

С. А. Казанцев^{1✉}

Метод динамической автокалибровки термодатчиков

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kazantsevsa@ipggsbras.ru

Аннотация. Измерение величины теплового потока через дно водоемов требует особо высокой точности определения значения геотермического градиента в илах. Эта точность ограничивается возможностями лабораторной калибровки термодатчиков. Предложен способ автоматической калибровки, позволяющий в 10 раз увеличить точность измерения температурного градиента в донных осадках.

Ключевые слова: датчик температуры, градиент, точность калибровки, донные осадки

S. A. Kazantsev^{1✉}

Method of dynamic autocalibration of temperature sensors

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: kazantsevsa@ipggsbras.ru

Abstract. Measuring the value of heat flow through the bottom of water bodies requires particularly high accuracy in determining the value of the geothermal gradient in silts. This accuracy is limited by the capabilities of laboratory calibration of temperature sensors. A method of automatic calibration is proposed that allows increasing the accuracy of measuring the temperature gradient in bottom sediments by 10 times.

Keywords: temperature sensor, gradient, calibration accuracy, bottom sediments

Тепловой поток (q) является одной из важнейших характеристик энергетического состояния земной коры. В настоящее время широкое распространение получили методы измерения параметров теплового поля Земли через дно глубоких водоемов, где термический режим донных осадков определяется исключительно глубинным тепловым потоком. Здесь рассмотрим методические особенности измерения температурного градиента в донных осадках глубоких водоемов.

Как правило, тепловой поток вычисляется по формуле:

$$q = \lambda \times g,$$

где g – результаты отдельных измерений геотермического градиента; λ – коэффициент теплопроводности донных илов.

Теплопроводность донных осадков можно определить несколькими способами, например, вычислить по весовому или процентному содержанию влаги в

образцах [1] или измерить теплопроводность поднятых образцов в лаборатории на борту судна. Современное оборудование позволяет измерять теплопроводность донных илов и в условиях их естественного залегания [2].

Геотермический градиент измеряется специальным прибором – термоградиентографом [3,4]. К точности измерения градиента температур в осадках, в данном случае, предъявляются особые требования.

Наибольшую чувствительность по температуре имеют полупроводниковые терморезисторы [5]. Их сопротивление изменяется на 4% от номинала при изменении температуры на один градус. Однако при наивысшей чувствительности, термисторам присущ определенный недостаток: они имеют нелинейные и практически индивидуальные характеристики зависимости сопротивления от температуры.

Отсюда высокоточное измерение температурного градиента в донных осадках водоемов осложняется возможностями градуировки полупроводниковых термодатчиков. В подавляющем большинстве случаев лабораторная калибровка термисторов по абсолютной температуре возможна не точнее $0,01^{\circ}\text{C}$. Это определяется использованием при калибровке ртутных термометров ТР-1 с минимальным делением шкалы в $0,01^{\circ}\text{C}$. Таким образом, точность по измерению абсолютной температуры не может превышать точности калибровки термодатчиков. Но при этом возможности современной измерительной аппаратуры [6] позволяют фиксировать изменения температуры полупроводникового датчика до значений в $0,001^{\circ}\text{C}$ и выше.

При измерении температурного градиента в донных илах водоемов такая разрешающая способность совершенно необходима. По сути нам необходимо измерить разницу температуры между двух или нескольких датчиков находящихся на разной глубине в донных осадках. Изменение температуры каждого из датчиков современная аппаратура позволяет отследить с разрешением до $0,0001-0,0003^{\circ}\text{C}$. Но разница температуры между двумя или несколькими отдельными датчиками определяется возможностями калибровки каждого из них и это ограничение составляет $0,01^{\circ}\text{C}$.

Метод динамической калибровки направлен на приведение значений измеренных температур датчиков, физически находящихся в равных для них температурных условиях, к одному определенному значению.

Экспериментальные геотермические исследования в таких глубоких водоемах как Черное море [7,8] и Байкал [9] выявили, что на определенных глубинах существует мощные водяные толщи практически изотермичные по глубине. В момент нахождения измерительного зонда в таком слое воды температура всех датчиков, размещенных на нем, физически идентична.

Предположим, что при регистрации температуры датчиков с разрешением доступной калибровки в таком слое воды получили в результате по всем датчикам одинаковые показания – T_1 (табл. 1).

Температура датчиков

| № датчика | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| T1 | 4,72 | 4,72 | 4,72 | 4,72 | 4,72 | 4,72 | 4,72 |
| T2 | 4,720 | 4,728 | 4,727 | 4,729 | 4,727 | 4,724 | 4,722 |
| Поправка | 0,002 | -0,006 | -0,005 | -0,007 | -0,005 | -0,002 | 0 |
| T3 | 4,722 | 4,722 | 4,722 | 4,722 | 4,722 | 4,722 | 4,722 |

Если же регистрировать измеряемые параметры, используя возможности аппаратуры с точностью до 0,001 доли градуса, получим расхождение показаний начиная с третьего знака после запятой – T2. Учитывая, что физическая температура всех датчиков в этот момент идентична, рассчитаем поправки для каждого датчика. Для вычисления поправок выберем датчик номер 7 условно базовым и определим температуру всех датчиков равной температуре датчика № 7. Разницу в показаниях результатов измерения определяем, как поправку (табл. 1). После введения поправки температура всех датчиков будет регистрироваться совпадающей – T3.

С учетом этой поправки измерение температурного градиента в донных илах, а по сути относительной разности температур между отдельными датчиками, можно определить с точность в 10 раз превышающей точность калибровки по абсолютным значениям температуры.

Технический процесс динамической автокалибровки происходит следующим образом. Программы калибровки и расчета поправок записываются в память микроконтроллера. При включении измерительного зонда сразу начинается процесс измерения температуры датчиков и идет запись результатов измерений в память устройства. При спуске зонда на определенной, наперед заданной, глубине сигнал с датчика давления включает процесс вычисления поправки. При этом частота измерения температуры увеличивается до 10 раз в секунду. Глубина включения автокалибровки определяется температурным разрезом водной толщи конкретного водоема заранее. В течении определенного времени поправка для каждого из датчиков вычисляется, усредняется и записывается в оперативную память (ОЗУ) устройства. С этого момента все результаты измерений температуры датчиков записываются в память устройства с учетом этой поправки. После внедрения зонда в осадки процесс измерения температуры датчиков, находящихся на разной глубине в осадках, фиксируется и записывается в память устройства уже с поправками.

После подъема и выключения зонда поправки обнуляются. Это обусловлено тем, что в разных участках водоема могут быть различные температурные условия. Кроме того, обновление поправок при каждом зондировании позволяет учесть как возможную нестабильность, так и вероятное старение датчиков.

Программа автокалибровки предусмотрена для измерителя последней модификации [10]. Измеритель состоит из герметичного контейнера с цифровым регистратором, металлической заостренной штанги, системы термодатчиков,

расположенной в тонкой трубке, вынесенной за пределы штанги на расстояние 4-5 см и с системой из 7-ми датчиков расположенной в полуметровой трубке с шагом 25 см. Частота опроса во время измерений составляла 1 раз в секунду, что позволяло достаточно детально отслеживать процесс стабилизации температурного режима зонда после внедрения его в осадки.

Для пояснения работы метода и наглядности в качестве примера приведены реальные графики измерения температур при спуске № 105 на озере Байкал в 2021 году [11] (рис. 1). Хотя в этих работах на Байкале в 2021 году метод автокалибровки не был применен на практике ввиду малых глубин и практически отсутствующего изотермичного слоя воды.

Обработка была проведена в лаборатории на реальных термограммах. На графиках, на участке времен измерений с 500 по 600 секунд, вручную сделана врезка температур, вычисленных с поправкой.

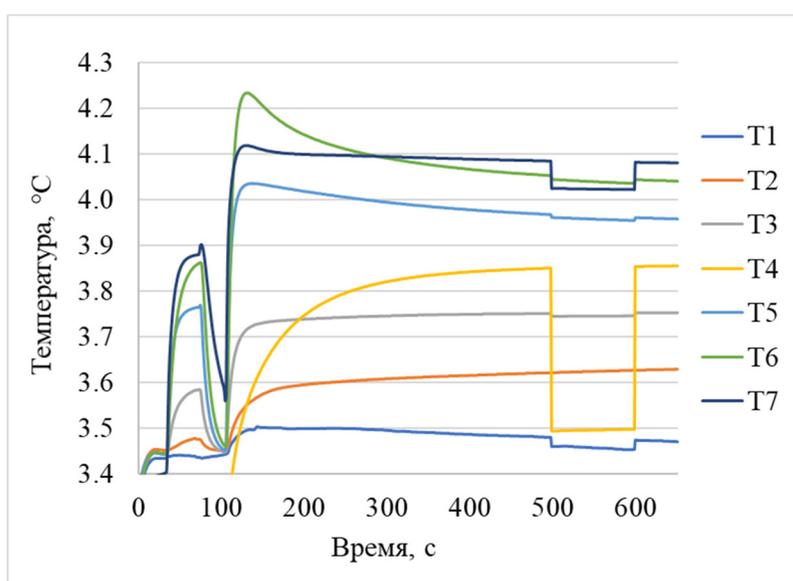


Рис.1. Температура воды и осадков точке №105, оз. Байкал

Расчет поправок, также вручную, произведен во временном интервале с 20-й по 30-ю секунду измерений T в воде. Окончательное внедрения зонда в осадке произошло на 104-й секунде измерений. По графику так же можно сделать вывод, что датчик T4 неисправен и его показания не учитываются. В реальных условиях поправка будет учитываться в измерениях сразу после ее вычисления и до выключения регистратора.

Таким образом, выполнив такую автокалибровку, получаем возможность определить геотермический градиент в донных осадках, то есть разницу температур между отдельными датчиками, с разрешением, приближенном к возможностям современной аппаратуры, и на порядок большим, чем возможная точность лабораторной градуировки датчиков по измерению ими абсолютных значений температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bullard E.C., Day A. The flow of heat through the floor of the Atlantic Ocean // *Geophysical Journal International*. – 1961. – Vol. 4. – P. 282-291.
2. Казанцев С.А., Дучков А.А. Измерения теплопроводности донных осадков "in situ" автономными зондами. Тепловое поле Земли и методы его изучения: Сб. научн. Трудов. – М.: Изд-во РУДН, 1997. – С. 153-157.
3. Казанцев С.А., Дучков А.Д. Аппаратурное обеспечение высокоточного температурного мониторинга // *Геофизические технологии*. – 2018. – № 3. – С. 39-47.
4. Казанцев С. А., Дучков А. Д. Автономная аппаратура для геотермических исследований в озерах. В кн.: *Применение геотермии в региональных и поисково-разведочных исследованиях*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983.
5. Шефтель И.Т. Терморезисторы. – М.: Наука, 1973. – 415с.
6. Дмитриенко А. Г. Пискаев К. Ю., Гудков К. В., Тюрин М. В. Методы совершенствования метрологических характеристик $\Sigma\Delta$ -АЦП // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2024. – № 3. – С. 5-16.
7. Дучков А.Д., Казанцев С.А. Тепловой поток впадины Черного моря // *Геофизические поля Атлантического океана*. – М.: Наука, 1988. – С. 121-130.
8. Дучков А.Д., Казанцев С.А. Тепловой поток через дно западной части Черного моря // *Геология и геофизика*. – 1985. – Т. 26. – № 8. – С. 113-123.
9. Голубев В.А. Геотермия Байкала. – Новосибирск: Наука, 1982. – 150с.
10. Казанцев С.А., Кальяк А.А. Устройство для температурного мониторинга. Патент на полезную модель № 231782. 2025 г.
11. Аюнов Д.Е., Кальяк А.А., Казанцев С.А. Выявление аномалий теплового режима в придонном слое осадков. – XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направление и технологии поиска, разведки и разработки месторождения полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2024. –Т. 2. – Вып. 2. – С. 25-30.

© С. А. Казанцев, 2025