ГЕОХИМИЯ АЗОТНЫХ НИЗКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД МЕСТО-РОЖДЕНИЯ ХОДЖА-ОБИ-ГАРМ (ПАМИРО-АЛАЙСКАЯ ГОРНАЯ СИСТЕМА)

Демонова А.Ю.¹, Харитонов Н.А.^{1,2}, Челноков Г.А.², Салихов Ф.С.³

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, E-mail: danna1985@yandex.ru;

²Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия;

³Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Душанбе, Таджикистан, E-mail: ffaarriidd@mail.ru

АННОТАЦИЯ: В данной статье рассмотрены особенности распределения макро- и микрокомпонентов, а также радиоактивных элементов радона, урана и тория в азотных низкоминерализованных термальных водах месторождения Ходжа-Оби-Гарм.

1. ВВЕДЕНИЕ

Химический состав подземных вод уникального месторождения азотных термальных вод Ходжа-Оби-Гарм (Памиро-Алайская горная система, Таджикистан) достаточно детально изучался при решении различных прикладных задач ещё в прошлом столетии [2, 7], после чего планомерных работ больше не проводилось.

Цель данного исследования – это показать особенности распределения в термальных подземных водах данного месторождения макро- и микрокомпонентного состава, а также весьма важных радиоактивных элементов радона, урана и тория. Все эти компоненты были получены с применением новейшего аналитического оборудования. Анализ полученных данных был выполнен с учетом опыта отечественных и зарубежных ученых-геохимиков.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Месторождение азотных низкоминерализованных термальных вод Ходжа-Оби-Гарм расположено в 48 км к северу от г. Душанбе на территории Таджикистана в пределах южных отрогов Гиссарского хребта Памиро-Алайской горной системы. Одноименный курорт находится на высоте +1740-1960 метров над уровнем моря в верховьях р. Ходжа-Оби-Гарм левого притока р. Варзоб. В геологическом строении принимают участие, в основном, интрузивные породы, представленные гранитами, гранодиоритами, гранит-порфирами среднего и нижнего карбона. Интрузии перекрыты чехлом четвертичных аллювиально-пролювиальных отложений. В юго-западной части района исследований палеозойские образования перекрыты нижнемеловыми осадками, представленные песчаниками и глинами. В геолого-структурном отношении месторождение расположено на северном крыле Ходжа-

Оби-Гармской грабен-синклинали, осложненного сбросами [2, 3, 7].

Гидрогеологические условия месторождения чрезвычайно сложные, которые определяются геолого-структурными особенностями горного региона. По условиям залегания и циркуляции – это трещинно-жильные термальные воды, приуроченные к мощной зоне дробления гранитов, связанной с Ходжа-Оби-Гармским разломом и более молодыми опережающими разломами. В связи с этим питание трещинно-жильных вод вероятнее всего инфильтрационное. Поверхностные воды в процессе фильтрации по разломам прогреваются, изменяют свой химический состав при взаимодействии с водовмещающими породами и разгружаются в рыхлые четвертичные отложения, формируя термальное месторождение [2, 3, 7].

3. МЕТОДЫ

Приведенные в данной работе результаты химических анализов азотных низкоминерализованных вод выполнены химиками-аналитиками в аналитических подразделениях ДВГИ и ДОО ДВО РАН. Основные катионы и анионы определялись методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10AVp, SHIMADZU), микро и рассеянные элементы анализировались с использованием плазменно-оптической эмиссионной спектрометрии (ICP-AES, Plasmaquant-110) и индуктивной плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS, Agilent 7500c). Для определения изотопных отношений $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и D/H в образцах воды был использован высокотемпературный конвертер TC/EA (ThermoQuest, Bremen, Germany) соединенный с изотопным масс-спектрометром MAT 253 (ThermoQuest, Bremen, Germany).

Измерение содержания радиоактивного изотопа водорода (^3H) было выполнено в ТОИ ДВО

РАН на низкофоновом жидкостинтилляционном спектрометре QUANTULUS – 1220 с предварительным электролитическим обогащением.

Для более полного понимания процессов, происходящих в системе вода-порода-газ были использованы компьютерные программы: AQUACHEM 5.1 (User's guide..., 2006), WATERQ4F (User's manual..., 1991), PHREEQC (Parkhurst, 1995) [3].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Минеральные воды термального месторождения Ходжа-Оби-Гарм по химическому составу относятся к хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатным натриево-кремнистым. Обращает на себя внимание исключительно низкая общая минерализация 300-400 мг/л, высокая щелочность pH до 9,18 и высокая температура (63,5-93°C). Во многих скважинах среди анионов превалирует HCO_3^- (CO_3^{2-}) ион, но в некоторых скважинах - SO_4^{2-} . Основным катионом является Na^{2+} содержание которого достигает до 100 мг/л, в то время как содержание Ca^{2+} колеблется от 6 до 15 мг/л, K^+ не более 9 мг/л и Mg^{2+} – до 1 мг/л.

Помимо карбонатных ионов (HCO_3^- и CO_3^{2-}) в достаточно высоких количествах присутствуют хлор (до 55 мг/л) и сульфат-ион (до 40 мг/л). Наличие борной кислоты составляет (H_3BO_3) – 6 мг/л. Исследуемые термы богаты фтором, концентрации которого достигают 18 мг/л. Отношение Cl/F составляет 3,18. Содержание фтора в исследованных термах достаточно хорошо коррелирует с карбонатными ионами, но плохо — с сульфатами. Кроме того, наблюдается положительная корреляция содержаний F с содержанием SiO_2 и температурой. Это, возможно, свидетельствует об идентичности источников фтора, кремния и натрия. Наиболее вероятно, данные компоненты поступают в водный раствор в результате гидролиза алюмосиликатных минералов. И чем более длительным является растворение материнского минерала, тем больше фтора поступает в водный раствор. К тому же наблюдается достаточно высокое содержание кремнекислоты, которое составляет от 85,6 до 147 мг/л. Содержание углекислоты свободной (CO_2) варьирует от 2 до 6 мг/л, а сероводорода (H_2S) содержится 3,54 мг/л. Установлена практически прямая зависимость между содержанием в растворе натрия и метакремниевой кислоты, что также говорит об одном ми-

неральном источнике для данных компонентов (предположительно это натриевый полевой шпат – альбит, основной породообразующий минерал водовмещающих горных пород).

Расчет форм нахождения основных ионов в растворе показал, что катионы до 99% находятся в ионной форме [3].

По микрокомпонентному составу термальных вод среди сидерофильной группы элементов значимые концентрации в водах имеют железо (68,8-139,6 мкг/л), марганец (1,18-7,04 мкг/л), кобальт (0,013-0,039 мкг/л), никель (0,07-0,44 мкг/л). Среди халькофильных элементов особо выделены такие элементы как медь (0,4-2,2 мкг/л), цинк (0,8-2,3 мкг/л), галлий (3,9-7,2 мкг/л), мышьяк (4,6-5,34 мкг/л), селен (0,04-0,199 мкг/л), серебро (0,002-0,068 мкг/л), кадмий (0,029-0,047 мкг/л) и свинец (0,12-5,49 мкг/л). Среди литофильных элементов очень высокие концентрации обнаружены для лития (0,9-1,03 мг/л), рубидия (107,3-122,6 мкг/л), стронция (151,7-169,2 мкг/л), цезия (204-231 мкг/л) и алюминия (0,48-126,5 мкг/л). Концентрации марганца (1,18-7,04 мкг/л), а ванадия, хрома и бария очень низкие и не превышают единичных значений в мкг/л. Содержание бора невелико, от 0,31 до 0,34 мг/л. Соотношение B/Cl составляет 0,006, что практически в четыре раза ниже, чем бор-хлорное отношение в морской воде (где оно равно $2,4 \cdot 10^4$). Это практически на порядок ниже чем в углекислых водах Памира и почти совпадает с показателем B/Cl (0,04-0,007) в термальных источниках областей активного вулканизма. Соотношение Cl/Br равно 257, что очень близко по значению к морским водам (293). Соотношение Li:Rb:Cs составляет 100:12:23, это несколько выше чем в термальных водах Камчатки Li:Rb:Cs=100:9:10 [3].

Расчет индексов насыщения минеральных фаз при различных температурах (40-200 °C) указывает на то, что глубинные термальные воды недонасыщены по отношению к кварцевым модификациям и карбонатным фазам. Однако, при подъеме вод к поверхности земли происходит снижение температуры и давления вод, начинают отлагаться вторичные минеральные фазы (кальцит и кварцевые минералы) [3].

Термальные воды месторождения Ходжа-Оби-Гарм обогащены радоном – его концентрация составляет 22 нКи/л (814 Бк/л), что характеризуются слабой радиоактивностью. Установлено, что накопление радона в термах зависит как

от типа водовмещающих пород, так и от эманулирующей способности этих пород, размеров трещин и скорости движения самих вод.

Среди радиоактивных элементов в данных термах также были выявлены уран и торий. Концентрации урана изменяются от 0,064 до 0,313 мкг/л. Тория содержится от 0,002 до 0,036 мкг/л. Вероятным объяснением содержания урана и тория в подземных водах терм Гиссарского хребта является периодическая активизация сейсмической деятельности в регионе. Таджикистан, как известно, считается одной из самых сейсмически активных территорий земного шара и ежегодно на территории республики и сопредельных территориях могут регистрироваться около 5 000 землетрясений различной природы и силы [1]. Как показали полевые наблюдения, разгрузка терм происходит по открытым разрывным нарушениям сбросового типа. В их пределах продолжаются не только деформации и подвижки горных пород, которые фиксируются сейсмологами, но и достаточно мощные землетрясения [1]. Однозначно установлено, что в период сейсмических событий малой амплитуды, происходят сотрясения массивов горных пород. В ранее образовавшихся трещинах и разломах разных масштабов и направлений, из глубинных слоев литосферы помимо газов поднимаются ртуть, фтор, мышьяк, сурьма, литий, уран и другие элементы [4].

Полученные нами данные показывают, что содержание 18-кислорода составляет -13,1 ‰ и остается стабильным от скважины к скважине, в то время как содержание дейтерия находится в диапазоне значений от -79,8 до -84,2 ‰. В целом, изотопный состав близко ложится вдоль глобальной линии метеорных вод (линия Крейга), что несомненно свидетельствует об инфильтрационном происхождении данных вод. Также не зафиксированы сколь-нибудь значительные отклонения от линии метеорных вод. Это говорит о масштабном процессе взаимодействия метеорных вод с водовмещающими породами. Измеренные значения трития в термальных водах месторождения Ходжа-Оби-Гарм очень низкие, всего 0,8 тритиевых единиц (ТЕ) или 0,09 Бк/кг, причем ошибка определения составляет $\pm 0,3$ ТЕ. Столь низкие значения содержания изотопа трития в данных водах могут свидетельствовать о достаточно долгом периоде водообмена этих вод, и о практически полном отсутствии смешивания с поверхностными водами грунтового водоносного горизонта [3].

При интерпретации изотопных данных необходимо учитывать, что движение подземных вод в горных породах на больших глубинах (2-3 км и более), где формируются азотные термы, медленное и питание терм происходило не в современное время, а десятки, возможно, и сотни тысяч лет назад. Не исключено поэтому, что источником современных азотных терм были воды ледниковых отложений, изотопный состав которых был значительно легче [6].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что по химическому составу термальные воды месторождения Ходжа-Оби-Гарм относятся к низкоминерализованным (до 450 мг/л) хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатным натриево-кремнистым водам. Воды обогащены фтором (до 18 мг/л), литием (до 1,03 мкг/л), рубидием (до 123 мкг/л), стронцием (до 170 мкг/л), цезием (около 205-230 мкг/л), галлием (7,2 мкг/л), свинцом (до 5,5 мкг/л), мышьяком (до 5,7 мкг/л), радоном (до 815 Бк/л) и в небольшой степени ураном (до 0,313 мкг/л) и торием (0,036 мкг/л).

По условиям формирования изученные термальные воды принадлежат к трещинно-жильным водам, циркулирующим в пределах массивных интрузий, локализованных в пределах зоны альпийской складчатости. Естественные выходы данных азотных терм контролируются, прежде всего, тектоническими разрывами. Обнаруженные выходы вод тяготеют к крупному региональному разлому (Ходжа-Оби-Гармский разлом) [2, 3, 5, 7]. По-видимому, сложная сеть тектонической трещиноватости, которая характерна для данных водовмещающих гранитных (гранитоидных) пород и сейсмическая активность региона являются важнейшими факторами, определяющими накопление подземных вод на глубине и их последующий выход на поверхность. При этом только «открытые» и, соответственно, более водопроницаемые новейшие тектонические разломы создают предпосылки для быстрого подъема с больших глубин и выхода на земную поверхность высокотермальных вод.

При движении из глубин литосферы к поверхности термальные воды интенсивно взаимодействуют с водовмещающими породами и растворяют их. Во время данного процесса происходит интенсивное выщелачивание многих макро и микрокомпонентов (La, Rb, Sr, Zr, Ba, Li и др.) и концентрирование их в подзем-

ных водах. Расчет индексов насыщения минералов, позволяет предположить один источник для макро и микрокомпонентов термальных вод, а именно растворение породообразующих алюмосиликатных минералов. В результате реакций гидролиза в условиях низких парциальных давлений углекислого газа (CO₂) происходит рост щелочности (pH) термальных вод месторождения Ходжа-Оби-Гарм. В результате сейсмической активности региона, термы обогащаются радиоактивными элементами, такими как радон, уран и торий.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №18-05-00445.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаев А.М., Ишук А.Р., Негматулаев С.Х. Сейсмические условия территории Таджикистана. – Душанбе, 2008. – 60 с.

2. Баратов Р.Б. Геология и петрография района термальных источников Ходжа-Оби-Гарм. Отчет Ходжа-Оби-Гармской геологической партии по работам 1946 г. – Душанбе, 1946.

3. Демонова А.Ю., Харитонов Н.А., Корзун А.В., Сардорев А.И., Челноков Г.А. Химический состав азотных термальных вод бальнеоклиматического курорта Ходжа-Оби-Гарм (Таджикистан) // Вестн. Моск.ун-та. Сер. 4. Геология. 2017. – № 5. – С. 77-84.

4. Кац В.Е. Природная радиоактивность геологической среды // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы II международной конференции. – Томск, 2004.

5. Разыков Б.Х. Особенности размещения и экономическая оценка минеральных вод Таджикистана. – Душанбе: Дониш, 2007. – 99 с.

6. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. – М.: Наука, 1983. – 277 с.

7. Шапар А.А. и Туев В.Г. Результаты разведочных гидрогеологических работ на месторождении термальных вод Ходжа-Оби-Гарм. (Отчет Ходжа-Оби-Гармской партии за 1963-67 гг.). – Душанбе, 1967.

GEOCHEMISTRY OF LOW-MINERALIZED NITROGEN THERMAL WATERS OF THE KHOJA-Obi-GARM FIELD (PAMIR-ALAI MOUNTAIN SYSTEM)

Demonova A.Yu.¹, Kharitonova N.A.^{1,2}, Chelnokov G.A.², Salikhov F.S.³

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, E-mail: danna1985@yandex.ru

²Far Eastern Geological Institute of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

³Branch of Lomonosov Moscow State University, Dushanbe, Tajikistan, E-mail: ffaarriidd@mail.ru

ABSTRACT: In this article, the features of the distribution of macro- and microcomponents, as well as radioactive elements of radon, uranium and thorium in the nitrogen-poorly mineralized thermal waters of the Khoja-Obi-Garm field are considered.