

С. П. Мишенина¹✉, С. Б. Бортникова¹, Ю. А. Манштейн², Г. Л. Панин¹

Комплексные геофизико-геохимические исследования термального поля кальдеры вулкана Узон, Камчатка

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²ООО «Балтсибгео», г. Калининград, Российская Федерация
e-mail: KokhanovaSP@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе описаны комплексные геофизико-геохимические исследования на термальном поле в кальдере вулкана Узон. При сопоставлении результатов электротомографии, частотного зондирования и геохимического анализа обнаружена структурированная зональность термального поля, подтверждена зависимость между минерализацией и УЭС вещества. Описанный в настоящей работе комплекс методик исследования подповерхностного пространства неразрушающими методами может применяться для обнаружения и повышения эффективности поисков гидротермальных месторождений, мониторинга эксплуатации геотермальных электростанций. Результатом работы является визуализация приповерхностного пространства термального поля до глубины 10 м, позволяющая наблюдать контраст между высокопроводящими термопроявлениями и зонами относительно повышенного сопротивления, представляющими собой гидротермально изменённые породы. Визуализированная геоэлектрическая зональность определяется преимущественно соотношением жидкости к твёрдому веществу. В зависимости от количества флюида и его путей движения из глубинного источника к поверхности меняется его состав, кислотность, общий уровень минерализации. От уровня взаимодействия флюида с вмещающими породами меняется его состав и степень изменения пород, давая контрастность геохимических параметров рядом с расположенным термопроявлением.

Ключевые слова: электротомография, грязевые котлы, частотное зондирование, активные вулканы

S. P. Mishenina¹✉, S. B. Bortnikova¹, Yu. A. Manshtein², G. L. Panin¹

Complex geophysical and geochemical studies of the thermal field at the Uzon volcano caldera, Kamchatka

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²LLC «Baltsibgeo», Kaliningrad, Russian Federation
e-mail: KokhanovaSP@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper describes complex geophysical and geochemical studies of the thermal field at the Uzon volcano caldera. When comparing the results of electrical resistivity tomography, frequency sounding and geochemical analysis, a structured zoning of the thermal field was detected, and the relationship between mineralization and resistivity of the substance was confirmed. The set of methods for studying the subsurface space by non-destructive methods described in this paper can be used to detect and improve the efficiency of prospecting for hydrothermal deposits and monitor the operation of geothermal power plants. The result of the work is visualization of the near-surface space of the thermal field to a depth of 10 m, which allows observing the contrast between highly conductive

thermal manifestations and zones of relatively increased resistance, which are hydrothermally altered rocks. The visualized geoelectric zoning is determined mainly by the water / rock interaction. Depending on the amount of fluid and its movement paths from a deep source to the surface, its composition, acidity, and general level of mineralization changes. The composition and degree of rock alteration change depending on the level of interaction of the fluid with the host rocks, giving a contrast in geochemical parameters to nearby thermal manifestations.

Keywords: electrical resistivity tomography, mud pots, frequency sounding, active volcanoes

Введение

В мировой практике не раз поднимался вопрос о возобновляемых источниках энергии, в частности, геотермальной. Несмотря на значительное количество активных вулканов в России данная тема не столь популярна и изучена [2-4, 11], как за рубежом [6, 7, 9]. Об исследовании источников геотермальной энергии с помощью электротомографии не так много публикаций, но в последние годы электроразведка на термальных полях интересует учёных по всему миру [5, 10]. Однако, остаются недообследованными многие термальные поля для потенциальной разработки недр.

Целью данной работы являлось выявление путей, структуры и физико-химических параметров разгрузки поверхностных гидротерм на термальном поле вулкана Узон. В процессе определена геоэлектрическая зональность подповерхностного пространства двумя методами: частотным зондированием (ЧЗ) и электротомографией (ЭТ); выполнено геохимическое опробование с последующим химическим анализом жидкости и вещества стенок термопроявлений; выведены и подтверждены зависимости между геохимическими и геофизическими параметрами.

Описанный в настоящей работе комплекс методик исследования подповерхностного пространства неразрушающими методами может применяться для обнаружения и повышения эффективности поисков гидротермальных месторождений, мониторинга эксплуатации геотермальных электростанций.

Методы и материалы

Малоглубинные зондирования выполнены с помощью: ЭТ – Syscal Pro Switch-48 (IRIS Instruments, Франция), ЧЗ – ЭМС (ООО «КБ Электротетрии», Россия). Произведено геохимическое опробование с последующими лабораторными анализами. Также в работе приведены расчёты по формуле Муанфара [8] для выведения количественной связи между геофизическими и геохимическими параметрами среды термальных полей. Формула связывает минерализацию, температуру и удельное электрическое сопротивление:

$$\sigma_w = \left[\left(0.0123 + \frac{3647,5}{C_w^{0,955}} \right) \times \frac{81,77}{T+6,77} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где C_w – концентрация соли NaCl, ppm; T – температура, °F; σ_w – электропроводность пластовой воды, См/м.

Схема работ на термальном поле кальдеры Узон приведена на рис. 1.

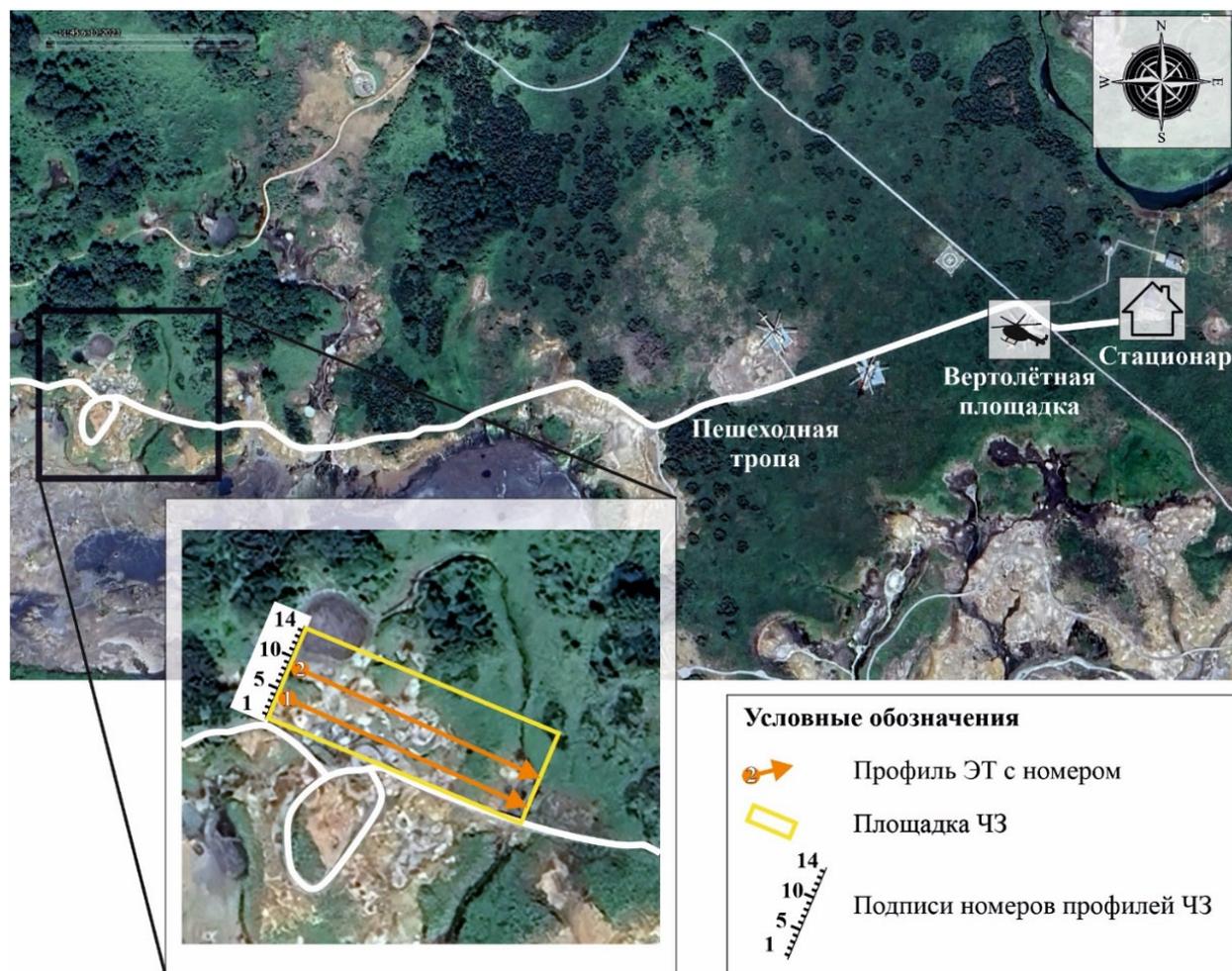


Рис. 1. Расположение профилей ЭТ (выделены оранжевым) и площадки исследований методом ЧЗ (жёлтым) на термальном поле кальдеры влк. Узон на космоснимке с высоты 600 м

Выполнено 2 профиля ЭТ длиной 48 м с межэлектродным расстоянием 1 м и над ними – 14 параллельных профилей ЧЗ той же длины с расстоянием между профилями 1 м. При этом, площадка ЧЗ проходит непосредственно по профилям ЭТ. Этот объект интересен обилием термальных источников, находящихся на небольшой площадке.

Результаты

Геохимические параметры термальных и поровых растворов

Растворы котлов кислые, значения рН колеблются от 2.2 до 4.3, Eh варьирует от слабо- до сильноокислительных условий (табл. 1). Воды сульфатного и сульфатно-хлоридного типа.

Таблица 1

Измеренные и расчётные параметры для термальных котлов

Измеренные и расчётные параметры	Уз-1/08	Уз-2/08	Уз-3/08	Уз-4/08	Уз-5/08	Уз-6/08	Уз-7/08	Уз-8/08
pH		2,33	2,5	2,36	2.64	3.62	2.74	2.45
Eh, мВ	442	274	164	350	585	440	255	587
M, г/л	1,3	1,3	1,7	1,1	1,1	1,2	1,4	0,9
M, ppm	1266	1350	1707	1053	1123	1225	1415	923
T, °C	96,7	89,3	66,6	97,7	94	95	96	32,5
T, °F	206	193	152	208	201	203	205	91
σ_w	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,2
$\rho_{\text{расч}}$, Ом·м	1,5	1,5	1,5	1,8	1,8	1,6	1,4	4,5
$\rho_{\text{эт}}$, Ом·м	6	6	6	10	12	12	6	10
$\rho_{\text{чз}}$, Ом·м	20	6	10	6	4	6	12	4
Измеренные и расчётные параметры	Уз-9/08	Уз-10/08	Уз-11/08	Уз-12/08	Уз-14/08	Уз-15/08	Уз-16/08	Уз-17/08
pH	2,2	2,3	2,36	4,27	3,18	2,36	2,13	2,59
Eh	246	245	238	438		240	496	487
M, г/л	1,5	1,7	1,3	1,2	1,7	0,9	0,9	0,9
M, ppm	1472	1669	1268	1205	1664	935	900	860
T, °C	85,8	88,7	87,1	99,3		78	82	65
T, °F	186	192	189	211	32	172	180	149
σ_w	0,7	0,8	0,6	0,6	0,2	0,4	0,4	0,3
$\rho_{\text{расч}}$, Ом·м	1,5	1,3	1,7	1,6	6,5	2,4	2,4	3,0
$\rho_{\text{эт}}$, Ом·м	10	8	10	10	12	8	10	
$\rho_{\text{чз}}$, Ом·м	10	8	6	10	8	6	8	
Измеренные и расчётные параметры	Уз-18/08	Уз-20/08	Уз-21/08	Уз-22/08	Уз-23/08	Уз-24/08	Уз-25/08	
pH	2,17	2,01	5,03	2,8	7,38	9,23	2,93	
Eh	224	458	260	337	-36	183	218	
M, г/л	2,0	1,5	0,6	0,6	0,4	0,6	0,4	
M, ppm	2012	1482	561	647	449	578	442	
T, °C	68	70	70	70	70	70	92,7	
T, °F	154	158	158	158	158	158	199	
σ_w	0,8	0,6	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	
$\rho_{\text{расч}}$, Ом·м	1,3	1,7	4,3	3,7	5,3	4,2	4,3	

Результаты геофизических исследований

Зондирования разными методами показали неплохую сходимость результатов (рис. 2, табл. 1).

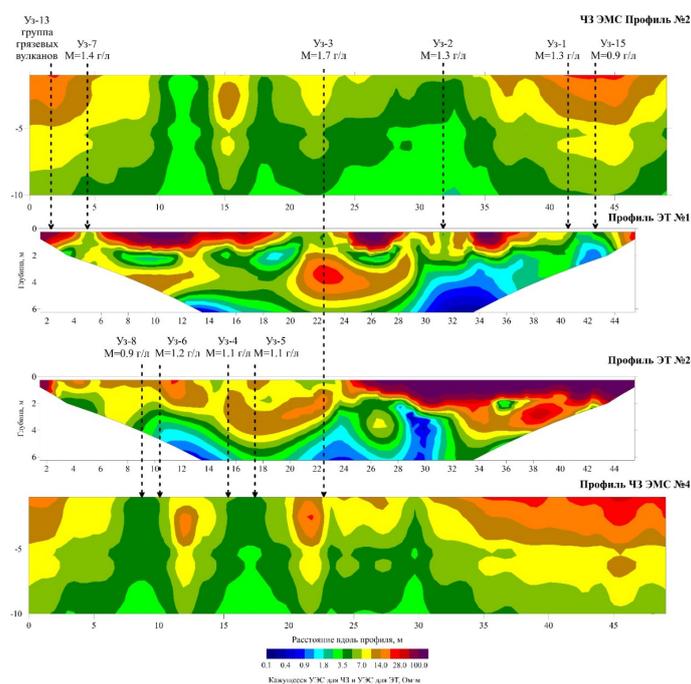


Рис. 2. Профили ЭТ и ЧЗ на термальном поле

Все разрезы приведены к единой шкале, являются высокопроводящими ($УЭС \leq 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). На профиле ЭТ № 1 идентифицируются низкоомные зоны ($УЭС \sim 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), прослеживающиеся до поверхности, и далее соединяются друг с другом на глубине 2 м. Зоны имеют общее основание (0,1-4 Ом·м). Максимальное УЭС соответствующего ему профиля ЧЗ №2 едва достигает 30 Ом·м. Начинаются профили с площадки повышенного сопротивления, в том месте находятся небольшие парящие грязевые вулканы. Скорее всего, повышение сопротивления связано с низкой обводнённостью вулканов, насыщением поверхности газом. Далее находится котёл №7, нашедший отображение на профиле ЭТ, и визуально отсутствующий на профиле ЧЗ. Это может быть связано с разной разрешающей способностью методов.

На профиле ЭТ №2 с середины профиля и до конца на поверхности проявлена относительно высокоомная зона (до 100 Ом·м), она же повторяется на профиле ЧЗ. Это связано с окончанием термальной площадки, далее за профилями течёт небольшой ручей. На втором профиле ЭТ подводящие каналы источников менее заметны, зато на профиле ЧЗ выделены достаточно. На рис. 3 представлена изоома, отвечающая кажущемуся сопротивлению 4,9 Ом·м.

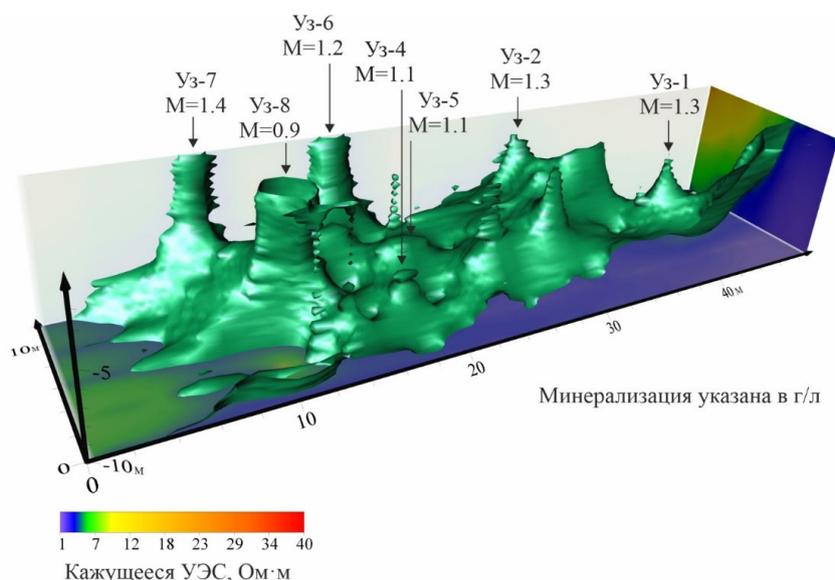


Рис. 3. Трёхмерная визуализация результатов исследований методом ЧЗ над грязевыми котлами термальной площадки

Связь геофизических и геохимических параметров среды

В табл. 1 приведены значения трёх вариантов УЭС: расчётного, измеренного методом ЭТ, измеренного методом ЧЗ. Корректность трехмерных моделей по данным ЭМС описана в статье Балкова Е.В., где приведено сравнение трансформации сигналов электромагнитного сканера ЭМС в УЭС в виде псевдореза и разрез по данным ЭТ, а также проведена одномерная инверсия данных ЭМСа [1]. Расхождения в значениях расчётного и измеренных УЭС имеются, и, на первый взгляд, достаточно значительные. Однако, весь разрез по данным двух методов – чрезвычайно проводящий, и найти в нём контрасты сложно. Во-вторых, при расчёте по формуле Муанфара минерализация должна быть взята в пересчёте на NaCl, что проблематично для богатого состава термальных источников и поровых вод. Соответственно, эти значения могут рассматриваться как не достоверные, но опорные, так как обратнопропорциональная зависимость минерализации и УЭС прослежена.

Обсуждение

При сопоставлении методов ЭТ и ЧЗ важно понимать разницу между инвертированными данными ЭТ и кажущейся глубиной по данным ЧЗ: они могут совпадать и нет, в зависимости от среды. Но источники на профилях ЧЗ отображаются чётко, вне зависимости от глубины – зоны пониженного сопротивления. Отсутствие чётких каналов на профилях ЭТ объясняется общей высокой проводимостью всего разреза (не более 30 Ом·м) и разницей измерений в двух выбранных методах: непрерывные измерения при ЧЗ и ограничения разрешения верхней части разреза межэлектродным расстоянием в ЭТ.

Различия измеренного и расчётного УЭС объясняются несовершенством формулы Муанфара, учитывающей лишь два параметра среды, и общей высокой проводимостью разреза.

Заключение

Результатом работы является визуализация приповерхностного пространства термального поля до глубины 10 м, позволяющая наблюдать контраст между высокопроводящими термопроявлениями и зонами относительно повышенного сопротивления, представляющими собой гидротермально изменённые породы. Визуализированная геоэлектрическая зональность определяется преимущественно соотношением жидкости к твёрдому веществу. В зависимости от количества флюида и его путей движения из глубинного источника к поверхности меняется его состав, кислотность, общий уровень минерализации. От уровня взаимодействия флюида с вмещающими породами меняется его состав и степень изменения пород, давая контрастность геохимических параметров рядом с расположенным термопроявлением.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы ФНИ (проект № FWZZ -2022-0029).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балков Е. В. Технология малоглубинного частотного зондирования // Геофизика. – 2011. – № 6. – С. 42-47.
2. Вилор Н. В. Мироманов А. В., Давыденко Ю. А., Шкиря М. С., Вилор А. М. Применение комплекса поисковых методов для прогноза термальных вод в Прибайкалье, Восточная Сибирь // Росгеология. В поисках новых открытий. – 2018. – С. 18-21.
3. Каймонова О. О., Шкиря М. С., Бадминов П. С., Давыденко Ю. А. перспективы развития геотермальной энергетики // Печатается по решению редакционно-издательского совета ИРНИТУ. – 2018. – С. 287.
4. Кугаенко Ю. А., Мельников Д. В. О некоторых аспектах техногенного воздействия Мутновского геотермического комплекса (Южная Камчатка, Россия) на окружающую среду // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – № 5. – С. 56-63.
5. Ненюкова А. И., Спичак В. В. Поиск перспективных участков для разведки геотермальных ресурсов на основе комплексного анализа разрезов петро-и теплофизических свойств пород // Науки о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46. – № 1 (82). – С. 6-19.
6. Hermans T., Vandenbohede A., Lebbe L., Nguyen F. A shallow geothermal experiment in a sandy aquifer monitored using electric resistivity tomography // Geophysics. – 2012. – V. 77. – № 1. – P. B11-B21.
7. Munoz G. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods // Surveys in geophysics. – 2014. – V. 35. – P. 101-122.
8. Moinfar A., Mallan R. K., Torres-Verdin C., Anger R. Time-lapse variations of multi-component electrical resistivity measurements acquired in high-angle wells // Petrophysics. – 2010. – V. 51. – P. 408-427.
9. Nieto I. M., Martín A. F., Blázquez C. S., Aguilera D. G., García P. C., Vasco E. F., García J. C. Use of 3D electrical resistivity tomography to improve the design of low enthalpy geothermal systems // Geothermics. – 2019. – V. 79. – P. 1-13.
10. Sáez Blázquez C., Martín Nieto I., Carrasco J., Carrasco P., Porrás D., Maté-González M. Á., González-Aguilera D. Applying Deep Electrical-Resistivity Tomography Techniques for the Exploration of Medium-and Low-Geothermal Energy Resources // Energies. – 2024. – V. 17. – № 8. – P. 1836.
11. Spichak V. V. Geophysical methods of geothermal resources exploration // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 2. – P. 25-29.

© С. П. Мишенина, С. Б. Бортникова, Ю. А. Маништейн, Г. Л. Панин, 2025