

**ПОДПОВЕРХНОСТНАЯ СТРУКТУРА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФУМАРОЛЬНОГО  
ПОЛЯ ВУЛКАНА ЭБЕКО (О. ПАРАМУШИР) ПО ДАННЫМ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И  
ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Г.Л. Панин<sup>1</sup>, М.П. Гора<sup>2</sup>, С.П. Бортникова<sup>1</sup>, Е.П. Шевко<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
просп. Ак. Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090; PaninGL@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Ак. Коптюга 3,  
г. Новосибирск, 630090; goga@igm.nsc.ru

<sup>3</sup>ФГАОУ ВО НИТомский политехнический университет, просп. Ленина 30, г. Томск, 634050; liza@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 11 февраля 2012 г.

Приведены результаты комплексного исследования Северо-Восточного фумарольного поля вулкана Эбеко (о-в Парамушир). Результаты геохимического изучения термальных источников и котлов свидетельствуют о сложном составе растворов: высокие содержания некоторых химических элементов в источниках не объяснимы только лишь выщелачиванием из вмещающих пород. Для выявления структурных особенностей, которые могут привести к накоплению элементов в термальных растворах, проведено геофизическое изучение Северо-Восточного фумарольного поля вулкана: частотным зондированием, электротомографией, температурной съемкой по профилю. В результате выявлены структура подповерхностного пространства термального поля, строение подводящих каналов и наличие фазового барьера, на котором идет разделение флюидов. Проведенный комплекс исследований позволил объяснить некоторые особенности геохимического состава термальных источников и описать эволюцию флюидов в верхней части разреза.

**Ключевые слова:** активные вулканы, электроразведка, геохимия, электротомография, частотное зондирование, термальные поля, о. Парамушир, Курильские острова.

## ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые поверхностные разгрузки термальных растворов представляют собой контрастные типы газо-гидротермальных проявлений, состав которых зависит от множества факторов. Основным фактором мы полагаем состав вмещающих пород, через которые идет транспорт флюида к поверхности с выщелачиванием многих химических элементов. Смешение кислых магматических газов с поверхностными водами приводит к появлению большого объема гидротермальных растворов кислого и ультракислого состава [4]. Последующий подъем смешанных растворов осуществляется через серию геохимических барьеров, на которых происходит вторичное кипение, разделение на конденсат и солевой остаток, и, следовательно, существенное изменение состава исходного термального раствора. Различные геофизические методы, применяемые в настоящее время при изучении

активных вулканов, позволяют локализовать фазовые барьеры, являющиеся важным фактором рудогенеза [11]. Электроразведочное зондирование устанавливает строение подводящих каналов и выявляет особенности функционирования гидротермальной системы в приповерхностных участках термальных полей [13, 20]. В данной статье рассмотрены результаты комплексного исследования одного из термальных полей вулкана Эбеко (о. Парамушир) – Северо-Восточного фумарольного поля (СВФП) – и сделана попытка определения генезиса гидротермальных поверхностных разгрузок на основании петролого-геохимических и геофизических данных.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования было выбрано СВФП влк. Эбеко (о. Парамушир), поскольку поверхностные разгрузки, функционирующие на этом поле, разно-

образны по фазовому и химическому составу и представляют собой масштабное проявление гидротермальной деятельности активного вулкана.

Влк. Эбеко расположен в северной части о. Парамушир (рис. 1) и представляет собой конус (1037 м) с тремя кратерами на вершине. Постройка вулкана сложена лавами и пирокластическим материалом андезитового и андезибазальтового состава. Известны его извержения 1793, 1895, 1934–1938, 1967–1971 и 1987–1991 гг. [12, 14, 16]. Гидротермальная деятельность, сопровождающая все этапы формирования вулкана, привела к глубокому изменению его пород до опаловых, опало-алунитовых, опало-каолинитовых разновидностей [17].

СВФП является одним из наиболее ранних и стабильных проявлений гидротермальной деятельности на влк. Эбеко. Поверхностные разгрузки на СВФП проявлены в виде активных кипящих водных и грязевых котлов с кислой и ультракислой средой. Помимо водных источников, на поле функционируют многочисленные, но небольшие серные fumaroles и парящие термальные площадки, на которых идет интенсивное современное минералообразование из паро-газовой смеси. Предыдущие результаты изучения геохимических особенностей гидротермальной и fumarole деятельности влк. Эбеко свидетельствуют о сложных многоступенчатых процессах трансформации гидротермальных растворов, приводящих к фазовым разделениям флюида на барьерах и, как следствие, к глубокой дифференциации вещества на пути подъема к поверхности [3, 4, 7, 15, 22, 23]. Наблюдаемые на fumarole поле контрастные

по составу термальные источники отражают закономерности взаимодействия магматических флюидов с вмещающими породами, а также особенности структурных путей транспорта [5].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На протяжении нескольких лет проводились комплексные исследования влк. Эбеко, которые включали полевое геологическое изучение вулканических построек, отбор образцов эффузивных пород, геохимическое опробование термальных растворов из различных проявлений поверхностных разгрузок, геофизическое зондирование внутренней структуры термальных полей, лабораторные исследования собранных коллекций и теоретическое осмысление полученных результатов.

## Полевое изучение

В течение ряда лет опробовались термальные кипящие котлы на СВФП вулкана. При опробовании в растворах измерялись pH, Eh, (прибором Эксперт-001, изготовлен фирмой «Эконикс-Эксперт», г. Москва), концентрации Fe(II) (прибором НАСН DR/890 Colorimeter), электропроводность (прибором Cond 315i/SET, фирмы WTW, Германия), температура (термометром ЛТ-300, изготовлен фирмой ООО «Термэкс», г. Томск). Пробы растворов отбирались в пластиковые контейнеры, герметично запаковывались.

Для получения представительной коллекции, охватывающей все разнообразие пород вулканической постройки, опробование производилось в разновозрастных коренных обнажениях. Пробы брались из центральных частей потоков, не подверженных вто-

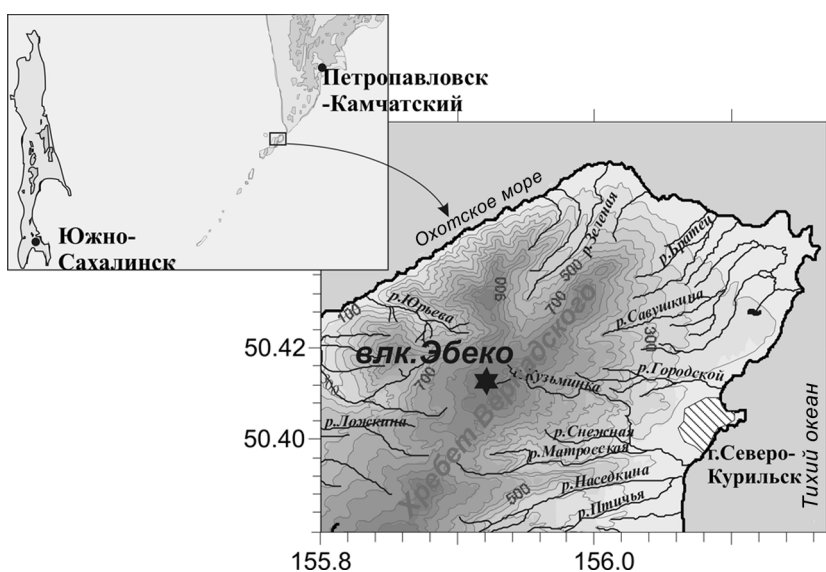


Рис. 1. Географическое положение влк. Эбеко.

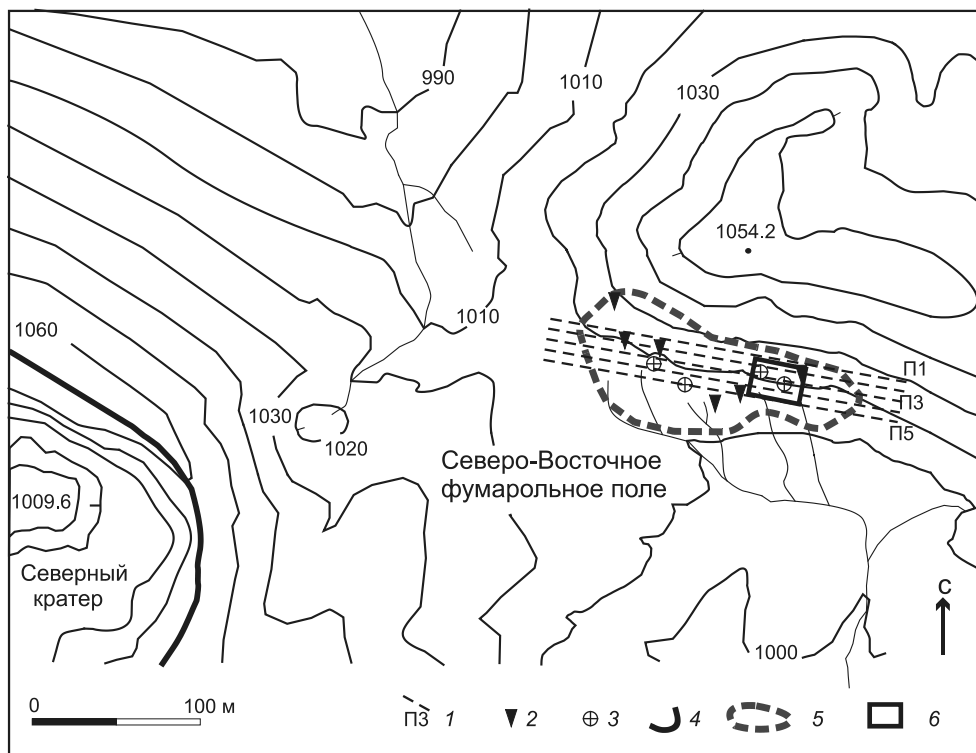
ричному изменению и выветриванию. Опробованы разрезы эффузивов: по р. Кузьминка, которая прорезает вулканическую постройку с восточной (тихоокеанской) стороны острова; по р. Юрьева, впадающей в Охотское море; по хр. Вернадского. Кроме того, на побережьях Охотского моря и Тихого океана опробованы мощные покровы, образующие плато в основании вулканических построек острова.

Электроразведочные работы двумя методами – частотным зондированием (ЧЗ) и электротомографией – были проведены на СВФП: 5 профилей электротомографии и 9 профилей частотного зондирования (рис. 2).

Частотное зондирование было выполнено на участках, где вулканогенные разгрузки образуют наиболее насыщенные фумаролами и кипящими котлами поля. Шаг между точками наблюдения ЧЗ был выбран 1 м, такой же шаг был между профилями. Электротомография проводилась с использованием двух электроразведочных кабелей по 115 м каждый, общее количество электродов которых равнялось 48. Шаг между электродами для электрических зондирований был выбран 5 м, что связано с конструктивными особенностями кабеля и давало возможность достигнуть максимальной глубины зондирования при разносе

питающих линий до 235 м для установок Шлюмберже. Чтобы обеспечить наименьшее искажение кривых зондирования из-за рельефа, установки в методах постоянного тока были ориентированы вдоль склонов. Частотное зондирование было использовано для локализации и обнаружения гидроэлектрической зональности, которая определяется сменой физико-химических параметров термальных растворов. Разрешение этого метода составляло не более 1 м и напрямую зависело от шага по точкам наблюдения и между профилями. Теоретической предпосылкой для применения электроразведочных методов было наличие минерализованных растворов в поровом пространстве горных пород [1, 13, 19]. В основе интерпретации данных частотного зондирования лежала программа ISystem [2], которая разработана в ИНГГ СО РАН для аппаратуры ЭМС. Для методов сопротивлений использовались пакеты программ Res2Dinv и Res3Dinv от Geotomo Software, поставляемые совместно с комплексом аппаратуры от компании Iris Instruments. Помимо геоэлектрических работ, на середине профиля электротомографии № 3 (от точки 80 м до точки 160 м по профилю 3) была выполнена съемка градиента температур.

Измерения температуры проводились высокоточным термометром на основе титановой термопа-



**Рис. 2.** Расположение профилей электротомографии и частотного зондирования в привершинной части влк. Эбеко. 1 – профили электротомографии; 2 – фумаролы; 3 – термальные котлы; 4 – бровка кратерного уступа; 5 – контуры Северо-Восточного фумарольного поля; 6 – контуры площадки частотного зондирования.

ры (точность  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ) на дневной поверхности и на глубине 0.5 м. Для проведения измерений бурились отверстия глубиной 0.5 м в грунте, затем в них помещался датчик термометра.

### Лабораторное исследование

Растворы котлов и термальных источников пропускались через фильтр 0.45 мкм и анализировались методом ИСП-АЭС для определения содержаний основных катионов и примесных элементов, прибор IRIS фирмы Jarell Ash Corporation (США). Пределы обнаружения метода составляют для Be – 0.0001; Al, As, B, Cd, Pb – 0.005; Ba, Cr, Mo, Sr, Ti – 0.003; Li – 0.002; Cu, Mn, Ni, Zn – 0.001; Co – 0.03; Fe, Nb, P, Se, Si, V – 0.01 мг/л, ошибка определения – 5–10 %.

Анионный состав (содержания  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) определялся методом ионной хроматографии.

Микроскопическое описание пород велось под микроскопом Olympus BX51, позволяющим проводить изучение полированных шлифов как в проходящем, так и отраженном свете. Содержание оксидов силикатной группы определялось стандартным методом РФА в АЦ ИГМ СО РАН. Определение содержания редких и рассеянных элементов проведено методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ), позволяющим получить концентрации 36 химических элементов с пределом обнаружения 0.01–0.05 г/т.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Геохимический состав термальных вод Северо-Восточного fumarольного поля вулкана Эбеко

Растворы кипящих котлов и источников на fumarольном поле представляют собой горячие воды ( $T = 41\text{--}93^\circ\text{C}$ ) с кислой и ультракислой средой ( $\text{pH} = 0.39\text{--}1.6$ ) и довольно широким диапазоном солености: от 2.7 до 20 г/л (табл. 1). Основные анионы в растворах представлены хлоридами и сульфатами в разных соотношениях и концентрациях. Присутствуют как хлоридно-сульфатные, так и сульфатно-хлоридные классы, причем если содержание сульфатов в растворах может различаться в 9 раз, то хлоридность варьирует в пределах 3 порядков. Общая минерализация связана с содержанием анионов прямой зависимостью, в отношении хлоридов она более строгая ( $r = 0.891$ ), чем в отношении сульфатов ( $r = 0.760$ ). Основным катионом во всех источниках и котлах является алюминий, составляющий более 50 мг-экв. % среди катионов. Вторым по значимости идет железо (13–33 мг-экв. %), доля щелочных металлов (Na и K) не превышает в сумме 10 мг-экв. %, а щелочноземельных (Ca и Mg) – около 20 мг-экв. %. Содержание катионов в растворах котлов более стабильно, чем анионов, наибольшие

вариации отмечаются для железа (8.6 раз), концентрации других металлов различаются в 3–5 раз.

Микроэлементный состав растворов разных котлов характеризуется высокой контрастностью, концентрации элементов изменяются более чем на порядок (табл. 1). Выделяются несколько характерных ассоциаций элементов, максимальные концентрации которых приурочены к определенным котлам. Ассоциации Al-Li-Be и Fe-Mn-Zn-V в высоких концентрациях обнаружены в небольшом негорячем котле ( $T = 51^\circ\text{C}$ ) на восточном фланге поля. Недалеко от него в прозрачном кипящем котле ( $T = 85^\circ\text{C}$ ) определено максимальное содержание Ba и Sr. В котле Большой наиболее высоки концентрации Ti-Co-Cr-Ni (рис. 3, табл. 1, пробы Э-10, Э-14).

Для выяснения особенностей состава гидротермальных растворов и понимания процессов взаимодействия магматических флюидов с вмещающими породами вулканической постройки был подробно определен минеральный и геохимический состав пород вулкана и сделано сопоставление с составом растворов поверхностных разгрузок.

#### Петролого-геохимические особенности пород

Эффузивы, слагающие вулканическую постройку, представлены преимущественно андезитами и андезибазальтами. Отдельные потоки базальтов отмечаются спорадически. В эффузивных образованиях встречаются ксенолиты – обособления пород основного, реже кислого состава размером от первых сантиметров до 0.5 м (табл. 2).

По структурным и текстурным особенностям андезиты, андезибазальты и базальты вулканов группы Эбеко очень близки. Это серые, темно-серые породы с порфировой структурой. Порфиновые выделения представлены плагиоклазом, пироксеном и оливином. Отмечается зависимость количества вкрапленников от состава пород. В ряду андезит – андезибазальт – базальт количество фенокристаллов плагиоклаза постепенно снижается и составляет, соответственно, 25–50 об. % – 20–40 об. % – 20–25 об. %. Максимальное количество порфирокристаллов оливина в том же ряду увеличивается: 0–3 – 3–5 – 5–10 об. %. При этом количество вкрапленников пироксена для всех разновидностей пород практически постоянно и колеблется в пределах 5–15 об. %. Микропорфиновые выделения титаномагнетита встречаются во всех типах эффузивов, и их содержание изменяется от единичных кристаллов до 2–3 об. %.

Наблюдается отчетливая корреляция между содержаниями петрогенных компонентов и кремнекислотностью пород. В ряду пород базальт – андезибазальт – андезит – дацит происходит закономерное

Таблица 1. Состав растворов кипящих котлов на Северо-Восточном фумарольном поле вулкана Эбеко.

	Э-2	Э-3	Э-4	Э-9	Э-10	Э-11	Э-14	Э-17	Э-1'	Э-2'
T°C	92	51	87	85	41	75	92	74	84	93
pH	1.15	1.24	0.61	1.47	1.03	1.04	0.39	1.16	1.6	0.9
	мг/л									
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5400	4200	2500	2800	3100	6900	9300	4500	1000	1500
Cl-	11	720	7400	64	24	580	9500	85	1200	1900
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	5.3	4.2	8.6	2.5	3.0	3.8	7.7	7.0	7.1	14
Ca <sup>2+</sup>	38	66	70	46	46	75	46	49	128	122
Mg <sup>2+</sup>	13	50	45	15	22	41	19	31	60	43
K <sup>+</sup>	39	35	55	15	24	20	43	43	30	86
Na <sup>+</sup>	26	44	36	17	29	51	30	32	40	41.0
SiO <sub>2</sub>	350	390	370	340	230	230	320	350	410	430
Fe	76	166	105	57	70	87	80	64	490	210
Al	170	280	220	94	160	180	180	170	350	400
Mn	0.8	3.20	2.5	0.9	1.6	2.4	1.48	1.74	4.50	2.6
Sr	1.3	0.88	1.6	0.32	0.98	1.3	1.5	1.2	0.83	3.6
Rb	0.19	0.59	0.48	0.50	н.о.	0.049	0.45	0.51	н.о.	н.о.
	мкг/л									
Ba	5.2	31	130	83	35	34	68	54	56	88
Li	8.3	17	14	1.0	11	11	8.5	1.0	30	21
Zn	н.о.	120	35	49	27	11	15	37	630	460
Cu	170	н.о.	н.о.	18	36	73	57	21	59	23
Ti	120	110	230	н.о.	440	140	890	93	2300	150
V	0.42	1.1	0.57	0.27	0.45	0.58	0.57	0.47	1.7	1.1
Co	н.о.	8.0	н.о.	6.3	н.о.	н.о.	25	19	58	65
Cr	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1500	н.о.	3600	н.о.	63	66
Ni	н.о.	1.9	н.о.	н.о.	600	н.о.	2000	28	10	19
Be	0.9	2.2	н.о.	н.о.	0.7	н.о.	н.о.	н.о.	2.7	1.7
Zr	9.7	н.о.	13	2.2	1.8	0.6	86	н.о.	16	100
Se	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	130

Примечание. н.о. – ниже предела обнаружения.

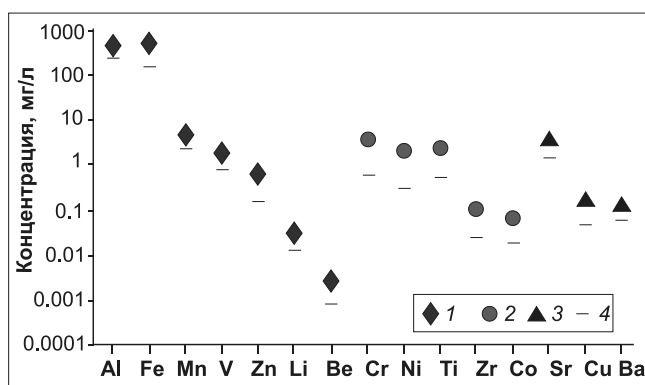


Рис. 3. Максимальные концентрации химических элементов в растворах трех разных котлов СВФП в сравнении со средними значениями по выборке.

1 – котел № 3 (северная часть поля); 2 – котел Большой (центральная часть поля); 3 – котел № 4 (центральная часть поля); 4 – средние значения по выборке.

уменьшение содержаний титана, алюминия, железа, марганца, магния и кальция с одновременным ростом щелочности пород (рис. 4), что может свидетельствовать о генетическом родстве указанных групп пород. Исключение составляют базальты, встреченные в виде ксенолитов – они содержат меньше титана, алюминия, марганца и натрия и больше магния, чем породы, формирующие потоки.

Микроэлементный состав андезитов и андезибазальтов вулкана Эбеко близок кларковым содержаниям средних и основных пород, по А.П. Виноградову [9]. Содержания элементов-примесей коррелирует с основностью пород. Чем выше содержание кремниевой кислоты в породах, тем больше в них концентрации таких элементов, как Ba, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Cs, Pb, Th, U, а количества V, Sr и Ag возрастают вместе с повышением основности пород.

Следует отметить, что в ксенолитах базальтового состава обнаружены повышенные содержания хрома и никеля. Количество этих элементов в ксенолитах

Таблица 2. Состав эффузивных пород вулканов группы Эбеко.

	ПР-30	ПР-32	ПР-34л	ПР-34м	ПР-39	ПР-40	ПР-49	ПР-49кс	ПР-60	ПР-66А
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO <sub>2</sub>	58.8	61.8	60.4	57.0	60.8	53.5	60.0	51.8	54.5	57.0
TiO <sub>2</sub>	0.61	0.53	0.61	0.67	0.57	0.78	0.55	0.70	0.74	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.7	16.7	16.6	17.6	16.9	18.1	16.4	15.7	17.9	17.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.54	6.62	7.55	8.92	7.10	9.74	7.42	9.83	9.43	8.71
MnO	0.16	0.16	0.16	0.18	0.21	0.19	0.16	0.17	0.19	0.18
MgO	3.73	2.34	2.76	3.58	2.56	4.30	3.08	8.39	4.04	3.54
CaO	7.04	5.63	6.15	7.59	5.85	9.22	5.78	9.18	8.83	7.44
Na <sub>2</sub> O	3.11	3.40	3.07	2.96	3.39	2.72	3.13	2.33	2.79	2.98
K <sub>2</sub> O	2.21	2.58	2.54	1.96	2.49	1.71	2.48	1.35	1.77	1.99
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.18	0.17	0.20	0.20	0.20	0.17	0.14	0.20	0.18
П.п.п.	0.17	0.20	0.00	-0.14	-0.17	-0.14	1.08	0.65	-0.15	-0.23
Сумма	100.3	100.2	100.0	100.4	99.9	100.2	100.3	100.2	100.2	100.2
Ba	470	480	440	360	430	270	450	250	330	350
Co	17	8	10	15	13	24	13	36	19	15
Собщ.	79	140	100	110	90	280	210	560	83	100
V	130	110	130	120	89	190	120	170	170	110
Cr	45	20	н.о.	22	н.о.	н.о.	100	390	18	28
Ni	36	18	21	24	21	31	36	115	22	20
Cu	66	52	63	70	77	76	69	67	79	69
Zn	62	56	72	70	62	71	72	63	69	68
Ga	15	13	14	14	13	13	16	12	13	15
Ge	2.0	2.3	2.1	2.5	2.5	2.4	1.7	2.0	1.9	3.0
Br	1.5	2.4	2.7	1.3	н.о.	0.7	2.1	1.3	1.2	1.8
Rb	46	54	56	38	51	35	55	28	35	40
Sr	400	390	360	390	380	430	370	340	420	390
Y	20	21	23	20	25	20	21	16	20	20
Zr	110	120	130	93	120	84	120	74	96	110
Nb	2.5	2.4	2.4	1.5	2.9	1.5	2.3	1.4	1.6	2.1
Mo	1.1	1.4	1.6	1.2	1.1	0.9	1.7	0.9	1.0	1.4
Pd	0.11	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0.06	0.09	0.12	н.о.
Ag	0.53	0.31	0.38	0.46	0.27	0.46	0.36	0.4	0.35	0.33
Cd	0.26	0.35	0.29	0.29	0.22	0.27	0.33	0.3	0.24	0.37
Sn	0.95	1.2	2.1	4.8	5.3	4.7	2.0	1.3	1.1	1.3
Sb	0.2	0.43	0.68	0.46	0.49	0.4	0.56	н.о.	0.25	0.48
I	н.о.	н.о.	н.о.	0.49	0.34	0.51	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Cs	2.3	2.1	2.5	1.6	0.9	1.5	2.5	1.1	1.2	1.3
As	н.о.	н.о.	4.4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Pb	8.4	9.9	11	8.8	7.8	6	12	5.4	7.4	9.4
Th	4.9	5.7	5.7	4.7	5.5	4	4.9	4.2	5.1	5
U	2.1	1.7	1.4	1.2	2.1	1.2	2.4	1.8	н.о.	1.4
Порода	А	А	А	АБ	А	АБ	А	Б	АБ	А

Примечание. Состав породообразующих оксидов приведен в мас. %, остальных компонентов – г/т. 1–5, 10 – р. Кузьминка; 6 – кратер влк. Эбеко; 7, 8 – вершинная часть влк. Эбеко; 9 – р. Юрьева. 3, 4 – полосчатые породы – чередование полос андезитов и андезибазальтов более темного (м) или светлого (л) оттенка; 8 – ксенолит в андезите 7. А – андезит, АБ – андезибазальт, Б – базальт.

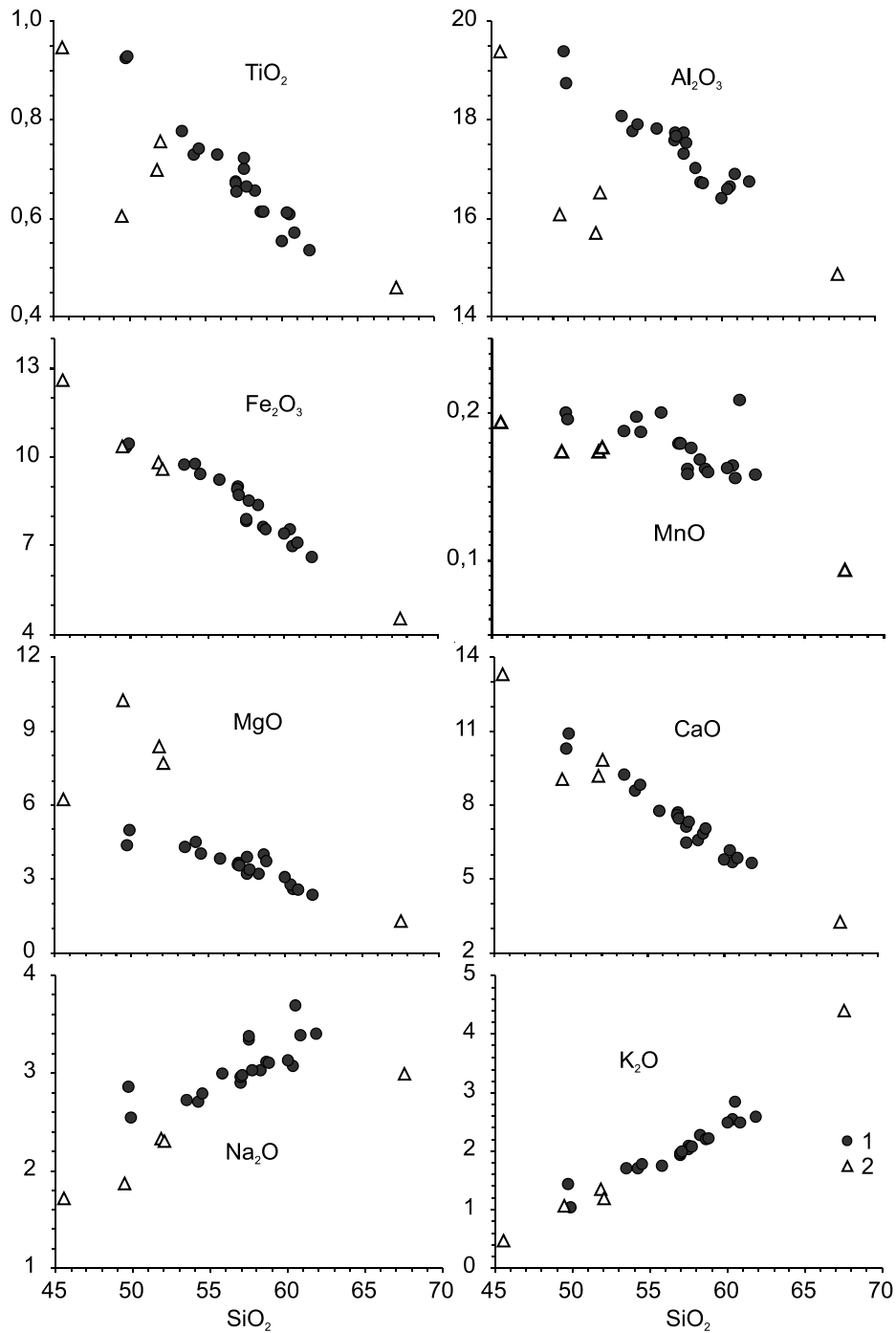


Рис. 4. Диаграммы Харкера для пород влк. Эбеко.

1 – эффузивы вулканов группы Эбеко; 2 – ксенолиты.

может в несколько раз превышать их концентрации в породах постройки. Это обусловлено минеральным составом пород – присутствием высокомагнезиального оливина ( $Fe_{77-91}$ ), содержание никеля в котором может достигать 0.29 мас. %, и наличием в оливине включений хромшпинелида (концентрация  $Cr_2O_3$  до 55.7 мас. %). В эффузивах вулканической постройки

хромшпинелид не встречен, а содержание NiO в оливине не превышает 0.05 мас. %.

#### Структура подповерхностного пространства

Результаты частотного зондирования и электро-томографии вскрыли сложную структуру подповерхностного пространства термальных полей. Удельное

электрическое сопротивление грунтов (УЭС) на рабочем участке Северо-Восточного поля вулкана Эбеко колеблется в пределах 0.5–30 Ом·м по данным инверсии электротомографии и от 1 до 20 Ом·м по данным трансформации частотного зондирования. Хороший результат зондирований, как индукционных, так и методов постоянного тока, во многом обусловлен высоким контрастом удельных электрических сопротивлений исследуемых объектов в сравнении с вмещающей средой. Гидротермальные объекты хорошо выделяются в виде аномалий пониженного удельного сопротивления на картах распределения УЭС до глубины нескольких метров (рис. 5). Для Северо-Восточного поля по данным частотного зондирования выделяется коническая структура подводящих каналов, которая указывает на близкое расположение гидротермально-го резервуара, предположительно на глубине до 10 м.

На профилях электротомографии (рис. 6) зафиксирован канал, подводящий высокоминерализованные растворы (очевидно, в перегретом состоянии).

Важным показателем фазовых переходов газ – раствор служит кривая разницы температур (рис. 6, профиль № 3). На профиле видны большие колебания  $\Delta T$ : от 10 до 40°C. Низкие значения  $\Delta T$  соответствуют водонасыщенным участкам (поскольку температура в растворах на поверхности не может колебаться значительно). Высокие  $\Delta T$  определяют паро-газовые зоны, в которых буквально на 50 см глубины температура может возрастать скачком до 100°C.

#### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Состав гидротермальных растворов зависит от состава вмещающих пород, через которые осуществляется транспорт флюида к поверхности. Для выяснения возможных источников химических элементов в термальных растворах содержания отдельных элементов в растворах котлов были отнесены к их содержанию в андезитах вулканической постройки [25]. По отношению концентраций в растворах котлов к содержанию в неизменном андезите (ПР-30, табл. 3) элементы разделились на три группы (рис. 7). Первая группа включает те элементы, чьи концентрации в 1 литре раствора могут быть реализованы при полном извлечении их из 1 г породы. Это породообразующие и некоторые примесные элементы К, Са, Na, Mg, Fe, Al, Mn, Co, P. Во вторую группу вошли элементы, содержание которых в растворе меньше, чем в 1 г породы: Ti, Ba, Cu, Zr. Третья группа составлена «аномальными» элементами. Концентрации этих элементов существенно превышают количество в 1 г породы: Cr, Ni. Основное значение в формировании состава гидротермальных растворов имеет сравнительная подвижность различных элементов [24, 25].

Только при растворении пород, где содержание хрома и никеля превышает средние значения в андезитах вулканической постройки, а именно пород, подобных ксенолитам базальтового состава, количество этих элементов в растворе, вероятно, сможет достигать полученных концентраций.

Таким образом, появление в котле Большом аномальных количеств Cr и Ni может свидетельствовать о наличии на пути подъема глубинных флюидов пород повышенной магнезиальности. Вероятно, разгрузка этих флюидов происходила при незначительном разбавлении метеорными водами, о чем можно сделать заключение из того факта, что общая минерализация котла Большого максимальна по сравнению с другими источниками СВФП и превышает этот показатель более чем в 2 раза. Об этом же свидетельствует отчетливо видимый на профилях электротомографии канал, подходящий к поверхности в районе котла Большого.

Сдвиг соотношения глубинный флюид/метеорные воды в ту или иную сторону определяет выход на поверхность растворов разного состава. И именно это соотношение обуславливает гидрохимическую зональность последних метров от поверхности (рис. 5, 6). Удельное сопротивление среды, различающееся от 0.1 до 6.5 Ом·м, отражает разную минерализацию поверхностных выходов.

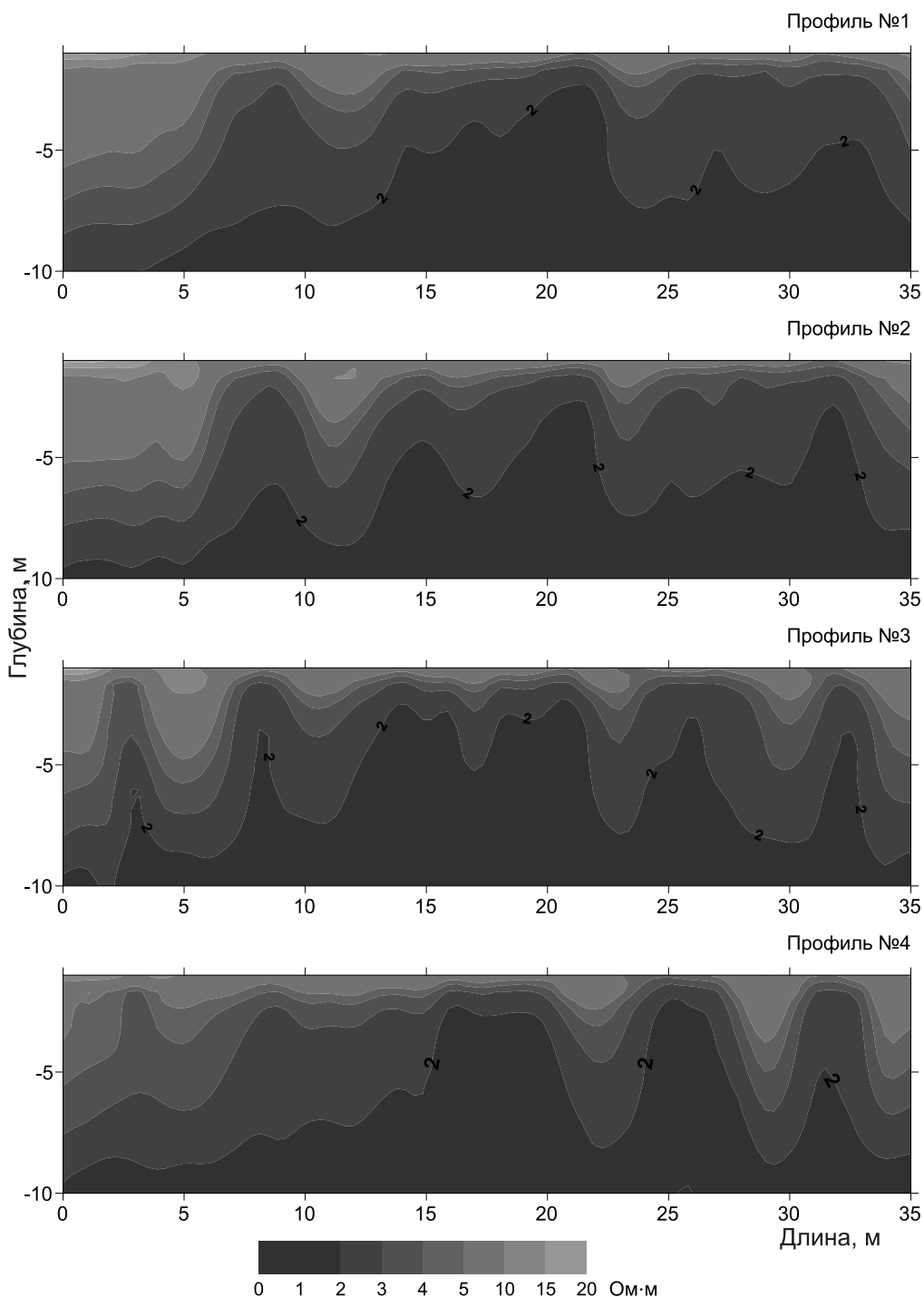
Согласно геоэлектрической зональности, выявленной на профилях электротомографии, удельное электрическое сопротивление в близповерхностном пространстве значительно возрастает, что можно объяснить наличием паро-газовой зоны, формирующейся при вторичном кипении растворов. При дальнейшем подъеме эта смесь конденсируется и формирует зоны с растворами, по своей минерализации отличающимися от более глубинных смесей. В определенных структурах возможен выход паро-газовой смеси на поверхность, что и дает термальные проявления в виде фумарол и парящих площадок.

Зональность термальной площадки, чередование высокопроводящих областей с относительными «изоляторами» являются следствием трансформации глубинных растворов на фазовых барьерах и объясняют высокую дифференциацию вещества в поверхностных разгрузках. Выявленная с помощью геофизических методов структура термального поля дает нам возможность обнаружить приповерхностные фазовые барьеры, ответственные за формирование составов гидротермальных растворов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных данных комплексных геофизических, геохимических и петрографических ис-



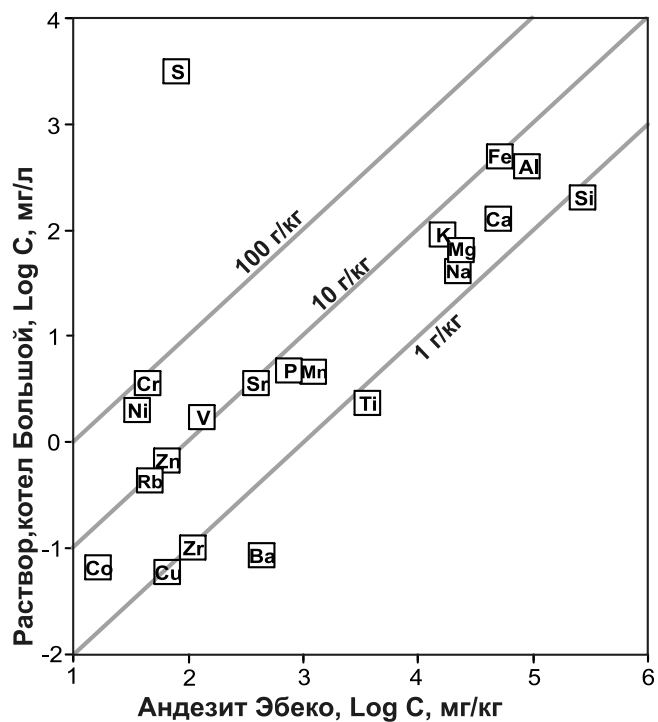
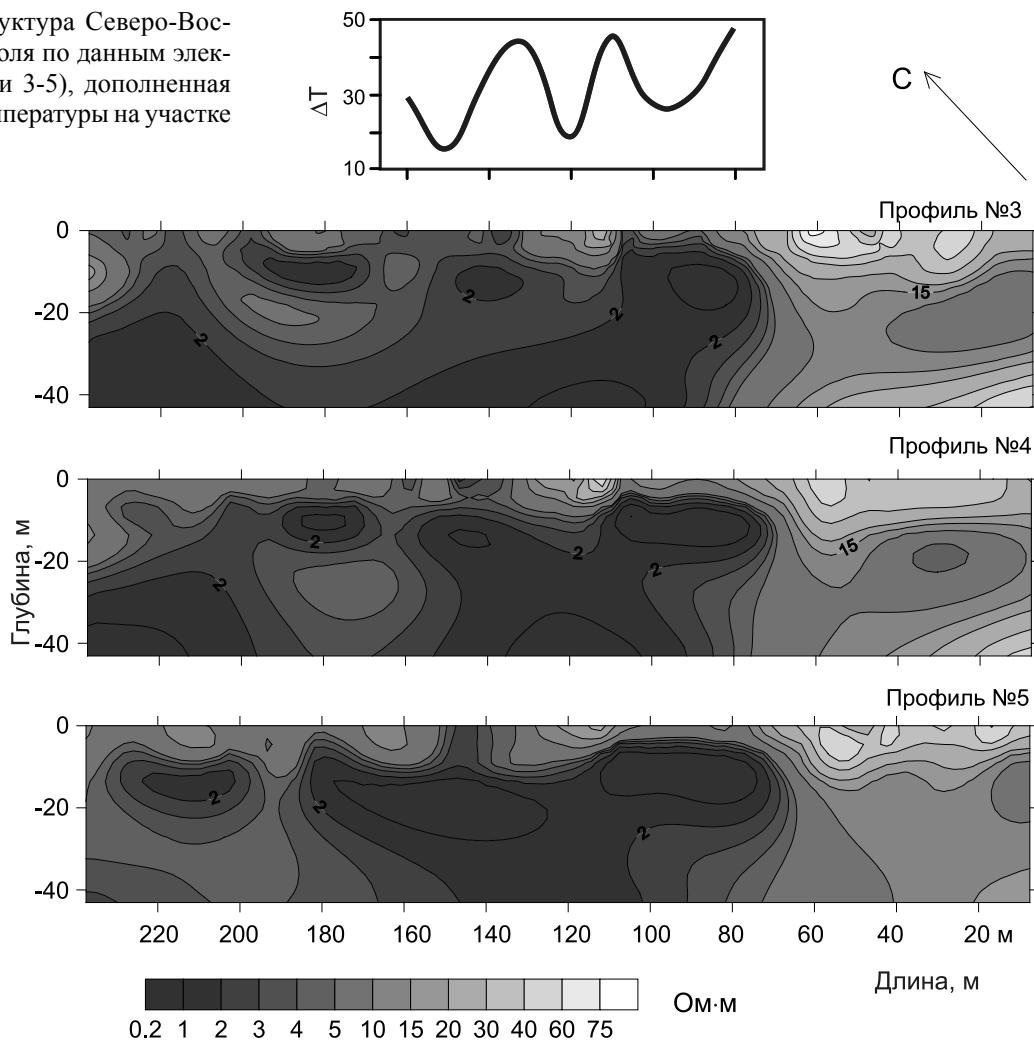


**Рис. 5.** Вертикальная зональность в подповерхностном пространстве Северо-Восточного фумарольного поля по данным частотного зондирования.

следований позволил приблизиться к пониманию генезиса гидротермальных флюидов на Северо-Восточном фумарольном поле вулкана и объяснить дифференциацию растворов. Подповерхностное пространство характеризуется наличием фазовых барьеров, которые определяют разделение флюида не только

по физическим параметрам (газ/жидкость терм), но и дифференциацию по химическому составу. Ярким тому примером служат хлор – малолетучий элемент, который накапливается в растворах вместе с породообразующими элементами, и сера – она уходит в газовую фазу на подповерхностном барьере. Резуль-

**Рис. 6.** Внутренняя структура Северо-Восточного фумарольного поля по данным электротомографии (профили 3-5), дополненная данными о градиенте температуры на участке профиля № 3.



**Рис. 7.** Концентрации элементов в растворе котла Большой СВФП в зависимости от содержаний элементов в андезите вулкана Эбеко (ПР-30).

татом становятся описанные выше корреляционные зависимости в составе термальных растворов. Современные методы электроразведки дают возможность выявить внутреннюю структуру термальных полей и наглядно показать вероятность выхода на поверхность растворов различного генезиса – глубинных и существенно разбавленных метеорными водами. Таким образом, удалось проследить пути миграции наиболее глубинных растворов и сделать обоснованные предположения о причинах накопления некоторых групп элементов.

Авторы благодарят за существенную помощь в проведении полевых исследований Л.В. Котенко, а также сотрудников ИВиС ДВО РАН, ИНГГ и ИГМ СО РАН, участвовавших в полевых, лабораторных, аналитических работах и обсуждениях полученных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №14-05-00798, 13-05-00544) и интеграционного проекта СО и ДВО РАН №42.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балков Е.В., Манштейн А.К. Трехкатушечный индукционный зонд в частотном зондировании // Геофиз. вестн. 2001. № 12. С. 17–20.
2. Балков Е.В., Эпов М.И., Манштейн А.К. Математическое обеспечение комплекса малоглубинного электромагнитного зондирования // IV международная научно-практическая геолого-геофизическая конкурс-конференция молодых ученых и специалистов «Геофизика-2003»: Тез. докл. СПб., 2003. С. 22–24.
3. Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Сугробов В.М. Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: геологическое строение, концептуальная модель, геотермальные ресурсы // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 34–50.
4. Бессонова Е.П. Моделирование динамики теплопереноса и физико-химических процессов в гидротермальной системе влк. Эбеко (Курильские острова): Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. Новосибирск, 2004. 21 с.
5. Бессонова Е.П., Фазлуллин С.М., Колонин Г.Р., Гаськова О.Л. Физико-химическое моделирование гидротермального изменения андезитов вулкана Эбеко, Курильские о-ва // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 56–64.
6. Бессонова Е.П., Гора М.П., Шевко А.Я., Чудненко К.В., Черепанова В.К. Оценка динамики изменения физических характеристик гидротермально измененного разреза по данным неизотермического физико-химического моделирования (на примере в. Мутновский) // Физика Земли. 2011. № 6. С. 57–68.
7. Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Трофимова Л.Б., Котенко Т.А., Николаева И.В. Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-в Парамушир) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 39–51.
8. Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Гора М.П. и др. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис / Отв. ред. О.Л. Гаськова, А.К. Манштейн. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. 282 с.
9. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
10. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. Тепловизионный анализ пост-эруптивной активности вулкана Экарма в 2010 г. (Курильские о-ва) // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 6. С. 27–30.
11. Копылов М.И. Роль электрохимических барьеров в локализации оруденения и их значение для поисков месторождений полезных ископаемых (на примере месторождений Приамурья) // Тихоокеан. геология. 2010. Т. 29, № 2. С. 69–80.
12. Котенко Т.А., Котенко Л.В., Шапарь В.Н. Активизация вулкана Эбеко в 2005–2007гг. // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 3–13.
13. Манштейн А.К., Панин Г.Л., Тикунов С.Ю. Аппаратура частотного электромагнитного зондирования «ЭМС» // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 6. С. 571–579.
14. Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю., Курбатов А.В., Несмачный И.А. Вулкан Эбеко (Курильские о-ва): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. 2. // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 24–41.
15. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 21–36.
16. Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Будников В.А. Активность вулкана Эбеко в 1987–1991гг.: характер извержений, особенности их продуктов, опасность для г. Северо-Курильск // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5–6. С. 21–33.
17. Никитина Л.П. Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с.
18. Никифоров В.М., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Дмитриев И.В., Старжинский С.С., Шкабарня Г.Н. Особенности флюидного режима литосферы в зоне сочленения Южного Приморья и Японского моря по комплексу геофизических данных // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 1. С. 54–64.
19. Панин Г.Л. Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений “Скала-48” // Инженерная и рудная геофизика: Материалы конф. Геленджик: EAGE, 2009. С. 2.
20. Панин Г.Л., Котенко Т.А., Котенко Л.В., Карин Ю.Г. Геофизико-геохимические исследования вулкана Эбеко (о. Парамушир) // Литосфера. 2010. № 3. С. 171–176.
21. Bessonova E.P., Bortnikova S.B., Gora M.P. et al. Geochemical and geoelectrical study of mud pools at the Mutnovsky volcano (South Kamchatka, Russia): Behavior of elements, structures of feeding channels and a model of origin // Applied Geochemistry. 2012. V. 27, N 9. P. 1829–1843.
22. Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Zelenskii M.E.: Hydrogeochemistry of thermal springs at Ebeco volcano (Kuril Islands) // Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey. 2005.
23. Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Kolmogorov Yu.P. et al. Trace elements in native sulfur as indicator of substance sources in fumaroles of active volcanic regions (Ebeco Volcano,

- Paramushir Island) // Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25–29 April. 2010.
24. Taran Y., Rouwet D., Inguaggiato S. et al. Major and trace element geochemistry of neutral and acidic thermal springs at El Chicho`n volcano, Mexico. Implications for monitoring of the volcanic activity // J. Volcanology and Geotherm. Res. 2008. V. 178. P. 224–236.
25. Taran Y. A. Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the Kamchatka – Kuril subduction zone // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. V. 73. P. 1067–1094.

*Рекомендована к печати А.Н. Диденко*

***G.L. Panin, M.P. Gora, S.P. Bortnikova, E.P. Shevko***

**Results of intergrated geoelectrical and geochemical studies of the northeastern fumarole field of the Ebeco Volcano, Paramushir Island**

The paper presents the results of the study of the northeastern fumarole field of the Ebeco Volcano (Paramushir Island). Geochemical study of thermal sources and pot holes evidence complex compositions of the solutions: high contents of some chemical elements there cannot be explained only by the leaching from host rocks. To understand the features of the structure of this hydrothermal system, which can lead to accumulation of the elements in thermal solutions we applied geophysical methods such as EM sounding, DC tomography, and temperature survey along the profile. This allowed us to reveal the structure of the subsurface thermal field, the structure of feeders and the presence of phase barrier for separation of fluids. This research allowed explanations to be made of some features of geochemical composition of thermal sources and the evolution of fluids in the upper profile to be described.

***Keywords:* active volcanoes, electrical prospecting, geochemistry, electric tomography, frequency sounding, thermal fields, Paramushir Island, Kuril Islands.**