

УДК 550.461

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД БАЙКАЛЬСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

¹Зиппа Е.В., ^{1,2}Пургина Д.В., ^{1,2}Дребот В.В.

¹Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Томск, e-mail: zev-92@mail.ru;

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

В статье представлены новые данные о химическом составе и температурном режиме термальных вод Республики Бурятия. Показано, что термальные воды являются пресными (минерализация не превышает 500 мг/л), слабощелочными и щелочными (pH от 8,2 до 9,7). Исследуемые термы по своему химическому составу относятся преимущественно к $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ и $\text{SO}_4\text{-Na}$ типам, однако встречаются термы $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na}$ типа. Оценка температур на глубине циркуляции была произведена с помощью Si- и Na/K-геотермометров. Согласно полученным результатам расчетов по Si-геотермометру при адиабатическом охлаждении температура терм на глубине циркуляции составляет от 98 до 143 °С, по Si-геотермометру при кондуктивном охлаждении – от 97 до 150 °С. Температуры терм на глубине, рассчитанные по Na/K-геотермометрам, варьируют от 74 до 173 °С. С помощью построения диаграммы Гиггенбаха для термальных вод исследуемого региона установлено, что применение Na/K-геотермометра возможно только для источников Сеюйский и Змеиный. Кроме этого, в рамках настоящего исследования проведена оценка степени смешения термальных вод и холодных подземных вод по мере миграции первых к зоне разгрузки. Оценка степени смешения терм произведена с помощью построения модели смешения Si-энтальпии, которая показывает, что большая часть термальных вод подвержена смешению с холодными водами.

Ключевые слова: термальные воды, химический состав, глубина циркуляции, глубинные температуры, геотермометры

CHEMICAL COMPOSITION AND GEOTHERMAL REGIME OF THERMAL WATER OF THE BAIKAL FOLDED REGION (REPUBLIC OF BURYATIA)

¹Zippa E.V., ^{1,2}Purgina D.V., ^{1,2}Drebot V.V.

¹Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics in the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, e-mail: zev-92@mail.ru

²National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

The manuscript presents new data on the chemical composition and temperature regime of the thermal waters of the Republic of Buryatia. It is shown that thermal waters are fresh (mineralization does not exceed 500 mg/l), weakly alkaline and alkaline (pH from 8.2 to 9.7). In terms of their chemical composition, the studied waters mainly belong to the $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ and $\text{SO}_4\text{-Na}$ types, however, there are waters of the $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na}$ type. Temperatures at the circulation depth were estimated using Si- and Na/K-geothermometers. According to the results of calculations by the Si-geothermometer with adiabatic cooling, the temperature of the term at the circulation depth is from 98 to 143 °C, by the Si-geothermometer with conductive cooling – from 97 to 150 °C. Thermal water temperatures at depth calculated from Na/K geothermometers range from 74 °C to 173 °C. Using the construction of the Giggenbach diagram for the thermal waters of the region under study, it was found that the use of the Na/K geothermometer is possible only for the Seyuysky and Zmeiny springs. In addition, within the framework of this study, an assessment was made of the degree of mixing of thermal waters and cold groundwaters as the former migrate to the discharge zone. Estimation of the degree of thermal mixing was made using the Si-enthalpy mixing model, which shows that most of the thermal waters are subject to mixing with cold waters.

Keywords: thermal waters, chemical composition, circulation depth, circulation temperature, geothermometers

Термальные воды широко распространены по всему миру и являются объектом исследования учёных разных областей. Среди возникающих вопросов в области гидрогеологии и гидрогеохимии наиболее дискуссионными являются проблемы формирования терм, процессы и механизмы в системе вода-порода, генезис и возраст терм, генезис вторичных минералов и др. Республика Бурятия характеризуется проявлением термальных вод, которые активно используются местным населением в баль-

неологических целях. Исследуемым водам посвящены многочисленные работы [1-3], описывающие химический, газовый и изотопный состав, характер равновесия с минералами вмещающих пород, механизмы взаимодействия терм с горными породами и т.д. В настоящей работе представлены новые данные по составу термальных вод Республики Бурятия и рассчитаны температуры на глубине циркуляции. Полученные результаты позволят восстановить, в частности, геотермальный режим, а также усло-

вия, процессы и механизмы формирования термальных вод в целом. В дальнейшем это послужит основой и для построения концептуальной модели формирования состава термальных вод интрузивных пород. В этой связи целью настоящего исследования является оценка температур термальных вод Республики Бурятия на глубине их циркуляции.

Материалы и методы исследования

Настоящее исследование основано на результатах гидрохимического опробования, проведённого в 2022 г. на территории Республики Бурятия. Непосредственно на месте пробоотбора был определён ряд показателей: pH и температура измерены с помощью pH-метра HI 9911300, Eh – с помощью ОВП-метра HM Digital ORP 200. Анализ проб по определению химического состава проводился в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск). Химический анализ осуществлён методом титрования при помощи анализатора жидкости «Анион 7-51» (Россия) (HCO_3^- , CO_3^{2-}), атомно-абсорбционным методом (Ca^{2+} и Mg^{2+}), методом ионообменной хроматографии с использованием хроматографа ICS-1000 Dionex (США) (Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+) и методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой NexION 300D (PerkinElmer, США) (Si). Оценка глубинных температур проведена с применением различных геотермометров, представляющих собой эмпирические и расчётные соотношения, связывающие пластовую температуру и концентрацию или отношения концентрации Si, Na/Li, Mg/Li, Na/K, Na-K-Ca [4-6]. В частности, применены кварцевые геотермометры при адиабатическом (1) и кондуктивном охлаждении раствора (2) [7]:

$$T, ^\circ\text{C} = 1522 / (5,75 - \log(\text{SiO}_2)) - 273,15 \quad (1)$$

$$T, ^\circ\text{C} = 1309 / (5,19 - \log(\text{SiO}_2)) - 273,15 \quad (2)$$

где SiO_2 – концентрация SiO_2 в мг/л [7].

Наряду с вышеперечисленными геотермометрами расчёт температур терм на глубине циркуляции осуществлён по Na-K-геотермометрам, которые в меньшей степени подвержены влиянию процессов кипения и охлаждения, поскольку включают себя отношения концентраций ионов (3, 4) [4].

$$T, ^\circ\text{C} = [1217 / (1,483 + \log(\text{Na} / \text{K}))] - 273,15 \quad [8] \quad (3)$$

$$T, ^\circ\text{C} = [1178 / (1,470 + \log(\text{Na} / \text{K}))] - 273,15 \quad [9] \quad (4)$$

Результаты исследования и их обсуждение

В геологическом отношении исследуемая территория расположена на границе докембрийской Сибирской платформы и Байкальской складчатой области и характеризуется широким распространением глубинных разломов, сформированных в результате рифтогенных процессов [1]. Выходы термальных вод Республики Бурятия приурочены в основном к баргузинскому комплексу, представленному интрузивными породами протерозойского возраста [10]. Баргузинский комплекс гранитоидов состоит из двух фаз: 1) среднезернистых порфиридных (часто гнейсовидных) биотитовых, биотит-роговообманковых и роговообманковых гранитов, граносиенитов, гранодиоритов, сиенитов, диоритов и 2) средне- и мелкозернистых массивных и гнейсовидных (иногда порфиридных) биотитовых гранитов [10].

Результаты анализа химического состава представлены в табл. 1, из которой видно, что исследуемые термальные воды являются пресными, поскольку величина общей минерализации едва достигает 1 г/л и варьирует от 266 до 858 мг/л. При этом термальные воды являются щелочными, значения pH колеблются от 8,2 до 9,7, что является характерной особенностью азотных терм, отличающих их от большинства других природных вод. Величина Eh преимущественно колеблется от -350 до -110 мВ, но есть исключения, родники Гусихинский и Алгинский, где значения Eh выше 0 и составляют соответственно 38 и 124 мВ [4]. Температуры терм в местах разгрузки варьируют от 21 до 72 °С. Самые низкие значения температуры отмечены для источников Толстихинский и Алгинский (29 и 21 °С соответственно). Вероятно, температура терм понизилась в результате смешения с более холодными водами, поскольку рассматриваемые источники разгружаются в непосредственной близости рек [4].

Анионный состав исследуемых терм характеризуется попеременным доминированием SO_4^{2-} и HCO_3^- . Концентрации SO_4^{2-} и HCO_3^- соответственно составляют от 40 до 365 мг/л и от 27 до 154 мг/л. Содержание Cl^- варьирует от 3,5 до 40,5 мг/л. Катионный состав характеризуется преобладанием Na^+ , концентрации которого варьируют от 104 до 211 мг/л. Исключение составляет Алгинский источник, где преобладание от Na^+ переходит к Ca^{2+} и до-

стигает максимального значения 81,7 мг/л. Содержание Ca^{2+} в исследуемых термах изменяется в пределах широкого диапазона от 1,6 до 81,7 мг/л. На фоне основных катионов, Mg^{2+} и K^+ содержится в наименьших количествах, не превышающих соответственно 2,5 и 6 мг/л, за исключением родника Гусихинского (K^+ достигает

12 мг/л). Наряду с основными ионами для термальных вод Республики Бурятия характерны высокие концентрации F^- и SiO_2 , соответственно варьирующие от 3 до 20 мг/л и от 47 до 125 мг/л. По химическому составу исследуемые термы относятся преимущественно к HCO_3^- - SO_4^- -Na и SO_4^- -Na, реже к SO_4^- - HCO_3^- -Na (рис. 1) [4].

Таблица 1

Химический состав термальных вод Республики Бурятия, мг/л

Название источника	T, °C	pH	Eh, мВ	M*	CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SiO_2	F^-
Горячинский	51	9,0	-206	685	15,6	42	365	6,2	34,7	2,44	149	4,3	63	3
Золотой ключ	45	8,8	-110	526	10	60	210	19,6	12,9	1,22	123	4,2	78	7
Кулиные болота	51	9,4	-115	628	25,8	137	133	32,6	2,1	0,73	154	3,4	121	19
Змеиный	37	9,6	-350	582	25,2	144	122	40,5	4,4	0,24	146	2,2	88	9
Гусихинский	72	8,5	38	858	9,4	106	356	33,5	17,2	0,98	211	12	101	11
Толстихинский	29	9,7	-240	453	19,5	128	92	20,8	3,2	1,22	114	2,5	62	10
Алгинский	21	8,2	124	664	3	63	338	15,5	81,7	1,59	104	5,6	47	4
Аллинский	43	9,2	-339	556	28,5	154	88	14,3	8,6	0,73	122	4,3	125	12
Умхеский	48	9,5	-275	506	42	134	79	12,4	1,7	0,85	125	1,9	95	14
Кучигерский	38	9,5	-300	465	29,4	110	90	15,0	2,3	0,92	118	1,5	86	12
Сеюйский	53	9,4	-244	456	35,7	100	85	11,0	2,0	0,31	130	1,6	72	19
Хакусский	47	8,4	-	266	7,2	27	90	3,5	17,2	0,49	72	1,0	45	3
Котельниковский	63	9,5	-	375	31,2	112	40	19,1	2,0	0,71	93	2,7	55	20
Гоуджекит	52	9,6	-	475	39,6	142	76	20,6	1,6	0,49	114	4,2	57	19
Мин.	21	8,2	-350	266	3	27	40	3,5	1,6	0,24	72	1,0	45	3
Макс.	72	9,7	124	858	42	154	365	40,5	81,7	2,44	211	12	125	20
Сред.	46	9,2	-183	535	23	104	154	18,9	13,7	0,92	126	3,7	78	12

*М – минерализация.

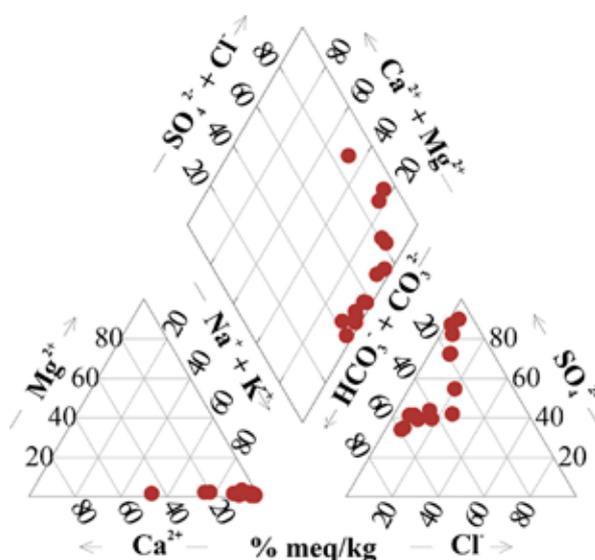


Рис. 1. Химические типы термальных вод Республики Бурятия

Результаты расчётов температур термальных вод Республики Бурятия на глубине их циркуляции, произведённых с применением разных геотермометров, приведены в табл. 2, из которой видно, что температуры, рассчитанные с помощью кварцевых геотермометров, отличаются незначительно. Расчёты по Si-геотермометру при кондуктивном охлаждении показывают температуры терм от 97 до 150 °С, при адиабатическом охлаждении – от 98 до 143 °С. Расчёты с помощью Na/K-геотермометров показали температуры терм на глубине, варьирующие в диапазоне от 74 до 173 °С. Вполне вероятно, что такие завышенные значения являются ошибочным результатом ввиду пределов применения Na/K-геотермометров, или, наоборот, заниженные температуры по Si-геотермометру можно объяснить смешением с более холодными водами по мере движения терм на поверхность [4].

Для корректного применения Na-K-геотермометров при оценке температур термальных вод на глубине циркуляции используется треугольная диаграмма Гиггенбаха (рис. 2) [5]. На диаграмму нанесены точки, отражающие соотношение концентраций катионов в термальных источниках. Видно, что подавляющее большинство термальных источников располагается в области «незрелых вод» по [5], т.е. вод, не достигших равновесия с вмещающими породами. Для таких

вод представляются некорректными результаты расчётов температур с помощью Na-K-геотермометров. Последние могут быть использованы для оценки геотермального режима источников Змеиный и Сеюйский, находящихся в зоне «частичного равновесия» (рис. 2), где характерны значения глубинных температур от 110 до 120 °С.

Использовать геотермометры для оценки глубинных температур следует с учётом условий формирования термальных вод, особенностей состава и пределов применения, например смешивания термальных вод с более холодными подземными водами. Предполагается, что геотермометры не учитывают возможность смешивания терм с холодными водами, но если термы подвержены смешиванию, то концентрации кремния в термальных водах уменьшаются, что, как следствие, приводит к заниженным температурам, оценённым с помощью геотермометров.

В этой связи необходимо провести оценку степени смешения термальных вод с холодными водами для более точного определения температуры терм на глубине циркуляции. Оценка степени смешения производится с помощью модели смешения Si-энтальпия (рис. 3) [11-13], при использовании которой необходимо учитывать процесс кипения вод, сопровождающийся выделением пара.

Таблица 2

Результаты расчётов глубинных температур терм Республики Бурятия, °С

Номер родника	t _{разгрузки}	t(Si) _{кондук.}	t(Si) _{адиабат}	t(Na/K) [8]	t(Na/K) [9]
Горячинский	51	113	112	130	119
Золотой ключ	45	124	121	140	128
Кулиные болота	51	148	142	115	104
Змеиный	37	130	127	96	86
Гусихинский	72	138	133	173	161
Толстихинский	29	112	111	114	103
Алгинский	21	99	100	169	157
Аллинский	43	150	143	142	130
Умхеский	48	134	130	96	85
Кучигерский	38	129	126	87	77
Сеюйский	53	120	118	84	74
Хакусский	47	97	98	93	83
Котельниковский	63	106	106	131	119
Гуджекит	52	108	108	144	132
Мин.	21	97	98	84	74
Макс.	72	150	143	173	161

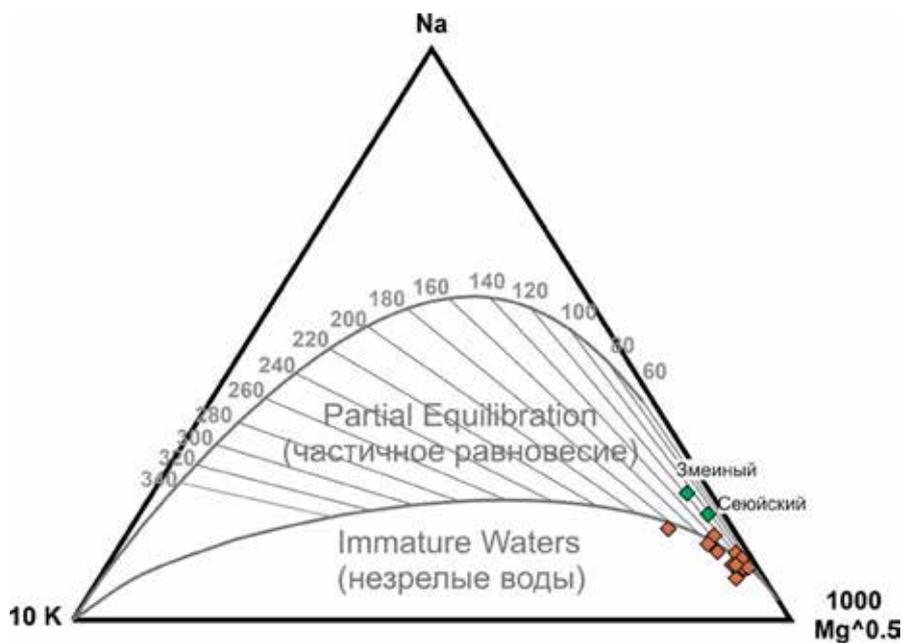


Рис. 2. Диаграмма Гиггенбаха для термальных вод Республики Бурятия

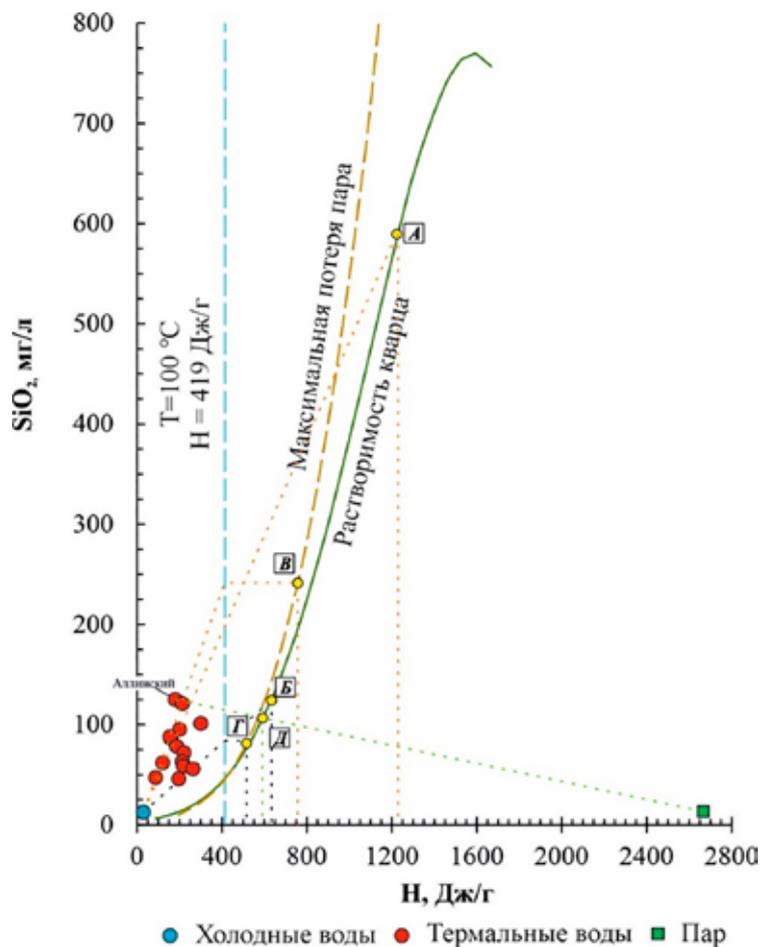


Рис. 3. Расположение фигуративных точек азотных термальных вод Республики Бурятия на модели смешения Si-энthalпия

Расположенные точки ниже линии 0-А на рис. 3 свидетельствуют о смешении большинства термальных вод исследуемого региона с холодными водами и, в этой связи, об изменении температуры терм по мере движения к местам разгрузки. Следует рассмотреть две ситуации, когда кипение не произошло или произошло до момента смешения термальных вод с холодными. В первом случае (точки А и Б на рис. 3) температура терм на глубине составляет от 152 до 283, во втором (точки В и Г на рис. 3) температура терм изменяется от 122 до 177°C. Следует отметить Аллинский источник, отклоняющийся от общей тенденции и характеризующийся отсутствием смешения с холодными водами, так как линия, проходящая через холодные воды и фигуративную точку Аллинский, не пересекает кривую растворимости кварца. Температура воды на глубине при этом составляет 141°C (точка Д).

Выводы

Таким образом, температура термальных вод Республики Бурятия при движении с глубины к местам разгрузки понижается вследствие смешения с холодными водами. Об этом свидетельствует расположение фигуративных точек терм на диаграмме Si-энтальпия. Полученные температуры терм на глубине, рассчитанные с помощью геотермометров, отличаются друг от друга. Однако для оценки геотермального режима исследуемых вод следует отдавать предпочтение Si-геотермометрам, поскольку полученные с помощью них результаты хорошо коррелируют с результатами оценки по диаграмме смешения. Что касается Na/K-геотермометров, то последние показали широкий диапазон температур, и большинство точек расположены в зоне «незрелых вод» на диаграмме Гиггенбаха. В этой связи температуры термальных вод Республики Бурятия на глубине циркуляции составляют от 122 до 177°C.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МК-1408.2022.1.5.

Список литературы

1. Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 5. С. 647-664.
2. Шварцев С.Л., Замана Л. В., Плюснин А. М., Токаренко О. Г. Равновесие азотных терм байкальской рифтовой зоны с минералами водовмещающих пород как основа для выявления механизмов их формирования // Геохимия. 2015. № 8. С. 720-733.
3. Zippa E., Plyusnin A., Shvartsev S. The chemical and isotopic compositions of thermal waters and gases in the Republic of Buryatia, Russia. E3S Web of Conference. 2019. V. 98. 6 p. DOI: 10.1051/e3sconf/20199801055.
4. Зиппа Е.В. Оценка температур циркуляции термальных вод Республики Бурятия // Геология на окраине континента: материалы II молодежной научной конференции школы ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток, 12-16 сентября 2022 г.) Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2022. С. 181-185.
5. Bragin I.V., Zippa E.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. Estimation of the Deep Geothermal Reservoir Temperature of the Thermal Waters of the Active Continental Margin (Okhotsk Sea Coast, Far East of Asia). Water. 2021. V. 13. № 9. 15 p. DOI: 10.3390/w13091140.
6. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его оформления. М.: ГЕОС, 2012. 348 с.
7. Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. Geothermics. 1977. V. 5. P. 41-50.
8. Fournier R.O. A revised equation for the Na-K geothermometer. Geothermal Resource Council Transactions. 1979. V. 3. P. 221-224.
9. Nieva D., Nieva R. Developments in geothermal energy in Mexico, part 12. A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources. Heat Recovery Systems and CHP, 1987. V. 7. P. 243-258.
10. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Isotopes of the earth's hydrosphere. Springer, Berlin, 2012. 567 p. DOI: 10.1007/978-94-007-2856-1.
11. Pasvanoğlu S., Çelik M. A conceptual model for groundwater flow and geochemical evolution of thermal fluids at the Kızılcahamam geothermal area, Galatian volcanic Province. Geothermics, 2018. V. 71. P. 88-107. DOI: 10.1016/j.geothermics.2017.08.012.
12. Wang X., Wang G. L., Gan H. N., Liu Z., and Nan D. W. Hydrochemical characteristics and evolution of geothermal fluids in the Chabu high-temperature geothermal system, Southern Tibet. Geofluids, 2018. 15 p. DOI: 10.1155/2018/8532840.
13. Alçiçek H., Bülbül A., Brogi A., Liotta D., Ruggieri G., Capezzuoli E., Meccheri M., Yavuzer I., Alçiçek M.C. Origin, evolution and geothermometry of the thermal waters in the Gölemezli Geothermal Field, Denizli Basin (SW Anatolia, Turkey). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2018. V. 349. P. 1-30. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.07.021.