

УДК 553.7 (235.211)

А.Ю. Бычков¹, Т.А. Киреева², Ф.С. Салихов³**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД
УГЛЕКИСЛОГО ИСТОЧНИКА ФИРУЗА МГУ (СЕВЕРНЫЙ ПАМИР)⁴**

Рассмотрены геологические условия локализации и химический состав вод углекислого источника Фируза МГУ, открытого в 2015 г. на Северном Памире. Приводится подробный микрокомпонентный состав вод, полученный методом ICP-MS, и результаты его сравнения с содержанием аналогичных микрокомпонентов в водах углекислых источников Камчатки и Дальнего Востока. На основе величины отношения В:Сl и соотношения К:Li:Rb:Cs, близкой к аналогичным отношениям для хлоридно-натриевых терм зон активного вулканизма, сделан вывод о глубинном происхождении воды источника. Расчет температуры формирования вод, полученных по методу Na–K геотермометра, показал значение 147,3 °С, что позволяет предположить формирование вод источника на глубине около 5 км.

Ключевые слова: углекислый источник, микрокомпоненты подземных вод, хлоридно-натриевые термы, геотермометр, Северный Памир.

We consider the geological conditions of the location and the chemical composition of water carbon source Firuza MGU opened in 2015 in the North Pamirs. A detailed microcomponent composition of water produced by ICP-MS, and compares it with similar content of microcomponents in waters carbonic sources of Kamchatka and the Far East. On the basis of the ratio В:Сl and the ratio of К:Li:Rb:Cs, close to the same relationship to chloride-sodic term areas of active volcanism, concluded that the origin of the deep water source. The calculation of the temperature of formation water obtained by the Na–K geothermometer method showed the importance 147,3 °С, suggesting the formation of a source of water at a depth of about 5 km.

Key words: carbonate springs, microcomponents of underground water, sodium chloride thermal water, geothermometer, North Pamir.

Введение. В Центральном Таджикистане и на Памире выходы углекислых вод достаточно многочисленны и приурочены к разнообразным породам — магматическим, метаморфическим и осадочным. Холодные углекислые воды неглубокой циркуляции, как правило, связаны с второстепенными мелкими разломами. Теплые и горячие углекислые воды (известные только на Памире) приурочены к крупным разломам глубокого заложения. Температурные особенности этих вод ранее позволяли предполагать, что они циркулируют на глубине около 1 км. Несмотря на то что они приурочены к осадочным и метаморфическим породам, их химический состав примерно одинаков: они гидрокарбонатно-хлоридно-натриевые, относятся к содовому типу. Наиболее известный и крупный источник (групповые выходы вод) до последнего времени — месторождение углекислых вод Гарм-Чашма, расположенное в юго-западной части Памира, на западном склоне Шах-Дарьинского хребта в среднем течении р. Гарм-Чашма (приток р. Пяндж). Источник Фируза МГУ, открытый

летом 2015 г., превосходит его по величине. Для вод углекислых источников Памира выполнен значительный объем определений состава макрокомпонентов и содержания растворенных газов, однако их микрокомпонентный состав оставался практически неизученным. Поэтому основной задачей исследования было исследование содержания микрокомпонентов в водах нового углекислого источника Памира и его сравнение с содержанием микрокомпонентов в водах термальных источников других регионов.

Геологические условия. Источник минерализованных вод Фируза МГУ расположен на Северном Памире, в долине р. Баландкиик, на левом борту р. Джайловкумсай, в месте слияния ее с р. Баландкиик (рис. 1), на высоте 3925 м. Долина р. Баландкиик — одно из самых труднодоступных мест Северного Памира. Именно труднодоступность этого района и позволяет обнаруживать новые геологические и географические объекты вплоть до настоящего времени, несмотря на общую достаточно изученность Памира. В результате полевых

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра геохимии, профессор, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* andrewbychkov@rambler.ru.

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, кафедра гидрогеологии, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* ta_kireeva@mail.ru.

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, филиал в г. Душанбе, доцент, канд. геол.-минерал. н.; *e-mail:* ffaarriidd@mail.ru.

⁴ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00029).

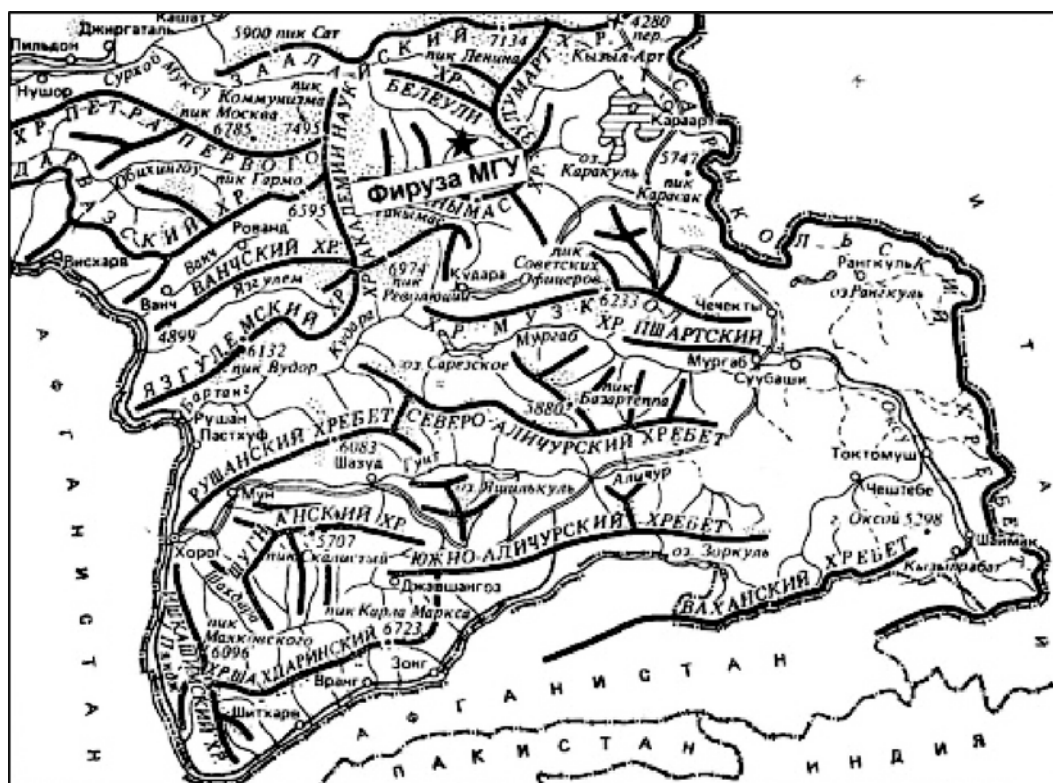


Рис. 1. Схема расположения источника

Таблица 1

Макрокомпонентный состав вод некоторых углекислых источников Памира и Дальнего Востока

Компоненты, мг/л	Источник Фируза МГУ	Источник Гарм-Чашма*	Дальний Восток, месторождение Горноводное, скважина 1**	Дальний Восток, месторождение Шмаковка, участок Медвежий**	Камчатка, кальдера Узон, Восточное термальное поле
CO ₂ св	145,2	285,0			
Ca ⁺²	160,2	157,6	303,0	272,0	48,0
Mg ⁺²	19,2	81,6	17,90	118,0	6,0
Na+K	118,22	682,4	61,03	21,4	1185
SO ₄ ²⁻	54,72	171,9	27,2	1,2	118,0
Cl ⁻	113,6	400,0	3,5	1,5	1696
HCO ₃ ⁻	634,4	1692,1	1158,0	1148,0	89,0
M, мг/л	1100,34	3470,6	1660,0	1562	4040
pH	6,7	6,8	7,5	6,01	7,7
Формула ионного состава	HCO ₃ 70 Cl 22 SO ₄ 8 Ca54 (Na+K)35 Mg11	HCO ₃ 65 Cl 27 SO ₄ 8 (Na+K)67 Ca18 Mg15	HCO ₃ 97 SO ₄ 3 Ca79 (Na+K)14 Mg7	HCO ₃ 100 Ca56 Mg40 (Na+K)4	Cl 95 SO ₄ 3 HCO ₃ 2 (Na+K)95 Ca4 Mg1

* Содержание компонентов по [Дислер, 1977], ** содержание компонентов по [Харитоновна, 2013].

Таблица 2

Микрокомпонентный состав (мг/л) некоторых углекислых источников Памира и Дальнего Востока

Ис-точник	K	As·10 ⁻³	Zn·10 ⁻³	Cu	Mn	U·10 ⁻³	Pb	Ba	Li	Rb·10 ⁻³	Cs·10 ⁻³	Ag·10 ⁻³	Mo·10 ⁻³	Sr	B	Br	B:Br	B:Cl
1	5,8	н/о	5	0,7	н/о	2,4	0,1	25	0,2	26	31	0,6	12	0,8	1,1	0,05	22	0,01
2		н/о	н/о	0,002											5,0	1,2	4,2	0,01
3		2,9	23,7	0,4	4,14			0,13	0,26		11,7		3	1,93	0,02			0,006
4	3,4			0,18	0,30		0,003		0,16					1,4	0,1			0,07
5	148	3,4	0,004	0,06	1,4	н/о	0,001	0,33	7,8	768	696	н/о	11	0,3	51,7			0,05

Примечания. 1 — Памир, источник Фируза МГУ, T = 14 °C, pH = 6,7; 2 — Памир, источник Гарм-Чашма, T = 60 °C, pH = 6,8; 3 — Дальний Восток, месторождение Горноводное, скважина 1, T = 7,5 °C, pH = 7,5; 4 — Дальний Восток, месторождение Шмаковка, участок Медвежий, T = 8–10 °C, pH = 5–6; 5 — Камчатка, кальдера Узон, Восточное термальное поле, II участок, скважина К-1, T = 98,5 °C, pH = 7,7.

работ 2015 г. (геологический отряд филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Душанбе), в верхнем течении р. Баландкик выявлен ранее неизвестный источник минерализованных вод.

Источник назван Фируза МГУ (Бирюза МГУ) в связи с оттенком цвета и в честь МГУ имени М.В. Ломоносова, имеющего филиал в г. Душанбе. Источник представляет собой выход слабоминерализованных вод в аллювиальных отложениях (переотложенные моренные образования) на левом борту поймы р. Джайловкумсай. Устье источника — углубление подковообразной формы размером 5×2 м и глубиной 1,4 м, заполненное прозрачной водой. Температура источника невысокая (+14 °С), но все же теплее, чем в соседствующих с ним реках Джайловкумсай и Баландкик на 6 °С. Вкус воды пресный, со слабоуловимой карбонатной солоноватостью, дебит 7 л/с.

Изливающаяся из устья источника вода веерообразно растекается по широкой дуге системой неглубоких ступенчатых бассейнов, сложенных известковистыми туфами. Эта система бассейнов образует линейно вытянутую площадь развития известковистых туфов длиной около 130 м и максимальной шириной до 65 м с общей высотой отложений 14 м. Все они образуют каскады и природные бассейны, заполненные чистой водой, как правило, неглубокие (до 30 см), различных конфигураций и размеров (рис. 2) [Салихов, 2015]. Площадь развития известковистых туфов и бассейнов около 5000 м², что позволяет считать источник Фируза МГУ самым крупным по площади развития травертинов минеральным источником в Таджикистане [Чуршина, 1992].



Рис. 2. Фото естественных «ванн» из известковистых туфов

Методы исследования. Анализ химического состава вод углекислого источника Фируза МГУ выполнен на кафедрах гидрогеологии и геохимии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Определение содержания макрокомпонентов (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^-) проводилось методами объемного титрования по стандартным методикам. Определение микрокомпонентного состава выполнено методом ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения с ионизацией в индуктивно-связанной плазме «ELEMENT2» на

кафедре геохимии. Пределы обнаружения элементов при использовании этого метода составляют 0,01 мкг/л. Результаты исследований приведены в табл. 1 и 2.

Результаты исследования и их обсуждение.

По величине общей минерализации (1,1 г/л) и макрокомпонентному составу воды источника Фируза МГУ относятся к маломинерализованным гидрокарбонатно-кальциевым, значение pH нейтральное (6,7). В качестве сравнения в табл. 1 приведены составы вод самого известного углекислого источника Памира — Гарм-Чашма, углекислых источников некоторых месторождений минеральных вод Дальнего Востока и хлоридно-натриевой воды Камчатки, соответствующей глубинному источнику. Воды источника Гарм-Чашма более минерализованы (3,5 г/л), а по составу гидрокарбонатно-натриевые. Отметим, что на месторождении Гарм-Чашма есть выходы менее минерализованных углекислых вод (0,5–1,5 г/л) и по соотношению макрокомпонентов более близких к источнику Фируза МГУ, т.е. гидрокарбонатно-кальциевых. Однако такой состав выбран потому, что только для него приведено содержание некоторых микрокомпонентов.

Сравнительный анализ (табл. 2) показывает, что в источнике Фируза МГУ по сравнению с источниками углекислых вод Дальнего Востока больше содержание бария (более чем в 10 раз), цезия (более чем в 2 раза), молибдена (в 4 раза), бора (более чем в 10 раз), свинца (в 100 раз). Вместе с тем содержание цинка, марганца, стронция ниже. Разницу в содержании металлов можно объяснить особенностями вмещающих пород, это требует дальнейших исследований

В соответствии с систематизацией природных вод по степени их ураноносности [Токарев, 1956] воды зоны активного водообмена содержат в среднем 5,0 мкг/л U, зоны затрудненного водообмена — 2, воды тектонических трещин — 4,0 мкг/л. Следовательно, содержание урана в водах источника Фируза МГУ, равное 2,4 мкг/л, близко к значению для вод зоны затрудненного водообмена.

Отметим, что в водах источника Фируза МГУ наблюдается низкая концентрация As, хотя его повышенное содержание очень характерно для углекислых термальных вод. Это может объясняться существенно кальциевым составом вод источника, так как мышьяк мигрирует в виде анионов мышьяковой и мышьяковистой кислот, кальциевые соли которых малорастворимы, что вызывает его отложение совместно с кальцитом.

Содержание же K и Li очень близко к таковому в источниках Памира и Дальнего Востока. Вместе с тем повышенные значения содержаний Cs, Ba и особенно В свидетельствуют о глубинных условиях формирования вод источника Фируза МГУ. Известно, что для высокотемпературных гидротерм

районов современной вулканической деятельности характерно резко повышенное содержание редких щелочей (литий, рубидий, цезий) — до $n \cdot 1,0$ мг/л, а бора до $n \cdot 10$ мг/л при общей минерализации 1–8 мг/л [Арсанова, 1974]. При этом отношение В:Сl (увеличение которого вулканологи рассматривают в качестве признака формирования вод в высокотемпературных условиях из-за привноса бора глубинными эндогенными флюидами) в источниках Памира (Фируза МГУ и Гарм-Чашма) равно 0,01. (Для сравнения, в пластовых водах зон затрудненного водообмена этот показатель составляет около 0,0003–0,0007, т.е. на 2 порядка ниже, в термальных источниках областей активного вулканизма его значения изменяются в пределах 0,04–0,007 [Иванов, 1974], а в газопаровых выбросах действующих вулканов увеличивается до 0,1 [Трухин, 2003]).

Таким образом, по величине отношения В:Сl воды источника Фируза МГУ близки к термам областей активного вулканизма, и температура их формирования не может быть ниже 100 °С. В водах углекислых источников Дальнего Востока (табл. 2) этот показатель иногда даже выше, чем для источников Памира, но это нельзя считать объективным критерием, так как в этих водах крайне мало хлора и в результате отношение явно завышено.

Более объективным критерием следует считать отношение В:Вг [Киреева, 2009]. Содержание брома в водах источника Фируза МГУ составляет 0,05 мг/л, соответственно отношение В:Вг равно 22 (табл. 2), что близко к аналогичным значениям для высокотемпературных гидротерм (19–97) и резко отличается от отношения В:Вг для океанической воды, седиментогенных хлоридных пластовых рассолов и рассолов поверхностного испарения, в которых оно составляет 0,1–0,3 [Киреева, 2015]. Для источника Гарм-Чашма отношение В:Вг равно 4,2, это меньше, чем для источника Фируза, но имеет такой же порядок, как в аналогичных глубинных гидротермах. Таким образом, исходя из значений отношений В:Вг и В:Сl в источнике Фируза МГУ, близка к этим показателям для глубинных гидротерм, можно предположить глубинное формирование вод источника в высокотемпературных условиях.

Наиболее глубинными водами в областях современного вулканизма считаются хлоридно-натриевые воды, генетически связанные с другими типами вод — сульфатными и гидрокарбонатными [Пилипенко, 1976]. Для хлоридно-натриевых вод Камчатки характерна высокая концентрация лития, рубидия, цезия, в табл. 1 приведен анализ из кальдеры Узон (Восточное термальное поле, скважина К-4). Соотношение щелочных металлов в них составляет (в пересчете на 100 частей калия) К:Li:Rb:Cs=100:5,3:0,52:0,47. Для источника Фируза МГУ это соотношение оказалось близким — К:Li:Rb:Cs=100:3,5:0,45:0,53, за исключением несколько пониженного содержания лития. Такие

соотношения редких щелочей подтверждают глубинное происхождение воды источника.

Для большей определенности необходимо определить температуру формирования этих вод, что возможно с применением метода геотермометра, т.е. определения температуры формирования растворов по соотношению значений концентрации некоторых компонентов. Наиболее известен Na–K геотермометр, основанный на отношении концентрации ионов натрия и калия, которое в основном определяется температурой растворов и не зависит от разбавления [Таран, 1988]. Рассчитать этот показатель можно по формуле [Fournier, 1981]:

$$T, \text{ } ^\circ\text{C} = 933 / (0,993 + \lg[\text{Na}^+]/[\text{K}^+]) - 273,$$

где $[\text{Na}^+]$ и $[\text{K}^+]$ — концентрация компонентов, мг/кг.

Для исследуемых вод при значениях концентрации Na^+ и K^+ , равных 112,4 и 5,8 мг/л соответственно, рассчитанная температура формирования вод равна 147,3 °С. Таким образом, при среднем значении геотермического градиента (3 °С/100 м) глубина формирования вод углекислого источника должна составлять 4,9 км.

Выводы. 1. По величине общей минерализации (1,1 г/л) и макрокомпонентному составу воды источника Фируза МГУ относятся к маломинерализованным гидрокарбонатно-кальциевым, значение рН нейтральное (6,7).

2. В источнике Фируза МГУ содержание бария (более чем в 10 раз), цезия (более чем в 2 раза), молибдена (в 4 раза), бора (более чем в 10 раз), свинца (в 100 раз) больше, чем в некоторых источниках углекислых вод Дальнего Востока и хлоридно-натриевых термах Камчатки. Вместе с тем содержание цинка, марганца, стронция понижено, что можно объяснить особенностями вмещающих пород.

3. Отмечена аномально низкая для углекислых вод концентрация мышьяка в связи с существенно кальциевым составом вод источника Фируза МГУ.

4. Содержание урана, равное 2,4 мкг/л, в водах источника Фируза МГУ близко к таковому для вод затрудненного водообмена.

5. Значение отношения В:Сl в водах источника составляет 0,01, что на 2 порядка больше, чем в водах затрудненного водообмена, и близко к значениям для вод областей активного вулканизма.

6. Соотношение К:Li:Rb:Cs для вод источника Фируза МГУ равно 100:3,5:0,45:0,53, что близко к аналогичным отношениям для хлоридно-натриевых терм зон активного вулканизма и подтверждает глубинное происхождение воды источника.

7. Расчет температуры формирования вод, выполненный по Na–K-геотермометру, показал значение 147,3 °С. Таким образом, с учетом среднего геотермического градиента, можно предположить, что воды источника сформировались на глубине 4,9 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арсанова Г.И.* Редкие щелочи в термальных водах вулканических областей. Новосибирск: Наука, 1974. 110 с.
- Дислер В.Н.* Углекислые воды Тянь-Шаня и Памира // Тр. ЦНИИ курортологии и физиотерапии. Т. 34. Вопросы гидрогеологии минеральных вод. М., 1977. С. 192–218.
- Иванов Б.В.* Современная гидротермальная деятельность в районе вулканов Карымской группы // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука, 1974. С. 32–38.
- Киреева Т.А.* К методике оценки эндогенной составляющей глубоких подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. № 1. 2009. С. 54–57.
- Киреева Т.А.* Гидрогеохимические особенности инверсионных вод, в связи с нефтеносностью глубоких горизонтов осадочного чехла // Тез. докл. 2-й Всеросс. научн. конф. с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Владивосток, 6–11 сентября 2015 г. Владивосток, 2015.
- Пилипенко Г.Ф.* Парогидротермы кальдеры Узон // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 179–211.
- Салихов Ф.С.* Минеральный источник в долине р. Баландкиик (Северный Памир) // Докл. АН РТ. 2015. Т. 58, № 4. С. 338–342.
- Таран Ю.А.* Геохимия геотермальных газов. М.: Наука, 1988. 168 с.
- Трухин Ю.П.* Геохимия современных геотермальных процессов и перспективные геотехнологии. М.: Наука, 2003. 376 с.
- Харитонова Н.А.* Углекислые минеральные воды северо-востока Азии: происхождение и эволюция: Автореф. докт. дисс. Владивосток, 2013.
- Чуришина Н.М.* Минеральные воды Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1992. 186 с.

Поступила в редакцию
13.03.2016