Оценка температуры азотных термальных вод на глубине циркуляции, Сихотэ-Алинь

Зиппа Е.В.

*Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Томск, Россия
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, Россия, E-mail: zev-92@mail.ru*

Брагин И.В.

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, Россия E-mail: bragin_ivan@mail.ru

АННОТАЦИЯ: В работе представлены результаты расчётов глубинных температур азотных терм месторождений Тумнин и Анненское. Показано, что воды являются ультра и умеренно пресными ($M < 0,3$ мг/л), щелочными (рН 9,2-9,3). По химическому составу термы Тумнина относятся к $\text{HCO}_3\text{-Na}$, Анненские термы к $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ типу. Для оценки глубинных температур были использованы геотермометры. Степень смешения терм с более холодными водами оценена с помощью диаграммы смешения Si-энтальпия. Согласно расчётам по Si-геотермометру при кондуктивном охлаждении, температура Анненских терм и Тумнина на глубине циркуляции соответственно составляет 130 и 121 °С. В случае смешения терм с более холодными водами, их глубинная температура, согласно диаграмме смешения Si-энтальпия, составляет для месторождения Тумнин 155 °С, для Анненских терм – 165 °С.

The estimation the N_2 -thermal waters temperature at the circulation depth, Sikhote-Alin

Zippa E.V.

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

Bragin I.V.

Far East Geological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Science, Vladivostok, Russia: bragin_ivan@mail.ru

ABSTRACT: The calculation results of the Tumnin and Annenskiy thermal waters temperatures at circulation depth are presented in the paper. It is shown that waters are ultra fresh ($\text{TDS} < 0.3$ mg/L), alkaline (pH 9.2-9.3). According to the chemical composition, the Tumnin hydrotherms belong to the $\text{HCO}_3\text{-Na}$, Annenskiy – to the $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ type. To estimate the temperature at the circulation depth, geothermometers were used. To evaluate the degree of mixing of the thermal water with colder waters, the Si-enthalpy mixing diagram was used. The calculation results showed that the temperature of the Annensky and Tumnin thermal water at the circulation depth according to calculations by a Si-geothermometer with conductive cooling, are 130 and 121 °C, respectively. In the case of mixing of the thermal waters with colder waters, their depth temperature, according to the Si-enthalpy mixing diagram, is 155 °C for the Tumnin deposit, and 165 °C for the Annensky hydrotherms.

ВВЕДЕНИЕ

Термальные воды Сихотэ-Алиня принадлежат к провинции азотных терм и приурочены к позднемеловым гранитным массивам. Изученные воды локализованы в Хабаровском крае и представляют собой месторождения азотных терм Тумнин и Анненское, которые активно используются местным населением в бальнеологических целях, что объясняет повышенное внимание к водам со стороны учёных. Наибольший интерес представляют механизмы и процессы формирования термальных вод. Как известно, температура терм на поверхности отличается от температуры на глубине и является результатом охлаждения путём теплообмена с горными породами по мере движения вод к местам разгрузки или их разбавления более холодными грунтовыми водами. Для более полного обоснования процессов формирования термальных вод необходим комплексный подход, включа-

ющий в себя также исследование температурного режима терм на глубине циркуляции. Зачастую, температура на глубине циркуляции рассчитывается с помощью различных геотермометров, однако, последние не всегда учитывают возможность смешения термальных вод с более холодными грунтовыми водами. В этой связи целью настоящей работы является оценка глубинных температур термальных вод Сихотэ-Алинь с учётом возможного их смешения.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕРМ

Изученные месторождения азотных термальных вод Тумнин и Анненское расположены в Хабаровском крае: Тумнинские термальные воды находятся в 9 км от ж/д станции Тумнин, в долине р. Чопэ; Анненские термы расположены на правом берегу р. Амура, в 120 км вверх по течению от г. Николаевска-на-Амуре (рис.

1). Для территории распространения месторождений азотных термальных вод Тумнин и Анненское характерны молодые тектонические движения, которые контролируют, прежде всего, расположение гранитных массивов и циркуляцию вод по нарушениям сколового и трещинного характера.

Рис. 1. Схема расположения месторождений азотных терм Анненское и Тумнин

Выход Анненских термальных вод на поверхность приурочен к зоне контакта эффузивов и терригенных осадочных пород верхнего мела Большинской и Татаркинской свит. Тумнинские термы разгружаются в пределах зоны контакта гранитов и андезито-базальтов Кизинской свиты неогена [1].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу работы положены результаты гидрохимического опробования, проведенного в 2018 г., в результате которого опробованы месторождения азотных термальных вод Тумнин и Анненское. На месте отбора проб были определены pH и температура. Общий химический анализ осуществлялся методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10 Avp, SHIMADZU). Содержание Si определялось методом масс-спектрометрии (ICP-MS, Agilent 7500c). Анализы проводились в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток).

Для оценки глубинных температур зачастую используются геотермометры, которые связывают пластовую температуру и концентрацию или отношения концентрации следующих растворенных компонентов: Si, Na/Li, Mg/Li, Na/K, Na-K-Ca [2].

В работах [3-4] предложены расчётные формулы оценки температуры на глубине, основывающиеся на изменении растворимости SiO_2 в зависимости от температуры. Для расчёта глу-

бинных температур исследуемых вод использованы формулы Si-геотермометров с учётом форм кремнезёма (кварц, кристобалит, халцедон, аморфный кремнезём) и диапазона температур. Принимая во внимание то, что температура термальных вод месторождений Тумнин и Анненское меньше температуры кипения, а воды приурочены к гранитным породам, для оценки температур на глубине применены Si-геотермометры при адиабатическом (1) и кондуктивном охлаждении раствора (2) [3]:

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

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

где SiO_2 – концентрация 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. Расчёт глубинных температур с помощью Na-K-геотермометров

проведён по формулам 3-4 [5-6]:

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

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

Для оценки степени смешения термальных вод с грунтовыми водами и более точного определения температур на глубине циркуляции применена модель смешения Si-энтальпия [7-10].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты анализа химического состава показали, что исследуемые азотные термы ультра и умеренно пресные, щелочные. Величина общей минерализации составляет 160 и 257 мг/л для месторождения Тумнин и Анненское соответственно, pH – 9,3 и 9,2. Температура азотных терм Тумнина на поверхности составляет 44 °С, Анненских терм – 49 °С (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав азотных термальных вод Сихотэ-Алиня

Показатель		Азотные термальные воды	
		Тумнин	Анненские
T	°C	44	49
pH		9,3	9,2
M*	мг/л	160	257
HCO ₃ ⁻		78	112
Cl ⁻		2,1	4,8
SO ₄ ²⁻		10,2	33,5
Na ⁺		34,1	59,3
K ⁺		0,6	1,5
Ca ²⁺		0,7	2,0
Mg ²⁺		0,05	0,05
SiO ₂		73	88
F ⁻		0,22	2,85
*М - минерализация			

Доминирующим среди анионов является HCO_3^- , который содержится в количестве 78 и 112 мг/л в термах Тумнина и Анненских термах соот-

рождения Тумнин и Анненское. Следовательно, температура циркуляции терм при рассматриваемых условиях составляет 233 °С для терм Тумнина и 234 °С – для Анненских азотных терм.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Полученные температуры на глубине циркуляции с помощью модели Si-энтальпия с учётом отсутствия кипения до момента смешения показали весьма завышенные температуры. В случае, когда кипение произошло до момента смешения терм с холодными водами, полученные глубинные температуры близки к более реальным и отличаются от температур, рассчитанных с помощью Si-геотермометров на 30 °С.

Таким образом, если принимать во внимание то, что при движении к местам разгрузки термальные воды охлаждаются лишь в результате теплообмена с окружающей средой и не смешиваются с более холодными водами, то температура Анненских терм и Тумнина, согласно расчётам по SiO₂-геотермометру при кондуктивном охлаждении, соответственно составляют 130 и 121 °С. Однако, если же термы ближе к поверхности смешиваются с более холодными водами, то, согласно полученным с помощью диаграммы смешения Si-энтальпия результатам, температура азотных терм на глубине составляет для месторождения Тумнин 155 °С, для Анненских терм – 165 °С.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагин И.В., Челноков Г.А. Геохимия термальных вод Сихотэ-Алиня. Газовый аспект // Вестник ДВО РАН. – 2009. – №4. – С. 147-151.
2. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его оформления. – М.: ГЕОС, 2012. – 348 с.

3. Fournier R.O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems // *Geothermics*. – 1977. – V. 5. – P. 41–50.
4. Karingithi C.W. Chemical geothermometers for geothermal exploration. Presented at Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, organized by UNUGTP, KenGen and GDC, at Lake Naivasha, Kenya, November 1–22, 2009.
5. Fournier R.O. A revised equation for the Na-K geothermometer // *Geothermal Resource Council Transactions*. – 1979. – V. 3. – P. 221–224.
6. 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.
7. Truesdell A.H., Fournier R.O. Procedure for estimating the temperature of a hot water component in mixed water using a plot of dissolved silica vs. enthalpy // *Journal of Research of the U. S. Geological Survey*. – 1977. – V. 5. – P. 49-52.
8. Fournier R. Lecture on geochemical interpretation of hydrothermal waters // *UNU Geothermal training programme: Iceland, 1989*. – Report 10. – 66 p.
9. 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.
10. Зиппа Е.В., Гусева Н.В., Сунь Чж., Чень Г. Оценка температур циркуляции термальных вод провинции цзянси с применением различных геотермометров // *Успехи современного естествознания*. – 2019. – № 10. – С. 52-57
11. Fournier R.O., Truesdell A.H. An empirical Na-K-Ca chemical geothermometer for natural waters // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1973. – V. 37. – № 5. – P. 1255-1275.
12. Giggenbach W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1988. – V. 52. – P. 2749-2765.
13. Keenan J.H., Keyes F.G., Hill P.G., Moore J.G. *Steam Tables – thermodynamic properties of water including vapor, liquid, and solid phases* // International Edition - metric units: Wiley, New York, 1969. – 162 p.