1. ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

DOI.10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-11-14

Микрокомпоненты в подземных и поверхностных водах бассейна р. Сенца (Восточный Саян)

Алексеев С.В., Алексеева Л.П.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, E-mail: salex@crust.irk.ru

Иркутский государственный университет, Россия, E-mail: lalex@crust.irk.ru

АННОТАЦИЯ: В работе приводятся первые данные о распределении микрокомпонентов в подземных и поверхностных водах бассейна р. Сенца (Восточный Саян). Показано, что термальные воды Хойто-Гола в значительной степени обогащены Li, Be, B, Si, Mn, Ge, As, Br, Rb, Sr, Cs, Ba, W и обеднены Al, P, Cu, Zn, Ag относительно речных и дождевых вод. Спектры распределения РЗЭ в подземных и поверхностных водах имеют особенности, характеризующиеся четкой европиевой аномалией и превалированием легких РЗЭ над тяжелыми.

Trace elements in ground waters and surface waters of the Sentsa River basin (Eastern Sayan Ridge)

S.V. Alexeev¹, L.P. Alexeeva^{1,2}

¹*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia, E-mail: salex@crust.irk.ru*

²*Irkutsk State University, Geographical Department, Irkutsk, Russia, E-mail: lalex_crust@mail.ru*

ABSTRACT: The paper presents the first data on the distribution of trace elements in ground waters and surface waters of the Sentsa River basin (Eastern Sayan Ridge). It is shown that the Khoyto-Gol thermal waters are significantly enriched in Li, Be, B, Si, Mn, Ge, As, Br, Rb, Sr, Cs, Ba, W and depleted in Al, P, Cu, Zn, Ag relative to river waters and rainwater. The REE distribution spectra in ground waters and surface waters are characterized by a strongly positive Eu anomaly and the prevalence of light REE over heavy REE.

ВВЕДЕНИЕ

Первые гидрогеологические исследования в бассейне р. Сенца (Окинское плато, Восточные Саяны) начались в 40^х годах прошлого века. С.В. Обручевым и Н.И. Толстихиным был описан источник термальных вод Хойто-Гол в одноименной долине реки - левого притока р. Сенца. В последующие годы новые данные о химическом, газовом, изотопном и микробиологическом составе термальных подземных вод были получены В.Г. Ткачук, Е.В. Пиннекером, И.М. Борисенко, Л.В. Заманой, А.М. Плюсниным, А.В. Татаринковым, П.С. Бадминовым, А.И. Оргильяновым и др. Между тем до настоящего времени отсутствовали сведения о геохимии других типов вод в бассейне р. Сенца, в том числе и распределении микрокомпонентов в них. Благодаря использованию ICP MS появилась возможность определять содержание широкого спектра микроэлементов в водных растворах. В настоящей статье приводятся первые данные о распределении микрокомпонентов в подземных и поверхностных водах бассейна р. Сенца.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы воды отобраны в период полевых работ в июле 2018 г. После фильтрования воды с помощью ручного вакуумного фильтрата Merck Millipore через мембранные фильтры Millipore

(диаметр 47 мм, размер пор 0.45 мкм) выполнена консервация проб путем добавления в каждую пробирку 50 мкл HNO₃. Содержание основных макрокомпонентов в пробах определено в ЦКП «Геодинамика и геохронология» (г. Иркутск) традиционными методами [7], а микрокомпонентный состав - методом ICP MS на приборе Element-2 (Finnigan MAT, Германия) в Институте геохимии СО РАН.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕРЗЛОТНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Геологический разрез бассейна р. Сенца формируют средне- и верхнепротерозойские отложения мощностью до 3800 м. В составе ильчирской свиты PR₂ доминируют сланцы с песчаниками и эффузивам. Монгошинская свита PR₃ представлена карбонатными породами (известняками, доломитовыми известняками) с прослоями метаморфических сланцев. Ее перекрывает мощная (до 3000 м) дибинская толща PR₃, сложенная песчаниками и сланцами. Этот осадочно-метаморфический комплекс прорван гранитоидами PR и PZ возраста (рис. 1). Мезозой-кайнозойская активизация тектонических движений и базальтовый вулканизм привели к обновлению древних глубинных разломов, интенсификации водообмена и сформировали современный геоморфологический облик региона.

Многолетнемерзлые породы (ММП) имеют сплошное распространение с тенденцией их уменьшения в западном и северо-северо-восточном направлении (рис. 2). Мощность многолетнемерзлых пород на междуречных пространствах в среднем равна 170-200 м, а в долинах рек составляет 140-180 м. Среднегодовая температура мерзлых пород изменяется в пределах $-2,1 \dots -8,5^\circ\text{C}$. Сезонно протаивающий слой на междуречных пространствах имеет мощность 1,0-1,5 м, достигая 3,5 м на южных склонах [8].

Рис. 1. Геологическое строение [5]. 1 – валуны, галечники, пески, суглинки Q; 2 – песчаники, эффузивы, карбонатные породы PR₂-PR₃; 3 – граниты, градиориты, редкометалльные пегматиты PR-PZ; 4 – тектонические нарушения

В гидрогеологическом отношении регион относится к Восточно-Саянской гидрогеологической складчатой области. В пределах криогидрогеологических массивов зона интенсивного водообмена заморожена, а трещинные и трещинно-жильные напорные воды приурочены к метаморфическим и изверженным породам. Они вскрыты скважинами (которые часто фонтанируют) сразу под многолетнемерзлыми породами на глубине 170-180 м [3].

В долинах рек, особенно заложенных по зонам разломов (например, по Сенцинскому региональному разлому), прослеживаются подрусловые талики, по которым происходит разгрузка подмерзлотных холодных и термальных вод. Восходящие источники зимой образуют крупные наледи.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ионно-солевой состав подземных и поверхностных вод

Подземные воды в бассейне р. Сенца подразделяются на термальные и холодные и разгружаются на земную поверхность в виде серии родников.

Рис. 2. Распространение ММП пород в краевой части Окинского плато [4]: 1 – преимущественно сплошное мощностью 0-100 м, $t_{\text{ср.пород}} = -0,5 \dots -2^\circ\text{C}$, 2 – преимущественно сплошное мощностью 50-150 м, $t_{\text{ср.пород}} = -1 \dots -5^\circ\text{C}$, 3 – сплошное мощностью 200-300 м, $t_{\text{ср.пород}} = -3 \dots -7^\circ\text{C}$; 4 – источники термальных (темный кружок) и холодных (светлый кружок) подземных вод

Термальные воды в долине р. Хойто-Гол – левого притока р. Сенца – по ионно-солевому составу гидрокарбонатные кальциево-натриевые с минерализацией 880-900 мг/дм³ и околонейтральным pH (6,95-7,05). В составе воды присутствует фтор – до 5 мг/дм³, кремнекислота (H₄SiO₄) – до 102 мг/дм³. Температура воды в родниках изменяется от 29,6 до 34,0 °C.

Холодные воды источника Манзарагши (левый берег р. Хойто-Гол) по составу гидрокарбонатные кальциево-натриевые с минерализацией 495 мг/дм³, pH 6,95, $t = 10,8^\circ\text{C}$. Содержание фтора и кремнекислоты (1,92 и 55 мг/дм³ соответственно) в два раза меньше, чем в воде термальных источников.

Поверхностные воды. Речные воды (рр. Сенца, Хойто-Гол, Аршан) по химическому составу гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 90-107 мг/дм³ и низким содержанием кремнекислоты – 4-8 мг/дм³. Фтор отсутствует. Температура воды в р. Сенца – 9 °C, р. Хойто-Гол – 10 °C, в р. Аршан – 5 °C. Состав поверхностных вод типичен для основных водотоков Окинского плато. Озерные воды (оз. Хухэ-Нур, правый борт долины р. Сенца) – гидрокарбонатные кальциевые, имеют минерализацию 125 мг/дм³ pH 7,85.

Атмосферные осадки. Дождевые воды бассейна имеют гидрокарбонатный (в долине р. Хойто-Гол) и хлоридно-гидрокарбонатный (в долине р. Сенца) анионный состав. Среди катионов содержание натрия и кальция примерно равно с небольшим превышением Na (до 37 %-экв.) и необычно высокой долей магния и калия (10-12 %-экв.). Минерализация дождевых вод невысокая – 22-25 мг/дм³, по величине pH

(5,95-6,40) воды слабокислые. Снеговые талые воды в долине р. Сенца немного более минерализованные, чем дождевая вода ($M = 31 \text{ мг/дм}^3$), по химическому составу – гидрокарбонатные кальциевые.

Микрокомпоненты в подземных и поверхностных водах

Для оценки содержания микрокомпонентов и выявления закономерностей их распределения определены концентрации 40 элементов в термах источника Хойто-Гол, в водах рек Сенца,

Жомболок, озера Хухэ-Нур и дождевой воде (в долине р. Сенца) (рис. 3).

Анализ содержания микрокомпонентов показал, что термальные воды Хойто-Гола в значительной степени обогащены Li, Be, B, Si, Mn, Ge, As, Br, Rb, Sr, Cs, Ba и W. Например, концентрация Li (517 мкг/дм^3) – более чем в 500 раз, W (33 мкг/дм^3) – более чем в 600 раз, Cs (79 мкг/дм^3) – более чем в 11000 раз превышает концентрацию этих элементов в речных и дождевых водах. А такими элементами, как: Al, P, Cu, Zn, Ag, термы воды обеднены в 3-45 раз.

Рис. 3. Содержание микрокомпонентов в подземных термальных водах, поверхностных водах и атмосферных осадках бассейна р. Сенца

Сумма *редкоземельных элементов* в термальных водах составляет $0,3061 \text{ мкг/дм}^3$, что в 1,5 раза больше, чем в воде р. Сенца и в 3,6 раз, чем в атмосферных осадках. Концентрация всех индивидуальных РЗЭ в водах термального источника превышает содержание РЗЭ и в поверхностных водах, и атмосферных осадках бассейна. Исключением является лантан, содержание которого только в воде р. Сенца больше почти в 2 раза его концентрации в подземных водах источника. Доля La от суммы РЗЭ равна 0,56 в воде р. Сенца и 0,21 – в термах. Для всех типов вод характерно обогащение легкими РЗЭ, сумма их составляет от 70 до 90 % от общей суммы РЗЭ

Содержание легких редкоземельных элементов в термальных подземных водах источника в 3 раза больше, чем в дождевой воде.

Спектры распределения РЗЭ в подземных и поверхностных водах имеют характерные особенности, которые выражаются в четкой европиевой аномалии и превалировании легких РЗЭ над тяжелыми (рис. 4).

Для нормализации составов РЗЭ в термальных водах использовался состав хондрита [9], поскольку формирование состава подземных вод источника происходило на значительной глубине под влиянием гипогенных процессов, а

для речных и дождевых вод нормализация выполнялась на состав РЗЭ в Северо-Американском Сланце [10]. Профили распределения РЗЭ в поверхностных и дождевых водах очень схожи между собой, для них также характерны четкая Λ-образная форма положительной аномалии европия, повышенная концентрация La (31-45 % от суммы РЗЭ) и легких элементов по сравнению с тяжелыми.

Источники растворенного вещества в термальных водах это вмещающие породы, через которые фильтруются первичные растворы (инфильтрационные воды или мантийные флюиды).

Повышенная концентрация ряда редких щелочей в термальных водах (лития, рубидия, цезия) обусловлена, вероятно, длительным и высокотемпературным взаимодействием гидротермальных растворов с магматическими кислыми породами, которые содержат сподумен, слюды, поллуцит и полевые шпаты. Вольфрам и марганец, возможно, поступали в подземные воды при выщелачивании шеелита, вольфрамит и гюбнерита в условиях замедленного водообмена [6]. Источниками стронция и бария могли быть изверженные, эффузивные, гипсоносные и глинисто-карбонатные породы, из которых горячими растворами выщелачиваются подвиж-

ные элементы. Высокое содержание бериллия, фтора, редких земель в термальных водах обеспечено, вероятно, близостью месторождения Ве

и полиметаллических руд в нижнем течении р. Хойто-Гол.

Рис. 4. Нормализованное распределение содержания РЗЭ в подземных термальных водах, поверхностных водах и дождевой воде бассейна р. Сенца

Сопоставление спектров распределения РЗЭ в подземных термальных и поверхностных водах позволяет предположить, что единообразие профилей РЗЭ (с положительной европиевой аномалией и дефицитом тяжелых элементов) связано с процессами смешения гидротермального флюида, поднимающегося из глубинных частей земной коры, с инфильтрующимися атмосферными осадками и поверхностными водами, а также с подземными водами водоносных горизонтов и комплексов, встречающихся на его пути к области разгрузки. Более высокая концентрация всех редкоземельных элементов в термальных водах, несомненно, является наследием первичного раствора, сформированного на глубине 4,3 км [1] при высокотемпературном взаимодействии с водовмещающими метаморфизованными сланцами и известняками PR [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подземные термальные воды в бассейне р. Сенца существенно обогащены Li, Be, B, Si, Mn, Ge, As, Br, Rb, Sr, Cs, Ba и W, а также легкими РЗЭ относительно поверхностных вод и дождевых вод. Повышенная концентрация ряда (Li, Rb, Cs, V, Mn, Ba, Sr, Be, F) микрокомпонентов в термах обусловлена длительным и высокотемпературным взаимодействием в системе «вода-порода», а единообразие профилей РЗЭ в различных типах вод, возможно, связано с процессами смешения гидротермальных флюидов с холодными подземными и поверхностными водами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-45-380002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бадминов П.С., Иванов А.В., Писарский Б.И., Оргильянов А.И. Окинская гидротермальная система (Восточный Саян). Вулканология и сейсмология, 2013, №4. – С. 27–39.
2. Борисенко И.М., Замана Л.В. Минеральные воды Бурятской АССР. – Улан-Удэ, 1978. – 163 с.
3. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 360 с.
4. Геокриологическая карта СССР. Москва: МГУ, 1996.
5. Карта полезных ископаемых СССР, масштаб 1:200000. - М.: Глав.упр.геодез. и картогр., 1966.
6. Плюснин А.М., Чернявский М.К., Посохов В.Ф. Условия формирования гидротерм Баргузинского Прибайкалья по данным микроэлементного и изотопного состава. Геохимия, 2008. № 10, с. 1063-1072.
7. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод. - М.: Недра, 1970. - 488 с.
8. Соловьева Л.Н. Морфология криолитозоны Саяно-Байкальской области (на примере Бурятской АССР). – Новосибирск: Наука, 1976. – 126 с.
9. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies // Rare earth element geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63-114 (Developments in Geochemistry; 2).
10. Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The North American shale composite: its compilation, major and trace element characteristics// Geochim et Cosmochim Acta. 1984. Vol. 48. N 12. P.2469-2482.