

**ОЦЕНКА ГЛУБИННЫХ ТЕМПЕРАТУР ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ УШ-БЕЛДИР (ТУВА)**

**А.В. Шестакова**

*Научный руководитель зав. каф. ГИГЭ Н.В. Гусева*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия*

Основными задачами геохимических исследований геотермальных систем является прогнозирование пластовых температур для понимания циркуляции термальных флюидов и получения информации об их происхождении. Основное предположение заключается в том, что концентрации многих компонентов в геотермальных флюидах отражают тепловые условия на глубине [3]. Использование геохимических исследований существенно снижает затраты на геотермальную разведку. Опираясь на предположение, что концентрация растворенных компонентов в термальных водах связана с температурой резервуара, многие авторы разработали геотермометры для исследования геотермальных флюидов при различных условиях, в основном, катионные и кремниевые. Геотермометры были успешно применены ко многим термальным водам и стали важным и необходимым инструментам геотермальной оценки. Тем не менее, в своей простоте геотермометры могут потерпеть неудачу, т.к. полуэмпирические корреляции, на которых они основаны, не всегда действительны для всех геохимических систем, а отсутствие информации о геохимических условиях на глубине резервуара затрудняет использование ионных геотермометров [6, 3]. Кроме того, геотермальные флюиды, восходящие к земной поверхности, как правило, подвергаются потери газа, смешиванию и/или разбавлению холодной грунтовой, маскируя свои истинные глубинные геохимические особенности. По этим причинам интерпретации результатов расчетов геотермометров является сложной задачей.

Существует и другой подход для определения температуры геотермального резервуара, предложенный Reed и Spycher (1984). Этот метод заключается в вычислении индексов насыщения вод потенциальными минералами в диапазоне температур, при этом группа минералов достигает равновесия при определенной температуре. Эту температуру, при которой максимальное количество минералов находятся в равновесии друг с другом и с геотермальной жидкостью, можно считать температурой пласта [5]. В связи с распространенностью геотермальных источников и наличием нескольких методов температурной оценки резервуара, выбор наиболее достоверного и надежного способа установления температуры является весьма актуальным. Целью данного исследования является определение глубинной температуры циркуляции термальных вод на примере месторождения Уш-Белдир (Тува).

На юго-востоке республики Тыва на границе с Монголией находится действующий лечебный курорт Уш-Белдир, представляющий 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 83 °С, а также в 50-х годах 20 века было пробурено 4 разведочно-эксплуатационных и 9 зондировочных скважин. Термальные воды используют для физиотерапевтических процедур, бытовых нужд и обогрева корпусов санатория.

В 1932 г. советский гидрогеохимик Левченко В.М. проводил изучение термальных вод Уш-Белдира, после чего через год здесь открыли небольшой курорт. Последующее изучение источников проводилось геологами, гидрогеологами и бальнеологами в 1945-1955 гг. (Обручев С.В., Архангельская В.В., Махин Г.В., Богородицкий К.Ф. и др.). В 1963-1966 гг. был произведен подсчет запасов термальных вод Центральным институтом курортологии и физиотерапии, результаты этих работ освещены Барабановым Л.Н. и Сидоровым В.Е. (1967 г.) [1]. Недавние работы по опробованию родников на Уш-Белдире проводились летом 2015 г сотрудниками ПНИЛ гидрогеохимии. В работе использовались данные по скважине 3 рэ с глубиной 63 м и самой высокой температурой.

В геологическом строении данной территории участвуют метаморфические породы верхнего протерозоя (гнейсы, кварциты, сланцы) и синия (мраморы, сланцы), а также прорывающие их нижнепалеозойские (габбро, диориты, габбро-диориты) и девонские (граниты, сиениты) интрузии. Здесь располагается обширное Восточно-Тувинское поле кайназойских базальтов [1]. С учетом уровня теплового потока на территории Тувы, а также средней теплопроводности метаморфических и магматических пород в горных районах южной Сибири (2,5 Вт/м °С), изменение геотермического градиента на Уш-Белдире составляет 2,7 °С на каждые 100 м глубины.

По химическому составу подземные воды Уш-Белдира относятся к содовому типу вод, с высокой температурой воды при разгрузке – 83 °С, очень низким окислительно-восстановительным потенциалом -476 мВ, и щелочными условиями среды (рН 9,46). Воды гидрокарбонатные натриевые, пресные, с низким содержаниями основных макрокомпонентов и, соответственно, низкой минерализацией – 374 мг/л, также подземные воды Уш-Белдира характеризуются высокими значениями SiO<sub>2</sub> – 116 мг/л и F – 13 мг/л (табл.).

*Таблица*

*Химический состав термальных вод Уш-Белдира*

Номер скважины	Параметры													
	T	Eh	pH	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	Ca	Mg	Na	K	SiO <sub>2</sub>	F	Минерализация
	°С	мВ		мг/л										
3 рэ	83	-476	9,46	87	110	26	21	2,1	0,6	111	3,4	116	13	374

Для оценки пластовых температур по методу Reed и Spycher (1984) в программном комплексе PhreeqC, используя химический состав вод, были рассчитаны индексы насыщения вод (SI) различными минералами в зависимости от температуры. Если индексы насыщения SI относительно нескольких минералов стремятся к равновесию (SI от 0 до  $\pm 0,5$ ) при определенной температуре, эта температура соответствует наиболее вероятной пластовой температуре, или, температуре исходного водоносного горизонта для конкретной рассматриваемой воды [4]. Диапазон расчетных температур был выбран от температуры разгрузки до 200 °С. Выбор минералов для построения графиков зависимости индексов насыщения вод от температуры основывался на определенном типе вод и предполагаемых для этого типа минералов гидротермальной системы.

Согласно расчетам индексов насыщения вод Уш-Белдира при температуре разгрузки 83 °С наблюдается насыщение вод Уш-Белдира карбонатными минералами (кальцитом, магнезитом) и низкотемпературным смектитом, при этом воды далеки от равновесия с ангидритом, флюоритом и альбитом (Рис.). Линии индексов насыщения вод смектитом, воллостанитом, кварцем и халцедоном пересекаются в области близкой к нулю при температуре 120–140 °С, что отражает пластовую температуру геотермальной системы.

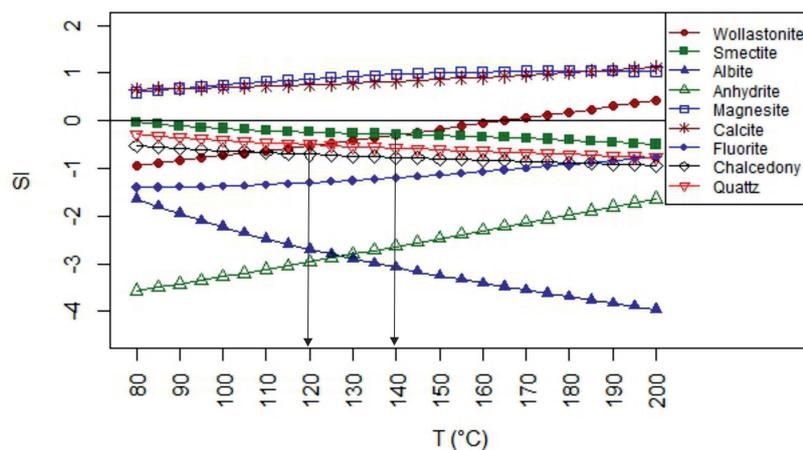


Рис. Диаграмма равновесий минералов для термальных вод Уш-Белдира

В предыдущих исследованиях оценка глубинных температур Уш-Белдира с помощью геохимических Na-K, кремниевого и Na-K-Ca геотермометров показала, что прогнозная температура резервуара составляет от 113 до 149 °С. Оба метода показали хорошую сходимость результатов, разница температур составляет не более 20 °С. С учетом геотермического градиента, глубины циркуляции подземных вод Уш-Белдира составляют около 5 км.

Согласно классификации выделения геотермальных районов, территория Уш-Белдира относится к нормальному классу, с температурным градиентом менее 40 °С/км [2], а оцененные прогнозные пластовые температуры термальных вод Уш-Белдира составляют 120–140 °С, при этом температура воды на выходе – 83 °С. С точки зрения коммерческого использования, воды с температурой на глубине менее 150 °С не представляют интереса для выработки электроэнергии. Однако для местного использования в качестве обогрева корпусов и физиотерапевтического лечения этой температуры достаточно и это подтверждает более чем 60-летний опыт эксплуатации данного месторождения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-35-00324).

#### Литература

1. Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы. – Кызыл: Тувинское книжное издательство. – 1968. – 105 с.
2. Городов Р.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Р.В. Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев. – 1-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 294 с.
3. Battistel, M., Hurwitz, S., Evans, W., Barbieri, M., 2014. Multicomponent geothermometry applied to a medium-low enthalpy carbonate-evaporite geothermal reservoir. Energy Procedia 59, 359–365. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.389
4. Gökgöz, A., Akdağoğlu, 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.
5. Peiffer, L., Wanner, C., Spycher, N., Sonnenthal, E.L., Kennedy, B.M., Iovenitti, J., 2014. Optimized multicomponent vs. classical geothermometry: Insights from modeling studies at the Dixie Valley geothermal area. Geothermics 51, 154–169. doi:10.1016/j.geothermics.2013.12.002
6. Spycher, N., Peiffer, L., Sonnenthal, E., 2014. GeoT user ' s guide, a computer program for multicomponent geothermometry and geochemical speciation. Lawrence Berkeley Natl. Lab. Rep. Number LBNL-6172E 1–38.