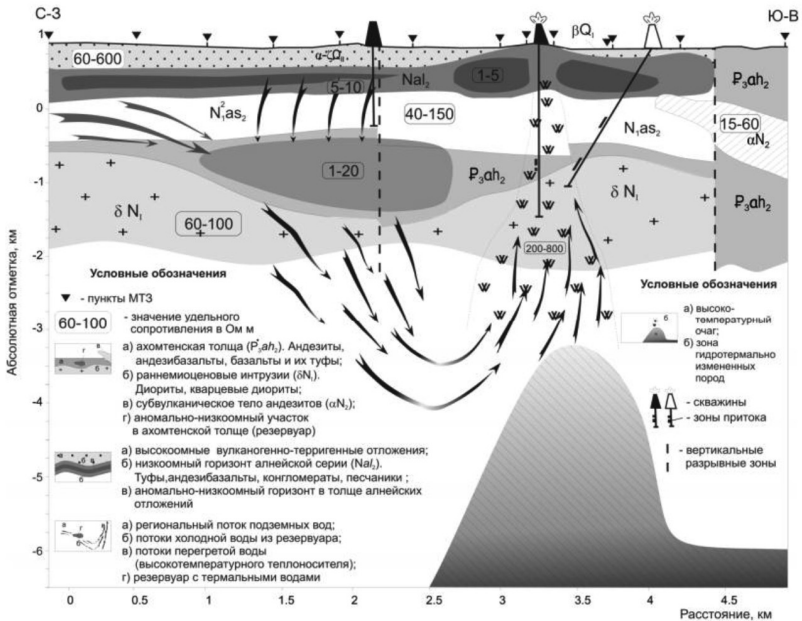


Рис. 3. Геолого-геофизическая модель Мутновского месторождения парогидротерм, построенная по интерпретации данных МТЗ [Нурмухамедов и др., 2010].

Стрелками показаны предполагаемые направления движения флюидов. С запада направлен региональный поток подземных вод. Смешиваясь с водами из верхнего алнейского резервуара, они формируют нижний ахотенский резервуар. По вертикальной разрывной зоне воды проникают на глубину, в область высокотемпературного очага. Отсюда разогретые воды устремляются в верхние горизонты, в зоны разгрузки.

### Заключение

Представленные примеры демонстрируют яркие проводящие аномалии, которые характерны и для других геотермальных зон. Эти аномалии связаны с:

- 1) Низкоомными минералами гидротермального происхождения;
- 2) Термальными водами, насыщающими трещиноватые разломные зоны и коллектора;
- 3) Частичным плавлением горных пород на больших глубинах.

Присутствие и преобладание того или иного типа аномалий зависит от истории геологического развития и современного строения геотермальной зоны.

Более подробный обзор ЭМ исследований геотермальных зон рассмотрены в работе [Куликов и Пушкарев, 2020]. Среди других публикаций, посвящённых методике и результатам таких исследований, можно выделить обзор [Munos, 2014] и монографию [Спичак, 2019].

### Литература

Куликов В.А., Пушкарев П.Ю. Электромагнитные зондирования при решении глубинных задач. М: МГУ, 2020. 228 с.

Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М: Наука, 1991, 181 с.

Нурмухамедов А.Г., Чернев И.И., Алексеев Д.А., Яковлев А.Г. Трёхмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм. Физика Земли, 2010, № 9, с. 15-26.

Пушкарев П.Ю., Шустов Н.Л., Силёва Д.С., Спичак В.В., Хьялмар Эстейнсон. Глубинное строение геотермальной зоны Хенгилл [Исландия] по данным магнитотеллурических зондирований. Тезисы докладов III Международной конференции «Инженерная и рудная геофизика – 2007». Геленджик, 2007, с. 57-59.

Спичак В.В. Электромагнитная томография земных недр. М.: Научный мир, 2019, 376 с.

Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysics, 1987, 52, 3, p. 289-300.

Eysteinnson H., Arnason K., Flovenz O.G. Resistivity methods in geothermal exploration in Iceland. Surveys in Geophysics, 1994, 15, p. 263-275.

Gianelli G., Manzella A., Puxeddu M. Crustal models of the geothermal areas of southern Tuscany (Italy). Tectonophysics, 1997, 281, p. 221-239.

Manzella A., Spichak V., Pushkarev P., Sileva D., Oskooi B., Ruggieri G., Sizov Yu. Deep fluid circulation in the Travale geothermal area and its relation with tectonic structure investigated by a magnetotelluric survey. Proceedings of the 31<sup>st</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, California, Stanford University, 2006, SGP-TR-179.

Munos G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods. Surveys in Geophysics, 2014, 35, p. 101-122.

Pushkarev P., Ivanova K. Typical resistivity model of a geothermal zone and the efficiency of magnetotelluric data interpretation methods. Abstracts of the 21<sup>st</sup> Workshop on EM Induction in the Earth. Darwin, 2012.

Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. Geophysics, 2000, 65, 3, p. 791-803.

Sumarokova E. Resistivity structure of Hengill geothermal zone [Iceland]. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Youth Scientific Conference «Innovations in Geology, Geophysics and Geography – 2017». Sevastopol, 2017.