

УДК 556.314

О.В.ЧУДАЕВ, В.А.ЧУДАЕВА

Состав и генезис гидротермальных систем областей современного островодужного вулканизма

Установлены основные геохимические группы термальных вод вулканов Менделеева и Баранского, образующие классическую вертикальную зональность. Показано, что щелочные высокотемпературные воды пересыщены по отношению к адуляру, альбиту, диккиту, вайракиту, нейтральные и слабощелочные – по отношению к альбиту, иллиту, каолиниту и группе низкотемпературных и среднетемпературных цеолитов. На примере взаимодействия р. Лесная и ручья Кислый (о-в Кунашир, влк. Менделеева) рассмотрено влияние термальных вод на пресные.

Ключевые слова: гидрогеохимия, современные гидротермальные системы, генезис.

Composition and origin of modern hydrothermal systems of the Kuril Islands arc. O.V.CHUDAEV (Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok), V.A.CHUDAeva (Pacific Institute of Geography, FEB RAS, Vladivostok).

In the result of this work the main geochemical groups of thermal waters of Mendeleev and Baransky volcanoes were established. These groups form classical vertical geochemical zonality. Thermodynamic calculations show that alkaline high temperature waters are supersaturated with adularia, albite, dickite, wairakite, whereas neutral and low alkaline thermal waters are supersaturated with albite, illite, kaolinite, and zeolites: analzime, clinoptilolite, stilbite. Interaction of surface acid waters (Kisly Creek of Mendeleev Volcano) and neutral fresh waters of Lesnaya River is shown.

Key words: hydrogeochemistry, modern hydrothermal systems, origin.

Курильские острова на протяжении кайнозоя являются ареной активной вулканической деятельности, в результате чего образовались четыре вулканических комплекса: зеленотуфовый (ранний–средний миоцен); вулканогенно-кремнисто-диатомитовый; базальтоидный (поздний плиоцен) и андезитовый (Q₄) [11]. С формированием последнего связана интенсивная газогидротермальная деятельность, параметры которой варьируют в широких пределах. Их изучением занимались многие исследователи, особенно активно в 1970–1980-е годы [1, 2, 5–10]. В последнее время работы по изучению разных аспектов формирования гидротерм на Курильских островах значительно активизировались [3, 4, 12–16].

Данные о геохимическом составе термальных вод, полученные авторами в 2001–2007 гг. на вулканах Менделеева (о-в Кунашир) и Баранского (о-в Итуруп), позволяют по-новому взглянуть на процессы формирования островодужных гидротерм (рис. 1).

Отбор проб, анализ вод и газов проводили в соответствии с отечественными и международными стандартами. Замеры нестабильных параметров выполняли на месте с использованием микропроцессора М90 со сменными электродами (рН, Eh, DO – растворимый кислород, SEC – электропроводность и др.). Анализ микроэлементов, включая

ЧУДАЕВ Олег Васильевич – доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток), ЧУДАЕВА Валентина Анатольевна – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток).
E-mail: chudaev@fegi.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 04-05-65245 и Президиума ДВО РАН: проекты 09-1-П16-03, 09-2-СО-08-006.

редкоземельные (РЗЭ), проводили прямым методом на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), изотопов гелия – на масс-спектрометре в Токийском университете. Изотопные отношения кислорода и водорода определяли на масс-спектрометре в ДВГИ ДВО РАН (в центре коллективного пользования). Таким образом, выполнен комплекс работ, принятый в мировой практике, что позволило расширить представления об условиях формирования островодужных гидротермальных систем вулканов Менделеева и Баранского.



Рис. 1. Схема расположения изученных объектов

Среди термальных вод вулканов Менделеева и Баранского по основным ионам выделяются три основные группы (рис. 2). Первая характеризуется резким преобладанием сульфат-иона (SO_4) над хлор-ионом (Cl) и гидрокарбонат-ионом (HCO_3). Это сульфатные воды, которые, как правило, располагаются на fumarольных полях (кратеры вулкана). В составе катионов преобладают натрий и кальций. Температура терм на поверхности достигает $97^\circ C$. Общая минерализация (TDS) составляет от 393 мг/л до первых десятков граммов на литр. Воды кислые и суперкислые с pH 0,6–2,3. Вторая группа – хлоридные натриевые воды, максимальная минерализация которых достигает нескольких десятков граммов на литр. Они вскрываются скважинами в основании вулканической постройки, т.е. находятся гипсометрически ниже, чем сульфатные; их часто называют термальными водами глубинного резервуара. Эти воды щелочные, pH 7,9–8,2. Как видно на рис. 2, преобладают ионы натрия и хлора. Третья группа – воды, которые, как правило, разгружаются на периферии вулканов и располагаются гипсометрически между первой и второй группами. Фактически это дериваты хлоридных натриевых вод, образующиеся за счет разбавления последних пресными подземными холодными. Примером данного типа вод могут служить воды Столбовских и Третьяковских источников, которые локализируются на периферии влк. Менделеева. Воды Рейдовского источника разгружаются на периферии влк. Баранского. Концентрация хлор-иона незначительно превышает таковую сульфат-иона

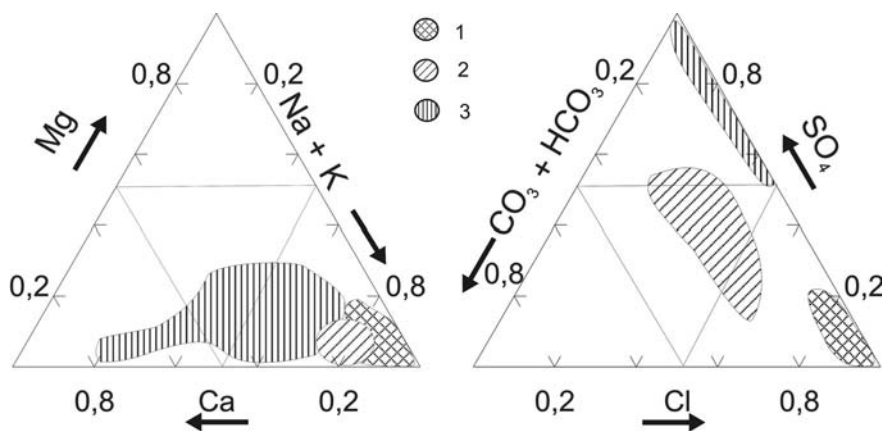


Рис. 2. Соотношение основных ионов на диаграмме Пайпера в термах вулканов Менделеева и Баранского. 1 – хлоридные натриевые воды (воды глубинного резервуара); 2 – хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатные натриевые (периферийные); 3 – сульфатные натрийкальциевые (кратеры и воронки взрыва)

и вдвое меньше, чем у гидрокарбонат-иона. Эти воды близки к нейтральным, их общая минерализация достигает первых единиц граммов на литр.

Таким образом, указанные типы вод образуют классическую вертикальную гидрогеохимическую зональность. Следует отметить, что химический состав разгружающихся термальных вод на вулканах Менделеева и Баранского варьирует в широких пределах в результате смешения разных геохимических групп вод, с одной стороны, и их разбавления пресными инфильтрационными водами (а в отдельных случаях даже морскими) – с другой. Но исходными водами являются сульфатные – кислые, щелочные хлоридные натриевые и их хлоридно-гидрокарбонатные натрий-кальциевые дериваты.

Выделенные по основным ионам геохимические группы вод различаются и концентрациями микроэлементов, а также фракционированием изотопов, что связано в первую очередь с разностью генезиса этих вод. Рассмотрим поведение микроэлементов по группам, выделенным на основе их геохимических свойств.

Сидерофильные элементы (Fe, Co, Ni, Mo). В сульфатных водах отмечаются высокие концентрации Fe, Co, Ni (сотни микрограммов на литр) и низкие Mo (первые микрограммы на литр). Обратная картина наблюдается в хлоридных натриевых водах. Здесь концентрации Mo превышают содержания Fe, Co и Ni, что естественно, так как молибден накапливается преимущественно в щелочной среде. В Столбовских и Третьяковских источниках концентрации сидерофильных элементов крайне низки, часто на пределе чувствительности метода ICP-MS ($< 0,1$ мкг/л).

Халькофильные элементы (Cu, Zn, Pb, As). В сульфатных водах их содержания варьируют в широких пределах. Концентрация цинка достигает 1,6 мг/л, свинца – 551 мкг/л. Все образцы вод этого типа имеют относительно повышенное содержание мышьяка (до 1,5 мг/л). В хлоридных натриевых водах концентрации халькофильных элементов достаточно низки, за исключением меди (до 229 мкг/л). Содержание мышьяка стабильное, редко превышает 300 мкг/л. Наши расчеты, проведенные для выборочных проб с относительно высокими содержаниями мышьяка, показали, что во всех случаях преобладающей формой в изливающих источниках является As (+3). Для кислых вод она составляет более 99%. В смешанном типе вод концентрации халькофильных элементов достаточно низки, за исключением меди, содержание которой достигает 32 мкг/л.

Литофильные элементы (Al, Li, Rb, Sr, Ba). В сульфатных водах содержание растворенного алюминия достаточно высокое (больше 30 мг/л), концентрация лития около 10 мкг/л, за исключением одного источника, где она достигает 927 мкг/л; в этом же источнике достаточно высоки содержания Rb и Ba. В хлоридных натриевых термах концентрация алюминия варьирует в пределах 100 мкг/л. Высокое содержание Al обнаружено в скважине 101 влк. Менделеева (9,1 мг/л), в водах которой также повышенные содержания Rb (508 мкг/л), Li (1,34) и Sr (2,36 мг/л). В Столбовских источниках содержания Li и Al варьируют незначительно (264–398 и 153–62 мкг/л соответственно). Концентрация Rb – 117 мкг/л, Sr – 1, Ba – 9,2 мг/л.

Редкоземельные элементы. Самые низкие содержания РЗЭ, близкие к таковым в атмосферных осадках и морской воде, характерны для щелочных, самые высокие – для кислых терм, причем чем выше общая минерализация, тем больше содержания РЗЭ и более сглажен их профиль (рис. 3). Следовательно, основным контролирующим фактором в колебаниях концентрации РЗЭ является рН. Кислые воды наиболее активно выщелачивают химические элементы из окружающих пород. В щелочных водах РЗЭ крайне слабо вымываются из окружающих пород, и их уровень остается низким.

Рассмотренные концентрации макро- и микроэлементов в термальных водах вулканов Менделеева и Баранского укладываются в пределы колебания состава терм большинства островодужных вулканов Тихоокеанского пояса [1, 2].

Стабильные изотопы (O, H, S, He). Как уже отмечалось, стабильные изотопы часто используют для выяснения генезиса водной и газовых фаз гидротерм. Наши данные по

стабильным изотопам кислорода и водорода в термах вулканов Менделеева и Баранского свидетельствуют о первоначально метеорном происхождении изученных вод: большинство точек (60 проб) располагаются вдоль линии метеорных вод Крейга (рис. 4). Утяжеление (отклонение от линии метеорных вод) кислорода характерно для высокотемпературных кислых терм. Это связано с активным взаимодействием вода–порода, когда тяжелый изотоп кислорода поступает из породы в воду. Для вод глубинного резервуара вулканов островных дуг утяжеление кислорода может быть связано с внедрением холодных морских вод, что выявлено нами только в термах Горячего пляжа (влк. Менделеева) и доказывается прямой корреляцией между содержанием хлор-иона и $\delta^{18}\text{O}$ [15]. Как видно на рис. 4, именно для этих терм наблюдается отклонение от линии метеорных вод.

Соотношение изотопов серы свидетельствует, что в пределах кратеров и воронок взрыва вулканов Менделеева и Баранского она имеет магматическое происхождение, тогда как на периферии вулканов (в смешанном типе вод) заимствована из морских карбонатов [16].

Впервые получены данные о соотношении изотопов гелия. Так, для влк. Баранского (Старозаводское поле) $^3\text{He}/^4\text{He}$ близко $7,74 \cdot 10^{-6}$, для влк. Менделеева эта величина равна $10 \cdot 10^{-6}$, что свидетельствует о значительной доли мантийного гелия в растворенных газах.

Следовательно, формирование химического облика термальных вод вулканических областей происходит в основном в результате взаимодействия вода–порода–газ. Если водная компонента имеет метеорное происхождение, то газовая фаза кратеров вулканов (сероводород, частично углекислый газ, гелий и др.) образуется за счет дегазации магматического очага [15].

Взаимодействие вода–порода. В результате взаимодействия термальных вод с окружающими породами в основном происходит формирование солевого химического состава вод, образуются вторичные минералы, контролирующие его. Выполненные нами термодинамические расчеты индексов насыщения вторичных минералов для вод глубинного резервуара вулканов Баранского и Менделеева показали, что щелочные хлоридные натриевые воды пересыщены по отношению к адуляру, альбиту, диккиту, вайракиту

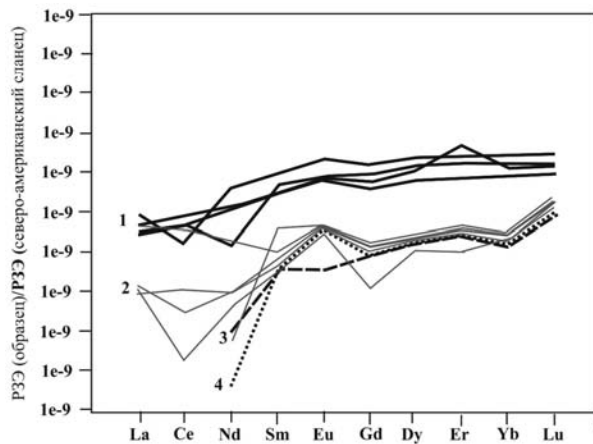


Рис. 3. Редкоземельные элементы (РЗЭ), нормализованные к северо-американскому сланцу в термах вулканов Менделеева и Баранского. 1 – кислые сульфатные воды, 2 – щелочные, 3 – морская вода, 4 – атмосферные осадки в районе о-ва Кунашир

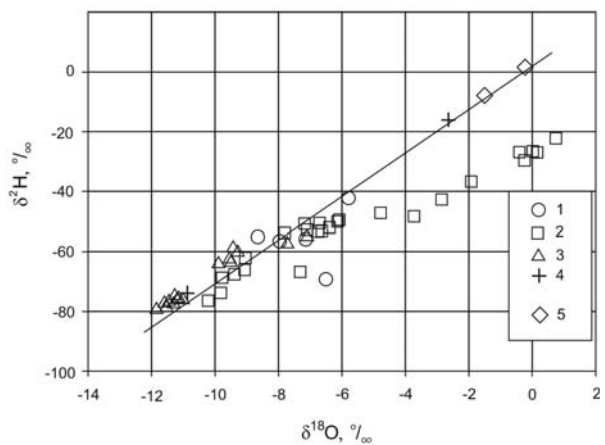


Рис. 4. Соотношение изотопов кислорода и водорода в термах вулканов Менделеева и Баранского. 1 – воды глубинного резервуара (хлоридные натриевые); 2 – кислые воды fumarольных полей; 3 – пресные подземные воды; 4 – атмосферные осадки; 5 – морские воды Охотского моря

и другим минералам, близнеитральные термы – по отношению к альбиту, иллиту, каолиниту и группе цеолитов (анальциму, клиноптилолиту, стилбиту и др.). Фактически в результате взаимодействия в системе вода–порода для вод глубинного резервуара формируется равновесная адулярь–альбит–цеолитовая ассоциация минералов.

При геохимических исследованиях термальных вод для оценки их температуры используют различные геотермометры; для высокотемпературных гидротермальных систем наиболее приемлемым является кварцевый. Рассчитанные нами равновесные температуры показывают, что для вод глубинного резервуара (хлоридные натриевые) влк. Баранского (Старозаводское поле) они близки к 300°C, а для района Кипящей речки – 350°C. Таким образом, более перспективным для использования геотермального тепла является именно этот участок, а не Старозаводской, который в настоящее время готовят к эксплуатации. Для влк. Менделеева максимальная температура вод глубинного резервуара близка к 270°C. Парогазовая смесь этого резервуара используется для получения электроэнергии небольшой геотермальной станцией.

**Влияние гидротерм на состав р. Лесная
(о-в Кунашир, влк. Менделеева)**

Физико-химические параметры вод	Проба		
	59к	58к	91к
T, °C	21,2	28,9	22
pH	8,01	2,45	4,8
Eh	204	529	217
TDS, мг/л	102	744	212
Mg	4,81	6,642	4,19
Na	10,76	79,62	16,51
K	1,23	7,29	2,59
HCO ₃	35,6	0	1,95
SO ₄	29,4	56,3	13,9
Cl	11,5	188,3	63,1
Ca	4,62	6,39	4,19
Si, мкг/л	14270	22150	13310
Al	34,69	6232	483,4
Br	50,63	257	91,96
Li	3,07	59,65	17,8
Mo	0,09	0,1	0,11
Fe	16,73	8155	14,08
Mn	14,37	1293	298,2
As	5,83	111,4	0,39
Cr	0,28	1,28	0,31
Co	0,047	1,51	0,45
Ni	0,12	1,06	0,31
B	2171	40840	8176
Ba	1,52	19,22	6,14
V	2,96	17,78	0,2
Cu	0,84	5,01	2,35
Zn	0,41	279,6	68,27
Pb	0,01	30,19	1,68
Y	0,05	6,33	1,32
Cd	0,01	2	0,45
La	0,032	0,28	0,09
Lu	0,084	0,21	0,11

Примечание. 59к – р. Лесная до впадения ручья Кислый, 58к – ручей Кислый, 91к – р. Лесная после впадения ручья Кислый.

Следует отметить, что термальные воды изученных вулканов оказывают существенное влияние на окружающие ландшафты, биоту, поверхностные водотоки и другие компоненты окружающей среды, что подробно рассмотрено в работе [4]. Нами проанализирован состав р. Лесная, одной из крупных рек о-ва Кунашир, до и после впадения в нее ручья Кислый, вдоль которой идет разгрузка термальных вод влк. Менделеева (см. таблицу). Видно, что после впадения ручья химический состав вод р. Лесная изменяется. Расчеты показывают, что только за сутки ручей привносит в реку 706 кг Si, 258 – Fe, 190 – Al, 90 кг Zn и других элементов, т.е. фактически пресная р. Лесная после впадения ручья Кислый становится «мертвой».

Таким образом, выделенные по основным ионам три группы термальных вод закономерным образом распределяются в пределах изученных вулканов и различаются по многим физико-химическим параметрам: pH, общей минерализации, концентрациям микроэлементов, включая РЗЭ, равновесным минералам, формирующимся из растворов, а также по степени участия глубинного флюида. Полученные нами данные о соотношении изотопов кислорода и водорода свидетельствуют о преимущественно метеорном происхождении изученных терм. Предположение о значительном участии морских вод в формировании хлоридно-натриевых вод влк. Менделеева [1, 2, 6] не подтвердилось. Влияние морской воды отмечено только в береговых термах, разгружающихся

в морскую воду в период приливов (о-в Кунашир, Горячий пляж). В кратерах вулканов доля мантийного гелия может достигать 95% [16]. Здесь же растворенная сера сульфатных кислых вод, образующаяся в результате окисления сероводорода инфильтрационными водами, имеет в основном магматическое происхождение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басков Е.А., Суриков С.Н. Гидротермы Земли. Л.: Недра, 1989. 243 с.
2. Басков Е.А., Суриков С.Н. Гидротермы тихоокеанского сегмента Земли. М.: Недра, 1975. 170 с.
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. Жарков Р.В., Побережная Т.М. Влияние сольфатарно-гидротермальной деятельности вулканов на компоненты ландшафтов (влк. Менделеева, о-в Кунашир, Курильские острова) // Вестн. ДВО РАН. 2008. № 1. С. 53-58.
5. Зеленов К.К. Вулканы как источник рудообразующих компонентов осадочных толщ. М.: Наука, 1972. 215 с.
6. Кононов В.И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. М.: Наука, 1983. 215с.
7. Лебедев Л.М. Минералы современных гидротерм. М.: Недра, 1979. 200 с.
8. Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
9. Меньяйлов И.А., Никитина Л.П., Шпарь В.Н. Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 21-36.
10. Никитина Л.П. Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с.
11. Пискунов Б.Н. Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг. М.: Наука, 1987. 236 с.
12. Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В. Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 2. С. 39-55.
13. Рычагов С.Н., Королева Г.П., Степанов И.И. Рудные элементы в зоне гипергенеза месторождения парогидротерм: распределение, формы миграции, источники // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 37-58.
14. Рычагов С.Н., Пушкарев В.Г., Белоусов В.И. и др. Северо-Курильское геотермальное месторождение: геологическое строение и перспективы использования // Вулканология и сейсмология. 2004. № 2. С. 56-72.
15. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.
16. Chudaev O., Chudaeva V., Sugimori K., Kuno K., Matsuo M. Composition and origin of modern hydrothermal systems of the Kuril island arc // Indian J. Mar. Sci. 2008. Vol. 37. P. 166-180.