

УДК 550.837.6 (571.66)

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ КАНАЛОВ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВУЛКАНА МУТНОВСКИЙ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

© 2008 г. Ю. А. Манштейн, С. Б. Бортникова, А. К. Манштейн, Г. М. Гавриленко,
И. В. Верниковская, Н. П. Сезько

Представлено академиком М.И. Эповым 10.03.2008 г.

Поступило 01.04.2008 г.

Особенности состава термальных источников в активных вулканических регионах отражают множество факторов, влияющих на спектр и уровень содержания химических элементов в растворах, выходящих на поверхность. В первую очередь, это соотношение глубинных флюидов и метеорных вод. Оно определяет физико-химические условия разгружающихся растворов. Это соотношение может сдвигаться в ту или иную сторону в зависимости от структурных особенностей транспорта: трещиноватые толщи, а тем более открытые каналы обуславливают беспрепятственный подъем флюидов к поверхности. Значительную роль играет состав вмещающих толщ, по которым идет фильтрация растворов и выщелачивание элементов. При этом смешанные растворы с большей долей глубинных компонентов агрессивны и способны извлечь из пород вулканической постройки существенно большее количество химических элементов, чем растворы, в которых метеорная составляющая имеет определяющее значение [1]. Появляющиеся в последнее десятилетие данные о широком круге микроэлементов и их специфических ассоциаций в термальных водах [2, 3] позволяют на количественной основе описать источники вещества и химических элементов в поверхностных разгрузках.

На Донном поле влк. Мутновский гидрогеохимическими исследованиями были обнаружены термальные источники (грязевые котлы), раство-

ры которых имеют уникальный состав [4]. Их уникальность заключается в высоких содержаниях химических элементов, в том числе редкоземельных и платиноидов, отличающихся от известных ранее в аналогичных вулканических районах мира на один–два порядка (табл. 1). Полученные данные указывают на большую долю магматического флюида в их составе и свидетельствуют о наличии открытых каналов или сильно трещиноватых структур, по которым идет транспорт растворов к поверхности.

Была предложена численная модель миграции флюида от магматической камеры к поверхности [4]. В ней показано, что формирование рассолов, соответствующих составу котлов, возможно на границе вторичного кипения, где смешанные высокоокисленные кислые растворы разделяются на конденсат и сепарат. Подъем сепарата к поверхности по открытым трещинам обеспечивал бы появление обсуждаемых котлов. Определение геометрии структурных путей разгрузки котлов

Таблица 1. Максимальные содержания некоторых химических элементов в кипящих котлах и поровых растворах (ПВ) на Донном поле влк. Мутновский, мг/л

Элемент	Котлы	ПВ	Элемент	Котлы	ПВ
Fe	4.3	53	Cr	60	18
Mn	8.1	400	Co	0.48	5.2
Al	3.0	15	Ni	33	7.1
Li	0.37	14	Cu	0.62	120
Rb	0.52	0.57	Zn	1.9	110
Sr	20	7.2	As	0.61	82
Ba	1.9	0.47	Sb	0.65	0.25
Nb	1.5	17	Tl	0.36	0.35
Zr	0.23	31	Ga	0.94	3.55
Ti	15	360	B	160	450
V	13	430	Be	0.014	0.99

Примечание. Fe, Al – в г/л.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука
Российской Академии наук, Новосибирск
Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
Петропавловск-Камчатский
Лимнологический институт
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск*

являлось ключевым вопросом, ответ на который соединил бы рассчитанную физико-химическую модель и фактически полученные данные. Для проверки этой гипотезы были выполнены электроразведочные работы малоглубинной аппаратурой индукционного частотного зондирования. Физическими предпосылками для применения в данном случае комплекса ЭМС является высокая минерализация растворов в термальных источниках влк. Мутновский. Таким образом, задача идентификации каналов термальных вод в горных породах сводится к обнаружению электролита во вмещающей среде с относительно низким удельным электрическим сопротивлением [5, 6]. Цель работы состояла в исследовании структуры распределения объемной электропроводности на глубину до 6 м, что позволило выявить конфигурацию подводящих каналов котлов и распределение поровых вод в подповерхностном пространстве Донного поля.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Вулкан Мутновский расположен в 75 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского. Его постройка, имеющая максимальную высоту 2323 м над уровнем моря, состоит из четырех тесно сближенных, последовательно формировавшихся стратоконусов с вершинными кальдерами и дочерними внутрикальдерными сооружениями, а весь его массив осложнен многочисленными конусами побочных извержений [7]. В историческое время наряду с фреатическими происходили извержения с выносом ювенильного материала базальтового состава. Материал последних извержений, начиная с 1904 г., был резургентным, что установлено для извержений 1927–1929, 1960–1961, 2000 и 2007 гг. [8–10]. В достаточно протяженный интервал времени с 1961 по 2000 г. и спокойные периоды между фазами активизаций в начале 2000-х годов влк. Мутновский находится в стадии фумарольно-гидротермальной деятельности с необычайно высокими энергетическими параметрами 1800–1900 МВт, что квалифицируется рядом исследователей как “пассивное извержение” [10, 11].

Донное поле вулкана (северо-восточный кратер) является дном озера, существовавшего до 50-х годов XX века. Затем оно исчезло, а на его месте возникло фумарольное поле с весьма изменяющимся обликом. Более или менее постоянно на нем функционируют три серные фумаролы, большой грязевой котел Черный и множество небольших по размерам термальных источников, температура, окраска и консистенция (соотношение вода–порода) которых меняется в широком диапазоне: от мелких прозрачных выходов кипящих вод до черных котлов (доля взвеси в них составляет 10–15%). Встречаются котлы с желтова-

той, белесой, зеленоватой окраской кипящей в них смеси. На склоне поля расположен снежник, который в период таяния поставляет снеговую воду в протекающий по площадке ручей, и некоторая доля его воды смешивается с растворами котлов.

МЕТОДЫ

В 2007 г. были проведены геофизические исследования методом электромагнитного индукционного частотного зондирования с применением аппаратно-программного комплекса ЭМС. Комплекс разработан и изготовлен в ИНГГ СО РАН.

Исследуемая площадка на Донном поле была разбита на точки измерений по сетке 1×1 м (рис. 1). Зондирования производились на 14 частотах в диапазоне 2.5–250 кГц. Получаемая информация обрабатывалась программой Isystem, входящей в состав комплекса. Были построены геоэлектрические разрезы по 9 профилям наблюдений. Профили имели 29 м в длину, расстояние между профилями 1 м. Каждый профиль отражает распределение кажущегося удельного сопротивления грунта ρ . Конечная визуализация (квазитрехмерная модель подповерхностного распределения удельной электропроводности) была произведена с помощью оригинальной программы, разработанной там же. ЭМС как аппаратная реализация метода ЧЗ является наиболее подходящей в данном случае, благодаря его компактности, небольшому весу, высокой скорости проведения полевых исследований и возможности немедленной визуализации результатов.

После геофизических исследований (получены карты и распределения ρ) было проведено геохимическое опробование растворов на Донном поле. Опробованы кипящие котлы. Пробы из кипящих котлов отбирали тefлоновым прободборником. На термальной площадке были сделаны небольшие шурфы глубиной 50–70 см, из которых отобрано влажное вещество для отжима поровых растворов. Шурфы располагались таким образом, чтобы в пробы попало вещество из зон с различным ρ . Пробы упаковывали в пластиковые герметичные пакеты для транспортировки.

В лабораторных условиях из влажных проб были отдалены поровые растворы под давлением 100 атм. Катионный состав и содержания микроэлементов во всех растворах определялись методом ИСП-АЭС на приборе IRIS Advantage в АЦ ИГМ СО РАН. Содержания Cl^- и SO_4^{2-} измеряли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с непрямой УФ-детекцией анионов на колонке с обращенной фазой, модифицированной октадецилтриметиламмоний бромидом на микроколоночном хроматографе “Милихром А-02”, производитель “ЭкоНова” (Россия).



Рис. 1. Термальная площадка Донного поля с размеченными линиями профилей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно полученным построениям удельное сопротивление грунтов на исследованном участке изменяется в пределах 0.1–27 Ом/м. По-видимому, низкое сопротивление связано с насыщенностью грунта высокоминерализованными термальными водами, а высокое свойственно грунту, промываемому талой водой снежника. Судя по распределению ρ , все разрезы характеризуются повышенным сопротивлением в левой верхней части и пониженным в правой (рис. 2). Пространственное распределение проводящих зон указывает на наличие подповерхностных вертикальных каналов, сильно насыщенных высокоминерализованными термальными водами и приуроченных к поверхностным проявлениям этих вод – грязевым котлам. Вертикальные каналы отделены друг от друга “стенками” повышенного сопротивления с толщиной 1–3 м. По нашему мнению, стенки могут быть сложены более плотными, менее проницаемыми для растворов породами. Интерпретация результатов получает свое подтверждение при рассмотрении геоэлектрических разрезов один за другим при удалении от линии котлов. Наиболее близкий к грязевым котлам профиль показывает, что минерализованные гидротермалиты достигают поверхности из источника, положение которого при данной глубине зондирования выяснить не удалось. Но структура подводящих каналов

(мы предполагаем, что глубина зондирования составляла приблизительно 6 м) указывает на их устойчивую конфигурацию.

Состав выходящих на поверхность растворов варьируется в широких пределах (табл. 2), что находит объяснение при анализе зональности подповерхностного пространства. Зоны с низким ρ соответствуют котлам СДП 2, 3, 5. Котел СДП 4 формируется из локальной зоны с более высокими значениями ρ . Три химических элемента являются реперными при колебаниях соотношения талые воды – гидротермальные растворы; это хлорид-ион, алюминий и титан. В общей минерализации растворов хлорид-ион является определяющим компонентом. Сопоставление картины распределения ρ в вертикальном разрезе профиля 9 с составом грязевых котлов дает объяснение тем вариациям, которые обнаруживаются даже в близкорасположенных грязевых котлах. Они определяются тонкой гидрогеохимической зональностью подповерхностного пространства, которая вскрылась при электромагнитном зондировании. Например, в шурфе № 2 поровые растворы, полученные из трех вертикальных уровней, по содержаниям многих химических элементов отражают возрастание минерализации в соответствии с распределением ρ (рис. 2, табл. 3).

Высокопроводящие участки, трактуемые как каналы транспорта высокоминерализованного сепарата, с расстоянием от котлов истончаются, становятся менее выраженными, и их верхние ча-

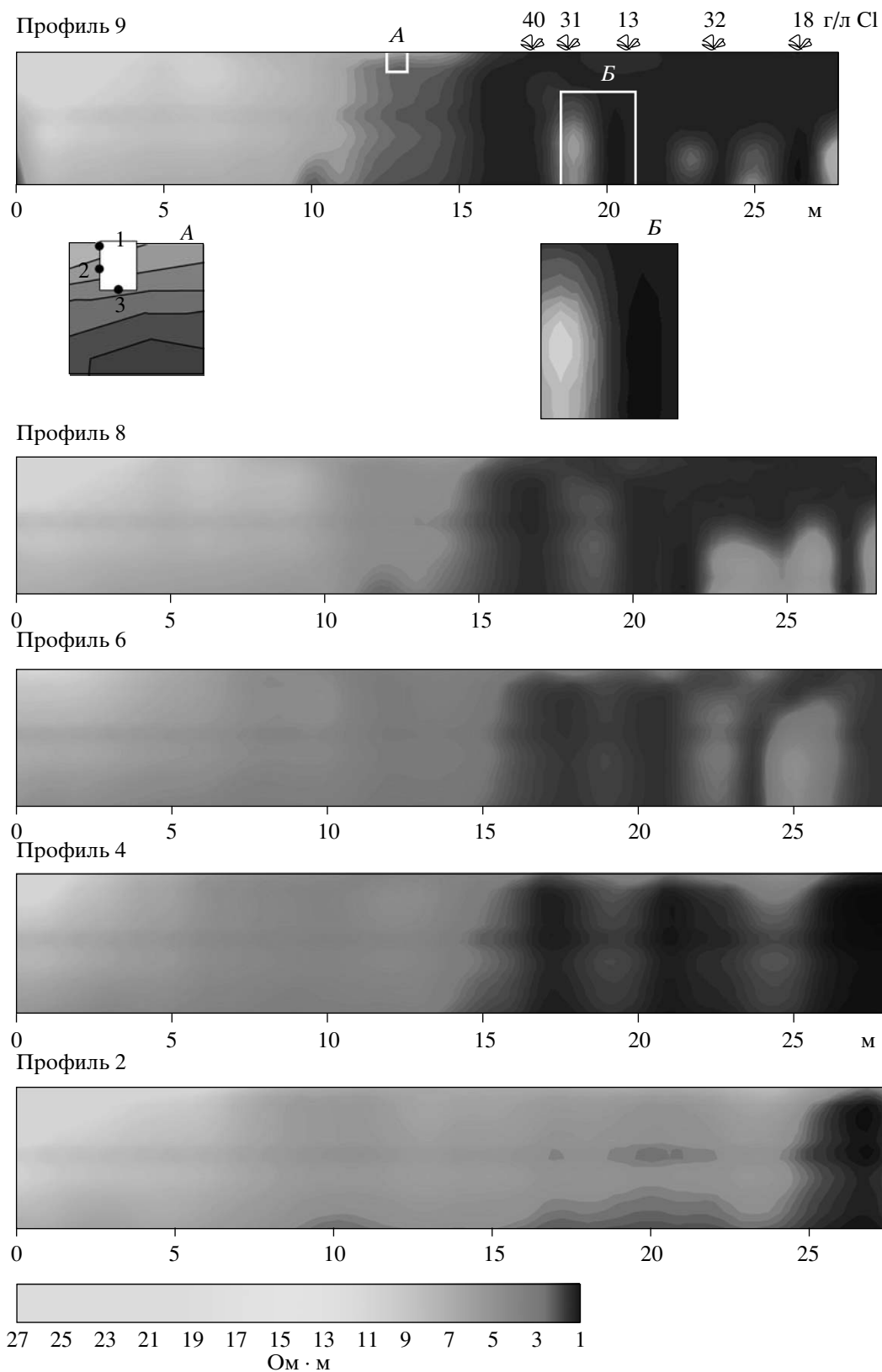


Рис. 2. Параллельные геоэлектрические разрезы термальной площадки на Донном поле. Вверху справа показаны грязевые котлы и содержание хлоридов в растворах котлов (табл. 2); А – схема опробования шурфа (глубина 50 см); Б – фрагмент гидрогеохимической зональности подповерхностного пространства.

Таблица 2. Состав и некоторые показатели растворов грязевых котлов на Донном поле влк. Мутновский, мг/л

Элемент	СДП 2	СДП 3	СДП 4	СДП 5	СДП 7	СДП 9а
pH	−0.26	−0.31	0.18	−0.03	0.33	0.29
Eh, мВ	609	590	510	530	550	640
Cl [−]	39000	31200	13100	31600	18400	2700
SO ₄ ^{2−}	4400	3300	2700	8500	2660	630
PO ₄ ^{2−}	32	40	15	120	45	19
Na	160	150	67	500	160	97
K	210	200	120	740	41	120
Ca	200	150	53	170	700	70
Mg	80	53	17	46	160	24
Fe _{общ}	320	170	64	190	390	64
Al	1100	1860	1100	2700	2300	880
Mn	5.6	2.8	1.1	3.0	5.3	1.1
Ti	9.7	7.9	0.78	3.2	1.2	0.74
V	2.4	2.3	0.92	4.5	5.4	0.99
Co	0.2	0.03	0.02	0.05	0.05	0.010
Cr	22	0.38	2.3	5.0	4.4	0.25
Ni	12	0.12	0.93	1.8	1.6	0.06
B	110	33	9.1	32	30	8.2

сти перекрыты менее электропроводными породами (т.е. термальные воды не достигают поверхности). В поровых растворах по профилю 4 отчетливо проявилась прямая корреляция общей минерализации поровых вод, содержаний Cl, Al и электропроводности растворов (рис. 3), что и нашло свое отражение в сложной зональности этого участка. Механизм формирования зональности может быть объяснен особенностями смешения снеготалой воды, поступающей со снежника (ему соответствует крайняя левая часть разрезов), с термальными растворами. В зависимости от времени года и водонасыщенности грунтов эта зональность может изменяться. Поровые растворы термальной площадки, полученные в 2006 г. (табл. 1), разительно отличались от поровых растворов из вещества, взятого практически на том же месте в 2007 г. Видимо, это было связано с тем, что в период сухой погоды наиболее минерализованные растворы (рис. 2, врезка Б на профиле 9) находились вблизи поверхности: им соответствуют зоны черного цвета. Мы предполагаем, что они имеют состав, наиболее близкий к сепарату, отделяющемуся на фазовом барьере, и способны достигать близповерхностного пространства. Это и дало возможность обнаружить растворы с экстремальными содержаниями химических элементов [12], а полученные результаты позволили объяснить их происхождение.

Таким образом, опробована и отработана методология дистанционного зондирования вулка-

Таблица 3. Изменение содержаний химических элементов и некоторых показателей в поровых растворах по вертикали (шурф 2), мг/л

Показатель	Ш 2-1	Ш 2-2	Ш 2-3
pH	2.97	2.32	1.34
Eh	577	585	630
δ, мСм/см	45.2	46.6	88
Cl [−]	6.9	7.3	25
SO ₄ [−]	5.0	5.8	3.5
F [−]	0.68	0.81	1.6
Ca	1600	1280	1150
Mg	120	150	310
K	15	36	51
Na	83	150	210
Al	1160	1130	1650
B	3.1	3.4	27
Co	0.1	0.11	0.48
Cu	0.03	0.08	3.8
Fe	230	370	1000
Mn	4	5.8	8.4
Ni	0.33	0.4	0.58
Sr	2.4	4.4	8
V	4.9	5.4	7.3
Zn	2.9	3.1	4.2

Примечание. Cl[−], SO₄[−] – в г/л.

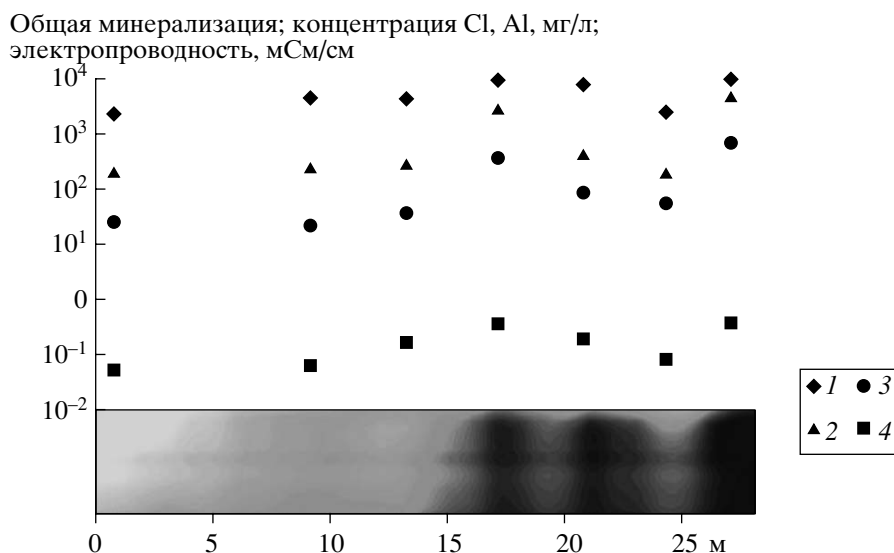


Рис. 3. Зависимость распределения кажущегося сопротивления среды ρ (см. рис. 2) от некоторых параметров поровых растворов: 1 – общая минерализация, 2 – содержание хлоридов, 3 – содержание алюминия, 4 – электропроводность.

нической структуры с контрастными параметрами удельного электрического сопротивления на глубину до 6 м. Получены геоэлектрические карты и разрезы, отражающие пространственное распределение удельного электрического сопротивления в среде.

В подповерхностном пространстве фумарольного поля Донное определена конфигурация подводящих каналов термальных источников, выраженная в вертикальных зонах пониженного сопротивления, что подтвердило гипотезу о транспорте рассолов аномальных источников по открытым трещинным зонам.

Выявлена гидрогеохимическая зональность поровых вод термальной площадки, обусловленная смешением поступающих рассолов и метеорных вод в разной пропорции, что является причиной появления термальных источников (грязевых котлов) с разным составом, окраской, физико-химическими параметрами на локальном участке. Зоны пониженного сопротивления имеют сложную пространственную геометрию, выражающуюся в зональном распределении растворов разной минерализации под поверхностью Донного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 06–05–96002, 07–05–00910) и ДВО РАН (грант 07–III –Д–08–092).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aiuppa A., Dongara G., Capasso G., Allard P. // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 2000. V. 98. P. 189–207.
2. Aiuppa A., Allard P., d'Alessandro W., Michel A. et al. // Geochim. et cosmochim. acta. 2000. V. 64. № 11. P. 1827–1841.
3. Giammanco S., Ottavian M., Valenza M. et al. // Water Resources. 1998. V. 32. № 1. P. 19–30.
4. Бортникова С.Б., Шарапов В.Н., Бессонова Е.П. // ДАН. 2007. Т. 413. № 4. С. 530–534.
5. Маништейн А.К., Энов М.И., Воевода В.В., Сухорукова К.В. Способ индукционного частотного зондирования. Российское агентство по патентам и товарным знакам. Пат. РФ № 2152058 С1. // Бюл. Изобр. 2000. № 18.
6. Маништейн Ю.А., Балков Е.В., Маништейн А.К. // Геофизика. 2006. № 1. С. 43–50.
7. Селянгин О.Б. // Вулканология и сейсмология. 1993. № 1. С. 17–35.
8. Гавриленко Г.М., Гавриленко П.Г. // Вестн. МГУ. Сер. Геология. 2004. № 4. С. 25–34.
9. Зеленский М.Е., Овсянников А.А., Гавриленко Г.М., Сеньюков С.Л. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 25–28.
10. Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В. // Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3–18.
11. Поляк Б.Г. Геотермические особенности области современного вулканизма (на примере Камчатки). М.: Наука, 1966. 180 с.