

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.233; 556.3

### ГЕОФЛЮИДЫ АВАЧИНСКО-КОРЯКСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО БАССЕЙНА, КАМЧАТКА

© 2015 г. А. В. Кирюхин\*, Ю. Ф. Манухин\*, С. А. Федотов\* В. Ю. Лаврушин\*\*,  
Т. В. Рычкова\*, Г. В. Рябинин\*\*\*, А. Ю. Поляков\*, П. О. Воронин\*

\* Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН,  
Пийпа-9, г. П- Камчатский, 683006 Россия. E-mail: AVKiryukhin2@mail.ru

\*\* Геологический институт РАН, Пыжевский-7, г. Москва, 119017 Россия.

\*\*\* Камчатский филиал Геофизической службы РАН,  
Пийпа-9, г. П- Камчатский, 683006 Россия.

Поступила в редакцию 10.07. 2014 г.

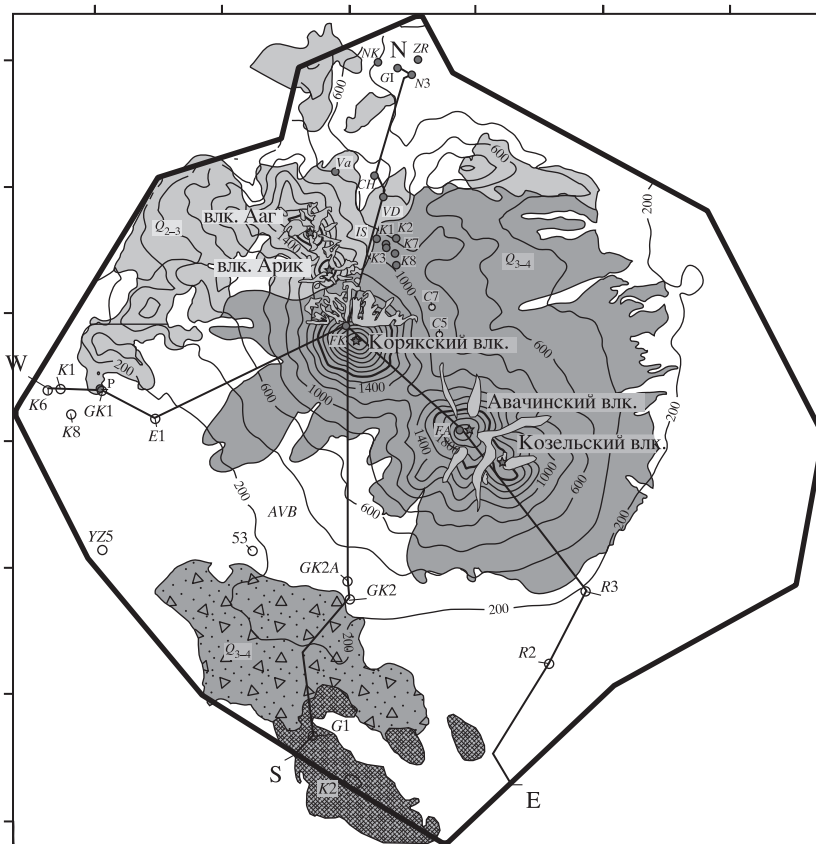
Авачинско-Корякский вулканогенный бассейн прилегает с севера к г. Петропавловск-Камчатский, включает пять верхнеплейстоценовых вулканов (два из которых, Авачинский и Корякский, активны) и суббассейны вулканогенно-осадочных неоген-четвертичных отложений. Зоны внедрения магматических флюидов четко определяются по распределению локальных землетрясений в постройках и фундаменте Корякского и Авачинского вулканов в диапазон глубин  $-6.0 \div +2.0$  и  $-1.5 \div +2.5$  км соответственно. Данные по изотопному составу воды ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) показывают, что ледники этих вулканов являются областями водного питания для прилегающих термоминеральных источников (Корякские Нарзаны, Изотовский и Пиначевский) и Быстринского месторождения пресных подземных вод (МПВ). Содержание  $\delta^{13}C$  в  $CO_2$  из углекислых источников на северных склонах Корякского вулкана свидетельствует о ее магматогенном генезисе. Высокая чувствительность термоминеральных источников к региональной и локальной сейсмической активности указывает на гидравлическую связь между зонами магматических внедрений под активными вулканами, с прилегающими гидротермальными системами и водно-метановыми резервуарами. Гидродинамическая TOUGH2-EOS9 модель Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна разработана и откалибрована по данным измерений уровня воды в 13 глубоких скважинах, по результатам инверсионного моделирования суммарный расход водного четвертичного бассейна оценивается  $6 \text{ м}^3/\text{с}$ , максимальный уровень подземных вод под вулканами  $+900$  м абс. Водно-метановые резервуары примыкают к магматическим резервуарам вулканов, их площадь со значительными газовыми ресурсами оценивается в  $\sim 650 \text{ км}^2$ , формирование газовых залежей под вулканами может происходить в результате гидромеханического и термического воздействия магмы.

**Ключевые слова:** Корякский, Авачинский, вулканогенный, геотермальный, метан, источники, сейсмичность, TOUGH2-моделирование.

#### ВВЕДЕНИЕ

Авачинско-Корякский вулканогенный бассейн [4] площадью  $2530 \text{ км}^2$  прилегает с севера к Петропавловск-Камчатскому и включает пять верхне-плейстоценовых вулканов (два из которых Авачинский (2750 м абс.) и Корякский (3456 м абс.) активны), суббассейны вулканогенно-осадочных неоген-четвертичных отложений мощностью до 1.4 км, расположенные в депрессии, образованной в кровле фундамента мелового возраста (рис. 1). Границы бассейна определяются естественными гидродинамическими границами (береговая линия Тихого океана на востоке, Ава-

чинская бухта на юге, реки Налычева и Авача на севере и западе соответственно). Вулканогенный бассейн содержит значительные ресурсы геотермальной энергии, термоминеральные источники, месторождения пресных подземных вод, водно-метановые резервуары, в то же время представляет потенциальную вулканическую опасность, поскольку Авачинский и Корякский вулканы расположены в 25–30 км от г. Петропавловск-Камчатский с населением около 250 тыс. человек. Конус Авачинского вулкана образовался 3500 лет назад, в историческое время (с 1737 г.) зафиксировано 15 извержений. В 2008–2009 гг. отмечено значительное усиление фумарольной активности



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна. Геологические подразделения:  $K_2$  – породы фундамента мелового возраста,  $N-Q_1$  – вулканогенно-осадочные неоген-четвертичные отложения,  $Q_{2-3}$  – суббассейн Пиначевских экструзий, AVB – артезианско-вулканогенный бассейн,  $Q_{3-4}$  – Авачинский, Корякский, Козельский вулканы и продукты их извержений вблизи Петропавловска-Камчатского. Термоминеральные источники (показаны черными закрашенными кружками): K1, K2, K3, K7, K8 – Корякские Нарзаны, IS – Изоговский, VD – Водопадный, CN, CH – Чистинские, Va – Вакинский, N3 – Налычевские (Лужа-3), GI – Грифон Иванова, NK – Налычевский котел, ZR – Желтореченский, P – Пиначевские. Холодные источники: C5 и C7. Скважины показаны незакрашенными кружками с соответствующими номерами. Масштабная ось – 10 км.

Корякского вулкана. Внедрение газонасыщенной магмы в водоносные горизонты может привести к повышению вулканической активности и гидротермальным взрывам. В связи с этим создание термогидродинамических моделей Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна необходимо для решения следующих задач: 1) определение расхода инфильтрационного питания и расчет поверхности уровня грунтовых вод в районе вулканов; 2) определение распределения температуры и проницаемости в районе вулканов; 3) оценка условий формирования и эксплуатационных запасов месторождений термоминеральных и пресных вод, а также газовых залежей в пределах бассейна; 4) анализ влияния сейсмической и вулканической активности на термогидрогеохимический режим прилегающих к вулканам термоминеральных источников и гидрогеологических скважин.

### АВАЧИНСКО-КОРЯКСКИЙ БАССЕЙН. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ И УСЛОВИЯ ПИТАНИЯ/РАЗГРУЗКИ ФЛЮИДОВ. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ

Авачинско-Корякский вулканогенный бассейн расположен в депрессии, сформированной в верхней части фундамента мелового возраста, характеризующейся низким температурным градиентом  $24^\circ\text{C}/\text{км}$ . Фундамент бассейна сложен верхнемеловыми отложениями  $K_2$ , представленными метаморфическими породами: метапесчаниками, метаалевролитами, филлитами с прослоями сланцев и микрокварцитов. Значения пористости – десятые доли процента. Породы практически непроницаемые  $0.001 \div 0.01$  мД, однако присутствуют локальные зоны трещиноватости, из которых при испытании скважин получены притоки воды с де-

битами от 4.6 до 530 м<sup>3</sup>/сут в интервале глубин 1438–1490 м (скв. Е1). Средняя теплопроводность меловых отложений 2.8 Вт/м °С.

Неоген-нижнечетвертичный водоносный комплекс сложен пирокластическими и вулканогенно-осадочными образованиями. Значения пористости довольно высокие: 0.36÷0.48, удельные дебиты скважин от 0.0004 л/(с·м) (скв. Р2) до 0.01 л/(с·м) (скв. ГК-1, Пиначевская). Средняя теплопроводность палеоген-четвертичных отложений 1.5 Вт/м °С.

Водоносный комплекс Пиначевского экструзивного массива Q<sub>1-2</sub> сложен экструзиями андезитов и риолитов и включает жерловые образования андезитов, дацитов и риолитов (мощность >200–500 м). По данным лабораторных исследований, пористость 0.12, проницаемость 24 мД.

Вложенный артезианско-вулканогенный бассейн (АВБ) включает водоносный комплекс водно-ледниковых образований: голоценовые аллювиальные отложения, верхнеплейстоцено-голоценовый морской и аллювиально-морской горизонты, верхнеплейстоценовый ледниковый и водно-ледниковый комплекс, водоносный голоценовый пролювиальный и делювиально-пролювиальный комплекс. По данным опробования скважин Быстринского месторождения подземных вод, диапазон проницаемости от 10 до 3000 мД.

Корякский и Авачинский вулканы (Q<sub>3-4</sub>), сложенные андезибазальтами и базальтами, формируют область питания подземных вод вулканогенного бассейна.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА АКТИВНОСТИ И УСЛОВИЙ МАГМАТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ ВУЛКАНОВ

Средний расход активных вулканов Корякского и Авачинского за время их существования оценивается в 80 и 150 кг/с соответственно. Активизация фумарольной деятельности Корякского вулкана началась 23 ноября 2008 г. в виде усиления парогазовой активности в трещине на северо-западном склоне вулкана при тепловой мощности струи ~40 МВт и расходе ~15 кг/с парогазового флюида. К концу декабря тепловая мощность, расход пара увеличились до ~400 МВт и ~150 кг/с, в шлейфе верхнего (основного) жерла появилась примесь пепла. Верхнее, ближайшее к кратеру жерло, было основным и характеризовалось на порядок большим расходом пара, чем нижнее. В январе 2009 г. расходы пара из этих жерл составили ~170 кг/с и ~20 кг/с соответственно. С конца апреля акти-

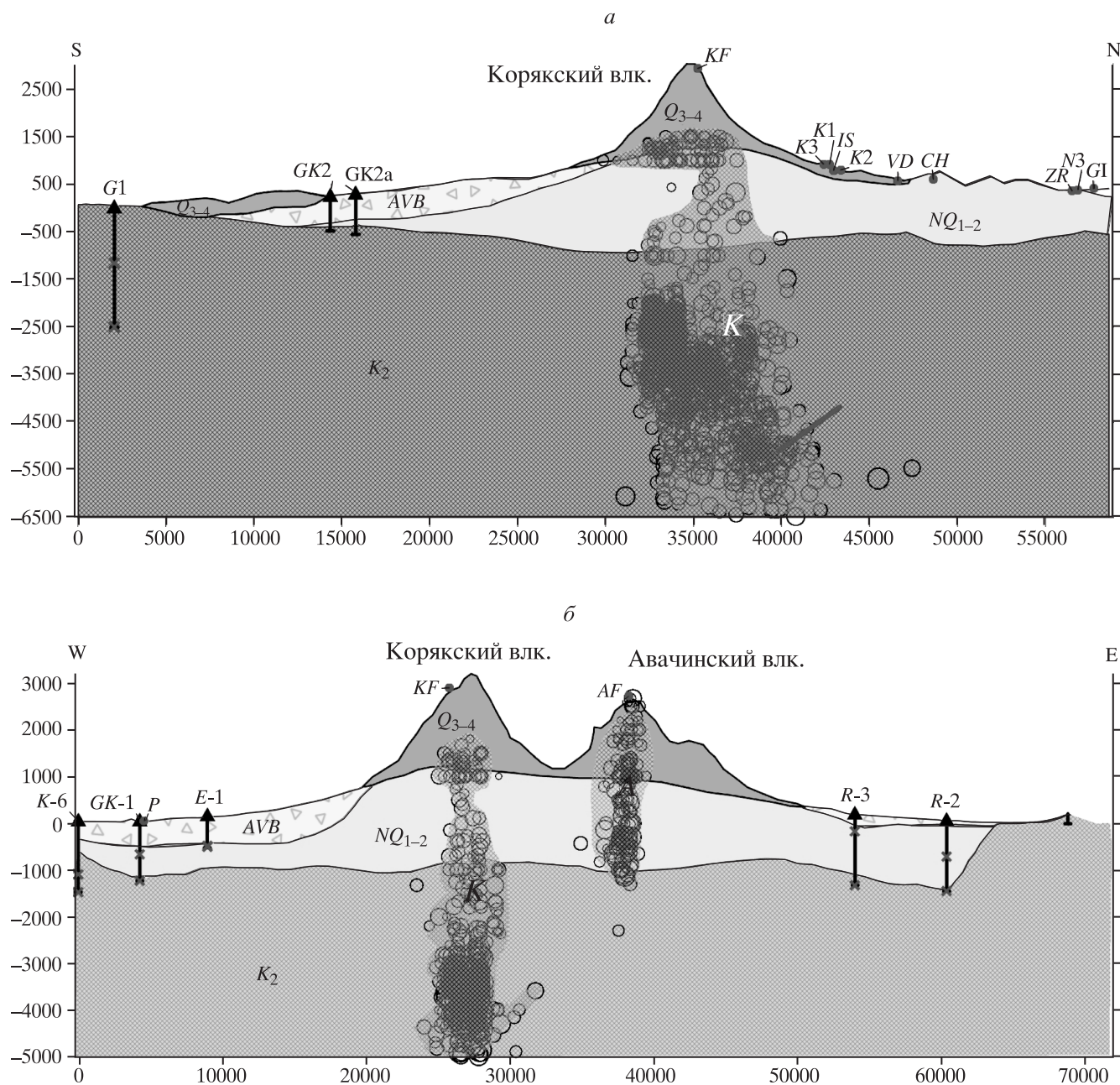
визация продолжалась как парогазовая только из основного жерла (на начало июня 2009 г.). Средняя тепловая мощность и расход пара для вулкана Авачинский в конце 2008 г. – начале 2009 г. 10–15 МВт (4–5 кг/с). Тепловые мощности парогазовых шлейфов вулканов оценивались В.В. Ивановым [3] по формулам С.А.Федотова.

По сейсмическим данным (2009 г., КФ ГС РАН), координаты землетрясений приурочены к двум резервуарам: резервуар “А”, центрированный в конусе вулкана Авачинский в диапазоне глубин –1.5 ÷ +2.5 км абс., имеющий поперечник около 2 км; и резервуар “К” – в постройке вулкана Корякский в диапазоне глубин –6.0 ÷ +2.0 км абс., характеризующийся горизонтальными размерами 15 × 3 км и простирающийся в субмеридиональном направлении (рис. 2). Указанные резервуары, очевидно, характеризуются повышенной проницаемостью и температурой, так как трассируют зоны гидроразрыва при внедрении магмы, питающей Корякский и Авачинский вулканы.

#### УСЛОВИЯ ВОДНОГО ПИТАНИЯ И РАЗГРУЗКИ В ВУЛКАНОГЕННОМ БАССЕЙНЕ

Интервалы опробования глубоких скважин (табл. 1), вскрывших фундамент Корякско-Авачинского бассейна (K<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>-N<sub>1</sub>), характеризуются химическим составом, соответствующим разбавлению океанической седиментационной воды за счет инфильтрации метеорных вод. Это Cl-Na воды с незначительными содержаниями HCO<sub>3</sub>, Ca, Mg и SO<sub>4</sub>. Соотношение Cl/Na близко к значениям морской воды, признаков значительной метаморфизации воды не отмечается. Некоторое увеличение Ca и Mg может быть связано с процессами выщелачивания CO<sub>2</sub> из вмещающих пород.

По газовому составу флюиды фундамента вулканического основания (кроме северного склона Корякского вулкана) характеризуются повсеместным распространением метана (около 70 об.%), обнаруженного в скважинах на Радыгиской площади (скв. R3), скважинах Кеткинско-го геотермального месторождения (K1 и др.), по юго-восточной периферии Пиначевского экструзивного массива (скв. GK1, Пиначевские источники) и к юго-западу от Корякского вулкана (скв. E1) (табл. 2, см. также [8]). Наиболее яркий пример – скв. R3, вскрывшая в интервале глубин 366–455 м газовую залежь под давлением 24.2 бар, при опробовании которой после углубления в полном интервале 366–1503 м получена продукция 3.2 кг/с воды и 4.0 л/с газа при температуре излива 18°С.



**Рис. 2.** Геологический разрез Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна по линии: *а* – SN, *б* – WE (см. на рис. 1). На разрезе показаны скважины, горячие источники и конфигурация резервуаров К и А (перекрестная штриховка), определенная на основе данных сейсмических наблюдений. Кружки – гипоцентры местных землетрясений в 2009 г. (КФ ГС РАН), жирная линия – след разлома индуцированного кластером землетрясений 2.08.2011 г.

Термоминеральные воды, разгружающиеся на северном склоне Корякского вулкана (Корякские Нарзаны и Изотовские<sup>1</sup>) существенно отличаются от вод, циркулирующих в породах фундамен-

та. Воды источников характеризуются наличием CO<sub>2</sub> в газовой фазе (табл. 2, 3), более низкими значениями pH (см. табл. 1) и более низкой минерализацией (1–4 г/л), что связано со значительным смешением этих вод с метеорными водами в приповерхностных условиях. Это воды состава HCO<sub>3</sub>-Na с малыми концентрациями Cl, сопоставимыми с концентрациями Cl рек и ручьев. Также наблюдается увеличение концентрации SO<sub>4</sub>,

<sup>1</sup> Петров М.А., Котельникова Т.К., Петрова Н.Ш. Отчет о результатах специализированных работ по изучению бальнеологических ресурсов и режима минеральных вод бассейна р. Налычева. 1995. №5819 (Территориальный фонд информации, П-Камчатский).

**Таблица 1.** Химический состав термоминеральных источников, холодных родников и скважин Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна (концентрации ионов в мг/л), по данным опробования 1970–2011 гг.

Номер скважины/источника	Дата	pH	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SiO <sub>2</sub>	T <sub>Na-K</sub>	T <sub>SiO<sub>2</sub></sub>
скважины												
GK1	04.10.1970	7.5	2199	207	–	1050	70	241	–	–	148	–
G1	14.04.1988	8.8	4929	502	100	3450	48	24	24	–	42	–
K6	17.11.1990	8.5	2124	–	–	1175	25	119	24	46	64	98
K8	17.11.1990	8.3	6358	14	13	3125	91	598	234	44	85	96
R3	05.06.1992	7.6	12 869	144	16	6667	167	679	271	61	75	111
R2	15.03.1993	8.2	6901	518	–	4308	0	110	122	11	–	43
E1	30.08.2011	12.1	344	68	10	285	47	36	2	2	–	–
53	05.07.2011	8.2	24	51	154	28	3	28	22	35	182	86
источники												
P2	30.05.2010	7.4	353	231	5	240	9	23	28	53	99	105
IS	28.07.2011	6.9	28	800	1114	323	103	401	2	66	358	116
K1	29.07.2011	6.6	32	678	115	64	14	76	92	40	292	92
K2	29.07.2011	6.3	41	866	134	80	21	84	120	51	320	103
VD	29.07.2011	6.5	<0.3	429	67	47	22	38	47	111	451	143
C5	30.07.2011	6.5	1	9	1	1	1	1	1	3	–	–

Примечания. Скважины: GK1, G1, K6, K8, R3, R2, 53, E1; горячие источники: IS, K1, K2, VD; холодные источники: C5 (см. рис.1). GK1, G1 – данные представлены Г.В.Рябининым по результатам опробования в 2011 г., K6, K8 (А. Сerezников и др., 2000\*), R2, R3 (А. Евтухов и др., 1995\*\*), E1 – данные представлены Г.Н. Копыловой по результатам опробования в 2011 г. Остальные пробы отобраны А.В.Кирюхиным, анализы проведены в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН.  $T_{SiO_2}$  и  $T_{Na-K}$ -гидрохимические геотермометры ( $T_{SiO_2} = 1309 / (5.19 - \text{LOG}_{10}(I3)) - 273$ ,  $T_{Na-K} = 855.6 / (\text{LOG}_{10}(Na/K) + 0.8573) - 273$  – Fournier, R.O., 1981 [16]).

\* Сerezников А.И., Лазарев В.А. Отчет о результатах гидрогеологического до изучения с инженерно-геологическими и геоэкологическими исследованиями картографированием М 1:200 000, проведенного на территории листа № 57-27 в 1991–1996 гг. 2000. ФГУ ТФИ. № 6045 (Территориальный фонд информации, П-Камчатский).

\*\* Евтухов А.Д., Чебыкин И.Н., Патракова Т.П. № 5837 Отчет о проведении общих поисков термальных вод на Радыгинской площади в 1991–1995 гг. ТОО “Аква”.1995. ФГУ “КТФГИ” (Территориальный фонд информации, П-Камчатский).

особенно в Изотовском источнике (IS). Указанные выше особенности могут быть результатом взаимодействия метеорных вод, обогащенных восходящими притоками вулканического CO<sub>2</sub> с вулканогенными породами. CO<sub>2</sub> выщелачивание приводит к обогащению по Na, а иногда и по Ca. Источником SO<sub>4</sub> могут быть вулканические газы (с CO<sub>2</sub>), либо выщелачивание метеорными водами гидротермально измененных пород в суб-кратерных зонах вулканов. Формирование таких вод в кинетически активных зонах характеризуется значительными вариациями значений геотермометров 200–300°C (см. табл. 1), в то время как воды фундамента показывают более узкий диапазон изменений значений геотермометров.

Условия водного питания артезианско-вулканогенного бассейна (АВБ) четвертичного возраста и термоминеральных источников достаточно хорошо идентифицируются на основе данных

по изотопному составу подземных вод (рис. 3). Судя по значениям δD (–128 ÷ –120‰), область водного питания для Корякских Нарзанов, Изотовских источников, Пиначевских источников и скважин Быстринского месторождения пресных подземных вод находится на отметках 1800–2500 м абс. По гипсометрическому положению это могут быть лишь склоны Корякского и Авачинского вулканов, покрытые ледниками. Область водного питания для группы Чистинских нарзанов находится на отметках 800–1500 м абс., что соответствует положению центральной части Пиначевского экстрезивного массива с вулканами Арик и Ааг.

По химическому и газовому составу флюиды термоминеральных источников на северном склоне Корякского вулкана (в зоне влияния резервуара К) резко отличаются от подземных вод фундамента преобладанием CO<sub>2</sub> в газовом со-

**Таблица 2.** Химический и изотопный состав свободных газов (об.%) из термоминеральных источников и скважин Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна, по данным опробования 2010–2013 гг.

Номер источника/скважины	Дата	H <sub>2</sub>	Ar	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Sum	δ <sup>13</sup> C (CH <sub>4</sub> )	δ <sup>13</sup> C (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	δ <sup>13</sup> C (CO <sub>2</sub> )
Скважины												
K1	07.08.2013	0.005	0.1	0.1	1.57	22.6	0.7	71.31	96.3	-34	-25.6	-27.7
R3	23.10.2013	0.017	–	0.1	–	37.5	0.1	60.7	98.3	-61	–	-49.7
R3	05.06.1992	–	–	–	–	26	0.2	73	99.2	–	–	–
GK1	25.05.1988	0	0.1	0	–	20.9	0.2	78.7	100	–	–	–
Источники												
K2	09.07.2010	0	0.1	0.2	–	11	88.6	0.04	99.9	–	–	–
K2	25.09.2010	0.001	0.3	2.9	–	28.8	68.1	0.03	100	–	–	–
K2	06.08.2013	0.105	0.2	0.1	<0.0086	23.7	75.6	0.04	99.8	–	–	–
K2	06.08.2013	–	–	0.1	–	27.1	72.4	0.05	99.6	-40.3	–	-8.8
K3	06.08.2013	–	–	0	–	62.2	37.7	0.05	100	-23.1	–	-9
CH	29.07.2011	0	0	0	–	2.5	96.7	0.08	99.3	–	–	–
IS	06.08.2013	<0.005	0	0.3	–	2.9	95.2	0	98.4	-36.8	–	-6.9

Примечания. Отбор проб осуществлялся А.В. Кирюхиным, Т.В. Рычковой, В.Ю. Лаврушиным. Химический анализ выполнен в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН Гусевой В.И. Изотопный анализ (δ<sup>13</sup>C) выполнен Б.Г.Покровским в ГИН РАН. R3 – данные по А.Евтухову и др. (1995).

**Таблица 3.** Концентрация растворенного газа (мл/л) в скважинах Авачинско-Корякского бассейна (53, E1, G1) и Пиначевском источнике (P1)

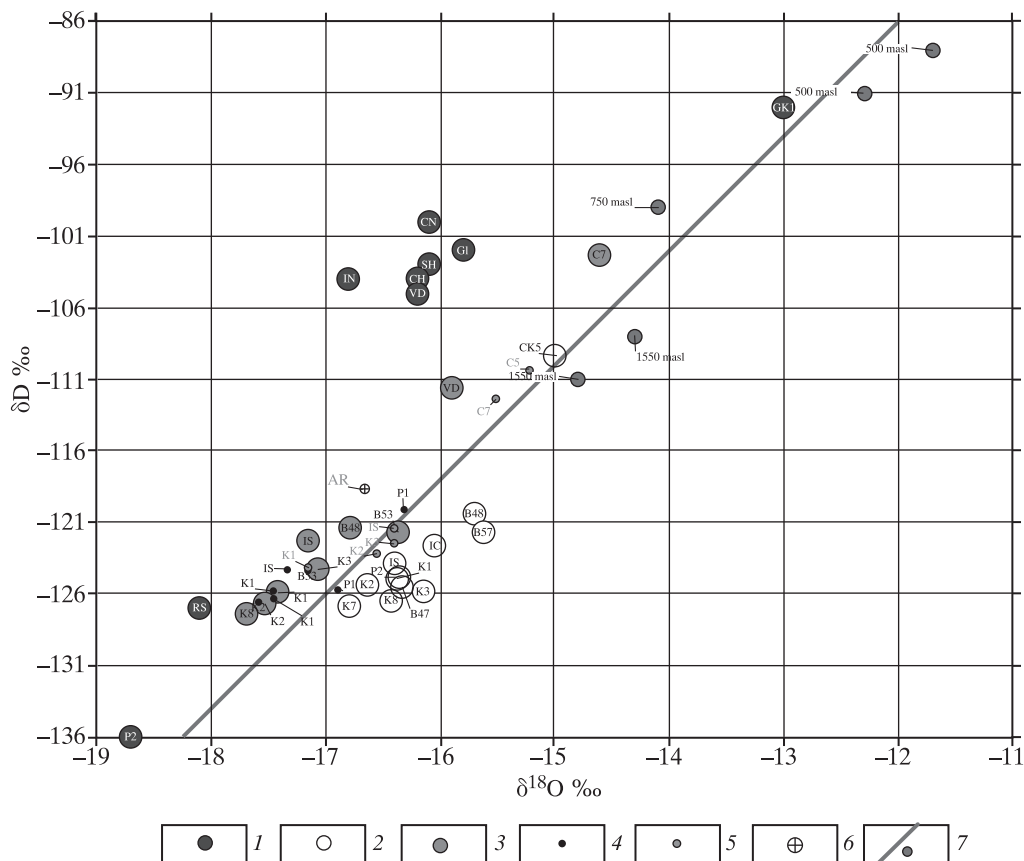
Номер источника/скважины	Дата	H <sub>2</sub>	He	Ar	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Скважины								
53	03.07.2013	0.002	–	0.4	0.7	22.2	0.2	0.0002
E1	1984	0.2	–	0.6	10	60	0.3	29
G1	2010–2014	–	0.0014	0.13	1.3	15.6	0.42	28.5
Источник								
P1	2010–2014	–	0.00095	0.4	3	19.2	7.6	0.5

Примечания. G1 – данные представлены Г.В. Рябиным по результатам опробования в 2011 г., E1 – данные представлены Г.Н. Копыловой по результатам опробования в 2011 г. Остальные пробы отобраны А.В.Кирюхиным, анализы проанализированы в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН Гусевой В.И.

ставе (78–97.5%) и показаниями высоких температур по Na-K-геотермометру (более 290–320°C) (см. табл. 1).

Изотопный состав углерода δ<sup>13</sup>C в CO<sub>2</sub> в пробах свободного газа источников на северном склоне Корякского вулкана (K2, K3 и IS) (см. табл. 2) находится в диапазоне -9.0 ÷ -6.9‰, т.е. в диапазоне Корякских и Авачинских фумарол (см. ниже), что указывает на магматическое происхождение CO<sub>2</sub> в упомянутых выше источниках (см. также [14]). По изотопному составу углерода δ<sup>13</sup>C в CH<sub>4</sub> в пробах свободного газа

метановые скважины Кеткинского геотермального месторождения (скв. K1, δ<sup>13</sup>C = -34‰) и Радыгинской площади (скв. R3, δ<sup>13</sup>C = -61‰) значительно различаются. Газ из скв. K1 формируется в более высоких температурных условиях, чем газ из скв. R3, где значительная доля метана – это “болотный метан” микробиологического происхождения. Интересно, что газ из скважин газоконденсатных месторождений на западе Камчатки также находится в этом диапазоне (Нижне-Квакчикское -36.9 ÷ -38‰, Кшукское - 43.1 ‰).



**Рис. 3.** Изотопный состав воды ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ). Условные обозначения: год опробования: 1 – 2009, 2 – 2010, 3 – 2011, 4 – 2012, 5 – 2013, 6 – 2014; 7 – образцы метеорной воды (с высотой над уровнем моря) и метеорная линия. Пробы отобраны А.В. Кирюхиным. Пробы 2009 г. проанализированы В.А. Поляковым (2009), пробы 2010 г. – Е.О. Дубининой. Пробы 2011, 2012, 2013 и 2014 гг. проанализированы П.О. Ворониным и А.Ю. Поляковым на изотопном анализаторе LGR IWA 45EP. Термальные минеральные источники: K1, K2, K3, K7, K8 – Корякские Нарзаны, IS – Изотовский, VD – Водопадный, CN, CH – Чистинские Нарзаны, Va – Вакинский, N3 – Налычевские (Лужа-3), G1 – Грифон Иванова, NK – Налычевский котел, ZR – Желтореченский, P1, P2 – Пиначевские. Холодные источники: C5 и C7. Реки: AR – р. Авача (Елизово), RS – р. Правая Шумная. Скважины: GK1 – Пиначевская, B47, B57, B48, B53 – Быстринское месторождение пресных подземных вод. См. рис. 1 с позициями точек отбора. Названия источников даются по М.А. Петрову. *Петров М.А., Котельникова Т.К., Петрова Н.Ш. Отчет о результатах специализированных работ по изучению бальнеологических ресурсов и режима минеральных вод бассейна р. Налычева. 1995. № 5819 (Территориальный фонд информации, П-Камчатский).*

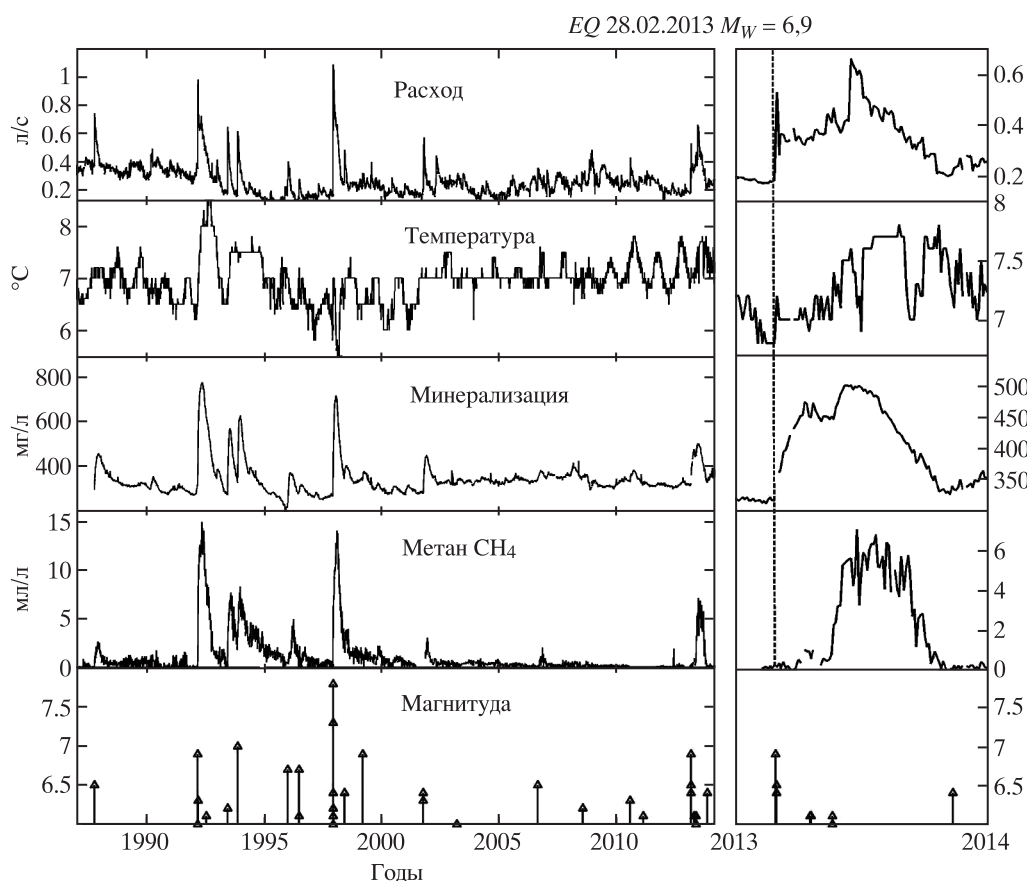
Возможно, что обогащение вулканогенного бассейна метаном происходит в результате термического и геомеханического воздействия в зонах внедрения магмы, питающей Корякский и Авачинский вулканы (резервуары К и А, см. рис. 2) на вмещающие вулканогенно-осадочные породы, содержащие органическое вещество разнообразного происхождения. Тем не менее низкие значения  $\delta^{13}C(CO_2)$  ( $-49.7 \div -16.8\text{‰}$ ) в метановых скважинах показывают, что значительная доля  $CO_2$  здесь немагматического происхождения (см. табл. 2) и парагенетически связана с метаном.

Химический и изотопный состав вулканических газов из fumarol Авачинского и Корякского вулканов (AF, KF, рис. 1) описан Ю.А. Тараном [17]:

эти газы характеризуются диапазоном изотопного состава, отражающим смесь воды магматического и метеорного происхождения, магматического  $CO_2$  ( $-58\text{‰} < \delta D < -30\text{‰}$ ;  $-0.1\text{‰} < \delta^{18}O < +7\text{‰}$ ;  $-11.8 < \delta^{13}C < -5.2$ ), высокая концентрация метана (до 0.3–0.6 ммоль/моль) указывает на его приток из водно-метановых бассейнов в фундаменте вулканов.

#### ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕРМОМИНЕРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН К СЕЙСМИЧЕСКИМ СОБЫТИЯМ

Непрерывные наблюдения на Пиначевских источниках начались в 1977 г. Измерения проводились каждые три дня и включали регистрацию



**Рис. 4.** Постсейсмические изменения параметров источника Пиначевский-1 (расход воды, л/с; температура, °С; общая минерализация, мг/л; концентрация метана, мл/л) в связи с сейсмическими событиями. В правой части диаграммы показан увеличенный фрагмент постсейсмических вариаций, ассоциирующихся с землетрясением 28.02.2013 г. Землетрясения приводятся по данным USGS <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>,  $M \geq 6.0$ , глубиной  $H \leq 50$  км и на расстоянии до 400 км от Пиначевского источника.

атмосферного давления и температуры, расхода и температуры источников, отбор проб для газохимического анализа. Установлено, что сильные землетрясения на юго-востоке Камчатки индуцировали следующие изменения в параметрах Пиначевских источников: увеличение расхода и температуры, минерализации и концентрации метана [1, 2, 6, 7, 11–13]. На рис. 4 показаны записи постсейсмических изменений вышеупомянутых параметров.

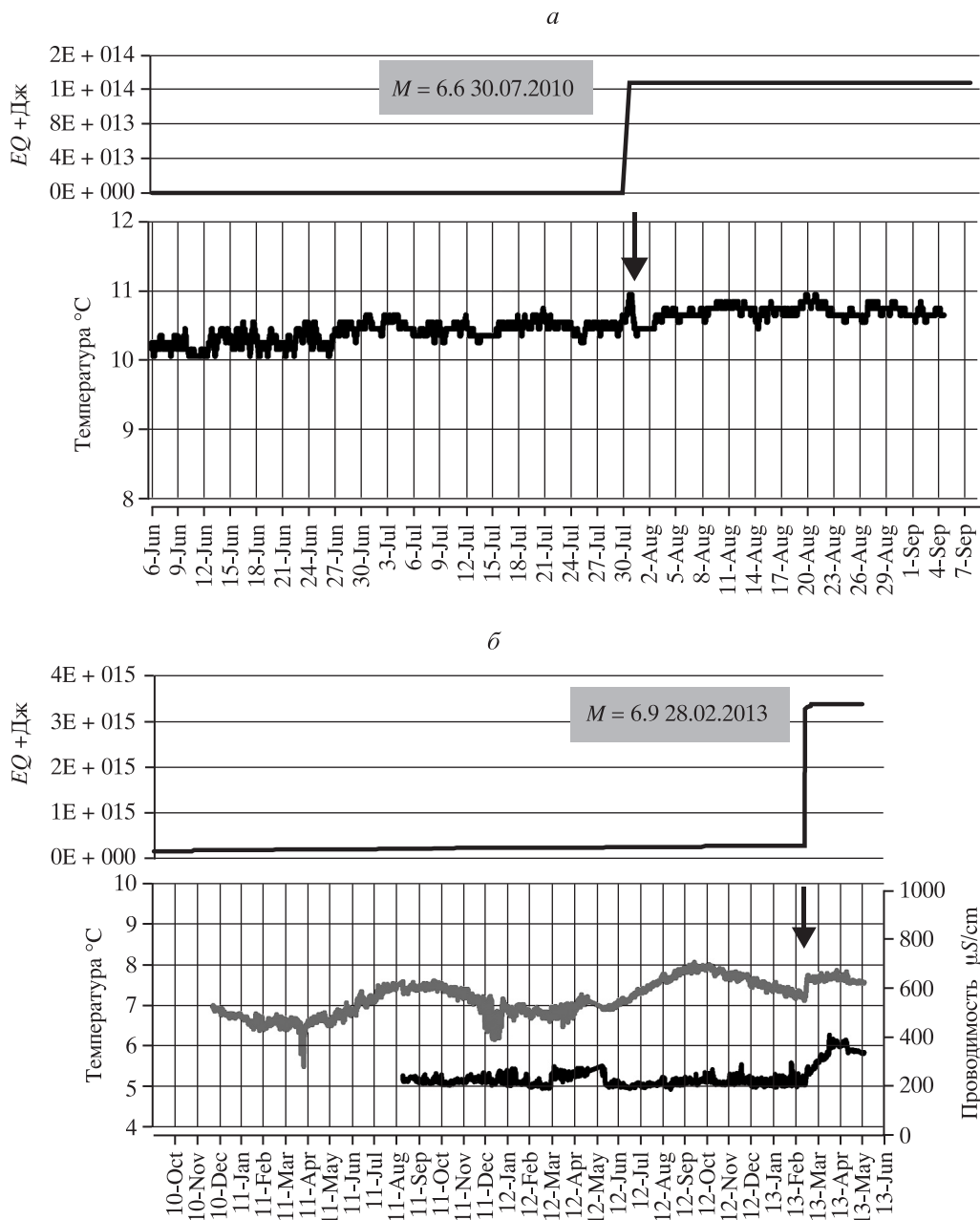
В дополнение к этому с 2009 г. температура источника Пиначевский-2 (*P* на рис. 1) фиксировалась в автоматическом режиме с использованием логгеров температуры и давления НОВО U20-001-04 (частота записи 20 мин.). В результате анализа непрерывных наблюдений в 2009–2010 гг. на источнике Пиначевский-2 выявлена краткосрочная (+0.5°C в течение 8 ч) ко-сейсмическая реакция на землетрясение в Авачинском заливе 30.07.2010 г. с магнитудой 6.6 (рис. 5а).

По источнику Пиначевский-1 в 2010–2013 гг. в автоматическом режиме (частота записи 30 мин)

осуществлялась запись изменений температуры и проводимости (логгер НОВО U24-001). В результате выявлена продолжительная постсейсмическая реакция на кластер землетрясений с магнитудой 6.4–6.9, происходивших 28.02–01.03.2013 г. на юге Камчатки (рис. 5б): увеличение температуры на 0.6°C и проводимости – от 224 до 381  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

На Изотовском источнике (IS на рис. 1), характеризующемся температурой 50°C и расположенном в 7 км от вулкана Корякский, в 2010–2013 гг. осуществлялась автоматическая запись температуры при помощи логгера НОВО U12 (частота записи 15 мин). В период 10.2011 – 06.2012 г. после активизации сейсмической активности (девять микроземлетрясений с магнитудами 0.75–2.95 в районе Корякского вулкана 2.08.2011 г.) зафиксировано повышение температуры на 6–12°C по сравнению со среднемесячными максимальными температурами (рис. 5в). На источнике Пиначевский-1 в 2012 г. в среднем температура возросла на 0.5°C по сравнению с 2011 г., что также может быть связано





**Рис. 5.** Реакция источника: *а* – Пиначевский-2 на землетрясение  $M = 6.6$ , 30.07.2010 г. в Авачинском заливе; *б* – Пиначевский-1 на кластер землетрясений  $M = 6.4–6.9$ , 28.02–1.03.2013 г. на юго-востоке Камчатки; *в* – Изотовский на сейсмичность Корякского вулкана 2.08.2011 г. EQ+ – накопленная сейсмическая энергия (Дж) региональных землетрясений по данным КФ ГС РАН. Жирная черная линия – средняя сезонная максимальная месячная температура, жирная серая линия – максимальная месячная температура, тонкая линия – зарегистрированные данные.

с указанной выше сейсмической активизацией вулкана Корякский. Плоскость, аппроксимирующая координаты кластера микроземлетрясений 2.08.2011 г., расположена в 1.5 км к ЮЗ от Изотовских источников на отметке  $-3 \div -2$  км абс., имеет угол падения  $45^\circ$  и азимут падения  $118^\circ$  (восток-юг-восток), в плане кластер ограничен площадью  $\sim 1 \times 1.5$  км. На разрезе (см. рис. 2) показан след плоскости кластера землетрясений 2.08.2011 г.

На изливающейся скважине 53 (Быстринское месторождение пресных подземных вод, глубина скважины 290 м ( $-128$  м абс.) в 2010–2013 гг. осуществлялась автоматическая запись температуры с использованием логгера НОВО U12 (частота записи 15 мин). Результаты указывают на отсутствие изменений температуры в скважине, диапазон изменений ограничен интервалом  $4.3–4.4^\circ\text{C}$  в течение всего периода записи.

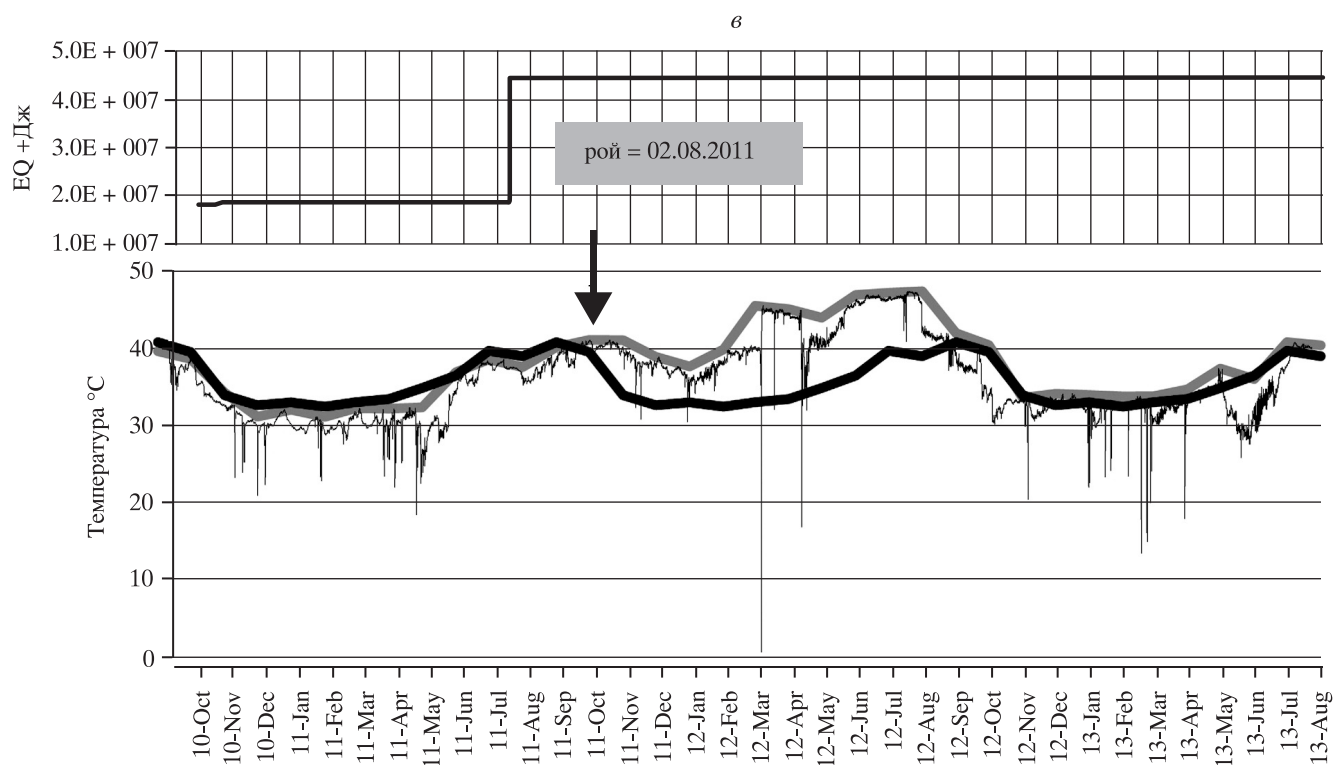


Рис. 5. Окончание

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАЧИНСКО-КОРЯКСКОГО БАССЕЙНА

### Сборка гидродинамической модели

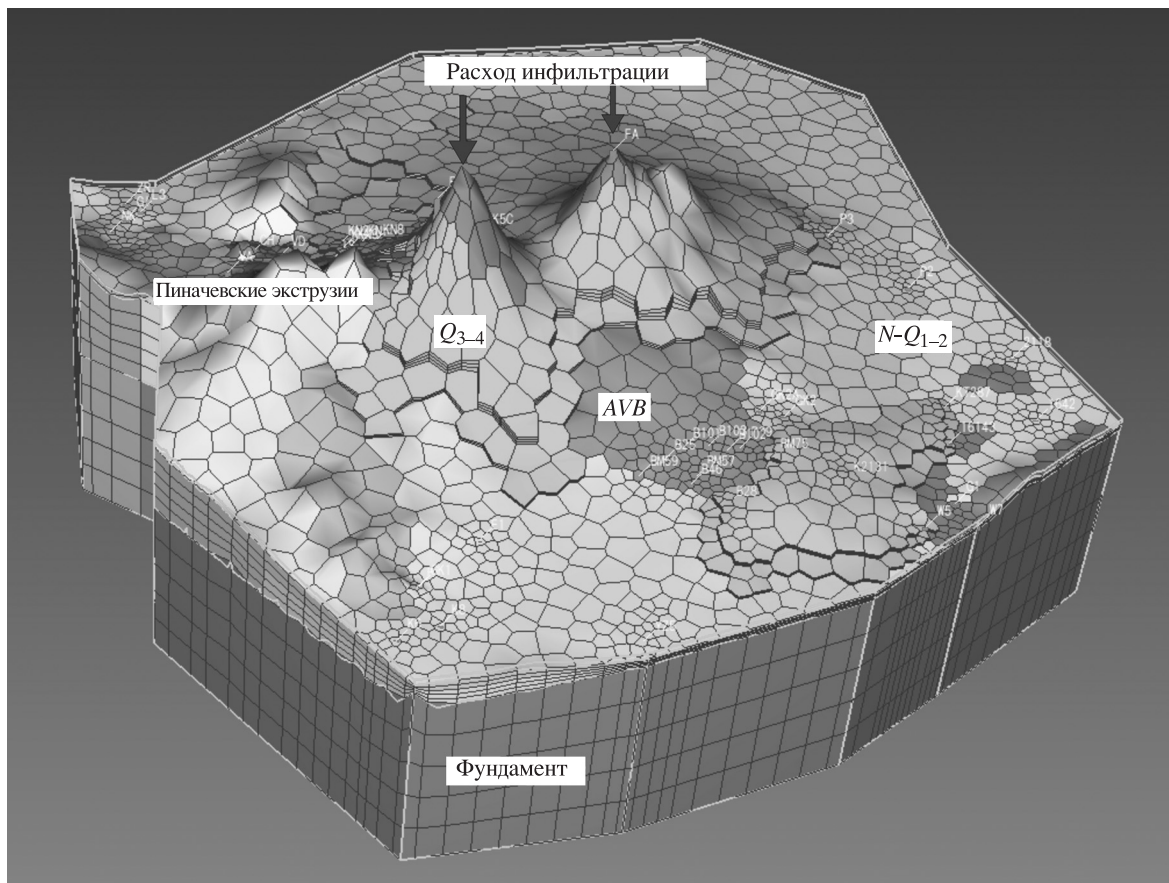
Модель включает в себя три основных слоя, соответствующих водоносным комплексам Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна: постройкам вулканов ( $Q_{3-4}$ ); вложенного артезианско-вулканогенного бассейна (АВБ) и бассейна неоген-нижнечетвертичных отложений ( $N-Q_{1-2}$ ); мелового фундамента ( $K_2$ ) (рис. 6). При зонировании модельных слоев выделяются домены магматической питающей системы вулканов, определенные по сейсмическим данным (резервуары К и А) вложенного артезианско-вулканогенного бассейна, Пиначевского экструзивного массива (включая лаво-туфовую и жерловую формации) и вмещающих массивов горных пород. Полигональная вычислительная сетка модели включает 18730 элементов. На границах модели, проходящих по береговой линии Тихого океана, Авачинской бухты и рек Авача и Налычева, заданы условия разгрузки подземных вод – постоянное давление (1 бар). На поверхности слоя вулканов задано условие постоянного насыщения воздушной фазы (0.8). Инфильтрационное питание задается во внутренних элементах построек вулканов выше 2000 м абс.

### Параметризация и калибровка гидродинамической модели

Калибровка модели осуществлялась методом инверсионного моделирования iTOUGH2-EOS9 (модуль состояния EOS9 позволяет воспроизводить условия неполного водонасыщения, характерные для конусов вулканических построек) [15] по воспроизведению гидродинамического состояния на время 5000 лет в Авачинско-Корякском вулканогенном бассейне. Для калибровки модели использованы данные по уровням грунтовых вод в 13 глубоких скважинах<sup>2</sup> [5], которые пересчитаны по гидростатическим формулам на значения давлений в центрах элементов модели, соответствующих забоям скважин с учетом минерализации воды (рис. 7).

На первом этапе меловой фундамент и неоген-нижнечетвертичный комплекс (характеризующиеся низкой проницаемостью) были выключены из модели. В результате инверсионного моделирования выполнена оценка расхода инфильтрации

<sup>2</sup> Сержеников А.И., Лазарев В.А. Отчет о результатах гидрогеологического доизучения с инженерно-геологическими и геоэкологическими исследованиями картографированием М 1:200 000, проведенного на территории листа № 57-27 в 1991–1996 гг. 2000. ФГУ ТФИ. № 6045 (Территориальный фонд информации, П.-Камчатский).



**Рис. 6.** Зонирование и параметризация 3-мерной гидродинамической модели Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна. Домены модели указаны соответствующими индексами.

онного питания (через Корякский и Авачинский вулканы) и проницаемости АВБ.

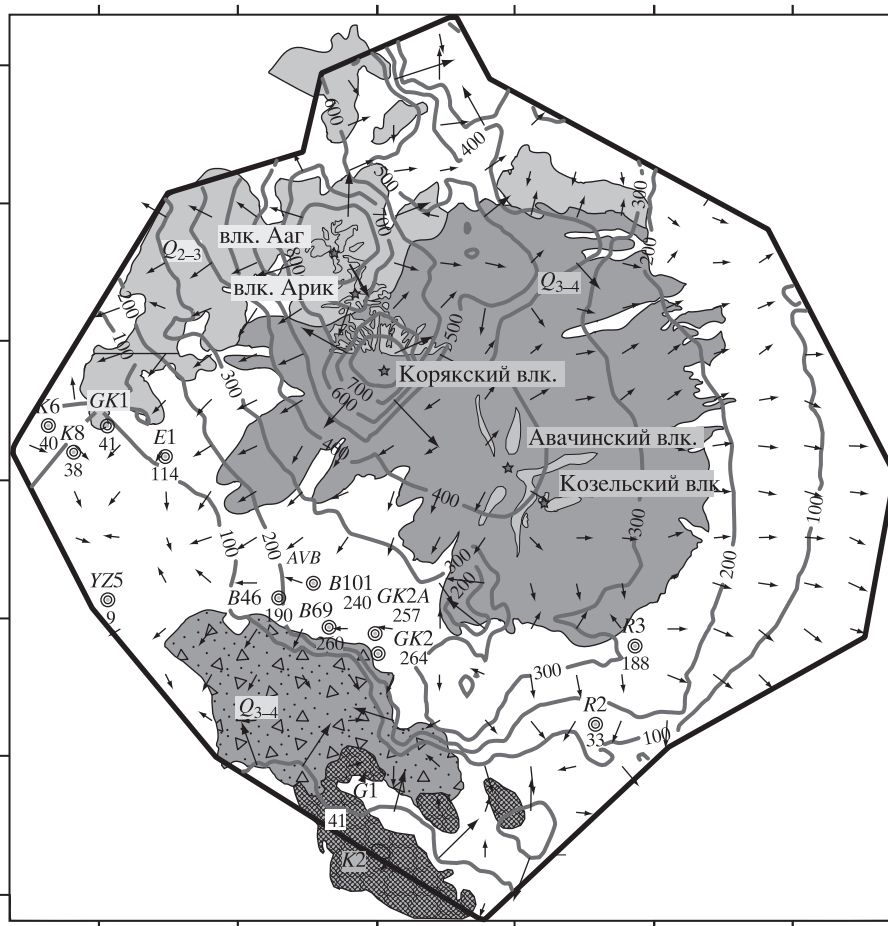
На втором этапе в модель были включены меловой фундамент и неоген-нижнечетвертичный комплекс (с проницаемостью  $10^{-3}$  мД), и выполнено инверсионное моделирование на 5000 лет (эффективное инфильтрационное время из вулканических структур, с учетом истории их существования). Расход инфильтрационного питания рассматривался как оцениваемый параметр. В связи с трудностью воспроизведения на модели поровых давлений в скважинах неоген-нижнечетвертичного комплекса (К6, К8, Е1, R2, R3), характеризующихся низкими давлениями, в модель пришлось добавить дополнительный оцениваемый параметр – сжимаемость. Аномально низкие значения давления в скважине R2 привели к более высоким оценкам сжимаемости неоген-нижнечетвертичного комплекса в области соответствующей скважины ( $6.7 \cdot 10^{-6}$  Па<sup>-1</sup>). Кроме того, для обеспечения соответствия данным по поровому давлению в районе Кеткинского геотермального месторождения (скважины К6 и К8) возникла не-

обходимость введения на модели дополнительного источника, отображающего там приток глубинного теплоносителя.

Наилучший вариант инверсионного моделирования обеспечивает соответствие в 13 калибровочных глубоких скважинах со стандартным отклонением 1.4 бар и смещением 0.2 бар. Суммарный расход инфильтрационного питания (Корякский и Авачинский вулканы) оценивается в 5880 кг/с, проницаемость АВБ – 2.0–3.0 Д. На рис. 7 показано модельное распределение статического уровня подземных вод и направлений подземных потоков.

### Обсуждение результатов гидродинамического моделирования

Концептуальная гидрогеологическая модель, положенная в основу варианта моделирования в целом подтверждается исходя из общего водного баланса и гидрохимических данных. Расчетная масса воды в пределах модельной области Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна оценивается в  $0.59 \cdot 10^{15}$  кг. Этому соответствует время полного водообмена бассейна в первые



**Рис. 7.** Результаты гидродинамического моделирования (TOUGH2-EOS9): изолинии уровня подземных вод (м абс.) и направления потоков (стрелки) в Авачинско-Корякском вулканогенном бассейне. Скважины, используемые для калибровки модели, показаны кружками, сверху – номер скважины, снизу – уровень подземных вод. Разметка осей – 10 км.

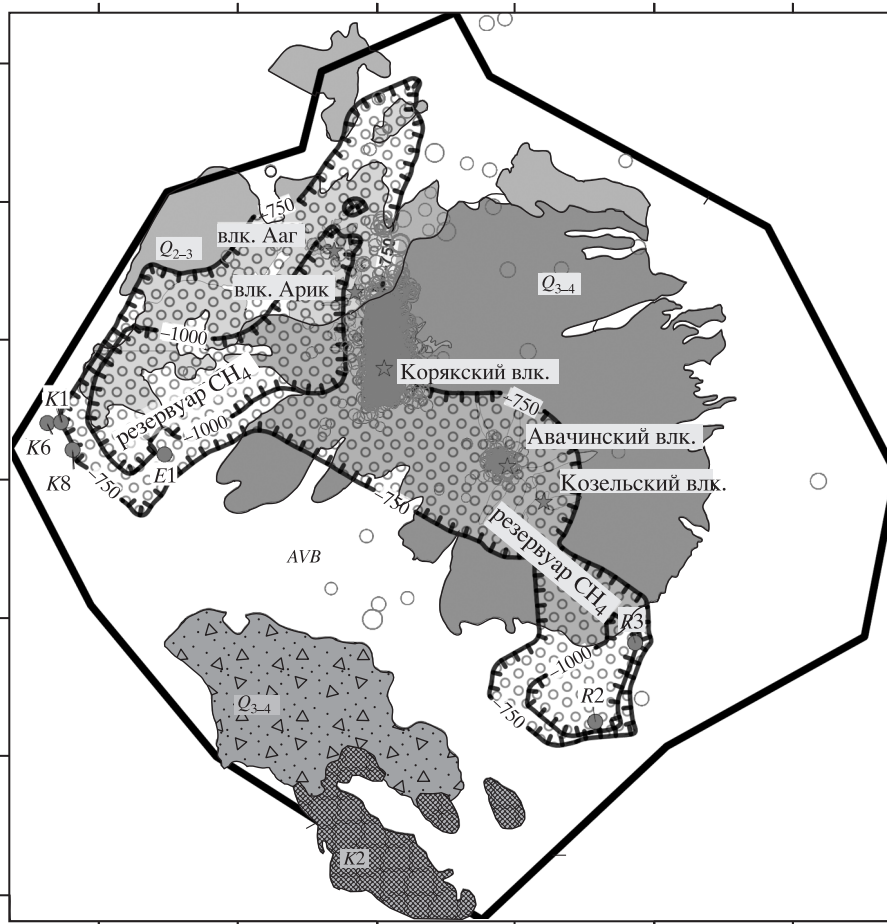
тысячи лет. Широкое распространение в фундаменте хлоридных натриевых вод с минерализацией 10–20 г/л свидетельствует об отсутствии существенной промывки фундамента инфильтрационными водами, проникающими из вулканических построек. Суммарная площадь с абс. отметками выше +1800 м составляет 49.7 км<sup>2</sup>, включая суммарную площадь ледников вулканов Корякский, Авачинский и Козельский 27.2 км<sup>2</sup> (см. рис. 1), что обеспечивает в целом расход инфильтрации около 6 м<sup>3</sup>/с с указанных отметок при условии, что величина аккумулируемых вулканами атмосферных осадков составляет 3800 мм/год.

#### ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МАГМАТИЧЕСКИХ ОЧАГОВ ВУЛКАНОВ И ВОДНО-МЕТАНОВЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ

Существуют геолого-геофизические предпосылки для приблизительной оценки геометрии магматического очага под Авачинским вулканом

в форме эллипсоида [9, 10]: положение верхней кромки магматического очага оценивается в пределах интервала от нулевой отметки уровня моря и не ниже 2 км от этого уровня, размер горизонтальной и вертикальной полуосей эллипсоида по изотерме 900°C не меньше 2.3 и 1.53 км, по изотерме 700°C – 4.5 км и 3 км соответственно. При длительной эксплуатации подземной циркуляционной системы в течение 100 лет блок нагретых пород объемом порядка 50 км<sup>3</sup> может обеспечить получение около 250 МВт электроэнергии [9, 10]. В настоящее время указанные выше оценки уточняются с учетом реальной геометрии и условий теплообмена питающих магматических систем вулканов с вмещающими породами.

Энергетический потенциал магматических очагов Авачинского и Корякского вулканов может быть дополнен прилегающими водно-метановыми резервуарами, которые обнаружены в фундаменте вулканических построек (рис. 8). Водно-



**Рис. 8.** Геотермальный потенциал и водно-метановые резервуары Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна. Потенциальные геотермальные резервуары: магматические интрузивные зоны под Корякским и Авачинским вулканами показаны более темной краской, соответствующей области эпицентров микроземлетрясений (2009, КФ ГС РАН). Потенциальные газовые (метановые) резервуары (область вскрытия метана в свободном или растворенном виде скважинами R3, K1, K6, K8, E1 в пределах депрессии мелового фундамента) – площадь, закрашенная серыми кружками и ограниченная изолинией – 750 м абс. Разметка осей – 10 км.

метановые резервуары вскрыты скважинами в неоген-нижнетертичных и меловых породах к юго-востоку от Авачинского вулкана (скважины R3 и R2) и к юго-западу от Корякского вулкана в зоне, прилегающей к Пиначевским экструзиям (GK1, E1, K1, K6, K8). Эти резервуары могли быть сформированы в результате гидромеханических и термических воздействий при внедрении магмы, питающей вулканы (резервуары К и А, см. рис. 2), на вмещающие вулканогенно-осадочные породы фундамента, содержащие органическое вещество различного происхождения.

Площадь потенциального накопления метана оценивается как  $\sim 650 \text{ км}^2$  (см. рис. 8), что соответствует запасам  $\sim 390 \text{ млрд м}^3$  метана (если используются оценки продуктивности, аналогичные газовым месторождениям западной Камчатки). По крайней мере 15% указанной выше площади доступны для бурения, следовательно, значительные ресурсы газа являются извлекаемыми.

## ВЫВОДЫ

1. По данным изучения изотопного состава ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) воды термоминеральных источников и скважин, водное питание Корякских Нарзанов, Изотовского и Пиначевского источников и скважин Быстринского месторождения пресных подземных вод осуществляется за счет таяния ледников Корякского и Авачинского вулканов (выше +1800 м абс.), областью водного питания группы Чистинских нарзанов является центральная часть Пиначевского экструзивного массива с вулканами Арик и Ааг (выше +800 м абс.). Изотопный состав углерода  $\delta^{13}C$  в  $CO_2$  в пробах свободного газа Корякских Нарзанов и Изотовского источников показывает его магматическое происхождение. Таким образом, углекислые источники  $CO_2$  на северном склоне Корякского вулкана являются результатом смешения потоков магматического газа ( $CO_2$ ) и ледниковой воды.

2. Термоминеральные источники, примыкающие к Корякскому вулкану и Пиначевским экзотризмам, чувствительны к сейсмическим событиям: ко- и постсейсмическое увеличение расходов, температуры, минерализации воды и концентрации метана в связи с сильными землетрясениями на юго-востоке Камчатки, повышение температуры после сейсмической активизации Корякского вулкана. Это указывает на гидравлическую связь между зоной внедрения магмы, питающей Корякский и Авачинский вулканы, с прилегающими гидротермальными системами и водно-метановыми резервуарами.

3. Разработана 3D-гидродинамическая модель TOUGH2-EOS9 Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна, калибровка модели осуществлена по данным уровней воды в 13 глубоких гидрогеологических скважинах. Инверсионное моделирование использовано для оценки расхода инфильтрации в области питания бассейна через постройки действующих вулканов (~6 м<sup>3</sup>/с), распределения уровня подземных вод под вулканами (до +900 м абс.) и сжимаемости неоген-нижнечетвертичного слоя ( $9.4 \cdot 10^{-7} \div 6.7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$ ). Более высокие значения сжимаемости могут отражать локальные условия газонасыщения.

4. Зоны внедрения магмы, питающей Корякский и Авачинский вулканы, фиксирующиеся по микросейсмическим данным в диапазоне глубин -6.0 ÷ +2.0 км абс. и -1.5 ÷ +2.5 км абс., соответственно являются потенциальными объектами для разведки геотермальных ресурсов. Водно-метановые резервуары примыкают к магматическим резервуарам вулканов с юго-востока и юго-запада, площадь потенциального накопления метана со значительными газовыми ресурсами оценивается в ~650 км<sup>2</sup>. Формирование газовых залежей под вулканами может происходить в результате геомеханического и термического воздействия магмы на вмещающие вулканогенно-осадочные породы, содержащие органическое вещество различного происхождения.

*Авторы признательны А.А. Данилину, Г.Н. Копыловой, М.А. Петрову за предоставление дополнительной информации по скважинам и источникам, Е.В. Черных за подготовку данных и В.В. Кирюхиной за техническую подготовку рукописи.*

*Исследования осуществлялись при поддержке проекта РФФИ № 12-05-00125-а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриц Г.Н. Роль геодинамических факторов в формировании режима гидротерм на примере Пиначевских источников (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 3. С. 30–37.
2. Гриц Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Некоторые результаты наблюдений за режимом подземных вод на Камчатке в связи с поиском предвестников сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1983. № 4. С. 62–71.
3. Иванов В.В. Активизация вулкана Корякский (Камчатка) в конце 2008 – начале 2009 г.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития извержения // Матер. конф., посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2009 г., Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 24–39.
4. Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф. Гидрогеология вулканогенов. СПб.: Наука, 2010. 395 с.
5. Кирюхин А.В., Черных Е.В., Рычкова Т.В. и др. 3D-термогидродинамическое моделирование Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна // Сб. докл. Третьей научно-техн. конф. “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”, 9–15 октября 2011 г. Обнинск, ГС РАН. С. 312–316.
6. Копылова Г.Н., Воропаев П.В. Отклик режимного источника на землетрясения как индикатор состояния его подземной водоносной системы // Вулканология и сейсмология. 2005. № 2. С. 32–45.
7. Копылова Г.Н., Воропаев П.В. Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 42–48.
8. Поздеев А.И. Углеродородная газогенерация Авачинской депрессии, ее перспективы и связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 44–54.
9. Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
10. Федотов С.А., Сугробов В.М., Уткин И.С., Уткина Л.И. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 32–46.
11. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34–42.
12. Bella F., Biagi P. F., Caputo M. et al. Hydrogeochemical Anomalies in Kamchatka (Russia) // Phys. Chem. Earth. 1998. V. 23. № 9–10. P. 921–925.

13. *Biagi P.F., Molchanov O., Minafara A. et al.* Co-post seismic hydrogeochemical anomalies in a volcanic environment // NHESS. 2003. № 3. P. 263–267.
14. *Evans W.C., Mariner R.H., Bergfeld D. et al.* Carbon isotope composition of CO<sub>2</sub> at Cascade Arc volcanoes// WRI. 2010, Mexico. P. 195–198.
15. *Finsterle S.* iTOUGH2 User's Guide. Rep. LBNL-40040, Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, California. 1999.
16. *Fournier R.O.* Application of water chemistry to geothermal exploration and reservoir engineering // Eds. Rybach, L., Muffler, L.J.P. Geothermal Systems. Principle and Case Histories// J. Wiley and sons. 1981. P. 109–143.
17. *Taran Y. A., Connor C. B., Shapar V. N. et al.* Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes, Kamchatka, from 1993 to 1994 // Bull Volcanol. 1997. V. 58. P. 441–448.

## GEOFLUIDS OF AVACHINSK-KORYAKSKY VOLCANOGENIC BASIN IN KAMCHATKA

**A. V. Kiryukhin\***, **Yu. F. Manukhin\***, **S. A. Fedotov\***, **V. Yu. Lavrushin\*\***,  
**T. V. Rychkova\***, **G. V. Ryabinin\*\*\***, **A. Yu. Polyakov\***, **P. O. Voronin\***

*\* Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,  
bulv. Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia.*

*E-mail: AVKiryukhin2@mail.ru*

*\*\* Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 7, Moscow, 119017 Russia*

*\*\*\* Kamchatka Branch, Geophysics Survey, Russian Academy of Sciences, bulv. Piipa 9,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

Avachinsk-Koryaksky volcanogenic basin with an area of 2530 km<sup>2</sup> is located in the vicinity of Petropavlovsk-Kamchatsky city and includes 5 Quaternary volcanoes (2 of which, i.e., Avachinsky (2750 m.a.s.l.) and Koryaksky 3456 (m.a.s.l.) are active), as well as sub-basins of volcanogenic and sedimentary Neogen-Quaternary deposits, located in a depression formed at the top of Cretaceous basement rocks. Intrusion zones of magma fluids are clearly detected by local earthquake distributions below Koryaksky and Avachinsky volcanoes at depths of –5.5 – +2.0 and –1.5 – +2.0 km, correspondingly. Water isotope (δD, δ<sup>18</sup>O) data show that these volcanoes are also recharge areas of thermal mineral springs (Koryaksky Narzan, Isotovskiy and Pinachevskiy) as well as of the Bystrinsky freshwater aquifer. δ<sup>13</sup>C in CO<sub>2</sub> springs at the northeast foothills of Koryaksky volcano results from mixing magmatic gases and glacial meltwater. High sensitivity of thermal springs to regional and local seismic events points to the hydraulic connection between the magma intrusion zone beneath the Koryaksky volcano, adjacent hydrothermal systems and methane reservoirs. Hydrodynamic TOUGH2-EOS9 model of Avachinsky-Koryaksky volcanogenic basin was developed and calibrated by water level data in 13 deep wells. According to the inverse modeling, the total rate of meteoric recharge is estimated at 6 m<sup>3</sup>/s, and the maximum groundwater head below volcanoes, at +900 m.a.s.l. The shallow methane CH<sub>4</sub> reservoirs penetrated by wells in Neogene-Quaternary layer around Koryaksky and Avachinsky volcanoes may result from heating magma beneath volcanoes. The area of potential methane accumulation is accounted at approximately 650 km<sup>2</sup>.

**Keywords:** *Koryaksky, Avachinsky, volcanogenic, geothermal, methane, springs, seismicity, TOUGH2-modeling.*