

УДК 556.314

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОТЕРМОМЕТРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЛУБИННЫХ ТЕМПЕРАТУР ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ ТУВЫ

Шестакова Анастасия Викторовна,
ashest91@mail.ru

Гусева Наталья Владимировна,
guseva24@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена наличием широкого разнообразия геохимических геотермометров, используемых для оценки глубинных температур, и достоверностью их применения к различным химическим типам термальных вод.

Цель работы заключается в установлении применимости метода оценки глубинных температур циркуляции термальных вод с помощью геотермометров для разных химических типов на примере родников Восточной Тувы.

Методы исследования. Анализ химического состава вод выполнен в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии ИПР ТПУ. Для проведения полного химического анализа использовались традиционные методы. Для оценки глубинных температур использовались геохимические геотермометры и расчеты индексов насыщения вод различными минералами в зависимости от температуры в программном комплексе PhreeqC.

Результаты. Проведенная оценка температурных условий гидротермальных систем Восточной Тувы показала, что, независимо от химических типов вод, кремниевые геотермометры прогнозировали более надежные температуры пласта для всех рассматриваемых термальных вод, по сравнению с другими геотермометрами. Выбор того или иного геотермометра определялся химическим типом вод, характером физико-химического равновесия в системе вода–порода и концентрацией основных элементов. Для сульфатных и гидрокарбонатных вод Тарыса и Уш-Белдира практически все геотермометры показали хорошую сходимость результатов, прогнозные температуры пласта составляют 120 и 130 °С на глубине 4,5 и 4,8 км соответственно. Такие же значения температур были получены методом расчета индекса насыщения в зависимости от температуры. Для гидрокарбонатных вод Чойгана определение достоверных глубинных температур с помощью катионных геотермометров оказалось затруднительным. В этом случае для вод с высокими концентрациями катионов надежную оценку температуры пласта обеспечивает кремниевый геотермометр. Температура, полученная по кремниевому геотермометру, подтвердилась и другим методом определения температуры – с помощью расчетов индексов насыщения вод, и составляет около 100 °С, при этом глубина формирования оценивается в 3 км.

Ключевые слова:

Термальные воды, геотермометры, гидротермальная система, химический состав, Тува.

Введение

Термальные воды привлекают большое внимание исследователей по всему миру с точки зрения изучения их широкого практического использования и наличия большого разнообразия флюидов разного ионного состава, которые формируются в геотермальных системах и активно участвуют в рудо- и минералообразовании. Кроме того, геотермальные ресурсы используются в качестве альтернативного источника энергии. Выработка геотермальной энергии в последнее время получила распространение в более чем 20 странах по всему миру. Например, в США, Филиппинах, Индонезии, Мексике, Новой Зеландии, Исландии и Италии до 50 % тепла, необходимого для отопления, обеспечивается за счет геотермальных вод [1, 2].

На территории России в отдельных районах Кавказа, Сибирского и Курило-Камчатского регионов сосредоточены значительные геотермальные ресурсы для производства электроэнергии. Республика Тыва обладает большим потенциалом для развития геотермальной энергетики, ее территория относится к продолжению Байкальской сейсмогенной рифтовой зоны (БРЗ), здесь на поверхности проявляются гидротермы, разгружающиеся по многочисленным разрывным наруше-

ниям в горных породах. Проявление термальных и субтермальных источников свидетельствует о высоких температурах и активном глубинном тепло-массопереносе в недрах Восточной Тувы [3]. Исследование особенностей формирования и распространения теплового потока в рассматриваемом регионе проводилось ранее, в том числе и с применением изотопно-гелиевого метода [4]. В результате этих работ получены новые данные о значениях теплового потока по Тувинскому региону и выявлена обширная изотопно-гелиевая аномалия на востоке Тувы.

Эта тепловая аномалия является продолжением изотопно-гелиевой аномалии юго-западного фланга БРЗ, в пределах которой наблюдается проявление термальных вод, и с ней же связано развитие термальных вод северо-востока Тувы [3]. Кроме того, П.С. Бадминовым, А.И. Оргильяновым, Д. Ганчимэг (2011, 2013) и др. для Окинской гидротермальной системы, расположенной на западном фланге БРЗ, а также для некоторых термальных источников Хангая и Восточного Саяна, были оценены прогнозные температуры гидротерм и глубины их формирования с помощью геотермометров. Авторами было установлено пространственное совпадение расположения Окинской гидротер-

мальной системы с районом проявления молодого вулканизма, свидетельствующего о связи с единым источником тепла, где тепловые параметры, газовый и химический состав коррелируют с возрастом вулканизма [5].

Определение перспективности использования гидротермальных систем, а также оценка теплового состояния недр возможна с помощью установления величины глубинной температуры геотермальных систем. Универсальным и полезным геохимическим инструментом для прогнозирования равновесных температур геотермальных систем на стадии разведки и разработки производства геотермальной энергии являются геохимические геотермометры, представляющие собой уравнения, основанные на реакциях ионного обмена элементов, где химический состав вод термальных источников отражает господствующие глубинные пластовые условия.

На правильность оценки глубинных температур геотермометрами могут влиять неоднородности литологического состава пород, смешение термальных вод с холодными грунтовыми водами, неравновесность состава минеральных вод с водовмещающими породами, влияние углекислого газа – в этом случае оценка температуры оказывается сильно заниженными или завышенными [1, 6, 7].

Геотермометры широко используются при оценке температуры пласта, поскольку их применение является относительно простым и экономичным. Разработаны различные программы для расчета глубинных температур, такие как SolGeo (Италия), GEOTHERM (США), AquaChem (США), GeoT (США) и другие, в которых заложены различные геотермометрические уравнения. Однако наличие широкого изобилия таких уравнений (порядка 35 уравнений) и отсутствие четких условий их применения затрудняет интерпретацию результатов расчетов геотермометров [7].

В литературе предлагается применять различные виды геохимических геотермометров, а затем проверять полученные температуры с учетом химического состава вод и литологии региона, так как не все геотермометры обеспечивают надежную оценку пластовой температуры. В настоящее время в работах по оценке глубинных температур с помощью геотермометров авторы приводят аргументированные объяснения по выбору того или иного геотермометра. В результате геотермометрических расчетов глубинных температур и сравнения их с измеренными температурами на глубине в скважинах авторы пришли к выводу, что наиболее достоверные и приемлемые результаты дают Na-K геотермометры, расхождение температур составляет ± 20 °С, что считается допустимым. Хорошая применимость Na-K геотермометров связана с тем, что такие процессы, как смешивание термальных и холодных грунтовых вод, процессы дегазации вод во время их подъема к поверхности, существенно не изменяют соотношение Na/K [7, 8]. Однако применение такого геотермометра может

быть ограничено в связи с наличием ионного обмена с минералами (в частности с глинистыми минералами), обогащением катионами Ca, Mg, Na, или из-за отсутствия равновесия в системе вода–порода [8]. Таким образом, выбор геотермометра для установления пластовой температуры определяется химическим типом вод и условиями химического равновесия [9].

В связи с этим целью данной работы является установление применимости метода оценки глубинных температур циркуляции термальных вод с помощью геотермометров для разных химических типов на примере родников Восточной Тувы.

Объекты исследования

Для проведения геотермометрической оценки геотермальной системы Восточной Тувы были изучены термальные родники лечебных природных комплексов Чойган, Уш-Белдир и Тарыс (рис. 1). Гидротермы указанных природных комплексов представляют собой единую гидротермальную систему, принадлежащую к юго-западному флангу Байкальской рифтовой зоны, которая образуется в результате нагрева подземных вод региональным тепловым полем в процессе их глубинной циркуляции [3]. Проявление термальных источников обусловлено образованием очаговых зон позднекайнозойского вулканизма, проявившегося в виде Восточно-Тувинского вулканического ареала, включающего Восточно-Тувинское лавовое нагорье. По всей вероятности, позиция Восточно-Тувинского вулканического ареала и контролируется единым крупным субмеридиональным разломом [10–12]. Согласно изотопно-гелиевой оценке, уровень теплового потока на территории Тарыса и Уш-Белдира составляет 68 мВт/м², на Чойгане – 84 мВт/м², что свидетельствует об аномальном прогревании недр Восточной Тувы [3].

Природный комплекс Чойган представляет собой месторождение углекислых холодных и термальных вод и располагается на северо-востоке Тувы недалеко от границы с Бурятией, на абсолютных отметках 1550–1570 м. Возникновение углекислых Чойганских источников связано с крупным широтным разломом в докембрийских породах (гнейсы, мраморы, сланцы), прорванных гранитами и диоритами палеозоя [13]. На небольшой территории располагается 33 родника с температурой на поверхности от 7 до 39 °С, однако глубинные температуры вод значительно выше. Разгрузка подземных вод происходит преимущественно на правом берегу р. Аржан-Хем. Вокруг углекислых источников обширно развиты поля травертиновых отложений.

Начало изучения источников Чойгана связано с такими учеными, как И.С. Крыжин (1858), С.В. Обручев (1945), В.Г. Ткачук (1955), Е.В. Пиннекер (1966–1967). Последующие исследования источников проводились в 90-х гг. XX в. сотрудниками Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов (ТИКОПР СО РАН) под

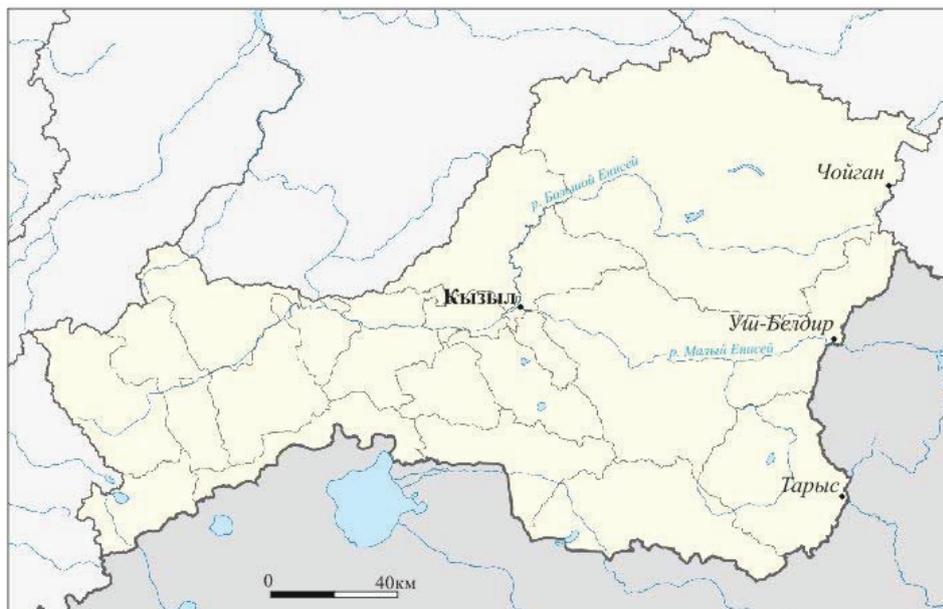


Рис. 1. Карта расположения природных комплексов Чойган, Уш-Белдир и Тарыс на территории республики Тыва

Fig. 1. Location map of natural spa complexes Choygan, Ush-Beldir and Tarys on the territory of the Republic of Tyva

руководством к.х.н. К.Д. Аракчаа и к.г.-м.н. К.С. Кужугета с привлечением ученых Иркутского государственного университета (руководитель – к.х.н. Г.М. Шпейзер) в 1989–1991 гг. и Томского политехнического университета (руководитель – к.г.-м.н. М.Б. Букаты) в 1992–1995 гг. Летом 2007 г. и в последующие годы изучение химического и газового состава родников Тувы было продолжено сотрудниками ТИКОПР СО РАН с участием проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета (ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ). Летом 2013 г. в составе научной экспедиции, организованной ООО «АржаанЛаб» (г. Кызыл), на Чойгане проводились комплексные научные исследования подземных вод, в процессе которых было обследовано 33 родника [11].

В 130 км к юго-западу от Чойгана по тому же глубинному разлому на крайнем юго-востоке республики Тыва рядом на границе с Монголией находится действующий лечебный курорт Уш-Белдир, который представляет собой крупное месторождение азотных терм. Источники располагаются в Прихубсугульском нагорье на абсолютной высоте 1120 м в месте слияния трех рек: Шишхид-Гол, Белин и Бусин-Гол. Месторождение насчитывает 10 термальных источников с температурой от 37 до 80 °С, а также в 50-х гг. XX в. было пробурено 4 разведочно-эксплуатационных и 9 зондировочных скважин. В 1932 г. В.М. Левченко проводил изучение термальных вод Уш-Белдира, после чего через год здесь открыли небольшой курорт. Последующее изучение источников проводилось геологами, гидрогеологами и бальнеологами (С.В. Обручев, В.В. Архангельская, Г.В. Махин, К.Ф. Богородицкий и др.) в 1945–1955 гг.

В 1963–1966 гг. был произведен подсчет запасов термальных вод Центральным институтом курортологии и физиотерапии, результаты этих работ освещены в работах Л.Н. Барабанова и В.Е. Сидорова (1967 г.) [13].

Геологическая структура представляет собой громадные глыбовые блоки, разбитые системой региональных разломов меридионального и широтного направлений. Главный Бусино-Белинский разлом протягивается близком к меридиональному направлению вдоль рек Бусин-Гол и Белина. Породы представлены метаморфическими толщами верхнего протерозоя (гнейсы, кварциты, сланцы) и синия (мраморы, сланцы), а также прорывающими их нижнепалеозойскими (габбро, диориты, габбро-диориты) и девонскими (граниты, сиениты) интрузиями. Здесь располагается обширное Восточно-Тувинское поле кайназойских базальтов [13].

Еще одна большая группа родников расположена в высокогорной местности на юго-востоке Республики Тыва, вблизи границы с Монголией – природный комплекс Тарыс, представляющий собой выходы 30 холодных и термальных родников. Источники находятся в 125 км южнее курорта Уш-Белдир в отрогах Прихубсугульского нагорья в устье ручья Аржаанец, на абсолютной отметке 1940 м, и представляют собой провинцию азотных вод с температурой воды до 48 °С. Наличие крупного разлома субмеридионального простирания вдоль контакта мраморизованных известняков верхнего протерозоя и нижнепалеозойских гранитов, а также трещиноватость пород обусловили возникновение термальных источников [14]. Первые сведения о Тарысских горячих источниках появились в работе В.М. Левченко в 1935 г., а в 1949 г. они изучались бальнеологом С.Л. Рогачевским. Изучением

режима минеральных вод и строительством ванн на Тарысе в 1954–1955 гг. занимались сотрудники «Союзгеокаптажминвод» (Ж.Ф. Богородицкий, В.И. Валединский, 1957). Летом 1955 г. Тувинским облздравотделом на Тарысе был организован временный врачебный пункт и консультации бальнеологов [13]. В 1965 г. термы обследовались Е.В. Пиннекером и Ю.И. Кустовым. Современное исследование родников Тарыса проводилось в 2012 г. под руководством Ч.К. Ойдул, а в 2013 г. работы по изучению вод велись К.Д. Аракчаа.

Методы исследования

Отбор проб природных вод проводился во время полевых маршрутов в 2013–2015 гг. В процессе полевых исследований на месте отбора проб определялись неустойчивые параметры состава вод: температура, pH, Eh, удельная электрическая проводимость с использованием портативного мультипараметрового анализатора Water Test фирмы Hanna. Вода для анализа макрокомпонентного состава отбиралась в пластиковую посуду объемом 1 л и доставлялась в лабораторию для анализа. Ионная составляющая химического состава вод анализировалась методами турбидиметрии, титриметрии, колориметрии и ионной хроматографии. Анализ проводился по программе общего количественного анализа. Комплексный анализ вещества состава вод выполнены в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» Института природных ресурсов Томского политехнического университета. В работе использовались результаты анализа химического состава термальных родников Чойгана, Уш-Белдира и Тарыса, имеющих температуру при разгрузке более 20 °С.

Название вод давалось в соответствии с правилом оттенков, согласно которому название химического типа воды складывается отдельно из ведущих анионов и катионов, содержания которых превышают 25 %-экв. При этом на первое место в названии ставятся анионы от 25 %-экв в возрастающем порядке, затем катионы в таком же порядке.

Для оценки резервуарных температур использованы различные методы, такие как геохимические геотермометры, диаграмма Гиггенбаха (W.F. Giggenbach, 1988) и метод минеральных равновесий. На основе результатов химического анализа проб воды были рассчитаны глубинные температуры с помощью геохимических геотермометров. Для расчетов были использованы Na-K геотермометр (R.O. Fournier, 1979), кремниевый (R.O. Fournier и R.W. II Potter, 1982), K-Mg (Giggenbach, 1988) и Na-K-Ca (Fournier and A.H. Truesdell, 1973) геотермометры [8, 15, 16].

Na-K геотермометр (Fournier, 1979):

$$T = \frac{1217}{1,438 + \log\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right)} - 273,15,$$

где Na, K в мг/л.

Кремниевый геотермометр (Fournier и Potter, 1982):

$$T = -42,198 \times (\pm 1,345) + 0,28831 \times (\pm 0,01337) \times S - 3,6686 \times 10^{-4},$$

где S – концентрация SiO₂ в мг/л.

K-Mg (Giggenbach, 1988):

$$T = \frac{4410}{14 - \log\left(\frac{\text{K}^2}{\text{Mg}}\right)} - 273,15,$$

где K, Mg в мг/л.

Na-K-Ca геотермометр (Fournier и Truesdell, 1973):

$$T = \frac{1647}{\lg\left(\frac{\text{Na}}{\text{K}}\right) + \beta \lg\left(\frac{\text{Ca}^{0,5}}{\text{Na}}\right) + 2,24} - 273,15,$$

Na, K, Ca – в моль/л, $\beta=4/3$ для T<100 °С.

Применение геотермометров основано на зависимости концентраций растворенных веществ от температуры и построено на предположении о сохранении равновесия в системе вода–порода–газ в геотермальном резервуаре до разгрузки вод на поверхности земли [17]. Катионные геотермометры основаны на реакциях ионного обмена, характеризующихся температурно-зависимыми константами равновесия [18].

Na-K геотермометр, представленный разными авторами, основан на обмене ионов K⁺ и Na⁺ в пластовых условиях и отражает возможные максимальные температуры в глубоких геотермальных системах. Он содержит дополнительные данные о более глубоких условиях и тепловых характеристиках геотермальной жидкости. Na-K геотермометр хорошо подходит для оценки температуры воды выше 200 °С [16, 18].

Кремниевый геотермометр основан на экспериментально определенных изменениях растворимости различных видов кремнезема (кварца, аморфного кремнезема и халцедона) в резервуаре в зависимости от температуры и давления. Кварцевые геотермометры лучше всего подходят для воды в диапазоне температур ниже 120–250 °С [18]. Недостаток данного геотермометра в том, что в связи с разбавлением термальных вод холодной водой, со сравнительно низким содержанием кремнезема, происходит его потеря, следовательно, расчетная температура пласта будет заниженной [16].

K-Mg геотермометр был впервые предложен Giggenbach и другими в 1983 г., а затем Giggenbach в 1988 г. разработал уравнение для этого геотермометра. Геотермометр используется для гидрогеотермальных систем с низкой и средней температурой в резервуаре порядка 50–300 °С. В отличие от Na-K геотермометра, K-Mg геотермометр отличается быстрым влиянием на изменения температуры и отражает самые последние значения температуры геотермальной жидкости [16].

Na-K-Ca геотермометр был разработан Fournier и Truesdell в 1973 г. для применения в водах с повышенным содержанием Ca^{2+} , который дает аномально высокую расчетную температуру для Na-K геотермометра. Геотермометр полностью эмпирический и предполагает один тип реакции обмена при температурах примерно $100\text{ }^\circ\text{C}$ [18].

По температуре формирования вод и геотермическому градиенту региона определялась глубина формирования вод по формуле:

$$h_{\text{форм}} = \frac{T}{\gamma},$$

где γ – геотермический градиент [5]. С учетом уровня теплового потока в регионе, а также средней теплопроводности метаморфических и магматических пород в горных районах южной Сибири ($2,5\text{ Вт/м }^\circ\text{C}$) для Уш-Белдира и Тарыса геотермический градиент составляет $27,2\text{ }^\circ\text{C/км}$, а для Чойгана – $33,6\text{ }^\circ\text{C/км}$ [5].

Кроме того, в программном комплексе PhreeqC были рассчитаны индексы насыщения вод (SI) различными минералами при разных температурах. Физико-химическое моделирование выполнялось для условий нормального атмосферного давления, диапазон температур был выбран от температуры разгрузки растворов до $150\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$. Если значения индексов насыщения относительно нескольких минералов находятся около нуля, т. е. в равновесном состоянии при определенной температуре, эта температура соответствует наиболее вероятной пластовой температуре для конкретной рассматриваемой воды [19]. Если SI равен или близок к нулю, то раствор находится в равновесном состоянии с данным минералом, при $\text{SI} < 0$ – раствор ненасыщен к минералу (происходит его растворение), если значение $\text{SI} > 0$ – раствор пересыщен к минералу и происходит его формирование [20]. В связи с тем, что геотермальные жидкости обычно подвергаются смешиванию с другими водами, будет наблюдаться сдвиг в значениях индекса насыщения, при котором раствор находится в равновесии с минералами, т. е. SI будет от 0 до $\pm 0,5$ [21].

Выбор минералов для построения графиков зависимости индексов насыщения от температуры основывался на определенном типе вод и характерных для этих типов минеральных равновесий в гидротермальных системах. Так как не известно, какие минералы на самом деле существуют в данной геотермальной системе, то вычисления выполняются для наиболее распространенных минералов, которые, как предполагается, существуют в системе и будут находиться в равновесии, в то время как равновесия с другими минералами не будут наблюдаться.

Обсуждение результатов

В табл. 1 приведен макрокомпонентный состав термальных вод Чойгана, Уш-Белдира и Тарыса.

По основным физико-химическим свойствам углекислые подземные воды Чойгана являются

термальными с температурой от 20 до $39\text{ }^\circ\text{C}$, слабокислыми и околонеитральными ($\text{pH } 6,1\text{--}6,9$), значения окислительно-восстановительного потенциала составляют от -170 до 183 мВ , в катионном составе преобладают ионы кальция и натрия, анионный состав представлен преимущественно гидрокарбонат-ионом. Отличительной чертой углекислых вод Чойгана, относительно других изучаемых вод Восточной Тувы, является кислый характер среды, наличие растворенного CO_2 ($277\text{--}1252\text{ мг/л}$) и повышенное содержание основных макрокомпонентов, а также SiO_2 в диапазоне от 26 до 55 мг/л . Воды Чойгана являются наиболее солеными, минерализация в среднем составляет 2216 мг/л . Минерализация вод обусловлена выщелачиванием элементов, таких как Ca, Na, K и Mg, из вмещающих пород поступающим углекислым газом.

Таблица 1. Химический состав термальных вод Восточной Тувы, мг/л

Table 1. Chemical composition of thermal water of Eastern Tuva, mg/l

Компонент Component		Чойган Choygan	Уш-Белдир Ush-Beldir	Тарыс Tarys	
T	$^\circ\text{C}$	<u>20–39</u> 28	<u>28–83</u> 62	<u>20–48</u> 37	
pH	–	<u>6,1–6,9</u> 6,4	<u>9,5–9,8</u> 9,7	<u>8,6–9,7</u> 9,5	
Eh	мВ (mV)	<u>-170–183</u> 29,8	<u>-482–120</u> -280	<u>-334–-39</u> -292	
HCO_3^-	мг/л (mg/l)	<u>1085–1910</u> 1607	<u>91–113</u> 105	<u>51–128</u> 69	
SO_4^{2-}		<u>4,5–45,2</u> 15,1	<u>26–53</u> 34	<u>114–220</u> 192	
Cl^-		<u>14,1–32,5</u> 23,5	<u>19–23</u> 21	<u>14–19</u> 15	
Ca^{2+}		<u>156–288</u> 225	<u>1–3</u> 2	<u>0,15–1,0</u> 0,34	
Mg^{2+}		<u>24,1–45,1</u> 32,1	<u>0,4–0,6</u> 0,5	<u>0,1–2,4</u> 0,8	
Na^+		<u>163–358</u> 283	<u>104–114</u> 110	<u>121–162</u> 148	
K^+		<u>24,2–56,2</u> 43,1	<u>2,8–3,6</u> 3,2	<u>4,1–6,7</u> 4,5	
SiO_2		<u>25,6–54,7</u> 44	<u>92,1–128,6</u> 116,2	<u>36,5–90,9</u> 71,6	
F		<u>0,14–1,1</u> 0,46	<u>12–14</u> 13	<u>15–24</u> 22	
CO_2^{2-}		<u>277–1252</u> 706	–	–	
CO_3		–	<u>66–90</u> 81	<u>8,4–43</u> 30	
Минерализация TDS			<u>1545–2647</u> 2216	<u>352–377</u> 369	<u>400–563</u> 483
Количество родников Number of springs			20	9	19
Химический тип Chemical type		$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	$\text{SO}_4\text{-Na}$	

Примечание. В числителе указаны минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Note: minimum and maximum values are in the numerator, the average ones are in the denominator.

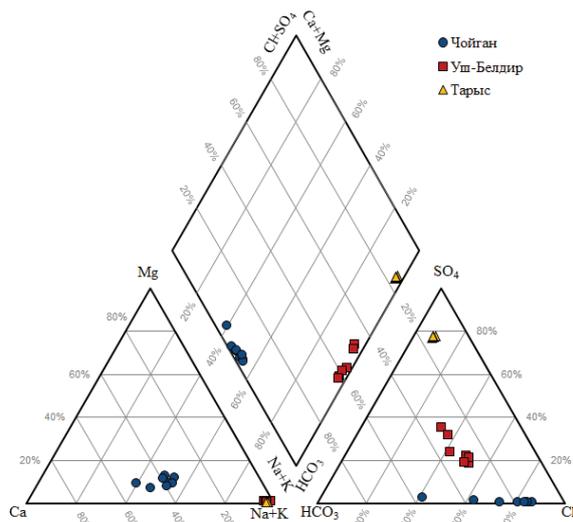


Рис. 2. Диаграмма Пайпера с нанесением данных по химическому составу термальных вод Восточной Тувы

Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of the thermal waters of Eastern Tuva

Азотные термальные воды Уш-Белдира и Тарыса по химическому составу, минерализации, температуре, значениям pH и Eh существенно отличаются от вод Чойгана. Подземные воды Уш-Белдира относятся к содовому типу, имеют высокую температуру воды в скважине (83 °С) и сильно восстановительную среду (минимальное значение Eh составляет –482 мВ), отличаются повышенной щелочностью (pH 9,5–9,7). В химическом составе воды среди катионов преобладает Na⁺, в анионном составе – HCO₃⁻. Воды умеренно пресные, с низким содержанием основных макрокомпонентов и, соответственно, низкой минерализацией – 374 мг/л, кроме того подземные воды Уш-Белдира отличаются высокими содержаниями SiO₂ (92–129 мг/л) и F⁻ (12–14 мг/л).

Максимальная температура воды Тарыса составляет 48 °С. По составу термальная вода является пресной сульфатной натриевой, минерализация в среднем составляет 483 мг/л, характеризуется низким окислительно-восстановительным потенциалом (Eh –292 мВ), по pH воды щелочные (pH 8,6–9,7). Отличительной чертой подземных вод Тарыса является присутствие в высоких концентрациях SO₄²⁻ (114–220 мг/л), F⁻ (15–24 мг/л) и SiO₂ (37–91 мг/л). Источниками F⁻, как и SiO₂, являются алюмосиликаты, и чем более длительным является взаимодействие в системе вода–порода, тем больше F может быть аккумуляровано в водном растворе.

Для геотермической оценки и выбора подходящего геотермометра для каждого типа вод широко используется диаграмма Na-K-Mg (рис. 3), предложенная Гиггенбахом в 1988 г. Эта диаграмма используется для установления степени равновесия подземных вод с минералами вмещающих пород и отражает эффект смешивания вод [17, 22].

Диаграмма также применяется для прогнозирования равновесной температуры и возможности использования катионных геохимических геотермометров для термальных вод. Она основана на температурной зависимости равновесия вод с группой минералов калия и натрия, которые образуются после изохимического метаморфизма породы в условиях геотермального влияния [23]. Положение точек опробования на диаграмме в поле «полного равновесия» (рис. 3) означает насыщение вод вторичными минералами натрия. Положение точек ниже линии равновесия в области «частичного равновесия» или «смешанных вод» отражает растворение минералов, но при этом вода не достигает полного насыщения вторичными минералами, либо указывает на смешение термальных вод с холодными грунтовыми водами. Область так называемых «неравновесных вод» указывает на начальную стадию растворения минералов, т. е. отсутствие равновесия вод с минералами калия и магния, высокое содержание магния в воде также объясняет расположение точек в данном поле [18].

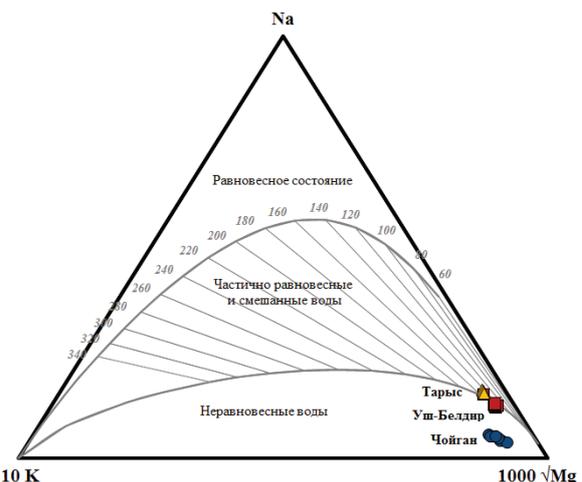


Рис. 3. Na-K-Mg треугольная диаграмма (Giggenbach, 1988) с нанесением термальных вод Восточной Тувы, демонстрирующая условия химического равновесия

Fig. 3. Na-K-Mg triangular diagram (Giggenbach, 1988) for thermal water of Eastern Tuva showing equilibrium conditions

Для определения применимости катионных геотермометров для изучаемых типов термальных вод Восточной Тувы результаты химического анализа точек опробования были нанесены на диаграмму Гиггенбаха. Подземные воды Чойгана на диаграмме лежат в поле неравновесного состояния вод, близко к углу Mg^{1/2} (рис. 3). Отсутствие равновесия вод с вторичными минералами калия и натрия возможно из-за быстрой циркуляции вод в трещинных водоносных породах и повышенного содержания Mg²⁺ в водах Чойгана (21–45 мг/л), по сравнению с другими рассматриваемыми водами. Нельзя не отметить тот факт, что присутствие свободной углекислоты в высоких концентрациях

ускоряет процесс выщелачивания элементов из вмещающих пород, обогащая воды такими катионами, как Na^+ , K^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} , что также влияет на результаты оценки. В связи с этим для данного типа вод использование катионных геотермометров не дает надежную оценку равновесной температуры, вместо этого более подходящими для использования будут кремниевые геотермометры.

На рис. 3 термы Тарыса и Уш-Белдира лежат в поле частично равновесных и смешанных вод с приблизительной температурой пласта 140–120 °С, что отражает более высокую стадию взаимодействия подземных вод с минералами и позволяет с помощью катионных геотермометров установить для данных типов вод надежные температуры пласта. Результаты расчетов глубинных температур с помощью геотермометров представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные глубинные температуры подземных вод Восточной Тувы

Table 2. Calculated reservoir temperatures of the groundwater of Eastern Tuva

Геотермометр Geothermometer	Температура пласта Reservoir temperature (°C)		
	Чойган Choygan	Тарыс Tarys	Уш-Белдир Ush-Beldir
Na-K (Fournier, 1979)	250–270 238	120–147 132	131–141 138
SiO_2 (Fournier и Potter, 1982)	74–106 96	102–129 117	133–149 141
K-Mg (Giggenbach, 1988)	76–93 87	66–102 80	71–80 74
Na-K-Ca (Fournier и Truesdell, 1973)	82–119 105	118–131 125	96–141 120

Результаты геотермометрии показали, что температура формирования подземных вод Чойгана, рассчитанная по Na-K геотермометру, получилась сильно завышенной (более 200 °С), вызывая сомнения в использовании Na-K геотермометра для данного типа вод. Это связано с высокими содержаниями Ca^{2+} , а также с сильным влиянием смешения термальных и холодных грунтовых вод [15]. Кремниевый, K-Mg и Na-K-Ca геотермометры показали более реальную температуру для гидрокарбонатных кальциевых вод Чойгана – 96, 87 и 105 °С соответственно.

В более горячих и маломинерализованных водах Тарыса и Уш-Белдира значения глубинных температур оказались близкими между собой. Заниженную температуру формирования подземных вод Тарыса и Уш-Белдира показал K-Mg геотермометр – 80 и 74 °С соответственно, такие результаты связаны с низкими концентрациями K^+ и Mg^{2+} в сульфатных и содовых водах, где преобладающим катионом является Na^+ , следовательно, применение данного геотермометра для оценки температуры нецелесообразно. Расчеты глубинных температур вод с помощью Na-K, кремниевого и Na-K-Ca геотермометров показали значения выше 100 °С, разница между показаниями геотермометров со-

ставила не более 20 °С, что допустимо при оценке. Для Тарыса глубинная температура циркуляции вод составляет в среднем 122 °С, для Уш-Белдира – 130 °С. Согласно полученным результатам, практически все геотермометры дают достаточно точную оценку глубинной температуры для термальных сульфатных и содовых вод.

Установленные по результатам геотермометрии высокие температуры циркуляции вод для Восточной Тувы связаны с повышенным тепловым потоком на территории Тувы, при этом геотермические градиенты составляют чуть выше среднего для верхней части земной коры [3]. С учетом температуры, полученной по кремниевому геотермометру и геотермическому градиенту на Чойгане (33,6 °С/км) [3], глубина формирования составляет около 3 км. К юго-западу от Чойгана на Тарысе и Уш-Белдире геотермический градиент уменьшается и составляет 27,2 °С/км, при этом значения глубинных температур возрастают на 20–30 °С, а глубина циркуляции располагается на 1–2 км ниже, т. е. на уровне 4,5 и 4,8 км соответственно.

Кроме геотермометрической оценки существует еще один способ для установления глубинных температур или для проверки результатов расчетов геотермометров. Химический состав термальных вод определяется температурно-зависимыми реакциями между вмещающей породой и термальной водой, а также зависит от нескольких факторов: минерального состава пород-коллекторов, процессов смешивания, кипения и охлаждения [7]. М.Н. Reed и N. Sphycher (1984) предложили для наилучшей оценки температуры пласта использовать состояние равновесия между водой и различными минералами в зависимости от температуры, т. к. константы равновесий сильно зависят от температурных условий [19, 24]. Этот метод был применен к выборочным родникам Чойгана, Тарыса и Уш-Белдира, имеющим максимальную температуру воды на выходе (рис. 4).

Согласно расчетам при различных температурах, углекислые подземные воды Чойгана находятся в равновесии с кальцитом, кварцем, халцедоном, насыщены доломитом, мусковитом и каолинитом и далеки от равновесия с ангидритом при температуре разгрузки 38 °С (рис. 4, а). Для установления глубинной температуры вод необходимо определить температуру, при которой наибольшее число минералов находится в равновесии с водой, т. е. $SI=0$. Для этого на графике была найдена точка пересечения линий индексов насыщения нескольких минералов (мусковита, каолинита, кварца и халцедона), расположенная около нуля на уровне 95 °С, что отражает температуру формирования термальных вод Чойгана.

Оценка температуры формирования вод по расчетам индексов насыщения для высокотемпературных вод Тарыса и Уш-Белдира показала более высокие температуры, чем для гидротерм Чойгана. Сульфатные воды месторождения Тарыс при температуре разгрузки 48 °С насыщены кремние-

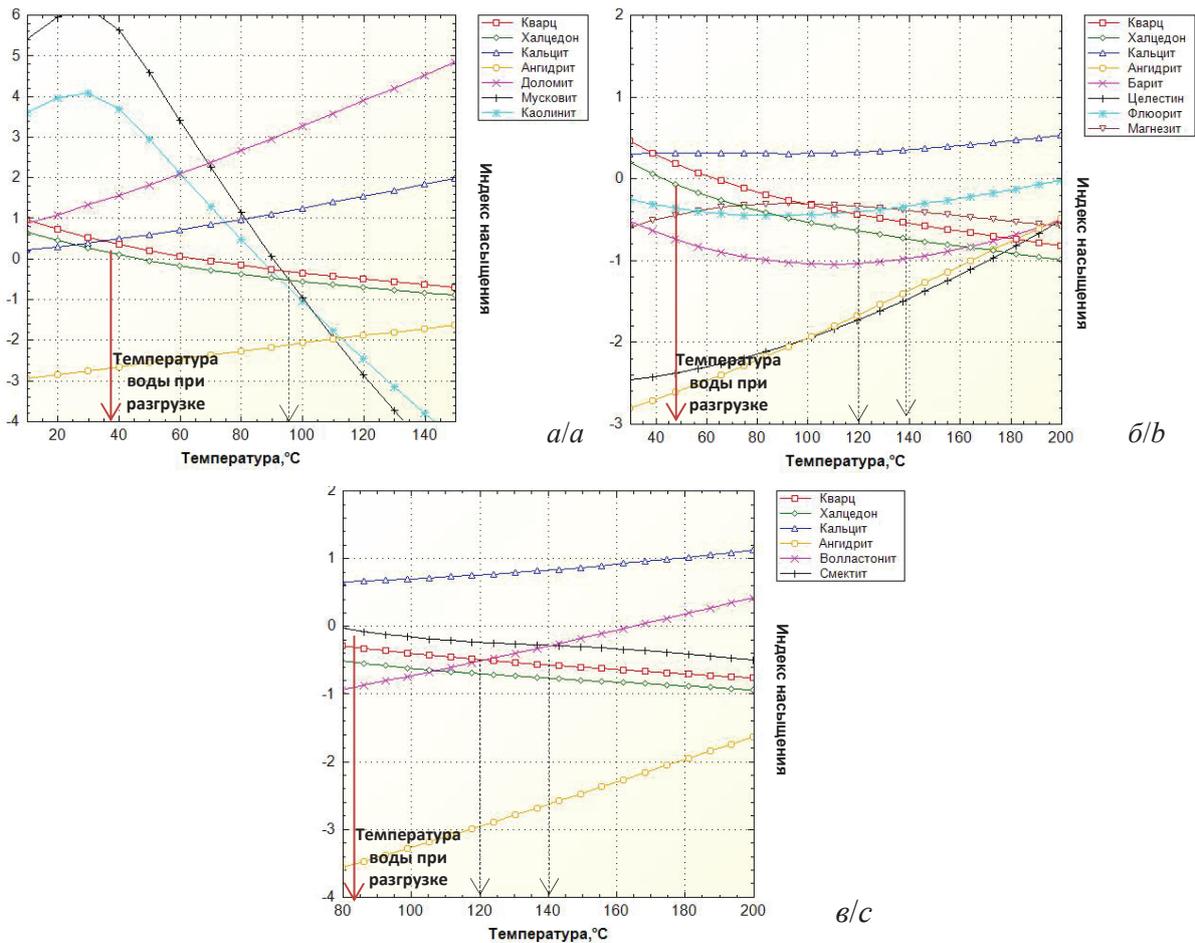


Рис. 4. Диаграммы равновесия минералов для термальных вод Восточной Тувы: а) Чойган, родник № 12; б) Тарыс, родник № 12; в) Уш-Белдир, скважина № 1 рэ

Fig. 4. Mineral equilibrium diagrams for thermal waters of Eastern Tuva: а) Choygan, spring no. 12; б) Tarys, spring no. 12; с) Ush-Beldir, well no. 1 re

выми и карбонатными минералами (халцедон, кварц и кальцит), при этом неравновесны с сульфатными минералами (барит, целестин, ангидрит), магнезитом и флюоритом (рис. 4, б). Область пересечения индексов насыщения флюорита, магнезита, кварца и халцедона находится в пределах температур 120–140 °С.

При температуре на выходе 83 °С наблюдается насыщение гидрокарбонатных натриевых вод Уш-Белдира кальцитом и низкотемпературным смектитом (рис. 4, в). Линия индексов насыщения смектитом, волластанитом, кварцем и халцедоном пересекаются в области температур 120–140 °С. Для более точного определения температуры можно использовать расчеты индексов насыщения другими минералами.

Полученные с помощью индексов насыщения температуры пласта близки к температурам, рассчитанным по геотермометрам, однако не дают точных значений. Этот метод можно использовать предварительно для ориентировочной оценки глубинной температуры или в качестве проверки расчетных температур геотермометров.

Выводы

Благодаря использованию нескольких существующих методов оценки глубинной температуры вод были рассчитаны пластовые температуры гидротермальных систем Восточной Тувы, а также для каждого типа вод установлены подходящие геотермометры.

Для сульфатных и содовых вод Тарыса и Уш-Белдира хорошую сходимость результатов показало применение практически всех геотермометров, разница температур составляет не более 20 °С. Полученные прогнозные температуры пласта по расчетам геотермометров составляют 120 °С на глубине 4,5 км для Тарыса и 130 °С на глубине 4,8 км для Уш-Белдира. Метод расчетов индекса насыщения в зависимости от температуры также дал хорошие результаты оценки глубинных температур. Для Уш-Белдира и Тарыса диапазон температур находится в пределах 120–140 °С, что совпадает с расчетами геотермометров. Расчеты К-Mg геотермометра показали заниженные температуры для сульфатных и гидрокарбонатных натриевых гидротерм Тарыса и Уш-Белдира, что дает возмож-

ность усомниться в его применимости для этих типов вод.

В случае с гидрокарбонатными кальциевыми водами Чойгана определение достоверных глубинных температур с помощью катионных геотермометров, особенно по Na-K геотермометру, является затруднительным. В этом случае для так называемых неравновесных вод, согласно диаграмме Гиггенбаха, более надежную оценку температуры пласта обеспечивают K-Mg и Na-K-Ca геотермометры, а также кремниевый. Величина глубинной температуры на Чойгане, полученная по геотермометрам, составила около 100 °C и подтвердилась другим методом определения температуры с помощью расчетов индексов насыщения, при этом глубина формирования оценивается в 3 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia / Н. Baioumy, М. Nawawi, К. Wagner, М.Н. Arifin // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2015. – V. 290. – P. 12–22.
2. Potential Geothermal Energy Resources of India: a review / Н.К. Singh, D. Chandrasekharam, G. Trupti, P. Mohite, B. Singh // *Curr. Sustain. Energy Reports*. – 2016. DOI: 10.1007/s40518-016-0054-0.
3. Оценки теплового потока Тувы по данным об изотопах гелия в термоминеральных источниках / А.Д. Дучков, К.М. Рычкова, В.И. Лебедев, И.Л. Каменский, Л.С. Соколова // *Геология и геофизика*. – 2010. – Т. 51. – № 2. – С. 264–276.
4. Поляк Б.Г. Изотопы гелия в подземных флюидах Байкальского рифта и его обрамления (к геодинамике континентального рифтогенеза) // *Российский журнал наук о Земле*. – 2000. – Т. 2. – № 2. – С. 1–21.
5. Окинская гидротермальная система (Восточный Саян) / П.С. Бадминов, А.В. Иванов, Б.И. Писарский, А.И. Оргильянов // *Вулканология и сейсмология*. – 2013. – № 4. – С. 27–39.
6. Estimation of deepwater temperature and hydrogeochemistry of springs in the Takab geothermal field, West Azerbaijan, Iran / R. Sharifi, F. Moore, Z. Mohammadi, B. Keshavarzi // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2016. – V. 188. – P. 75–86.
7. Solute geothermometry of Cerro Prieto and Los Humeros geothermal fields, Mexico: considerations on chemical characteristics of thermal water / A.Y. Garcia-Soto, K. Pandarinath, J.E. Marrero-Ochoa, C. Diaz-Gomez // *Arab. J. Geosci.* – 2016. DOI: 10.1007/s12517-016-2529-0
8. Verma S.P., Pandarinath K., Santoyo E. SolGeo: a new computer program for solute geothermometers and its application to Mexican geothermal fields // *Geothermics*. – 2008. – V. 37. – № 6. – P. 597–621.
9. Pandarinath K., Dominguez-Dominguez H. Evaluation of the solute geothermometry of thermal springs and drilled wells of La Primavera (Cerritos Colorados) geothermal field, Mexico: a geochemometrics approach // *South Am. Earth Sci.* – 2015. – V. 62. – P. 109–124.
10. Оценка глубинных температур термальных источников Хангая и Восточного Саяна с помощью гидрохимических геотермометров / П.С. Бадминов, Д. Ганчимэг, А.И. Оргильянов, И.Г. Крюкова, Д. Оуунцэцэг // *Вестник БГУ. Химия, физика*. – 2011. – Вып. 3. – С. 90–94.
11. Геохимия углекислых вод природного комплекса Чойган (северо-восток Тувы) / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, К.Д. Аракчаа, А.А. Хвашевская // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т. 55. – № 11. – С. 1635–1648.
12. Кужугет К.С., Монгуш С.С., Рычкова К.М. Глубинные температуры, кайнозойский вулканизм и сейсмичность Восточной Тувы // *Молодёжный научный вестник*. – 2016. – № 9. – С. 100–105.
13. Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы. – Кызыл: Тувинское книжное изд-во, 1968. – 105 с.
14. Химический состав вод родников природного комплекса Тарыс (Восточная Тува) / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, К.Д. Аракчаа и др. // *Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов*. – 2015. – Т. 2. – № 1–1. – С. 89–98.
15. Alçiçek H., Bülbül A., Alçiçek M.C. Hydrogeochemistry of the thermal waters from the Yenice Geothermal Field (Denizli Basin, Southwestern Anatolia, Turkey) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* – 2016. – V. 309. – P. 118–138. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.025.
16. Conceptual model of the Gulbahce geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data / T. Uzelli, A. Baba, G.G. Mungan et al. // *Geothermics*. – 2017. – V. 68. – P. 67–85.
17. A hydrochemical study of the Hammam Righa geothermal waters in north-central Algeria / M. Belhai, Y. Fujimitsu, F.Z. Boucharreb-Haouchine, A. Haouchine, J. Nishijima // *Acta Geochim.* – 2016. – V. 35. – P. 271–287. DOI: 10.1007/s11631-016-0092-8
18. Dolgorjav O. Geochemical characterization of thermal fluids from the Khangay area, Central Mongolia // *Geothermal training programme*. – 2009. – V. 10. – P. 125–150.
19. Gökçöz A., Akdağoglu H. Hydrogeology and hydrogeochemistry of a coastal low-temperature geothermal field: a case study from the Datça Peninsula (SW Turkey) // *Environ. Earth Sci.* – 2016. – V. 75. – P. 1143–1161.
20. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: Т. 1: Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
21. Wishart D.N. Comparison of silica and cation geothermometers of bath hot springs, Jamaica // *WI World Geotherm. Congr.* – Melbourne, 2015. – P. 1–13.
22. Integrated study of surface and subsurface data for prospecting hydrogeothermal basins of hot water spring Ain El Hammam: case of Utique region basin (extreme north of Tunisia) / M. Andolssi, S. Alyahyaoui, J. Makni, A. Charef, H. Zouari, M. Tarki, B. Challouf // *Arab. J. Geosci.* – 2015. – V. 8. – P. 8879–8897. DOI: 10.1007/s12517-014-1743-x
23. Giggensbach W.F. Geochemical exploration of a «difficult» geothermal system, Paraso, Vella Lavella, Solomon Islands // *Proc.*

- of the World Geothermal Congress. – Florence, Italy, 1995. – P. 995–1000.
24. Reed M.H., Spycher N. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1984. – V. 48 – P. 1479–1492.
25. Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China / P. Yang, Q. Cheng, S. Xie, J. Wang et al. // *Journal of Hydrology.* – 2017. – № 549. – P. 50–61.

Поступила 26.09.2017 г.

Информация об авторах

Шестакова А.В., инженер проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гусева Н.В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314

CALCULATION OF DEEP TEMPERATURES OF THERMAL WATERS IN EASTERN TUVA

Anastasia V. Shestakova¹,

ashest91@mail.ru

Natalia V. Guseva¹,

guseva24@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, 634050, Lenin Avenue, Tomsk, Russia.

Relevance of the work is caused by the presence of a wide variety of geochemical geothermometers used to assess depth of temperatures, and reliability of their application to various chemical types of thermal waters.

The main aim of the study is to establish the applicability of the method for estimating deep temperatures of thermal waters circulation using geothermometers for different chemical types on the example of the Eastern Tuva springs.

Methods of research. Chemical composition analysis of the waters was carried out in the accredited research laboratory of hydrogeochemistry of TPU. Traditional methods were used to conduct a complete chemical analysis. Geochemical geothermometers and calculation of a mineral saturation index as a function of temperature in PhreeqC package were used to estimate the deep temperatures.

Results. The assessment of the temperature conditions of the Eastern Tuva hydrothermal systems shown silicon geothermometers predicted more reliable reservoir temperatures for all thermal waters in question compared to other geothermometers independently of chemical types of water. The choice of this or that geothermometer is determined by the chemical type of water, equilibrium in the water–rock system and concentration of the main elements. Almost all geothermometers showed good convergence of results for sulfate and hydrocarbonate waters of Tarys and Ush-Beldir, the predicted reservoir temperatures are 120 and 130 °C at a depth of 4,5 and 4,8 km, respectively. The same temperature values were obtained by the saturation index approach over a range of temperatures. Determination of reliable deep temperatures for the Choigan hydrocarbonate waters with help of cationic geothermometers proved to be difficult. In this case, the silicon geothermometer provides a reliable estimate of the reservoir temperature for waters with high cation concentrations. The value of the temperature obtained from the silicon geothermometer was confirmed by another method of temperature determining – using saturation indices – and it is about 100 °C, while the depth of formation is estimated at 3 km.

Key words:

Thermal waters, geothermometers, hydrothermal system, chemical composition, Tuva.

The authors appreciate the valuable comments of the professor Stepan L. Shvartsev.

The research was financially supported by the RFBR grant no. № 16–35–00324 мол_a.

REFERENCES

- Baioumy H., Nawawi M., Wagner K., Arifin M.H. Geochemistry and geothermometry of non-volcanic hot springs in West Malaysia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, vol. 290, pp. 12–22.
- Singh H.K., Chandrasekharam D., Trupti G., Mohite P., Singh B. Potential Geothermal Energy Resources of India: a review. *Curr. Sustain. Energy Reports*. DOI 10.1007/s40518–016–0054–0.
- Duchkov A.D., Rychkova K.M., Lebedev V.I., Kamenskiy I.L., Sokolova L.S. Estimates of the heat flow of Tuva by the data on helium isotopes in thermomineral sources. *Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 2, pp. 264–276. In Rus.
- Polyak B.G. Helium isotopes in underground fluids of Baikal rift and its margins (on geodynamics of continental rifting). *Rossiyskiy zhurnal nauk o Zemle*, 2000, vol. 2, no. 2, pp. 1–21. In Rus.
- Badminov P.S., Ivanov A.V., Pisarskiy B.I., Orgiliynov A.I. Okinsk hydrothermal system (Eastern Sayan). *Journal of Volcanology and Seismology*, 2013, no. 4, pp. 27–39. In Rus.
- Sharifi R., Moore F., Mohammadi Z., Keshavarzi B. Estimation of deepwater temperature and hydrogeochemistry of springs in the Takab geothermal field, West Azerbaijan, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, vol. 188, pp. 75–86.
- García-Soto A.Y., Pandarinath K., Marrero-Ochoa J.E., Díaz-Gómez C. Solute geothermometry of Cerro Prieto and Los Humeros geothermal fields, Mexico: considerations on chemical characteristics of thermal water. *Arab. J. Geosci.*, 2016. DOI: 10.1007/s12517–016–2529–0
- Verma S.P., Pandarinath K., Santoyo E. SolGeo: a new computer program for solute geothermometers and its application to Mexican geothermal fields. *Geothermics*, 2008, vol. 37, no. 6, pp. 597–621.
- Pandarinath K., Domínguez-Domínguez H. Evaluation of the solute geothermometry of thermal springs and drilled wells of La Primavera (Cerritos Colorados) geothermal field, Mexico: a geochemometrics approach. *South Am. Earth Sci.*, 2015, vol. 62, pp. 109–124.
- Badminov P.S., Ganchimeg D., Orgiliynov A.I., Krukova I.G., Oyuntsetseg D. Evaluation of deep temperatures of thermal springs in Khangay and East Sayan using hydrochemical geothermometers. *Vestnik Buryatskogo gosydarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 90–94. In Rus.
- Kopylova Yu.G., Guseva N.V., Arakchaa K.D., Khvashchevskaya A.A. Geochemistry of CO₂ waters of the natural spa complex Choygan (north-east of Tuva). *Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, no. 11, pp. 1635–1648. In Rus.
- Kuzheget K.S., Mongush S.S.S., Ruchkova K.M. Glubinnye temperatury, kaynozoyskiy vulkanizm i seysmichnost Vostochnoy Tuvy [Deep temperatures, Cenozoic volcanism and seismicity of Eastern Tuva]. *Molodezhniy nauchniy vestnik*, 2016, no. 9, pp. 100–105.
- Pinneker E.V. *Mineralnye vody Tuvy* [Mineral water of Tuva]. Kyzyl, Tuvan Publ., 1968. 105 p. In Rus.
- Kopylova Yu.G., Guseva N.V., Arakchaa K.D. Chemical composition of the springs of the natural complex Tarys (Eastern Tuva).

- The resort base and natural health-improving areas of Tuva and adjacent regions*, 2015, vol. 2, no. 1–1, pp. 89–98. In Rus.
15. Alçiçek H., Bülbül A., Alçiçek M.C. Hydrogeochemistry of the thermal waters from the Yenice Geothermal Field (Denizli Basin, Southwestern Anatolia, Turkey). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2016, vol. 309, pp. 118–138. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.10.025.
 16. Uzelli T., Baba A., Mungan G.G. Conceptual model of the Gulbahce geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data. *Geothermics*, 2017, vol. 68, pp. 67–85.
 17. Belhai M., Fujimitsu Y., Bouchareb-Haouchine F.Z., Haouchine A., Nishijima J. A hydrochemical study of the Hammam Righa geothermal waters in north-central Algeria. *Acta Geochim.*, 2016, vol. 35, pp. 271–287. DOI: 10.1007/s11631-016-0092-8
 18. Dolgorjav O. Geochemical characterization of thermal fluids from the Khangay area, Central Mongolia. *Geothermal training programme*, 2009, vol. 10, pp. 125–150.
 19. Gökgöz A., Akdağoglu H. Hydrogeology and hydrogeochemistry of a coastal low-temperature geothermal field: a case study from the Dağça Peninsula (SW Turkey). *Environ. Earth Sci.*, 2016, vol. 75, pp. 1143–1161.
 20. Alekseev V.A., Ryzhenko B.N., Shvartsev S.L. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda T. 1. Sistema voda–poroda v zemnoy kore: vzaimodeystviye, kinetika, ravnovesiye, modelirovaniye* [Geological evolution and formation of water–rock system. V. 1. The water–rock system in the crust: interaction, kinetics, equilibrium modeling]. Novosibirsk, Russian Academy of Sciences Publ., 2005. 244 p.
 21. Wishart D.N. Comparison of Silica and Cation Geothermometers of Bath Hot Springs, Jamaica WI. *World Geotherm. Congr. Melbourne*, 2015. pp. 1–13.
 22. Andolssi M., Alyahyaoui S., Makni J., Charef A., Zouari H., Tarki M., Challouf B. Integrated study of surface and subsurface data for prospecting hydrogeothermal basins of hot water spring Ain El Hammam: case of Utique region basin (extreme north of Tunisia). *Arab. J. Geosci.*, 2015, vol. 8, pp. 8879–8897. DOI: 10.1007/s12517-014-1743-x
 23. Giggenbach W.F. Geochemical exploration of a «difficult» geothermal system, Paraso, Vella Lavella, Solomon Islands. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. Florence, Italy, 1995. pp. 995–1000.
 24. Reed M.H., Spycher N. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, vol. 48, pp. 1479–1492.
 25. Yang P., Cheng Q., Xie S., Wang J. Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China. *Journal of Hydrology*, 2017, no. 549, pp. 50–61.

Received: 26 September 2017.

Information about the authors

Anastasia V. Shestakova, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalia V. Guseva, Cand. Sc., head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.