УДК 620.92

Опыт применения геотермометров на активах ООО «ЗН Геотерм»

М.А. Степанов[1], Т.С. Баранов[1], Э.К. Хмарин[1,2]

[1]*АО «Зарубежнефть», Москва, Россия*
MStepanov@nestro.ru
[2]*ООО «ЗН Геотерм», Москва, Россия*

В настоящее время при оценке новых геотермальных проектов большинство компаний используют геотермометры. В данной работе представлены способы и результаты применения геотермометров на ряде лицензионных участков ООО «ЗН Геотерм» на Камчатке: Корякско-Кеткинском, Верхне-Жировском и Больше-Банном.

Experience in Using Geothermometers at ZN Geotherm LLC Licensed Areas

Mikhail A. Stepanov[1], Timofey S. Baranov[1], Eduard K. Khmarin[1,2]

[1]*Zarubezhneft JSC, Moscow, Russia*
[2]*ZN Geotherm LLC, Moscow, Russia*

Currently, most companies use geothermometers when evaluating new geothermal projects. This research presents methods and results regarding the application of geothermometers at some ZN Geotherm LLC licensed areas: Koryaksko-Ketkinskiy, Verhnezhirovskoy, Bolshe-Banniy.

Введение

В настоящее время в мировой геотермальной энергетике при изучении геотермальных систем широко применяются геотермометры. Геотермометр – это эмпирическое или расчетное выражение на основе зависимого от температуры химического или изотопного равновесия между водой и минералами в условиях недр. Практические задачи, которым может помочь геотермометрия:

1. Прогноз температуры воды в зоне ее максимального нагрева.
2. Оценка степени разбавления холодными водами.
3. Сравнительная оценка дальности от зоны нагрева, уточнение пути движения воды.

В данной работе рассмотрены результаты применения геотермометров на трех лицензионных участках ООО «ЗН-Геотерм» на Камчатке.

Виды и особенности геотермометров

Выделяется 4 группы геотермометров: кремниевые, катионные, газовые и изотопные. С учетом объема исходных данных в представленной работе использовались кремниевые и катионные геотермометры.

Кремниевые геотермометры основаны на изменении растворимости различных видов кремнезема в воде в зависимости от температуры. Различные виды кремниевых геотермометров наиболее применимы (с допущениями) для определенных диапазонов температур воды в зоне нагрева [1]: 150–250 °С − кварцевый, 120–180 °С – халцедоновый, менее 120 °С – аморфно-кремниевый (пониженная корреляция).

Особенности применения кремниевых геотермометров [2]:

- малоприменимы при температуре воды в зоне нагрева более 250 °С;
- при смешении с холодными водами оценка температуры занижается;
- при активном паровыделении оценка температуры завышается;
- при выпадении кремнезема до и после отбора оценка температуры занижается;
- при высоком pH оценка температуры завышается (при 150–220 °С от pH > 7,5).

В данной работе применялись кварцевые при кондуктивном охлаждении [3, 4], кварцевый при адиабатическом охлаждении [4] и халцедоновый [5] геотермометры.

Катионные геотермометры основаны на реакциях ионного обмена между минералами и жидкой фазой в зависимости от температуры. Особенности применения Na-K геотермометров [2]:

- слабо восприимчивы к смешиванию, дегазации;
- лучше подходят для высоких температур (более 150–180 °C);
- при высоком содержании Ca2+ завышают температуру.

Na-K-Ca геотермометр применяется при высоком содержании Ca^{2+}, CO_2. При высоком содержании Mg^{2+} применяется корректировка на Mg (Na-K-Ca-Mg геотермометр).

В данной работе использовались Na-K [6, 4], Na-K-Ca [7], Na-K-Ca-Mg [8] геотермометры.

Корякско-Кеткинская группа

В данном блоке оценивались Корякско-Кеткинский лицензионный участок, Кеткинское месторождение и три группы источников на северном склоне влк. Корякская Сопка (Корякские нарзаны, Изотовские, Водопадные). Изучение геотермометров проводилось для оценки максимально возможной температуры в зоне скважины 1П Корякско-Кеткинской и определения направления движения нагретых вод к скважине 1П.

С учетом состава вод из катионных геотермометров для скважин 1П и К-1 применены Na-K геотермометры, для северной группы источников – Na-K-Ca-Mg геотермометр. Результаты:

- Вода в скважинах 1П Корякско-Кеткинская и К-1 Кеткинское близка по температуре друг к другу по всем кремниевым и Na-K геотермометрам (рис. 1). Также, сгруппированы температуры северных источников по Na-K-Ca-Mg геотермометру.
- По разнице катионных и кремниевых геотермометров на Корякско-Кеткинском и Кеткинском участках степень разбавления холодными водами вероятно значительно ниже, чем на северной группе источников.
- По 1П и К-1 кремниево-энтальпийная модель показывает температуру 145 °C, что близко к значениям низкотемпературного Na-K геотермометра Truesdell (рис. 2)
- По модернизированной диаграмме Гиггенбаха [9] вода Кеткинского месторождения находится в зоне равновесия по соотношению K-Mg, вода скважины 1П К-К в зоне частичного равновесия, что возможно связано с тем, что вода к скважине 1П прошла более длинный путь, чем к Кеткинскому месторождению.
- Прогнозируемая температура в зоне прогрева вод: Корякско-Кеткинская группа – 120–160 °C, северная группа источников – 260–320 °C.
- В отличие от северных источников вода скважины 1П и Кеткинского месторождения вероятно не нагревалась в зоне очага Корякского вулкана.

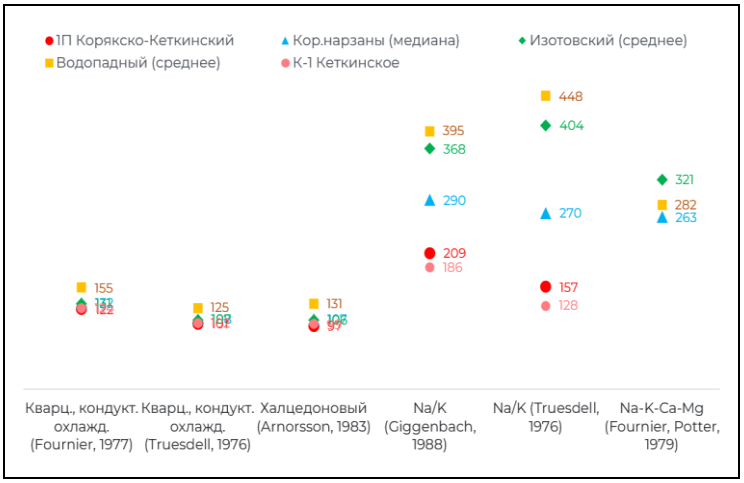


Рисунок 1 – Температура по геотермометрам, °C

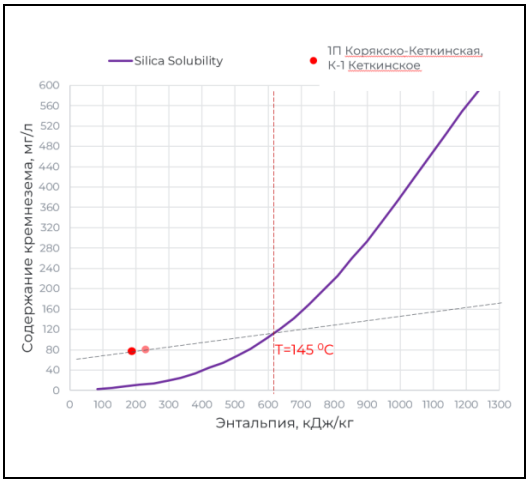


Рисунок 2 – Кремниево-энтальпийная модель смешивания

Верхнежировской участок

На Верхнежировском лицензионном участке в краткосрочной перспективе планируется строительство разведочной скважины. Расчет потенциальных температур по геотермометрам является одним из факторов для выбора участка для бурения скважины и определения предварительной схемы использования геотермального ресурса. Для воды скважины R-27, Вилючинских, Нижне-Жировых и Войновских источников применялись Na-K и кремниевые геотермометры, для Верхне-Жировых источников – Na-K-Ca геотермометр из-за высокой доли Ca. Результаты:

- По Вилючинским источникам и скважине R-27 результаты катионных геотермометров схожи, различия только по кремниевым возможно из-за большего разбавления холодными водами в источниках. Средняя температура по Na-K геотермометрам оценена в пределах 185–192 °C (рис. 3).
- По Вилючинским источникам температура по кремниево-энтальпийной модели смешивания (170 °C) схожа со средней температурой по Na-K геотермометрам (рис. 4).
- По Нижне-Жировым источникам разница температур между кремниевыми и Na-K геотермометрами минимальна, что вероятно показывает на невысокую степень разбавления холодными водами. Температуры по Na-K геотермометрам ниже, чем в остальных источниках.
- Прогнозируемая температура в зоне прогрева вод: Вилючинские источники и скважина R-27 – 160–220 °C, Нижне-Жировые источники – 140–190 °C, Верхне-Жировые – 270 °C, Войновские – 200–240 °C.
- Несмотря на более высокую температуру на поверхности Нижне-Жировых источников относительно Вилючинских перспективность по геотермометрам выше в районе Вилючинских источников при условии вскрытия скважинами зон отсутствия смешения с холодными водами.

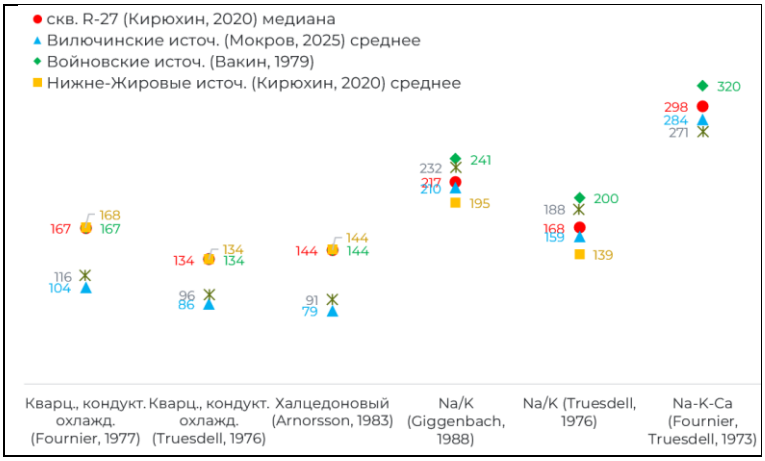


Рисунок 3 – Температура по геотермометрам, °C

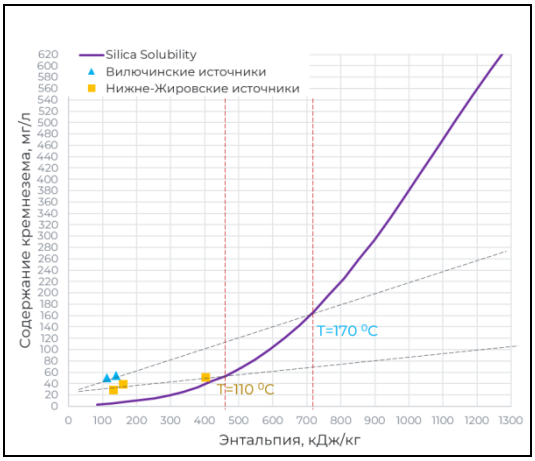


Рисунок 4 – Кремниево-энтальпийная модель смешивания

Больше-Банное месторождение

На Больше-Банном месторождении в среднесрочной перспективе планируется бурение оценочной скважины. Предыдущие скважины бурились до глубин максимум 1015 м, преимущественно 500–800м. Оценка температур по геотермометрам позволит оценить необходимость бурения более глубоких скважин. Для расчета температур использовались кремниевые и Na-K геотермометры. Результаты:

- Температура по кремниевым и Na-K геотермометрам находится в одном диапазоне, что говорит о высокой вероятности отсутствия разбавления холодными водами (рис. 5).
- По кремниево-энтальпийной модели смешивания температура воды до смешивания составляет 220 °C (рис. 6).
- Прогнозируемая температура в зоне прогрева вод составляет 180–220 °C.

Бурение глубоких скважин не приведет к существенному росту температуры. Возможен рост со 170 °С до 180–220 °С, но неизвестно на какой глубине.

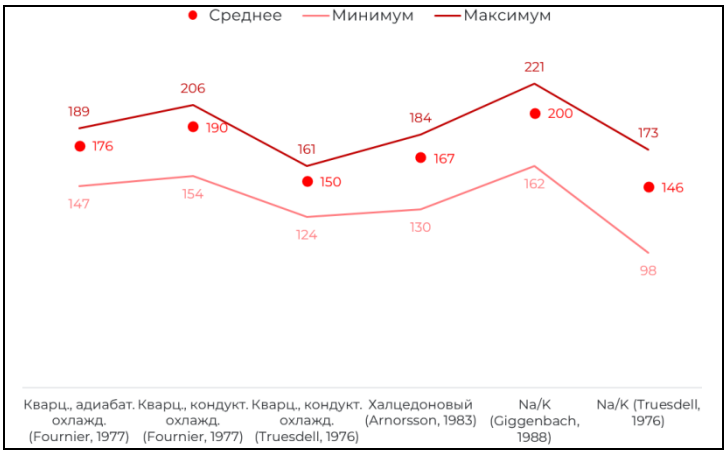


Рисунок 5 – Температура по геотермометрам, °С

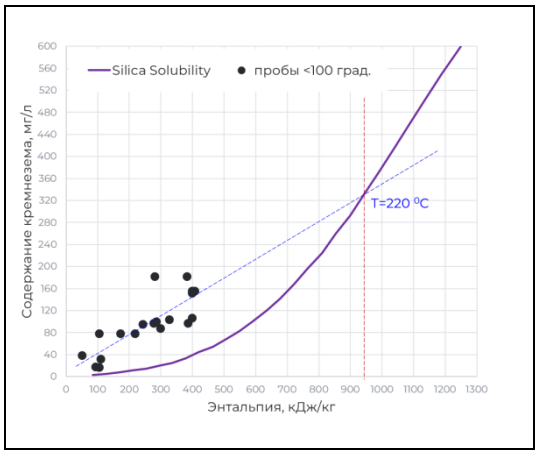


Рисунок 6 – Кремниево-энтальпийная модель смешивания

Заключение

Применяя кремниевые и катионные геотермометры, кремниево-энтальпийную модель смешивания проведена оценка прогнозных температур воды в зонах их нагрева на Корякско-Кеткинском, Верхнежировском и Больше-Банном участках Камчатки.

Комплексирование методов позволяет не только увеличить уверенность в оценке температуры, но и получить дополнительную информацию о степени разбавления холодными водами, дальности источника нагрева, зональности вод.

Необходимо всегда иметь ввиду, что перечисленные методы исследований являются косвенными и зависят от многих факторов и процессов, происходящих в недрах, большинство из которых могут быть не выявлены исследователями.

Список литературы

1. *Fricovsky B.* Geothermometry techniques in reservoir temperature estimation and conceptual site models constraction: Principles, methods and application for the Besenova elevation hydrogeothermal structure, Slovakia / *B. Fricovsky, L. Tometz, M. Fendek* // Mineralia Slovaca. 48. 2016. pp. 1–60.

2. *Gulec N.* Applications of geothermometry // Reviewed Course Book of International Summer School on Geothermal Geochemistry Izmir. 2005. pp. 85–103.

3. *Truesdell A.H.* Geochemical techniques in exploration (Summary of Section III) / Development and Use of Geothermal Resources: Proceedings of the Second United Nation Symposium, San Francisko. 1976. V. 1. pp. 53–79.

4. *Fournier R.O.* Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems // Geothermics. 1977. V. 5, pp. 41–50.

5. *Arnorsson S.* Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems – implications for chemical geothermometry investigations // Geothermics. 1983. V. 12. № 2–3. pp. 119–128.

6. *Giggenbach W.F.* Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Ca-Mg geoindicators // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1988. V. 52. № 12. pp. 2749–2765.

7. *Fournier R.O.* An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters / *R.O. Fournier, A.H. Truesdell* // Geochimica et Cosmochimica Act. 1973. V. 37. № 5. pp. 1255–1275.

8. *Fournier R.O.* Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer / *R.O. Fournier, R.W. Potter* // Geochimica et Cosmochimica Act.1979. V. 43. № 9. pp. 1543–1150.

9. *Таран Ю.А.* Минеральные воды Авачинской депрессии, Камчатка / *Ю.А. Таран, Г.В. Рябинин, Б.Г. Покровский, И.Н. Нажалова, Н.А. Малик* // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. № 2. Вып. 50. С. 22–39

10. *Вакин Е.А.* Мутновский геотермальный район на Камчатке / *Е.А. Вакин, Г.Ф. Пилипенко* // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях / Отв. ред. *Аладьев И.Т., Сугробов В.М* // Москва: Наука. С. 36–45.

11. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А.В. Кирюхин*. Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай Пи. 2020. 431 с.

12. *Мокров Е.А.* Отчет по проведению комплексных геолого-геофизических работ на Верхнежировском участке / *Е.А. Мокров.* Москва, АО «ВНИИнефть». 2025. 473 с.

.