

О методике температурных исследований в буровых скважинах прецизионными термометрами

Д.Ю. Демежко*, Б.Д. Хацкевич, Н.Р. Факаева, А.А. Горностаева
Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Прецизионные автономные скважинные термометры (логгеры) позволяют исследовать температурные аномалии сверхмалой амплитуды (до 1 мК), что значительно расширяет круг задач, которые может решать скважинная термометрия в разведочной геофизике, гидрогеологии, инженерной геологии, геоэкологии и др. При этом методики термокаротажа не развиваются, что не позволяет эффективно реализовать возможности этих приборов. В статье рассмотрены методические вопросы прецизионных температурных измерений в водонаполненных скважинах. Экспериментальные исследования с использованием автономного термометра RBRsolo³ T (RBR Ltd., Канада) показали, что аппаратный отклик на изменение температуры окружающей среды (релаксация) носит сложный характер. Уже через несколько секунд после погружения прибора в скважину он регистрирует температуру, близкую к температуре флюида. Однако это временное «окно» достаточно быстро закрывается, и через 15–20 с измеренная температура начинает все больше отличаться от невозмущенной. Следующее возвращение измеренной температуры к невозмущенной наступает через 1000–6000 с. Температурная аномалия в интервале 20–600 с осложнена непериодическими колебаниями амплитудой 0,02–0,05 К, связанными с тепловой конвекцией. Наличие временного «окна» на кривой релаксации термометра позволяет быстро и точно измерять температуру флюида в дискретном режиме. С помощью математического моделирования оценены конструктивные параметры термометров, определяющие ширину «окна». Даны рекомендации по проведению прецизионного термокаротажа скважин в непрерывном и дискретном вариантах.

Ключевые слова: геотермия, термокаротаж, термометр RBRsolo³T, прецизионные измерения температуры, свободная тепловая конвекция

Для цитирования: Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Факаева Н.Р., Горностаева А.А. (2024). О методике температурных исследований в буровых скважинах прецизионными термометрами. *Георесурсы*, 26(2), с. 92–98. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.2.8>

Введение

Температурный каротаж – один из наиболее простых, но в то же время эффективных методов геофизических исследований скважин, широко применяется в нефтяной и промысловой геофизике (Дахнов, 1982; Kutasov, 1999), гидрогеологии (Anderson, 2005; Pehme et al., 2014; Kurylyk et al., 2019), инженерной геологии, геоэкологии, геокриологии (Prensky, 1992), при решении задач глобальной тектоники (Поляк, Хуторской, 2018), палеоклиматологии (Демежко, 2001; Исаев, 2004; Bodri, Cermak, 2007), геодинамики (Shimamura et al., 1984; Демежко и др., 2012; Li et al., 2015). Появление высокоточных автономных температурных логгеров позволяет исследовать процессы, вызывающие температурные аномалии сверхмалой амплитуды (до $n \cdot 10^{-3}$ К), и одновременно исключить негативные факторы, характерные для скважинных термометров на кабеле: задержки сигнала вследствие индуктивности кабеля и шума в коллекторе каротажного подъемника. Однако при этом возникают другие явления, на которые при термокаротаже невысокой точности не обращали внимания, но которые нельзя игнорировать,

проводя прецизионные исследования. Во-первых, это инерционность термометров. Требуется некоторое время для достижения датчиком температуры окружающего флюида. В первом приближении, которым обычно и ограничиваются на практике (Costain, 1970; Nielsen, Balling, 1984; Saltus, Clow, 1994), регистрируемая во времени t температура T определяется начальной температурой прибора T_1 , температурой окружающей среды T_2 и постоянной времени τ :

$$T(t) = T_2 + (T_1 - T_2) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

откуда время, необходимое для достижения требуемой точности $\Delta T = T(t) - T_2$, равно

$$t = \tau \ln\left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta T}\right). \quad (2)$$

Так, при разности температур термометра и окружающей среды $T_1 - T_2 = 1$ К и $\tau = 10$ с требуется 23 с для достижения точности 0.1 К и 46 с для достижения точности 0.01 К, при $\tau = 100$ с – 230 и 460 с соответственно. Постоянная времени зависит от тепловой массы прибора, площади его внешней поверхности и коэффициента теплоотдачи. Величину τ определяют экспериментально и за весьма непродолжительное время. Это весьма грубое приближение, пригодное для измерений невысокой точности. Релаксационные зависимости реальных скважинных

* Ответственный автор: Дмитрий Юрьевич Демежко
e-mail: ddem54@inbox.ru

© 2024 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

термометров сложнее, особенно по мере приближения к невозмущенной температуре.

Во-вторых, это свободная тепловая конвекция флюида вблизи датчика. Ее инициируют температурные градиенты, неизбежно возникающие около скважинного прибора, первоначально имеющего отличную от флюида температуру. Нестационарные конвективные течения проявляются в виде температурного шума в записях прибора. По нашим сведениям, это явление ранее не было описано в научной литературе. Хорошо известны температурные эффекты, вызванные свободной тепловой конвекцией в скважине с естественным положительным геотермическим градиентом, превышающим некоторое критическое значение (Gretener, 1967; Diment, 1967; Sammel, 1968; Демежко и др., 2017). Методы, позволяющие устранить или учесть эти эффекты, описаны нами ранее (Демежко и др., 2020, 2021).

В настоящей статье на опыте эксплуатации автономного температурного логгера RBRsolo³T (RBR Ltd., Канада) и на базе математического моделирования рассмотрены методические аспекты прецизионных температурных исследований в скважинах. Отметим, что установленные закономерности и сделанные выводы не ограничиваются данным прибором и могут быть распространены на другие скважинные приборы.

Скважинный термометр и результаты эксперимента

Автономный температурный логгер RBRsolo³T (рис. 1) на сегодняшний день обладает наиболее высокими метрологическими характеристиками из всех известных скважинных термометров: погрешность $\pm 0,002$ °C, температурное разрешение $< 0,00005$ °C, постоянная времени в воде ~ 1 с, стабильность калибровки $0,002$ °C/год. Прибор имеет цилиндрический корпус диаметром 25,4 мм и длиной 210 мм, в котором размещены электронные блоки, включая память на $3 \cdot 10^7$ измерений. Специальный пластик, из которого изготовлен корпус, обеспечивает погружение прибора на глубину до 1700 м. Температурный датчик в тонкой трубке диаметром 2 мм и длиной 25 мм



Рис. 1. Автономный термометр (логгер) RBRsolo³T. Фото взято с сайта <https://rbr-global.com/products/compact-loggers/rbrsolo-t-2/>

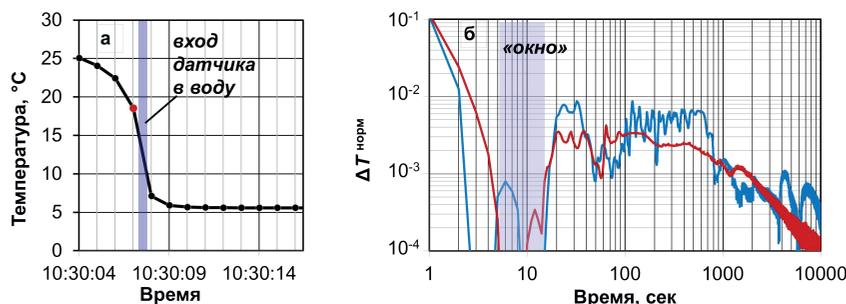


Рис. 2. Релаксационные кривые скважинного термометра RBRsolo³T: а) изменение температуры предварительно нагретого термометра при погружении в скважину; красная точка отмечает момент перед входом в воду; б) нормализованные температуры; красная кривая – $T_1 > T_2$, синяя – $T_1 < T_2$

вынесен за пределы корпуса прибора и окружен защитным кожухом с прорезями. Несмотря на то что термометр был разработан в первую очередь для океанографических наблюдений, он широко используется в скважинных исследованиях (Fulton et al., 2013; Li et al., 2015; de La Bernardie et al., 2018; Marcos-Robredo et al., 2022).

Экспериментальные исследования для оценки температурного отклика прибора проводились в обустроенной водонаполненной скважине ИГФ-60, входящей в состав оборудования геотермического полигона Института геофизики УрО РАН (г. Екатеринбург). В течение года верхняя отметка водонаполненного интервала в скважине сохраняется на уровне 7–8 м от поверхности. Предварительно нагретый (до температуры $+25$ °C) или охлажденный (до -10 °C) термометр быстро опускали на глубину 20 м в воду с температурой около $+6$ °C. Прибор оставляли в скважине на сутки. Зарегистрированные с дискретностью 1 с изменения температуры $T(t)$ пересчитывали в безразмерные нормализованные температуры:

$$\Delta T^{\text{норм}}(t) = (T(t) - T_2) / (T_1 - T_2), \quad (3)$$

где T_2 – невозмущенная температура, T_1 – начальная температура прибора. За начало отсчета времени $t = 0$ принимался момент касания датчиком воды. Он отмечается максимальной скоростью изменения температуры (рис. 2а). Уже через несколько секунд после погружения в воду прибор регистрирует невозмущенную (на уровне 0,001) температуру, рис. 2б. Однако через 15–20 с измеренная температура начинает все больше отличаться от невозмущенной и вновь возвращается к ней только через 1000–6000 с. Температурная аномалия в интервале 20–600 с осложнена неперiodическими колебаниями амплитудой 0,02–0,05, особенно заметными на кривой охлажденного термометра. Столь сложное поведение связано с большей постоянной времени корпуса прибора по сравнению с постоянной времени вынесенного датчика. Температурная аномалия, создаваемая прибором, достигает датчика лишь через некоторое время после его термализации, и следующий возврат к невозмущенным температурам происходит гораздо медленнее. Практический интерес представляет временное «окно», в пределах которого можно быстро и точно измерить невозмущенную температуру. Непериодические вариации обусловлены конвективными течениями флюида, вызываемыми температурными градиентами вблизи корпуса прибора.

Модель

Рассмотрим основные факторы, определяющие ширину «окна». Сам датчик представим в виде тела малых размеров с экспоненциальным температурным откликом (постоянная времени τ_1), рис. 3. На расстоянии z от датчика располагается торец корпуса прибора диаметром $2r$. И датчик, и корпус прибора первоначально находятся при постоянной температуре T_1 . После погружения в воду температура на торце также экспоненциально (с постоянной времени $\tau_2 \gg \tau_1$) приближается к невозмущенному значению.

Левые ветви релаксационных кривых на рис. 2б описываются соотношением (1). Предположим, что в момент времени $t = 0$ температура на торце прибора скачком меняется на небольшую величину D . Распределение температурной аномалии по оси z описывается нестационарным цилиндрически симметричным уравнением теплопроводности (Carslaw, Jaeger, 1958):

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial h} \left(h \frac{\partial T}{\partial h} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad z \geq 0, \tag{4}$$

где T – температура, a – температуропроводность. Решение уравнения (4), удовлетворяющее начальному и граничным условиям:

$$\begin{aligned} \Delta T (h, z, 0) &= 0, \\ \Delta T (h, 0, t) &= \begin{cases} D, & h < r \\ 0, & h > r \end{cases}, \\ \Delta T (h, z, t) \Big|_{z \rightarrow \infty, h \rightarrow \infty} &= 0, \end{aligned} \tag{5}$$

на оси симметрии $h = 0$, получено в (Демежко, 2001):

$$\begin{aligned} \Delta T (z, t) &= D \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{L} \right) - \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{z^2 + r^2}}{L} \right) \right], \\ L &= 2\sqrt{at}. \end{aligned} \tag{6}$$

Аппроксимируя экспоненциальное изменение температуры торца прибора серией скачков D_i :

$$D_i = (T_1 - T_2) \left[\exp \left(-\frac{t_i}{\tau_2} \right) - \exp \left(-\frac{t_{i-1}}{\tau_2} \right) \right], \quad t_i = t_{i-1} + \Delta t, \tag{7}$$

получим

$$\Delta T (z, t) = \sum_i D_i \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{L_i} \right) - \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{z^2 + r^2}}{L_i} \right) \right],$$

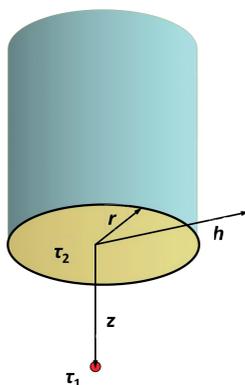


Рис. 3. Условия моделирования. Красной точкой обозначен датчик

$$L_i = 2\sqrt{a(t - t_i)}. \tag{8}$$

Нормализованные в соответствии с (3) зависимости релаксационных кривых от постоянных времени датчика и прибора τ_1, τ_2 , расстояния датчика от корпуса прибора z и диаметра корпуса $2r$ построены в соответствии с (1) и (7)–(8), представлены на рис. 4.

Обсуждение и рекомендации

Из анализа теоретических релаксационных кривых следует, что наибольшее влияние на ширину измерительного «окна» оказывают длина z и постоянная времени датчика τ_1 . Увеличение длины выносного датчика является наиболее эффективным способом увеличить ширину «окна». Возможности уменьшения постоянной времени датчика ограничены размерами существующих электронных компонентов – терморезисторов, термисторов, а также необходимостью их защиты от высоких давлений. Уменьшение массы и диаметра скважинного прибора ведет к потере его функциональности и не слишком эффективно. Определенную роль в релаксации играет не учтенный моделью охранный кожух датчика. С этим кожухом, скорее всего, связана первая температурная аномалия экспериментальных кривых на рис. 2б, проявляющаяся несколько раньше, чем предсказывает модель для параметров, близких к параметрам термометра RBRsolo³ T ($\tau_1 = 1$ с, $\tau_2 = 60$ с, $2r = 25$ мм). Более легкий охранный кожух, выполненный, к примеру, из стальной проволоки и отнесенный на максимальное расстояние от датчика, также позволит увеличить измерительное «окно».

Кроме того, температурные аномалии осложнены непериодическими колебаниями (температурным шумом). Эти колебания вызваны свободной тепловой конвекцией, обусловленной температурными градиентами вблизи корпуса прибора. Конвекция в водонаполненной скважине обычно возникает при положительном вертикальном градиенте, когда более теплый (и более легкий) флюид располагается ниже холодного и плотного (Gretener, 1967; Diment, 1967; Sammel, 1968; Демежко и др., 2017). Если скважинный прибор имеет более высокую температуру по сравнению с флюидом, то интенсивная конвекция возникнет вблизи его верхнего окончания. И наоборот, в случае «холодного» прибора интенсивная конвекция возникает внизу, около температурного датчика (рис. 5). В работе (Semin, Levin, 2022) показано, что конвекция может возникнуть и при значительных горизонтальных градиентах. Видимо, влиянием охранный кожух объясняется конвективный шум, зарегистрированный в пределах первой аномалии.

Очевидно, что наиболее эффективным способом избежать появления конвективного шума уже в начальной части релаксационной кривой является переход от дискретного к непрерывному каротажу.

Температурный каротаж проводится в выстоявшихся скважинах при спуске прибора непрерывно или дискретно. Непрерывный вариант обеспечивает более высокую производительность и позволяет избежать появления температурных аномалий, связанных с охранным кожухом и корпусом прибора. Но в случае применения автономных термометров возникают проблемы привязки по глубине, требующие равномерного спуска и точной

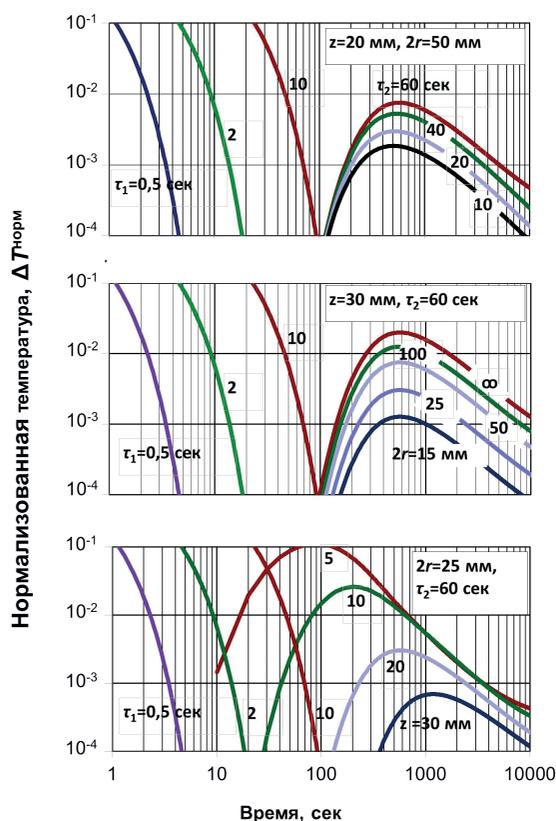


Рис. 4. Теоретические нормализованные релаксационные кривые в зависимости от постоянных времени датчика τ_1 и прибора τ_2 , диаметра прибора $2r$ и длины датчика z . Температуропроводность воды принималась равной $a = 1,37 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$

синхронизации внутренних часов термометра с работой подъемника. Минимальная скорость каротажа $V_{\text{мин}}$, очевидно, определяется длиной датчика z и дальней границей измерительного «окна» Δt :

$$V_{\text{мин}} = z \cdot \Delta t^{-1}. \quad (9)$$

Для автономного термометра RBRsolo³ T ($z = 0,025 \text{ м}$, $\Delta t = 12 \text{ с}$) получаем $V_{\text{мин}} = 7,5 \text{ м/ч}$. Максимальная скорость $V_{\text{макс}}$ зависит от постоянной времени датчика τ_1 , геотермического градиента G и допустимой погрешности регистрации температуры ΔT (Reiter et al., 1980):

$$V_{\text{макс}} = \Delta T \cdot G^{-1} \cdot \tau_1^{-1}. \quad (10)$$

Так, при допустимой погрешности $\Delta T = 0,01 \text{ К}$, геотермическом градиенте $G = 0,1 \text{ К/м}$ и $\tau_1 = 1 \text{ с}$ имеем $V_{\text{макс}} = 360 \text{ м/ч}$. Но для увеличения точности в 10 раз, равно как и при увеличении на порядок температурного градиента, например, в интервале проникновения годовой температурной волны (0–20 м) или в пределах температурной аномалии гидрогеологической природы, потребуются в 10 раз уменьшить скорость каротажа. При невозможности обеспечить необходимую скорость существует способ восстановления реальной температуры по данным, зарегистрированным в ходе непрерывного каротажа инерционными термометрами. Он основан на численном решении уравнения свертки с экспоненциальным ядром относительно подынтегральной функции $T(z)$ (Costain, 1970; Saltus, Clow, 1994; Clow, 2014). Однако решение этой задачи является неустойчивым и требует специальных мер подавления шума.

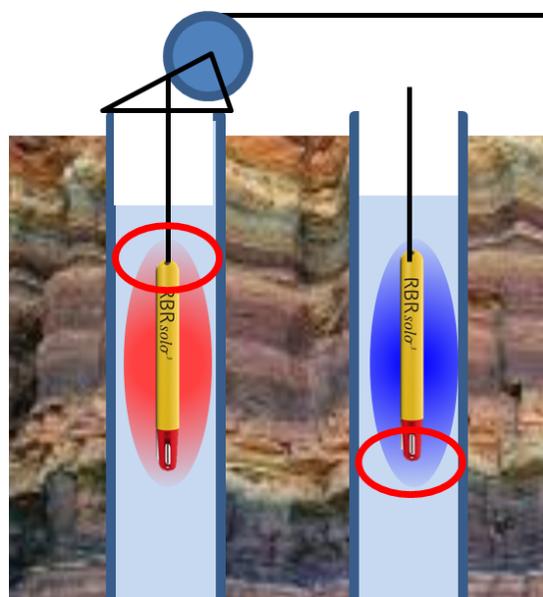


Рис. 5. Схема, поясняющая возникновение свободной тепловой конвекции при остановке «теплого» ($T_1 > T_2$, слева) и «холодного» ($T_1 < T_2$) скважинного прибора

Дискретный вариант предпочтительно использовать для термокаротажа неглубоких, в первые сотни метров, геотехнических, гидрогеологических, наблюдательных скважин, проводимого с помощью ручной лебедки. В этом случае сложно обеспечить равномерный спуск, кроме того, прибор неоднократно за непродолжительное время извлекается из скважины, подвергаясь воздействию температурных контрастов. В соответствии с выявленным характером релаксации термометра RBRsolo³ T для него можно рекомендовать следующую методику измерений.

1. Часы термометра синхронизируются с хронометром оператора с точностью не хуже 1 с и задается частота 1 Гц записи температуры во внутреннюю память.
2. Фиксируется время установки на верхней точке водонаполненного интервала скважины.
3. Термометр выдерживается на верхней точке 10–15 мин. За это время в значительной степени термализуется корпус прибора.
4. На каждой последующей точке термометр выдерживается около 20 с, при этом также фиксируется время остановки. Из полученной записи выбирается один или несколько (с последующим их усреднением) отсчетов, зарегистрированных в пределах «окна», т.е. через 5–12 с после каждой остановки прибора.

Заключение

Несмотря на появление высокоточных автономных скважинных термометров, имеющиеся методики термокаротажа не совершенствуются и не позволяют эффективно использовать потенциал этих приборов. Считается, что отклик прибора на изменение температуры окружающей среды носит монотонный, как правило, экспоненциальный характер. На этом основано распространенное мнение: чем больше время выдержки термометра, тем выше точность измерений. Исследования, проведенные с использованием автономного термометра RBRsolo³ T, показали, что это не соответствует действительности. Наличие «окна»,

в котором измеряемая температура быстро приближается к невозмущенной, может обеспечить высокую производительность и точность термокаротажа как в непрерывном, так и в дискретном вариантах. Очевидно, что и другие термометры, состоящие из массивного корпуса и вынесенного за его пределы термодатчика, имеют подобный характер релаксации. Применение прецизионных термометров по описанной методике позволит существенно расширить круг задач, решаемых скважинной термометрией, например выделять заколонные перетоки, вызывающие аномалии малой интенсивности, водоносные горизонты в обсаженном интервале гидрогеологической скважины. Повышение точности измерений дает возможность оценивать температурный градиент на коротких интервалах, что, мы надеемся, позволит на новом уровне возродить не применяемый в настоящее время геотермический метод литологического расчленения разреза скважины. Описанные теоретические зависимости ширины «окна» от конструктивных параметров (постоянных времени датчика и прибора, расстояния датчика от корпуса прибора и диаметра корпуса) могут быть полезны разработчикам скважинных термометров.

Финансирование/Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института геофизики УрО РАН (госбюджетная тема НИОКТР 122062200031-9), финансируемого Министерством науки и высшего образования РФ.

Мы благодарим рецензентов за внимание, уделенное нашему исследованию, и высказанные замечания.

Литература

- Дахнов В.Н. (1982). Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра, 448 с.
- Демежко Д.Ю. (2001). Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 143 с.
- Демежко Д.Ю., Миндубаев М.Г., Хацкевич Б.Д. (2017). Температурные эффекты свободной тепловой конвекции в буровых скважинах. *Геология и геофизика*, 58(10), с. 1602–1610. <https://doi.org/10.15372/GiG20171012>
- Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. (2021). Квазистационарный эффект свободной тепловой конвекции в водонаполненных буровых скважинах. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 332(7), с. 131–139. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3271>
- Демежко Д.Ю., Хацкевич Б.Д., Миндубаев М.Г. (2020). Методы подавления свободной тепловой конвекции в водонаполненных скважинах при проведении температурных исследований. *Георесурсы*, 22(1), с. 55–62. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.55-62>
- Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Щапов В.А. (2012). Температурные изменения в скважине куп-1 (о. Кунашир), вызванные землетрясением Тохоку (11.03.2011 г., M = 9.0). *Доклады Академии наук*, 445(2), с. 200–204.
- Исаев В.И. (2004). Палеотемпературное моделирование осадочного разреза и нефтегазообразование. *Тихоокеанская геология*, 23(5), с. 101–115.
- Поляк Б.Г., Хуторской М.Д. (2018). Тепловой поток из недр – индикатор глубоких процессов. *Георесурсы*, 20(4), Ч. 2, с. 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>
- Anderson M.P. (2005). Heat as a ground water tracer. *Groundwater*, 43(6), pp. 951–968. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>
- Bodri L., Cermak V. (2007). Borehole climatology: A new method how to reconstruct climate. Elsevier. 352 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045320-0.X5000-5>
- Carlslaw H., Jaeger J.C. (1958). Conduction of heat in soils. Clarendon Press, Oxford. 510 p.
- Clow G.D. (2014). Temperature data acquired from the DOI/GTN-P Deep Borehole Array on the Arctic Slope of Alaska, 1973–2013. *Earth System Science Data*, 6(1), pp. 201–218. <https://doi.org/10.5194/essd-6-201-2014>

Costain J.K. (1970). Probe response and continuous temperature measurements. *Journal of Geophysical Research*, 75(20), pp. 3969–3975. <https://doi.org/10.1029/JB075i020p03967>

de La Bernardie J., Bour O., Le Borgne T., Guühéneuf N., Chatton E., Labasque T., Le Lay H., Gerard M.F. (2018). Thermal attenuation and lag time in fractured rock: Theory and field measurements from joint heat and solute tracer tests. *Water Resources Research*, 54(12), pp. 10053–10075. <https://doi.org/10.1029/2018WR023199>

Diment W.H. (1967). Thermal regime of a large diameter borehole: Instability of the water column and comparison of air- and water-filled conditions. *Geophysics*, 32(4), pp. 720–726. <https://doi.org/10.1190/1.1439885>

Fulton P.M., Brodsky E.E., Kano Y., Mori J., Chester F., Ishikawa T., Harris R.N., Lin W., Eguchi N., Toczko S., and Expedition 343, 343T, and KR13-08 Scientists. (2013). Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements. *Science*, 342(6163), pp. 1214–1217. <https://doi.org/10.1126/science.1243641>

Gretnere P.E. (1967). On the thermal instability of large diameter wells – an observational report. *Geophysics*, 32(4), pp. 583–787. <https://doi.org/10.1190/1.1439886>

Kurylyk B.L., Irvine D.J., Bense V.F. (2019). Theory, tools, and multidisciplinary applications for tracing groundwater fluxes from temperature profiles. *WIREs Water*, 6(1), e1329. <https://doi.org/10.1002/wat2.1329>

Kutasov I.M. (1999). Applied geothermics for petroleum engineers. Elsevier, 346 p.

Li H., Xue L., Brodsky E.E., Mori J.J., Fulton P.M., Wang H., Kano Y., Yun K., Harris R.N., Gong Z., Li C. (2015). Long-term temperature records following the Mw 7.9 Wenchuan (China) earthquake are consistent with low friction. *Geology*, 43(2), pp. 163–166. <https://doi.org/10.1130/G35515.1>

Marcos-Robredo G., Rey-Ronco M.Á., Castro-García M.P., Alonso-Sánchez T. (2022). A Device to Register Temperature in Boreholes in Northwest Spain for Geothermal Research. *Sensors*, 22(13), 4945. <https://doi.org/10.3390/s22134945>

Nielsen S.B., Balling N. (1984). Accuracy and resolution in continuous temperature logging. *Tectonophysics*, 103(1–4), pp. 1–10. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(84\)90069-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(84)90069-6)

Peñhne P., Parker B.L., Cherry J.A., Blohm D. (2014). Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing groundwater flow in fractured rock. *Journal of Hydrology*, 513, pp. 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.015>

Prensky S. (1992). Temperature measurements in boreholes – An overview of engineering and scientific applications. *The Log Analyst*, 33(3), pp. 313–333.

Reiter M., Mansure A.J., Peterson B.K. (1980). Precision continuous temperature logging and comparison with other types of logs. *Geophysics*, 45(12), pp. 1857–1868. <https://doi.org/10.1190/1.1441070>

Saltus R.W., Clow G.D. (1994). Deconvolution of continuous borehole temperature logs: Example from the Greenland GISP2 icecore hole. Department of the Interior. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 94–254, 42 p. <https://pubs.usgs.gov/of/1994/0254/report.pdf>

Sammel E.A. (1968). Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells. *Geophysics*, 33(6), pp. 1004–1012. <https://doi.org/10.1190/1.1439977>

Semin M., Levin L. (2022). Study of the Influence of Thermal Convection on Temperature Measurement in Thermal Control Boreholes during Artificial Ground Freezing. *Fluids*, 7(9), 298. <https://doi.org/10.3390/fluids7090298>

Shimamura H., Ino M., Hikawa H., Iwasaki T. (1984). Groundwater microtemperature in earthquake regions. *Pure and Applied Geophysics*, 122(6), pp. 933–946. <https://doi.org/10.1007/BF00876394>

Сведения об авторах

Дмитрий Юрьевич Демежко – доктор геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики, Институт геофизики УрО РАН

Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100
e-mail: ddem54@inbox.ru

Богдан Дмитриевич Хацкевич – научный сотрудник лаборатории геодинамики, Институт геофизики УрО РАН

Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100
e-mail: disaybl@yandex.ru

Нелли Рафаэлевна Факаева – младший научный сотрудник лаборатории геодинамики, Институт геофизики УрО РАН

Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100
e-mail: fakaeva.n@gmail.com

Анастасия Александровна Горностаева – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики, Институт геофизики УрО РАН

Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100
e-mail: free_ride_@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.01.2024;
Принята к публикации 17.04.2024; Опубликована 30.06.2024

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

On the Method of Temperature Measurements in Borehole Using Precision Thermometers

D.Yu. Demezhko*, B.D. Khatskevich, N.R. Fakaeva, A.A. Gornostaeva

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

*Corresponding author: Dmitry Yu. Demezhko, e-mail: ddem54@inbox.ru

Abstract. Precise autonomous borehole thermometers (loggers) allow measuring temperature anomalies of small amplitude (up to 1 mK). It significantly expands the range of problems that borehole thermometry can solve in exploration geophysics, hydrogeology, engineering geology, and geoecology. However, thermal logging techniques remain outdated that hinders the effective implementation of the capabilities of these devices. The paper discusses methodological issues of precision temperature measurements in water-filled boreholes. Experimental studies with an autonomous thermometer RBRsolo³ T (RBR Ltd., Canada) showed that the device's response to changes in ambient temperature (relaxation) is complex. Within a few seconds after the immersing of device in a borehole, it registers a temperature close to the fluid temperature. However, this temporary "window" closes soon, and after 15–20 seconds the measured temperature begins to deviate more and more from the undisturbed temperature. Next time measured temperature returns to the undisturbed temperature after 1000–6000 sec. In addition, the temperature response in the interval of 20–600 sec is complicated by non-periodic fluctuations with an amplitude of 0.02–0.05 K associated with thermal convection. The presence of a time "window" on the relaxation curve makes it possible to measure fluid temperature quickly and accurately in stop-and-go mode. The design parameters of thermometers determining the width of the "window" were assessed using mathematical modeling. Recommendations for conducting precision temperature logging of boreholes in both continuous and stop-and-go modes have been provided.

Keywords: geothermy, borehole temperature logging, RBRsolo³ T logger, precise temperature measurements, free thermal convection

Acknowledgements

The work was performed within the state task of the Bulashevich Institute of Geophysics of the Russian Academy of Sciences (state budget topic 122062200031-9), funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

We thank the reviewers for their attention to our study and valuable comments.

Recommended citation: Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Fakaeva N.R., Gornostaeva A.A. (2024). On the Method of Temperature Measurements in Borehole Using Precision Thermometers. *Georesursy = Georesources*, 26(2), pp. 92–98. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.2.8>

References

- Anderson M.P. (2005). Heat as a ground water tracer. *Groundwater*, 43(6), pp. 951–968. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>
- Bodri L., Cermak V. (2007). Borehole climatology: A new method how to reconstruct climate. Elsevier. 352 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045320-0.X5000-5>
- Carlsaw H., Jaeger J.C. (1958). Conduction of heat in soils. Clarendon Press, Oxford. 510 p.
- Crow G.D. (2014). Temperature data acquired from the DOI/GTN-P Deep Borehole Array on the Arctic Slope of Alaska, 1973–2013. *Earth System Science Data*, 6(1), pp. 201–218. <https://doi.org/10.5194/essd-6-201-2014>
- Costain J.K. (1970). Probe response and continuous temperature measurements. *Journal of Geophysical Research*, 75(20), pp. 3969–3975. <https://doi.org/10.1029/JB075i020p03967>
- Dakhnov V.N. (1982). Interpretation of the results of geophysical studies of well sections. Moscow: Nedra, 448 p. (In Russ.)
- de La Bernardie J., Bour O., Le Borgne T., Guihéneuf N., Chatton E., Labasque T., Le Lay H., Gerard M.F. (2018). Thermal attenuation and lag time in fractured rock: Theory and field measurements from joint heat and solute tracer tests. *Water Resources Research*, 54(12), pp. 10053–10075. <https://doi.org/10.1029/2018WR023199>
- Demezhko D.Yu. (2001). Geothermal Method for Paleoclimatic Reconstructions (by the Example of the Urals). Yekaterinburg: UrO RAN Publ., 144 p. (In Russ.)
- Demezhko D.Yu., A.K. Yurkov, V.I. Outkin, V.A. Shchapov. (2012). Temperature changes in the KUN-1 borehole, Kunashir Island, induced by the Tohoku Earthquake (March 11, 2011, M = 9.0). *Doklady Earth Sciences*, 445(1), pp. 883–887. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12070124>
- Demezhko D.Yu., Mindubaev M.G., Khatskevich B.D. (2017). Thermal effects of natural convection in boreholes. *Russian Geology and Geophysics*, 58(10), pp. 1270–1276. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.016>
- Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. (2020). Methods of suppressing free thermal convection in water-filled wells during temperature research. *Georesursy = Georesources*, 22(1), pp. 55–62. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.55-62>
- Demezhko D.Yu., Khatskevich B.D., Mindubaev M.G. (2021). Quasi-stationary effect of free thermal convection in water-filled boreholes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(7), pp. 131–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3271>
- Diment W.H. (1967). Thermal regime of a large diameter borehole: Instability of the water column and comparison of air- and water-filled conditions. *Geophysics*, 32(4), pp. 720–726. <https://doi.org/10.1190/1.1439885>

Fulton P.M., Brodsky E.E., Kano Y., Mori J., Chester F., Ishikawa T., Harris R.N., Lin W., Eguchi N., Toczko S., and Expedition 343, 343T, and KR13-08 Scientists. (2013). Low coseismic friction on the Tohoku-Oki fault determined from temperature measurements. *Science*, 342(6163), pp. 1214–1217. <https://doi.org/10.1126/science.1243641>

Gretener P.E. (1967). On the thermal instability of large diameter wells – an observational report. *Geophysics*, 32(4), pp. 583–787. <https://doi.org/10.1190/1.1439886>

Isaev V.I. (2004). Paleotemperature modeling of sedimentary section and oil and gas formation. *Russian Journal of Pacific Geology*, 23(5), pp. 101–115. (In Russ.)

Kurylyk B.L., Irvine D.J., Bense V.F. (2019). Theory, tools, and multidisciplinary applications for tracing groundwater fluxes from temperature profiles. *WIREs Water*, 6(1), e1329. <https://doi.org/10.1002/wat2.1329>

Kutasov I.M. (1999). Applied geothermics for petroleum engineers. Elsevier, 346 p.

Li H., Xue L., Brodsky E.E., Mori J.J., Fulton P.M., Wang H., Kano Y., Yun K., Harris R.N., Gong Z., Li C. (2015). Long-term temperature records following the Mw 7.9 Wenchuan (China) earthquake are consistent with low friction. *Geology*, 43(2), pp. 163–166. <https://doi.org/10.1130/G35515.1>

Marcos-Robredo G., Rey-Ronco M.Á., Castro-García M.P., Alonso-Sánchez T. (2022). A Device to Register Temperature in Boreholes in Northwest Spain for Geothermal Research. *Sensors*, 22(13), 4945. <https://doi.org/10.3390/s22134945>

Nielsen S.B., Balling N. (1984). Accuracy and resolution in continuous temperature logging. *Tectonophysics*, 103(1–4), pp. 1–10. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(84\)90069-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(84)90069-6)

Pehme P., Parker B.L., Cherry J.A., Blohm D. (2014). Detailed measurement of the magnitude and orientation of thermal gradients in lined boreholes for characterizing groundwater flow in fractured rock. *Journal of Hydrology*, 513, pp. 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.015>

Polyak, B.G., Khutorskoy, M.D. (2018). Heat flow from the Earth interior as indicator of deep processes. *Georesury = Georesources*, 20(4), pp. 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

Prensky S. (1992). Temperature measurements in boreholes – An overview of engineering and scientific applications. *The Log Analyst*, 33(3), pp. 313–333.

Reiter M., Mansure A.J., Peterson B.K. (1980). Precision continuous temperature logging and comparison with other types of logs. *Geophysics*, 45(12), pp. 1857–1868. <https://doi.org/10.1190/1.1441070>

Saltus R.W., Clow G.D. (1994). Deconvolution of continuous borehole temperature logs: Example from the Greenland GISP2 icecore hole. Department of the Interior. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 94–254, 42 p. <https://pubs.usgs.gov/of/1994/0254/report.pdf>

Sammel E.A. (1968). Convective flow and its effect on temperature logging in small-diameter wells. *Geophysics*, 33(6), pp. 1004–1012. <https://doi.org/10.1190/1.1439977>

Semin M., Levin L. (2022). Study of the Influence of Thermal Convection on Temperature Measurement in Thermal Control Boreholes during Artificial Ground Freezing. *Fluids*, 7(9), 298. <https://doi.org/10.3390/fluids7090298>

Shimamura H., Ino M., Hikawa H., Iwasaki T. (1984). Groundwater microtemperature in earthquake regions. *Pure and Applied Geophysics*, 122(6), pp. 933–946. <https://doi.org/10.1007/BF00876394>

About the Authors

Dmitry Yu. Demezhko – Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Laboratory of Geodynamics, Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100 Amundsen str., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

Bogdan D. Khatskevich – Researcher, Laboratory of Geodynamics, Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100 Amundsen str., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

Nelly R. Fakaeva – Junior Researcher, Laboratory of Geodynamics, Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100 Amundsen str., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

Anastasiya A. Gornostaeva – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Laboratory of Geodynamics, Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100 Amundsen str., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

*Manuscript received 23 January 2024;
Accepted 17 April 2024; Published 30 June 2024*