

УДК 550.461(511.33)

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУР ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД ПРОВИНЦИИ ЦЗЯНСИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОТЕРМОМЕТРОВ

<sup>1,2</sup>Зиппа Е.В., <sup>1</sup>Гусева Н.В., <sup>3</sup>Сунь Чж., <sup>3</sup>Чень Г.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск;

<sup>2</sup>Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, e-mail: zev-92@mail.ru;

<sup>3</sup>Восточный Китайский технологический университет, Наньчан, провинция Цзянси

В работе представлены результаты расчетов глубинных температур азотных термальных вод провинции Цзянси. Показано, что азотные термальные воды являются пресными, минерализация меньше 0,5 г/л. При этом термы являются слабощелочными и щелочными, рН изменяется от 8,50 до 9,25. По химическому составу азотные термы относятся в основном к гидрокарбонатному натриевому типу, реже – к гидрокарбонатно-сульфатному натриевому. Для оценки температур глубины циркуляции были использованы Si- и Na/K-геотермометры. Результаты расчетов глубинных температур по Si-геотермометру при адиабатическом охлаждении составляют от 85 до 147 °С. Оценки температур по Si-геотермометру при кондуктивном охлаждении варьируют от 82 до 154 °С. Оценки температур по Na/K-геотермометрам составляют от ~80 °С до ~185 °С. Для оценки степени смешения термальных вод с холодными водами по мере миграции к зоне разгрузки была применена модель смешения Si-энтальпия. На диаграмме смешения (модель смешения Si-энтальпия) показано, что большая часть термальных вод является результатом смешения с грунтовыми водами или атмосферными осадками. В целом оцененные температуры с помощью модели смешения соответствуют значениям, полученным по Na/K-геотермометру, и составляют 113–155 °С. В результате исследования предпочтение при выборе метода расчета температур глубин циркуляции терм отдается Na/K-геотермометру, поскольку данный геотермометр в меньшей степени подвержен смешению и отражает реальные условия температурного режима. Таким образом, температуры азотных термальных вод на глубине циркуляции составляют 92–185 °С.

**Ключевые слова:** термальные воды, глубина циркуляции, глубинные температуры, геотермометры

## ESTIMATION OF CIRCULATION TEMPERATURES OF THE THERMAL WATERS IN JIANGXI PROVINCE USING DIFFERENT GEOTHERMOMETERS

<sup>1,2</sup>Zippa E.V., <sup>1</sup>Guseva N.V., <sup>3</sup>Sun Zh., <sup>3</sup>Chen G.

<sup>1</sup>National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk;

<sup>2</sup>Tomsk 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;

<sup>3</sup>East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi Province

The results of deep temperatures calculations of nitric thermal waters in Jiangxi Province are presented in the paper. It is shown that the thermal waters are fresh and have TDS lower than 0,5 g/L. In addition, the thermal waters are alkaline and alkaline, pH values range between 8,50 and 9,25. According to chemical composition the thermal waters belong to bi-carbonate sodium type, less to bi-carbonate-sulfate sodium type. The Si- and Na/K-geothermometers have been used for the deep temperatures estimation. The temperature calculated using the Si-geothermometer for adiabatic cooling range from 85 to 147 °C. The temperature calculated using the Si-geothermometer for conduction cooling changes from 82 to 154 °C. The Na/K-geothermometers shows temperatures from ~80 °C to ~185 °C. The Si-enthalpy mixing model was used to estimate the degree of mixing of thermal waters with cold waters during their migration to the discharge zone. According to the mixing diagram (Si-enthalpy), the majority of the thermal waters are the result of mixing with groundwater or atmospheric precipitation. In general, the estimated temperatures using the mixing diagram correspond to the values obtained using the Na/K geothermometer and range 113-155 °C. Eventually, choosing a method for calculating the temperatures of circulation depths the Na/K- geothermometer has more accuracy because the geothermometer data are less affected mixing and reflect the actual conditions of the temperature regime. Thus, the temperatures of nitric thermal waters at the circulation depth range 92-185 °C.

**Keywords:** thermal waters, circulation depth, circulation temperature, geothermometers

Провинция Цзянси расположена на юго-востоке Китая и характеризуется распространением термальных вод, которые активно используются местным населением в бальнеологических целях и в качестве альтернативного источника энергии. Широкое использование термальных вод в различных целях объясняет повышенное к ним

внимание со стороны ученых. Наибольший интерес представляют механизмы и процессы формирования термальных вод. Как известно, температура термальных вод на поверхности отличается от температуры на глубине и является результатом охлаждения путем обмена теплом с горными породами по мере движения вод к местам разгрузки

или их разбавления более холодными грунтовыми водами и атмосферными осадками. Детальное исследование формирования термальных вод невозможно без восстановления условий протекания этих процессов, в частности без понимания температурного режима на глубине циркуляции. В этой связи целью настоящей работы является оценка глубинных температур термальных вод провинции Цзянси для дальнейшей разработки модели их формирования.

#### Материалы и методы исследования

В основу работы положены результаты гидрохимического опробования, проведенного в 2015 и 2017 гг. На месте отбора проб были определены pH и температура с помощью прибора AMTAST AMT03 (USA). Общий химический анализ проводился несколькими методами:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  определялись методом титрования при помощи анализатора жидкости «Анион 7-51» (Россия);  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  – атомно-абсорбционным методом;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  – методом ионнообменной хроматографии с использованием хроматографа ICS-00 «Dionex» (США). Содержание Si определялось с помощью современного высокочувствительного метода – масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой NexION 300D (PerkinElmer, USA). Анализы проводились проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск) и Центром химического анализа и физических испытаний Восточного Китайского технологического университета (г. Наньчан, Китай).

Для оценки глубинных температур использованы различные геотермометры, представляющие собой эмпирические и расчетные соотношения, связывающие пластовую температуру и концентрацию или отношения концентрации следующих растворенных компонентов: Si, Na/Li, Mg/Li, Na/K, Na-K-Ca [1].

В работах [2, 3] предложены несколько расчетных формул оценки температуры на глубине по содержанию кремния, основывающиеся на изменении растворимости  $\text{SiO}_2$  в зависимости от температуры. Для расчета глубинных температур исследуемых вод использованы формулы Si-геотермометров с учетом форм кремнезема (кварц, кристобалит, халцедон, аморфный кремнезем) и диапазона температур.

Принимая во внимание то, что температура термальных вод провинции Цзянси

меньше температуры кипения, а воды приурочены в основном к гранитным породам, для оценки температур на глубине применены кварцевые геотермометры при адиабатическом (1) и кондуктивном охлаждении раствора (2) [2]:

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

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

где  $\text{SiO}_2$  – концентрация  $\text{SiO}_2$  в мг/л.

Na-K-геотермометр меньше подвержен влиянию процессов кипения и охлаждения, поскольку используется не абсолютное значение (как в Si-геотермометре), а отношение концентраций. Расчет глубинных температур с помощью Na-K-геотермометров проведен по формулам

$$T, \text{ }^\circ\text{C} = [1217 / (1,483 + \log(\text{Na} / \text{K}))] - 273,15 \quad [4], \quad (3)$$

$$T, \text{ }^\circ\text{C} = [1178 / (1,470 + \log(\text{Na} / \text{K}))] - 273,15 \quad [5]. \quad (4)$$

На территории провинции преимущественно распространены углекислые и азотные термальные воды, которые приурочены к глубинным разломам, развитым в разных геологических структурах. В настоящей работе рассмотрены только азотные термальные воды, в газовом составе которых азот составляет 95–99 об. % [6]. В геологическом отношении выходы азотных терм сложены преимущественно гранитами юрского возраста, в меньшей степени позднепротерозойского эона, а также кембрий-ордовикскими гранитами (Є-O) и каменноугольными и девонскими гранитоидами (С-D) [6].

Азотные термы провинции Цзянси характеризуются низкой величиной общей минерализации, до 0,5 г/л, при этом величина pH изменяется от 8,50 до 9,25. Температура терм варьирует от 27 до 83 °С. Среди анионов преобладающим является  $\text{HCO}_3^-$ , концентрации которого составляют 58–186 мг/л, в меньшей степени содержится  $\text{SO}_4^{2-}$  (11–104 мг/л) и  $\text{Cl}^-$  (1,5–6,7 мг/л). Среди катионов доминирующим является  $\text{Na}^+$  (55–110 мг/л), содержания  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  весьма низкие и не превышают 8,1 мг/л, 5,1 мг/л и 0,7 мг/л соответственно. По химическому составу рассматриваемая группа терм, в соответствии с классификацией С.А. Шукарева, относится к  $\text{HCO}_3^-$ -Na, либо  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^-$ -Na, лишь в единичном случае  $\text{SO}_4^-$ - $\text{HCO}_3^-$ -Na (рис. 1). Кроме этого, состав рассматриваемых терм характеризуется повышенными концентрациями  $\text{SiO}_2$  (32–134 мг/л) и  $\text{F}^-$  (2,8 до 15,6 мг/л) [6–8].

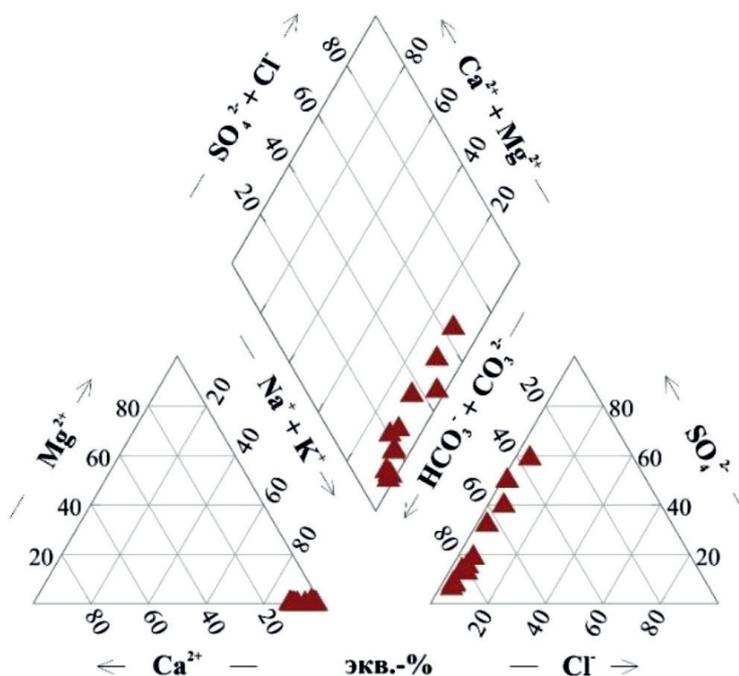


Рис. 1. Химические типы термальных вод провинции Цзянси

Таблица 1

Результаты расчетов глубинных температур по разным геотермометрам

Номер родника	$t_{\text{разгрузки}}$	$t(\text{Si})_{\text{кондук.}}$	$t(\text{Si})_{\text{адиабат}}$	$t(\text{Na/K})$ [4]	$t(\text{Na/K})$ [5]
17-2	27	86	89	92	82
17-8	59	82	85	145	134
15-7	38	117	115	127	116
15-9	82	146	140	185	172
L-5	69	118	117	107	96
L-2	65	131	128	127	116
L-3	65	118	117	92	82
L-1	71	125	122	108	97
17-7	55	129	125	162	150
15-10	41	143	137	139	128
17-6	54	124	122	138	126
15-8	83	154	147	172	182
Мин.	27	82	85	92	82
Макс.	83	154	147	185	182

### Результаты исследования и их обсуждение

Глубинные температуры азотных термальных вод провинции Цзянси рассчитаны по разным геотермометрам. Результаты расчетов приведены в табл. 1 и несколько отличаются друг от друга.

Диапазоны температур, рассчитанных по кварцевому геотермометру при адиабатическом и кондуктивном охлаждении, незначительно отличаются. В первом случае рас-

считанные температуры варьируют от 85 до 147 °С, во втором – от 82 до 154 °С. Температуры, оцененные с помощью Na/K-геотермометров несколько выше и изменяются в более широком диапазоне от ~80 °С до ~185 °С.

Сравнение полученных с помощью разных геотермометров результатов оценки глубинных температур азотных терм показывает хорошую корреляцию с измеренной температурой в местах выходов вод на поверхность (рис. 2).

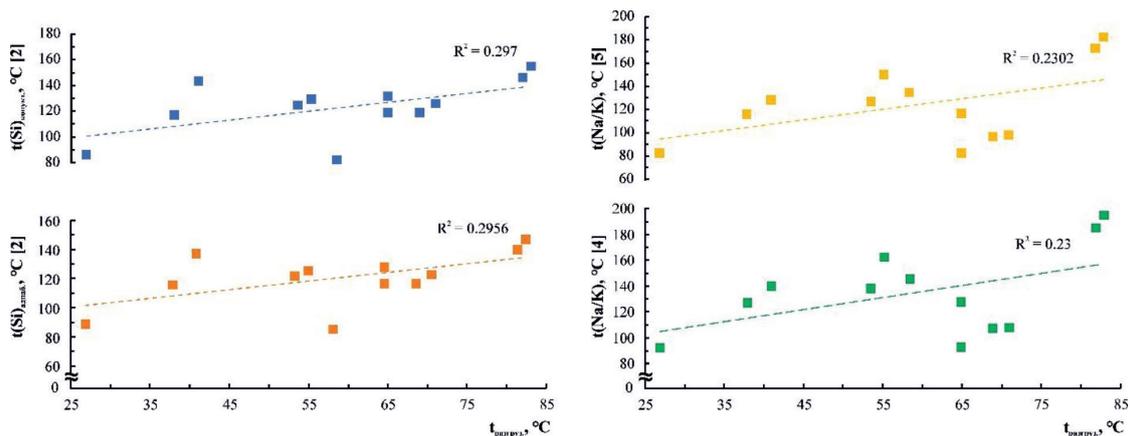


Рис. 2. Соотношение температуры разгрузки и глубинных температур азотных термальных вод провинции Цзянси, рассчитанных по разным геотермометрам

Наряду с этим, между температурами, рассчитанными по разным геотермометрам, также наблюдается прямая корреляция (рис. 3). Исключение составляют два родника (на рис. 3 выделены пунктирным овалом), которые выбиваются из общей тенденции взаимосвязи Si- и Na/K-геотермометров. Вполне вероятно, такие завышенные температуры, полученные по Na/K-геотермометрам, являются ошибочным результатом, ввиду пределов применения этого геотермометра, или, наоборот, заниженные температуры по Si-геотермометру можно объяснить смешением с более холодными водами по мере движения терм на поверхность.

Оценить степень смешения термальных вод с грунтовыми водами или атмосферными осадками и более точно определить глубинную температуру можно с помощью нанесения фигуративных точек на модель смешения Si-энтальпии [9–11]. Теоретически линия, проведенная из точки наиболее холодного компонента смешения (грунтовые воды или атмосферные осадки) через смешанные горячие воды (исследуемые родники) до пересечения с линией растворимости кварца, дает истинные содержания кремния и энтальпии термальных вод и называется линией смешения [2]. Кроме этого, при определении глубинной температуры с помощью Si-энтальпии диаграммы следует учитывать процесс кипения термальных вод, который сопровождается выделением пара. Если по мере движения терм на поверхность кипение терм не происходит до момента смешения с холодными водами, то

точка пересечения линии смешения и кривой растворимости кварца дает значения энтальпии на глубине циркуляции. В случае, если кипение терм и, соответственно, выделение пара произошло до момента смешения, то из точки пересечения линии смешения и вертикали, относящейся к температуре кипения 100 °C ( $H = 419$  Дж/г), проводится прямая, параллельная оси энтальпии, до пересечения с кривой растворимости при максимальной потере пара. Полученная точка пересечения отражает значения энтальпии и соответственно температуры на глубине циркуляции при заданных условиях. Для соотношения значений энтальпии и температуры использовали справочные данные [2].

Из рис. 4 видно, что по мере движения терм на поверхность большая часть родников в той или иной степени была подвержена смешению с более холодными водами. В случае, если кипение не произошло до момента их смешения с холодными водами, то проекции точек пересечения линии смешения и кривой растворимости кварца, точек В и Г дают значения энтальпии ~800 и ~1050 Дж/г соответственно. Следовательно, температура циркуляции терм при рассматриваемых условиях варьирует от 188 °C до 243 °C. Если кипение произошло до момента смешения, то температура терм изменяется в диапазоне от 137 °C до 155 °C ( $H = \sim 575$  и  $\sim 650$  Дж/г), точки Д и Е соответственно. В целом полученные глубинные температуры с учетом кипения до момента смешения схожи с их оценками по Na/K-геотермометрам.

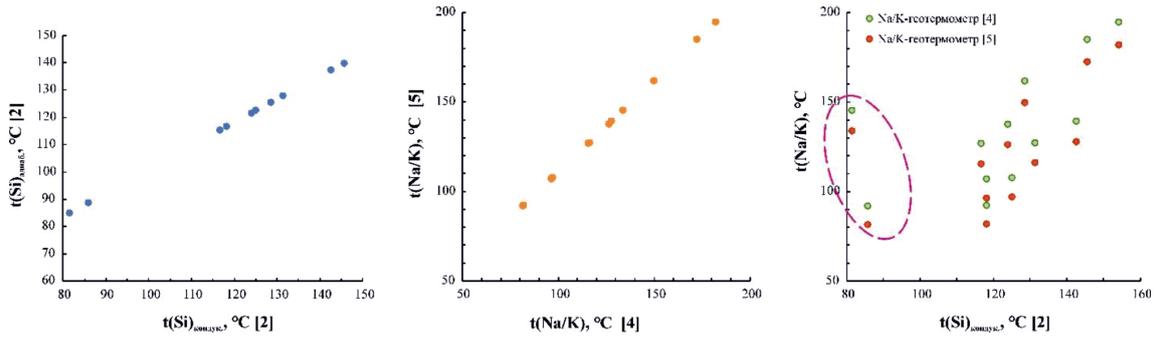


Рис. 3. Соотношение глубинных температур азотных термальных вод провинции Цзянси, рассчитанных по Si- и Na/K-геотермометрам

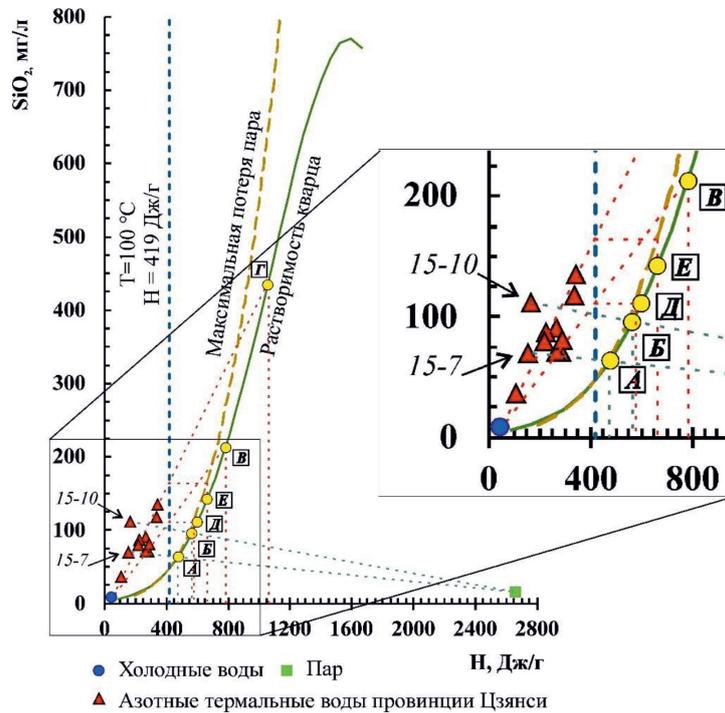


Рис. 4. Расположение фигуративных точек азотных термальных вод провинции Цзянси на модели смешения Si-энтальпия

Кроме этого, среди рассматриваемых вод выявлены некоторые отклонения от общей тенденции. Из рис. 4 также видно, что линия, проходящая через холодные воды и фигуративные точки азотных терм 15–10 и 15–7, не пересекает кривую растворимости кварца, что в свою очередь свидетельствует об отсутствии смешения. В данном случае глубинные температуры относятся к точкам пересечения линий, соединяющих точку пара и родников, с линией растворимости кварца (рис. 4, точки А и Б). Проекция этих точек на ось энтальпии дают значения ~475 Дж/г для родника 15-7 и ~560 Дж/г

для родника 15-10, что соответственно относится к температурам 113 °С и 133 °С. Полученные температуры соответствуют результатам расчетов по Si-геотермометру при адиабатическом охлаждении и Na/K-геотермометру [4].

#### Выводы

Полученные результаты оценки глубинных температур с помощью различных геотермометров показали разные результаты. Диаграмма Si-энтальпия наглядно демонстрирует смешение подавляющей части азотных терм с более холодными во-

дами по мере их движения на поверхность. В этой связи при выборе метода оценки глубинных температур рассматриваемых вод следует отдавать предпочтение Na/K-геотермометру [4], поскольку, в отличие от Si-геотермометров, в меньшей степени подвержен влиянию смешения вод и отражает реальные условия температурного режима на глубине циркуляции терм. Таким образом, температура азотных термальных вод провинции Цзянси на глубине циркуляции составляет от 92 до 185 °С.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проекта № 17-17-01158.*

#### Список литературы / References

1. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его оформления. М.: ГЕОС, 2012. 348 с.
1. Lavrushin V.Yu. Subsurface fluids of the Greater Caucasus and its surrounding. M.: GEOS, 2012. 348 p. (in Russian).
2. Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 1977. V. 5. P. 41–50.
2. Fournier R.O. A revised equation for the Na-K geothermometer. *Geothermal Resource Council Transactions*. 1979. V. 3. P. 221–224.
3. Karingithi C.W. Chemical geothermometers for geothermal exploration. Presented at Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, November 1–22, 2009. [Electronic resource]. URL: <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-10-0603.pdf> (date of access: 12.09.2019).
3. 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. DOI: 10.1016/0890-4332(87)90138-4.
4. Shvartsev S.L., Sun Z., Borzenko S.V., Gao B., Tokarenko O.G., Zippa E.V. Geochemistry of the thermal waters in Jiangxi Province, China. *Applied Geochemistry*, 2018. V. 96. P. 113–130. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.06.010.
5. Sun Zh., Shvartsev S.L., Tokarenko O.G., Zippa E.V., Gao B. Geochemical peculiarities of nitric thermal waters in Jiangxi province (SE-China). *IOP conference series: earth and environmental science*. 2016. V. 33(1). 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012012.
6. Sun Z., Gao B., Shvartsev S., Tokarenko O., Zippa E. The Thermal Water Geochemistry in Jiangxi Province (SE-China). *Procedia Earth and Planetary Science*. 2017. V. 17. P. 940–943. DOI: 10.1016/j.proeps.2017.01.031.
7. Pasvanoğlu S., Çelik M. A conceptual model for ground-water 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.
8. Wang X., Wang G. L., Gan H. N., Liu Z., 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.
9. 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.