

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РУДНО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОТЕРМ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

**Ю.П. Трошин**, И.С. Ломоносов, Н.Н. Брюханова

*Институт геохимии СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия*

Среди современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) по содержанию рудных и редких элементов, а также газовому составу выделены: углекислые, формирующиеся в карбонатных породах; сероводородные и бессероводородные азотные и метановые, разгружающиеся в кайнозойских отложениях; азотные, приуроченные к гранитоидам.

Углекислые гидротермы обогащены Sr, Ba, Y, Co и Cr; азотные, формирующиеся в гранитах, — Li, Rb, Cs, Mo, W и другими гранитофильными элементами; сероводородные — полиметаллами. Повышенные содержания урана и его спутников характерны для азотных щелочных окисленных термальных вод, в меньшей степени для углекислых; золота — для метановых.

Подобное разделение рудных элементов происходит уже на начальной стадии осадкообразования между органическим и глинистым веществом. Разделяющиеся по ассоциациям на этапе осадконакопления рудные элементы мобилизуются в гидротермальный раствор в основном такими же ассоциациями.

В окислительной (Eh — от +50 до +260 мВ) щелочной среде более эффективно переходит в раствор U и, видимо, другие элементы урановой ассоциации, связанные не только с гранитоидами, но и органическим веществом осадочных отложений. Щелочная среда ( $7 < \text{pH} < 10$ ) при разных значениях Eh благоприятна для мобилизации из изверженных пород и осадков Mo и W. Метановые гидротермы ( $8 < \text{pH} < 9$ , Eh  $< -70$  мВ) могут накапливать золото. В резко восстановительной (Eh — от  $-200$  до  $-360$  мВ) щелочной ( $\text{pH} > 8$ ) сероводородной бескислородной среде более активно переходят в раствор халькофильные полиметаллы, концентрирующиеся в глинистой части осадочных отложений. Таким образом, с уменьшением величины Eh и ростом концентрации  $\text{H}_2\text{S}$  гидротермальным раствором из изверженных и осадочных отложений мобилизуются разные ассоциации изученных рудных элементов в последовательности U—Mo, W—Au—Sn, Cu, Pb. В гидротермальном растворе происходит дальнейшее развитие первоначальной дифференциации, формирующейся в осадках. Отсюда следует, что разделение ассоциаций рудных элементов уже на начальной стадии осадкообразования задолго до начала гидротермальной активности является самым первым звеном в цепи процессов, ведущих в конечном итоге к дифференциации рудных месторождений по формационным типам.

В составе гидротерм, приуроченных к зонам разломов глубокого заложения, принимает участие эндогенный флюид, несущий мантийную „метку“ ( $^3\text{He}/^4\text{He}$ ), установленную в метановых и углекислых гидротермах Тункинской рифтовой впадины БРЗ, и состоящий, по результатам термодинамического моделирования, из  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , при явном отсутствии мантийных рудных элементов, так как его исходный состав определяется как углеводородный.

*Байкальская рифтовая зона, гидротермы, рудные элементы, осадочные отложения.*

### CONDITIONS OF FORMATION OF ORE-GEOCHEMICAL SPECIALIZATION OF MODERN HYDROTHERMS IN THE BAIKAL RIFT ZONE

**Yu.P. Troshin**, I.S. Lomonosov, and N.N. Bryukhanova

Modern hydrotherms of the Baikal Rift Zone (BRZ) are divided according to contents of ore and rare elements and gas composition into: (1) carbonaceous, forming in carbonate rocks, (2) hydrosulfuric and  $\text{H}_2\text{S}$ -free nitric and methane, discharged in Cenozoic deposits, and (3) nitric, produced in granitoids.

Carbonaceous hydrotherms are enriched in Sr, Ba, Y, Co, and Cr; nitric ones, in Li, Rb, Cs, Mo, W, and other granitophile elements; and hydrosulfuric hydrotherms are saturated with complex metals. High contents of U and associated elements are specific for oxidized nitric alkaline thermal waters and are atypical of carbonaceous ones, and high contents of Au are observed in methane hydrotherms.

Separation of ore elements between organic and clayey matter takes place as early as the initial stage of sediment formation. During sediment accumulation, these elements pass into hydrothermal solution in the same separated associations.

In oxidizing (Eh = +50...+260 mV) alkaline medium, U and, obviously, other elements of uranium association, present not only in granitoids but also in the organic matter of sediments, pass into the solution most actively. Alkaline medium ( $7 < \text{pH} < 10$ ) favors the transition of Mo and W from igneous rocks and sediments into the solution. Methane hydrotherms ( $8 < \text{pH} < 9$ , Eh  $< -70$  mV) can accumulate gold. In strongly reducing (Eh =  $-200$ ... $-360$  mV) alkaline ( $\text{pH} > 8$ ) hydrosulfuric anoxic medium, chalcophile complex metals of the clayey matter of sediments are the most active to pass into the solution. Thus, as Eh decreases and  $\text{H}_2\text{S}$  concentration increases, hydrothermal solution extracts various element associations from igneous and sedimentary deposits in the sequence U—Mo, W—Au—Sn, Cu, Pb. In the solution the differentiation of elements continues. Hence, the separation of ore-element associations at the initial stage of sediment formation, long before the hydrothermal

activity, is the first track in a chain of processes leading to the differentiation of ore deposits according to formational types.

Hydrotherms confined to deep-fault zones contain an endogenous fluid with mantle  $^3\text{He}/^4\text{He}$  values close to those in methane and carbonaceous hydrotherms of the Tunka rift depression in the BRZ. According to results of thermodynamic modeling, the fluid consists of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , and  $\text{CO}_2$  and obviously lacks mantle ore elements, as it was initially of hydrocarbon composition.

*Hydrotherms, ore elements, sedimentary deposits, Baikal Rift Zone*

## ВВЕДЕНИЕ

Основными механизмами формирования состава и рудно-геохимической специализации современных гидротерм в высокосейсмоактивной Байкальской рифтовой зоне (БРЗ), где их температура достигает  $100\text{ }^\circ\text{C}$  на глубинах до 3 км, являются инфильтрационный и элизионный процессы. При инфильтрации метеогенных и поверхностных вод в рыхлые отложения впадин и кристаллические породы их горного обрамления по зонам интенсивной трещиноватости за счет выщелачивания и растворения водовмещающих пород часть химических элементов переходит в раствор, определяя основной геохимический облик гидротерм при выходе их на поверхность по тектоническим разломам. При элизионном процессе глинистые отложения в байкальских кайнозойских рифтогенных впадинах, испытывая высокое давление, выделяют до 10 % поровых вод от исходного объема осадка. Роль элизионных растворов, являющихся своеобразной геохимической средой, в формировании современных гидротерм БРЗ пока изучена недостаточно. Вместе с тем установлено [Трошин, Ломоносов, 2005], что в сейсмостектонически-активной БРЗ, где сила землетрясений достигает 7—8 и даже 12 баллов, широко распространены напряжения сжатия и растяжения, приводящие к раскрытию или закрытию флюидопроводящих систем и миграции газогидротермальных проявлений через рыхлые отложения по принципу блуждающих сит.

При мобилизации гидротермами химических элементов из пород проявляется концентрирующая функция системы вода—порода [Шварцев, 1994, 1998, 2003; Рыженко, Крайнов, 2002, 2003; Бычинский и др., 2003]. Не исключено также участие мантийного флюида в формировании состава современных гидротерм БРЗ [Диденков и др., 2006].

Цель статьи — исследование механизма формирования рудно-геохимической специализации современных байкальских гидротерм и выяснение условий мобилизации рудных и редкометалльных ассоциаций элементов термальными водами как при разложении органоглинистых комплексов в процессе эпигенеза осадочных отложений впадин байкальского типа, так и при выщелачивании и растворении различных кристаллических пород горного обрамления.

## ОБЪЕКТЫ ОПРОБОВАНИЯ

В продолжение ранее выполненных работ [Трошин и др., 2001; Трошин, Ломоносов, 2005] авторами было проведено геохимическое изучение термальных вод Тункинской и Баргузинской рифтогенных впадин и восточного побережья оз. Байкал с использованием современных аналитических методов.

Кайнозойские осадочные отложения Тункинской впадины подстилает докембрийский фундамент, сложенный, наряду с другими кристаллическими породами, мощными толщами известняков и доломитов. К термальным водам Тункинской впадины относятся углекислые воды курорта Аршан-Тункинский, вскрытые скважинами глубиной до 400—650 м в приподнятом блоке известняков и доломитов фундамента в районе недавней угасшей вулканической деятельности. Две скважины у пос. Жемчуг, пробуренные в зоне Аршанского разлома, вскрывают термальные углекислые воды на глубине 1080 м в кристаллическом фундаменте (скв. Г-1) и метановые на глубине 700 м в вышележащих кайнозойских осадочных отложениях (скв. Р-1). Скважины глубиной до 300 м на курорте Нилова Пустынь вскрывают в гранитах азотные радоновые термы. Кроме того, на этом курорте был изучен субтермальный источник Глазной, имеющий специфический микроэлементный состав.

В Западном Забайкалье, частью которого является Баргузинская впадина, в конце позднего палеозоя произошло практически повсеместное внедрение гранитоидов Ангаро-Витимского батолита. Перекрывающая его метаморфическая толща, содержащая, в частности, доломиты и известняки, в настоящее время в большей части эродирована, в результате вскрыты гранитоиды, занимающие более 70 % площади водосборного бассейна оз. Байкал. Геохимические особенности гранитоидов отразились на составе гидротерм, приуроченных к пересекающим граниты глубинным разломам.

В долине р. Баргузин распространены азотные гидротермы с повышенным содержанием сероводорода, разгружающиеся в основном в четвертичных отложениях долины, перекрывающих коренные породы. Были опробованы Аллинский, Кучегерский, Умхейский источники, а также азотные несероводородные гидротермы — источник Алгинский и скважина, пробуренная в здравнице Гусиха. Среди рудонных гранитоидов батолита изучены отличные по составу Инские азотные гидротермы.

На восточном берегу оз. Байкал исследованы метановые сероводородные термальные воды у д. Сухая, вскрытые скважиной в неогеновых песчано-глинистых отложениях на глубине 150 м; азотные сероводородные термы грифонов Кулиных болот на Баргузино-Чивыркуйском перешейке и источника Змеиный на п-ове Святой Нос; азотные несероводородные термы скважины курорта Горячинск.

Кроме того, проанализированы азотные термальные воды, вскрытые скважиной в гранитах Ангаро-Витимского батолита у восточного портала Северо-Муйского тоннеля, и Джидинского (Енгарбойского) источника в Джидинском молибден-вольфрамовом рудном районе Западного Забайкалья.

Вопросу формирования состава термальных вод БРЗ уделялось и уделяется большое внимание [Ломоносов, 1974; Ломоносов, Пиннекер, 1980, 1982; Пиннекер, 1984; Пиннекер и др., 1998; Трошин, Ломоносов, 2005; и др.]. При этом процессам растворения, выщелачивания и гидролиза вмещающих водоносных пород, а также разбавлению гидротерм речными и подземными водами зоны гипергенеза придавалось особое значение.

В БРЗ выходы термальных вод приурочены к рифтогенным впадинам и оперяющим их разломам разных порядков. Приразломные впадины в древних кристаллических породах представляют собой речные долины, заполненные кайнозойскими отложениями. Термальные воды разгружаются в кристаллических породах в бортах депрессий, в приразломных кайнозойских осадках самих депрессий. Состав воды источников обычно соответствует составу трещинно-жильных водоносных горизонтов, вскрытых скважинами.

### МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В полевых условиях на месте отбора проб определялись температура, рН, Eh с использованием прибора Watertest фирмы Hanna и содержание в воде  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  методом титрования. Содержание макрокомпонентов определялось в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск): гидрокарбонат-иона, ионов хлора, кальция, магния — титрометрически, сульфат-иона — турбидиметрически, ионов калия и натрия — методом фотометрии пламени, кремниевой кислоты и фтор-иона — фотометрически (СФ-46), а концентрации микроэлементов методом ICP-MS на масс-спектрометре Element 2. Содержание золота определялось экстракционным методом. В качестве твердого экстрагента (ТВЭК) использовался хлорированный порошок трибутилфосфата. Анализ экстракта проводился атомно-абсорбционным методом с помощью атомизатора HGA на спектрометре фирмы Перкин-Элмер-503. Во время отбора проб для анализа на микроэлементы вода под давлением пропусклась через мембранные фильтры „МИНИСАРТ“ с диаметром пор 0.45 мкм для отделения взвеси микрочастиц. Затем вода собиралась в полиэтиленовые бутылки на 100 мл и подкислялась азотной кислотой до 2 %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Традиционно термальные воды БРЗ делятся на углекислые, метановые и азотные. Наши исследования показали, что при формировании рудно-геохимической специализации гидротерм региона, кроме солевого и газового составов, ведущее влияние оказывают такие показатели, как Eh и рН среды, с учетом которых авторами выделены: сероводородные азотные и метановые, из несероводородных — азотные и метановые, разгружающиеся в кайнозойских отложениях; азотные, приуроченные к гранитоидам; углекислые гидротермы, формирующиеся в карбонатных породах. Углекислые гидротермы особенно отличаются от остальных по составу и кислотно-щелочным свойствам (табл. 1).

**Гидротермы, разгружающиеся в кайнозойских отложениях.** Часть азотных и метановых гидротерм относятся к сероводородным с максимальными концентрациями сероводорода (14—26 мг/л) и отношением  $SO_4^{2-}/H_2S < 15$ . Эти термы характеризуются низкими значениями редокс-потенциала ( $Eh < -220$  мВ), они наиболее щелочные, не содержат кислород, а минерализация колеблется от 450 до 900 мг/л. К таким термам относятся Аллинский, Кучегерский, Умхейский и Змеиный источники, а также вода в скважине у д. Сухая.

В щелочных сероводородных гидротермах (рисунок, табл. 2) установлена максимальная доля в общей минерализации. Чаще всего максимальное содержание халькофильных элементов Cu, Pb, Cd, Sn, Au при среднем значении суммы 22 изученных микроэлементов 460 мкг/л. Низкий окислительно-восстановительный потенциал гидротерм, обогащенных натрием и галогенами (Cl, F), отвечает сразу нескольким способам переноса металлов — в виде двойных щелочных сульфидов (с  $Na_2S$ ), в галоидных соединениях неорганических и органических комплексов, коллоидных растворов и других формах [Еременко, 1964; Левченко, 1966; Гаррелс, Крайст, 1968; и др.].

Высокие содержания в метановых гидротермах хлоридов, а в азотных — фторидов, низкие концентрации редких литофильных элементов (Sr, Li) также обуславливают преобладание в щелочных сероводородных гидротермах, по сравнению с другими, рудных металлов — Cu, Pb, Sn, Cd, Co, Cr, V, Sb.

Таблица 1. Свойства и состав гидротерм центральной части Байкальской рифтовой зоны, мг/л

Скважина, источник	T, °C	pH	Eh, мВ	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	Cl	F	K	Na	Ca	Mg	Общая минерализация
Аршан-Тункинская 35	14.2	6.3	10	7.0	2620	<0.2	600	0.4	145	46	0.6	34.2	180	654	185	4470
Аршан-Тункинская 41	42.2	6.1	-59	11.4	2270	0.3	620	0.2	148	35	1.1	35.2	177	600	146	4044
Жемчуг Г-1	54.4	6.6	-102	185	2680	2.3	16	1.1	250	960	0.4	36.2	1005	110	253	5500
Джидинский (Енгарбойский)	37.0	7.9	167	10.8	98	—	540	16.3	110	15	12.5	11.7	260	31	1	1100
Нилова Пустынь	38.9	8.0	101	<2	83	5.2	520	1.3	73	16	6.2	9.0	217	57	3	990
Северо-Муйский тоннель	20	9.1	260	2.7	78	3.7	19	0.8	31	12	12	0.3	58	5	0.3	220
Инский	20.8	7.1	49	—	57	2.4	520	1.2	72	26	7.0	8.9	222	54	0.2	970
Сухой	45.9	8.5	-225	<2	405	0.8	55	21.2	120	44	17	6.7	220	0.8	0.4	890
Алла	47.6	9.1	-355	<2	99	<0.2	110	7.9	150	10	11.6	3.8	105	2	0.1	500
Кучегерский	43.6	9.4	-313	<2	104	<0.2	110	13.4	130	10	11.6	2.7	100	3	0.3	490
Умхей	47.9	9.4	-335	<2	120	<0.2	90	9.1	106	8	14.1	1.8	99	1	0.1	450
Алга	33.5	8.1	135	<2	85	3.0	320	0.6	56	8	3.4	5.8	129	24	14	650
Гусиха	75.6	8.5	-18	<2	115	3.3	280	0.6	140	22	11.9	11.2	184	13	0.1	780
Кулиные болота	33.6	9.4	560	<2	130	4.2	180	3.1	170	8	18.4	3	154	2	0.2	680
Курорта Горячинск	56.6	8.8	19	<2	55	3.6	300	0.5	92	7	3.2	4.1	148	18	0.1	630
Змеиный	45.5	9.1	—	—	78	—	140	10.0	130	22	10.9	4.5	122	1	0.1	520
Жемчуг Р-1	39.4	8.2	-76	2.2	960	4.3	1	0.6	46	64	0.1	3.1	330	22	5	1440
Глазной (Нилова Пустынь)	15.0	8.0	137	3.5	150	5.2	19	1.0	29	0.5	0.4	2.8	8.0	39	8	270

Примечание. Анализы выполнены С.Е. Черниговой и М.А. Артамоновой в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск). Проверк — нет сведений.

Таблица 2. Содержание микроэлементов (мкг/л) и отношение сумм их содержаний к общей минерализации ( $10^6$ ) в гидротермах Байкальской рифтовой зоны

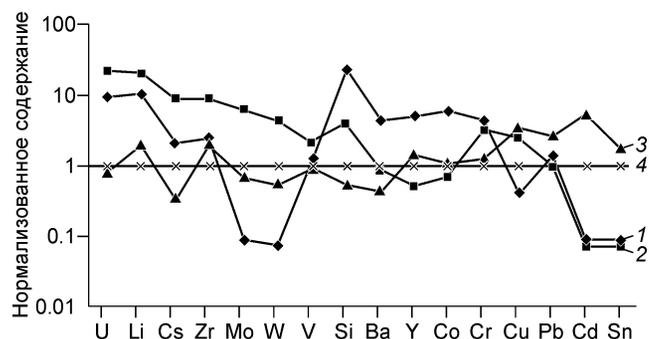
Скважина, источник	Li	Rb	Cs	Li+Rb+Cs*	Mo	W	Mo+W*	Cu	Pb	Sn	Cu+Pb+Sn*	Au	Au*	U	U*
Аршан-Гункинская 35	362	90	6.6	102	0.61	1.7	0.51	0.2	0.45	<0.05	0.2	0.004	0.00085	6.6	1.47
Аршан-Гункинская 41	382	94	7.3	119	<0.12	0.94	0.28	0.1	0.32	<0.05	0.1	—	—	0.77	0.19
Жемчуг Г-1	2712	110	8.2	514	0.37	<0.5	0.09	2.6	0.35	<0.05	0.54	—	—	0.18	0.03
Джидинский (Енгарбойский)	677	159	116.0	863	38	107	131	1.7	0.37	<0.05	1.9	—	—	0.85	0.77
Нилова Пустынь	985	100	38.0	1133	16.50	71	88	1.5	0.11	<0.05	1.62	0.004	0.00353	0.87	0.88
Северо-Муйский тоннель	761	52	25.1	3809	16.15	11.86	127	<0.1	<0.01	<0.05	—	—	—	3.38	15.36
Инский	224	41	15.1	289	29.56	44.87	77	1	1.63	0.31	3.1	—	—	2.69	2.77
Сухой	102	43	8.3	171	8.02	73	91	2.1	0.74	0.22	3.4	0.014	0.0156	0.29	0.32
Алла	54	11	1.2	132	3.61	7.3	22	1.5	0.94	0.14	5.12	—	—	0.04	0.08
Кучегерский	62	7	1.2	144	1.08	7.4	17	3.2	0.07	0.1	6.9	—	—	0.10	0.21
Умхей	73	9	0.8	185	1.22	7.4	19	0.8	0.56	0.31	3.8	—	—	0.04	0.1
Алга	5	2	0.5	12	0.57	12.8	21	0.6	0.25	0.2	1.6	—	—	0.08	0.12
Гусиха	98	24	3.5	160	10.14	20.2	39	0.5	0.28	0.23	1.3	0.003	0.00385	0.12	0.01
Кулиные болота	52	16	4.6	108	0.31	13.8	21	0.7	0.29	0.11	1.7	—	—	0.02	0.03
Курорта Горячинск	35	12	6.1	85	4.43	19.9	39	0.5	<0.01	0.05	0.9	—	—	0.03	0.05
Зменный	68	27	3.6	188	7.47	13.3	40	0.4	0.27	0.1	1.5	—	—	0.07	0.13
Жемчуг Р-1	4	3	0.1	5	1.36	<0.5	1.11	0.5	0.12	0.03	0.5	—	—	0.06	0.04
Глазной (Нилова Пустынь)	16	3	1.2	75	4.06	0.89	19	0.2	0.05	<0.05	1.0	—	—	2.59	9.7

Примечание. Анализы выполнены О.А. Склярской, В.И. Ложкиным и А.Г. Арсентьевой в Институте геохимии СО РАН. Проверка — нет сведений.

\* Отношение сумм концентраций микроэлементов к общей минерализации (см. табл. 1).

### Содержания микроэлементов в различных типах гидротерм Байкальской рифтовой зоны, деленные на содержания в слабоминерализованных водах (нормализованные).

Типы гидротерм: 1 — углекислые, 2 — азотные, разгружающиеся в гранитоидах, 3 — азотные сероводородные, 4 — слабоминерализованные.



Бессероводородные азотные и метановые гидротермы, разгружающиеся в кайнозойских отложениях, щелочные с низким содержанием  $H_2S$  ( $< 3$  мг/л) и с Eh от  $-70$  мВ (скв. Р-1 в пос. Жемчуг) до  $+560$  мВ (источник Кулиные болота). К этой же группе относятся и гидротермы Алгинского источника. По сравнению с сероводородными термами роль рудных халькофильных элементов в них значительно ниже.

**Гидротермы, приуроченные к гранитоидам.** Азотные щелочные гидротермы, формирование состава которых происходит в гранитных породах (источники Муйский, Инский, Джидинский, скважины Горячинск, Гусиха, Нилова Пустынь), имеют в среднем общую минерализацию 780 мг/л и обогащены гранитофильными элементами. Для них характерна относительно высокая сумма микроэлементов, среднее содержание которых превышает 2020 мкг/л с максимальным содержанием Li, Sr, Cs, Mo, W, Zr, U (см. рисунок, табл. 2).

Наиболее высокие концентрации Mo и W установлены в гидротермах с  $7 < pH < 10$ , что соответствует химическим свойствам оксидов этих элементов, которые растворимы в щелочных и не растворимы в кислых средах. Присутствие сероводорода способствует увеличению в них содержаний халькофильных элементов (Джидинский источник).

**Гидротермы, формирующиеся в карбонатных породах.** Углекислые гидротермы относятся к слабокислым с Eh от  $+10$  мВ (курорт Аршан-Тункинский, скв. 35) до  $-102$  мВ (пос. Жемчуг, скв. Г-1) с максимальными содержаниями  $CO_2$ ,  $HCO_3^-$  и максимальными значениями отношения  $SO_4^{2-}/H_2S$  (до 2500). Особенности макроэлементного состава этих гидротерм достаточно тесно связаны с составом водовмещающих пород. Так, резкое преобладание в них магния и кальция свидетельствует о том, что их источниками были доломиты и известняки. Будучи кислыми, углекислые гидротермы обладают высокой выщелачивающей способностью и имеют максимальную минерализацию (до 5500 мг/л) за счет растворенных компонентов карбонатных пород.

Углекислые гидротермы имеют максимальную сумму 22 изученных микроэлементов — 7500 мкг/л в скв. 35, из которых 6960 мкг/л приходится на стронций, элемент-спутник доминирующего в растворе кальция. В них максимальны концентрации элементов-спутников кальция — Ba, Y и спутников магния — Co, Cr (см. рисунок).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Критерием рудно-геохимической специализации нами принято отношение сумм содержаний металлов к общей минерализации гидротерм (см. табл. 2).

Обращает на себя внимание резко выделяющаяся редкометалльность азотных гидротерм, разгружающихся в гранитах, поскольку отношение в них содержаний редких щелочных металлов к общей минерализации максимально по сравнению с другими гидротермами. Кроме того, эти гидротермы обогащены молибденом и вольфрамом.

Медью и свинцом наиболее обогащены азотные, сероводородные щелочные гидротермы источников Кучегерский, Аллинский и Умхейский, метановые термы скв. д. Сухая и скв. Р-1 в пос. Жемчуг, а также азотные термы Инского источника.

Золото было определено в небольшом числе термальных источников. Максимальное содержание элемента установлено в метановой сероводородной воде скв. д. Сухая, со щелочной сильно восстановительной средой и с повышенным содержанием сероводорода (21 мг/л), хлора и фтора. Судя по диаграмме Eh—pH устойчивости соединений золота в растворах [Гаррелс, Крайст, 1968], золото устойчиво в форме золотохлоридных комплексов при  $Eh > 1000$  мВ в кислой среде или в форме золотосульфидных комплексов при  $Eh < 0$  мВ в щелочной среде. Последний вариант соответствует нашему случаю. Примечательно, что максимальное накопление золота (до первых сотен мг/т) установлено в илах, формирующихся при взаимодействии самоизливающихся метановых вод (скв. Р-1, пос. Жемчуг) с почвенным горизонтом.

Максимальное отношение содержаний урана к минерализации установлено в Муйском и Глазном источниках, для которых характерен повышенный окислительный потенциал. Следующими по степени

обогащенности ураном являются Инские, Аршанские и Ниловские гидротермы. Повышенные содержания урана в Муйском и в Инском источниках связаны с их приуроченностью к Уровскому и Конкудерскому потенциально ураново-рудным узлам, перспективным на обнаружение промышленных месторождений урана гидротермально-метасоматического и уранослюдково-цеолитового типов в высокорadioактивных гранитах [Ломоносов и др., 2002]. Гидротермы Ниловой Пустыни и Глазного источника приурочены к гранитам с повышенной радиоактивностью, и лишь уран в углекислых водах Аршан-Тункинского курорта пока не находит объяснения. При этом травертины этого месторождения содержат до 2 г/т урана, а их радиоактивность (42 мкР/ч), сопоставима с радиоактивностью гранитов Ниловой Пустыни.

Главными концентраторами редких и рудных элементов в осадочных отложениях являются органическое вещество, пелитовые илы и глины. Ранее было установлено [Трошин и др., 2001, 2003], что в глинах и илах донных отложений Байкала и его притоков существует отчетливая корреляция одних элементов с содержанием  $C_{орг}$ , а других — с содержанием и составом глинистой составляющей. Корреляция выражается рядом убывающей связи элементов с  $C_{орг}$  и нарастающей связи с глиной:  $C_{орг}—Se—U—W—Mo—Ag—B—Te—Au—Cu—Sn—Pb—Zn—$ глины (илы). Этот ряд с несущественными вариациями совпадает с рядами „органофильности“, полученными по угольным бассейнам [Юдович, Кетрис, 2002]. Последовательность элементов и их групп в ряду совпадает с набором последовательно сменяющихся друг друга ассоциаций рудных элементов в месторождениях — уранугольных, урановых (U, Se, Mo, Ag), молибденовых, молибден-вольфрамовых, кварц-молибденит-турмалиновых, золотомолибденовых, медно-молибденовых (Mo, Ag, B, Te, Au, Cu), золототеллуридных, золотых (Te, Au), касситерит-сульфидных (Sn, Cu, Pb, Zn), полиметаллических (Pb, Zn). Можно считать, что здесь закладывается дифференциация рудных месторождений по формационным типам задолго до начала гидротермальной активности еще на стадии осадкообразования и формирования будущих материнских пород — источников вещества для гидротермальных растворов.

Среди кристаллических пород, водовмещающих гидротермы, гранитоиды отличаются повышенным кларком литофильных элементов, в том числе накапливающихся в грейзенах — Li, Cs вместе с такими элементами, как Be, Ta, Nb, Sn, Mo, W, U и др. В карбонатных породах повышены содержания элементов-спутников кальция (Sr, Ba, Y) и магния (Co, Cr).

Итак, рудные элементы разделяются в осадочных отложениях по ассоциациям с органическим и глинистым веществом на этапе осадконакопления. Достаточно очевидно совпадение этих ассоциаций с ассоциациями рудных элементов в разных типах гидротермальных растворов. Видимо, переход элементов из пород в гидротермальный раствор происходит дифференцированно указанными ассоциациями при определенных условиях.

В кайнозойских отложениях БРЗ мобилизация в термальный раствор тех или иных металлов связана с условиями среды. В окислительной ( $Eh$  — от +50 до +260 мВ) щелочной среде более эффективно переходит в раствор U. Щелочная среда ( $7 < pH < 10$ ) при разных значениях  $Eh$  благоприятна для мобилизации из осадков и концентрированию в гидротермах Mo и W. Метановые гидротермы ( $8 < pH < 9$ ,  $Eh < -70$  мВ) могут накапливать золото. В резко восстановительной ( $Eh$  — от -200 до -360 мВ), щелочной ( $pH > 8$ ) сероводородной бескислородной среде более активно мобилизуются раствором халькофильные полиметаллы, связанные с глинистой частью осадочных отложений. Таким образом, с уменьшением величины  $Eh$  и ростом концентрации  $H_2S$  гидротермальным раствором из осадочных отложений мобилизуются разные ассоциации изученных рудных элементов в последовательности U—Mo, W—Au—Sn, Cu, Pb. Этот ряд соответствует ряду убывающей связи элементов с  $C_{орг}$ . Когда в рудных полях прослеживается стадийность и зональность, она нередко совпадает с приводимой последовательностью или ее частью, хотя условия и геологическая обстановка осаждения рудных компонентов могут вносить существенные коррективы.

Редкометалльная, молибден-вольфрамовая и урановая специализация азотных гидротерм БРЗ, разгружающихся в гранитоидах, объясняется в основном повышенным кларком этих элементов в гранитах, а максимальные концентрации элементов-спутников кальция — Sr, Ba, Y и спутников магния — Co, Cr в углекислых термах обусловлены растворением и выщелачиванием карбонатных пород.

Кроме того, получены данные о роли мантийных (ювенильных) флюидов в формировании современных гидротерм в БРЗ. В метановых гидротермах Тункинской впадины в 1976 г. впервые были выявлены высокие отношения  $^3He/^4He$ , свидетельствующие о поступлении гелия за счет мантийных источников [Ломоносов и др., 1976]. При дальнейшем изучении в 1983 — 1984 гг. метановых гидротерм впадины (скв. Р-1), проводившемся совместно с лабораторией ядерных реакций ОИЯИ (г. Дубна) под руководством академика Г.Н. Флерова, установлена их перспективность для поисков новых сверхтяжелых химических элементов [Флеров и др., 1984]. С этой целью в 1987 г. была пробурена специальная скважина (Г-1) глубиной 1100 м, вскрывшая кремнистые, гидрокарбонатно-хлоридные, натриевые углекислые гидротермы с мантийным ( $8 \cdot 10^{-6}$ ) отношением  $^3He/^4He$  [Ломоносов и др., 1988]. Таким образом, подтверждено участие мантийных флюидов не только в метановых, но и углекислых гидротермах БРЗ. В

продолжение этих исследований с помощью имитационных экспериментов был изучен сценарий прохождения мантийного флюида по проницаемым зонам Байкальского рифта [Диденков и др., 2005, 2006]. Результаты термодинамического моделирования эволюции восходящего кислородсодержащего углеводородного флюида показали, что он преобразуется во флюид, состоящий из  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , и является источником воды, образующейся в результате преобразования тяжелых углеводородов в метан с примесью его легких гомологов  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . Основными компонентами, растворенными в ювенильных водах, является метан и  $\text{CO}_2$ , что следует из существования процесса образования воды из исходного сухого углеводородного мантийного флюида.

Полученные данные позволяют выделить две равноправные ветви глубинной дегазации Земли. Первая (углеводородная) сопровождается накоплением специфических форм углеродистых образований, формированием месторождений нефти, газа и конденсата. В этом случае тяжелые углеводороды сохраняют метастабильную устойчивость, а образования сколько-нибудь значительных количеств воды не происходит. Со второй (водно-углекислой) ветвью связано накопление карбонатов и газогидратов, но, в первую очередь, существование источников ювенильных вод. Этот процесс возможен вследствие относительного обогащения восходящих потоков водородом и кислородом за счет образования твердых углеродсодержащих веществ.

Принимая эту точку зрения, можно объяснить явное отсутствие рудных мантийных элементов в современных гидротермах БРЗ, так как исходный состав флюида определяется как углеводородный. Лишь в процессе продвижения флюида при взаимодействии с вмещающими породами происходит мобилизация рудных элементов и могут возникать соединения с элементами, вступающими в реакцию с углеводородами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В песчано-глинистых отложениях Байкальской рифтовой зоны на этапе осадконакопления рудные элементы, разделяющиеся по ассоциациям между органическим и глинистым веществом, мобилизуются в гидротермальный раствор. В гидротермальном растворе происходит закрепление и дальнейшее развитие первоначальной дифференциации элементов, формирующейся в осадках. Распределение элементов в кайнозойских осадках БРЗ выражается рядом убывающей связи элементов с  $\text{C}_{\text{орг}}$  и нарастающей связи с глинистыми минералами:  $\text{C}_{\text{орг}}\text{—Se—U—W—Mo—Ag—B—Te—Au—Cu—Sn—Pb—Zn—глины (илы)}$ . Этот ряд элементов совпадает с набором последовательно сменяющих друг друга ассоциаций рудных элементов в месторождениях. Смена мобилизованных в раствор ассоциаций от урана с его спутниками до полиметаллов происходит в щелочной обстановке при уменьшении окислительного и росте восстановительного потенциала среды, росте содержания сероводорода. Отсюда следует, что разделение ассоциаций рудных элементов уже на начальной стадии осадкообразования (задолго до начала гидротермальной активности) является самым первым звеном в цепи процессов, ведущих к дифференциации рудных месторождений по формационным типам, к стадийности и зональности рудных полей, другим проявлениям рудной дифференциации. Мобилизация элементов из гранитных пород отличается накоплением в термальных водах гранитофильных и рудных элементов —  $\text{W}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{U}$ . Иногда наряду с этим повышается содержание сероводорода и связанных с ним халькофильных элементов. Углекислые гидротермы Байкальской рифтовой зоны отличаются более высокой минерализацией и обогащением микроэлементами материнских водоносных доломитов и известняков  $\text{Sr}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cr}$ .

Несмотря на то, что происхождение состава гидротерм БРЗ объясняется и выводится из состава водовмещающих кристаллических пород и осадочных отложений, особенности изотопного состава гелия в гидротермах указывают на возможное присутствие в водах термальных источников, по крайней мере, определенной доли мантийного флюида, состоящего из  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , при явном отсутствии в нем рудных мантийных элементов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ-Байкал (грант 05-05-97302) и междисциплинарного интегративного проекта СО РАН № 88-2006.

## ЛИТЕРАТУРА

**Бычинский В.А., Ломоносов И.С., Диденков Ю.Н.** Определяющие отличия физико-химических систем „вода—порода“ континентальных рифтовых зон и островных дуг // Проблемы поисковой и экологической геохимии Сибири (Тр. науч. конф.). Томск, 2003, с. 49—52.

**Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л.** Растворы, минералы, равновесия. М., Мир, 1968, 368 с.

**Диденков Ю.Н., Бычинский В.А., Мартынова М.А., Ломоносов И.С., Тупицин А.А., Чудненко А.В.** Структурно-гидрогеологические основы физико-химического моделирования процессов формирования гидросферы Байкальского рифта // Изв. вузов Сибири. Сер. наук о Земле. Вып. 8. Иркутск, Изд-во ИГТУ, 2005, с. 81—101.

**Диденков Ю.Н., Бычинский В.А., Ломоносов И.С.** О возможности существования эндогенного источника пресных вод в рифтовых геодинамических условиях // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (10), с. 1110—1114.

**Еременко В.Я.** Формы нахождения тяжелых металлов в некоторых природных водах // Гидрохимические материалы, 1964, т. 31, с. 125—133.

**Левченко В.М.** Теоретические основы физико-химического исследования природных вод // Гидрохимические материалы, 1966, т. 45, с. 123—132.

**Ломоносов И.С.** Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск, Наука, 1974, 166 с.

**Ломоносов И.С., Пиннекер Е.В.** Термальные воды Прибайкалья // Природа, 1980, № 3, с. 122—134.

**Ломоносов И.С., Пиннекер Е.В.** Месторождения, сформированные гидротермальными растворами // Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и истории воды в земных недрах. Новосибирск, Наука, 1982, с. 122—134.

**Ломоносов И.С., Мамырин Б.А., Толстихин И.Н., Прасолов Э.В.** Изотопный состав гелия и аргона в некоторых гидротермах Байкальской рифтовой зоны // Геохимия, 1976, № 11, с. 1743—1746.

**Ломоносов И.С., Пиннекер Е.В., Беляев В.Б., Флешлер В.И., Дмитриев С.Н., Флеров Г.Н.** Новые данные о современных гидротермах зон глубинных разломов Байкальской рифтовой зоны // Всесоюз. совещание по подземным водам Востока СССР. Иркутск—Южно-Сахалинск (Тез. докл.). Иркутск, 1988, с. 62—64.

**Ломоносов И.С., Мясников А.А., Медведев В.И., Коршунов Л.Г.** Эффективность геохимического метода поисков в Прибайкалье и Забайкалье // Прикладная геохимия. Вып. 3: Поиски и разведка. М., ИМГРЭ РАН, 2002, с. 570—591.

**Пиннекер Е.В.** Подземная гидросфера. Новосибирск, Наука, 1984, 166 с.

**Пиннекер Е.В., Попов А.М., Шпынев Е.В.** О глубине проникновения поверхностных вод в земную кору (на примере Прибайкалья) // Докл. РАН, 1998, т. 359, № 3, с. 397—400.

**Рыженко Б.Н., Крайнов С.Р.** Физико-химические факторы формирования химического состава вод зоны гипергенеза // Геохимия, 2002, № 8, с. 1—28.

**Рыженко Б.Н., Крайнов С.Р.** Модель „вода—порода“ как основа прогноза химического состава природных вод земной коры // Геохимия, 2003, № 9, с. 1002—1024.

**Трошин Ю.П., Ломоносов И.С.** Химический состав и условия формирования современных гидротерм центральной части Байкальской рифтовой зоны // География и природные ресурсы, 2005, № 2, с. 39—46.

**Трошин Ю.П., Ломоносов И.С., Ломоносова Т.К., Брюханова Н.Н., Гвоздков А.Н., Гелетий В.Ф., Петров Л.Л., Сандимиров И.В., Спиридонов А.М., Ткаченко Л.Л.** Геохимия рудообразующих элементов в отложениях кайнозойских впадин Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 348—361.

**Трошин Ю.П., Ломоносов И.С., Брюханова Н.Н.** Дифференциация рудообразующих элементов между органическим и глинистым веществом в аквагенных осадочных отложениях Байкальской рифтовой зоны и ее металлогеническое значение // Проблемы поисковой и экологической геохимии Сибири (Тр. научн. конф.). Томск, 2003, с. 206—209.

**Флеров Г.Н., Дмитриев С.Н., Ломоносов И.С., Пиннекер Е.В.** Поиск сверхтяжелых элементов в термальных водах Байкальской рифтовой зоны // Сообщение Объединенного ин-та ядерных исследований. Репринт. Р6-84-422, Дубна, 1984, 10 с.

**Шварцев С.Л.** Рудогенерирующие процессы в эволюционном развитии системы „вода—порода“ // Геология рудных месторождений, 1994, № 3, с. 261—270.

**Шварцев С.Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1998, 366 с.

**Шварцев С.Л.** Рудообразование в системе „вода—порода“ // Проблемы поисковой и экологической геохимии Сибири (Тр. науч. конф.). Томск, 2003, с. 132—135.

**Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** Неорганическое вещество углей. Екатеринбург, АИФ: Наука, 2002, 422 с.

*Рекомендована к печати 22 мая 2007 г.  
Г.Н. Аношиным*

*Поступила в редакцию  
13 декабря 2006 г.*