

## АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДНА (ВОДЫ И ОСАДКОВ) ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА В ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД

А.Д. Дучков, С.А. Казанцев

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Обсуждаются результаты экспериментальных наблюдений вариаций температуры дна, выполненных в октябре—декабре 2005 г. в глубоководной (глубина ~320 м) части Телецкого озера. Дано описание использованной автономной аппаратуры. Приведены графики изменения температуры воды и донных осадков (до глубины ~1.4 м). В процессе мониторинга впервые зафиксированы значительные и часто неожиданные изменения температуры. В это время температура придонной воды изменялась от 2.9 до 4 °С, а геотермический градиент в верхнем слое осадков — от -360 до +170 мК/м. За ноябрь температура воды выросла на 0.6 °С. 5 декабря практически мгновенно произошла смена теплового режима, и за последующие 22 дня температура воды у дна уменьшилась на 1.15 °С. Вариации температуры воды вызвали соответствующую перестройку теплового режима осадков: начал устанавливаться положительный геотермический градиент. Необходимо проведение более длительных наблюдений (>1 года), чтобы оценить глубинную составляющую геотермического градиента (теплового потока) на фоне столь сильных климатических помех.

*Автономный измеритель температуры, мониторинг температуры придонного слоя воды, мониторинг температуры донных осадков на разных глубинах, геотермический градиент в осадках, Телецкое озеро.*

## AUTUMN-WINTER ANOMALOUS VARIATIONS IN BOTTOM WATER AND SEDIMENT TEMPERATURES IN LAKE TELETSKOE

A.D. Duchkov and S.A. Kazantsev

We discuss the results of bottom temperature monitoring run in October through December 2005 in the deepwater basin of Lake Teletskoe at a lake depth of ~320 m using an autonomous recorder. The obtained temperature patterns of water and bottom sediments to a depth of ~1.4 m show sudden large changes. Bottom water temperature fluctuated between 2.9 and 4°C, and the geothermal gradient in the uppermost sediments changed from -360 to +170 mK/m over the period of measurements. Water temperature increased for 0.6°C through November and began to fall suddenly since 5 December to reach a 1.15°C decrease for the following 22 days. The change in water temperature caused the respective change in sediments, namely, gave rise to a positive geothermal gradient. Estimating the deep component of the geothermal gradient (heat flow) with this climate noise requires a longer experiment of more than one year.

*Autonomous temperature recorder, bottom water temperature monitoring, bottom sediment temperature monitoring to different depths, sediment geothermal gradient, Lake Teletskoe*

### ВВЕДЕНИЕ

Многолетними исследованиями [Дучков и др., 1980, 1995, 2001; Дучков, Казанцев, 1984] установлена значительная нестационарность температурного поля донных осадков Телецкого озера даже в наиболее глубоких его частях. Единственной причиной этого могут быть значительные сезонные, преимущественно климатические, вариации температуры придонного слоя воды ( $T_w$ ). Нерегулярные наблюдения за температурой воды озера, проводившиеся в ряде пунктов на протяжении многих лет Телецкой озерной станцией, а также и нами, показали, что  $T_w$  изменяется во времени на всех глубинах и ее колебания в придонном слое (на глубинах 250—320 м) в общих чертах имеют синусоидальный характер с годовым периодом и амплитудой более 1 °С [Селегей, Селегей, 1978; Дучков и др., 1980, 1995]. Таким образом, Телецкое озеро имеет сложный гидротермический режим, подверженный влиянию годовых климатических колебаний, которые заметны даже у дна озера, возможно, вследствие гравитационного и ветроволнового перемешивания. Экспериментальные измерения и расчеты показали, что столь мощные изменения  $T_w$  должны проникать на значительную глубину (до 7—8 м) в донные осадки, нарушая при этом стационарное температурное поле, создаваемое глубинным тепловым потоком [Дучков и др., 2001]. Климатическая составляющая геотермического градиента может быть в 3-4 раза больше глубинной (в интервале измерений) и к тому же изменяет знак в течение года. В данной ситуации уже длительное время не удастся определить достоверное значение глубинного геотермического градиента (теплового потока) через дно Телецкого озера, хотя сведения об этом параметре постоянно привлекаются при обсуждении проблемы происхождения озера.

Известны два подхода к оценке теплового потока в столь сложных условиях.

1. Измерение геотермического градиента в осадках термографами с длинными зондами (длина 8—10 м, вес 200—300 кг), позволяющими вынести датчики за пределы слоя с нестационарными температурами. На Телецком озере в настоящее время нет судов, с которых можно выполнить операции по спуску и внедрению таких зондов в осадки.

2. Организация длительного мониторинга температуры осадков ( $T_s$ ) на нескольких глубинах ниже дна и последующая интерпретация результатов.

Вариации придонной температуры могут быть представлены рядом Фурье [Тихонов, Самарский, 1966]:

$$T_w(0, t) = T_{w_0} + \sum A_i \cos(2\pi t/P_i - \varphi_i), \quad (1)$$

где  $T_{w_0}$  — средняя температура,  $P_i$ ,  $A_i$  и  $\varphi_i$  — период, амплитуда и фаза  $i$ -й составляющей (гармоники) записанного графика.

Когда осадки однородны по тепловым свойствам, а тепло переносится только кондуктивно (отсутствует конвекция), распределение температуры в осадках, нарушенное вариациями  $T_w$ , может быть рассчитано из уравнения:

$$T_s(z, t) = T_{w_0} + gz + \sum A_i \exp(-\sqrt{\pi} z/kP_i) \cos(2\pi t/P_i - \varphi_i - \sqrt{\pi} z/kP_i), \quad (2)$$

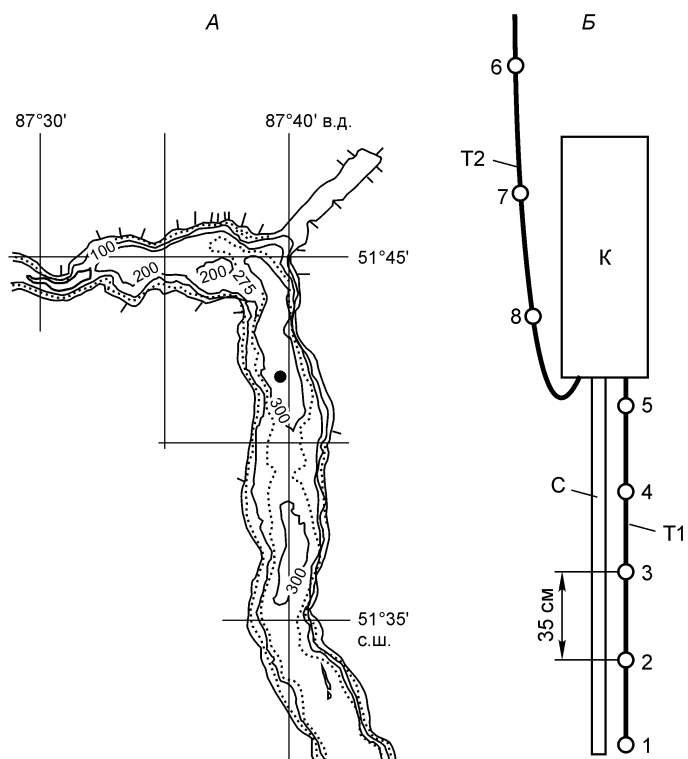
где  $g$  — ненарушенный (глубинный) геотермический градиент,  $k$  — коэффициент температуропроводности осадков. Длительность мониторинга должна превышать период наиболее долгопериодной составляющей. Для Телецкого озера — более 1 года. По результатам мониторинга  $T_s$  можно рассчитать величину и изменение во времени климатической поправки (последнее слагаемое в уравнении (2)) на фиксированных глубинах, определить для них исправленные значения  $T_s$ , построить термограммы и оценить ненарушенный геотермический градиент  $g$ .

Несмотря на трудности, второй подход представляется вполне достижимым в нашем случае, и мы приступили к его реализации. В данном сообщении представляются первые результаты непрерывного мониторинга температуры дна (воды и осадков) в наиболее глубокой центральной части Телецкого озера.

## АППАРАТУРА

Постановке эксперимента на Телецком озере способствовало то, что нами уже длительное время разрабатывается и изготавливается автономная цифровая аппаратура для измерения температуры [Дучков, Казанцев, 1992]. Последняя модификация такой аппаратуры была с успехом использована для проведения длительного температурного мониторинга дна (воды и осадков) на глубине 1350 м в Южно-Байкальской впадине в 2003—2004 гг. [Дучков и др., 2005, 2007].

Наблюдения были организованы в центральной, наиболее глубокой (~320 м) части озера, в пункте с координатами 51°42' с.ш., 87°40' в.д. (рис. 1, А). Для доставки датчиков в осадки был использован геотермический зонд (термограф) (см. рис. 1, Б). Измерительная аппаратура размещалась в тяжелом (~70 кг с грузами) герметичном контейнере, в нижнем торце которого укреплены прочный металлический стержень длиной 1.5 м и две



**Рис. 1. Фрагмент карты Телецкого озера (А) и общий вид геотермического зонда (Б).**

Черной точкой (на части А) отмечен пункт мониторинга температуры дна; К — герметичный контейнер с электроникой, С — металлический стержень (1.5 м), Т1 и Т2 — стальные трубки с температурными датчиками (термисторы).

стальные трубки (диаметр 5 мм) с термодатчиками. Одна трубка соединена кронштейнами со стержнем, а другая поднята вверх (расстояние между датчиками составляет 35 см). При спуске стержень с датчиками погружается в донные осадки под весом контейнера. При полном внедрении зонда в осадки (по нижний фланец контейнера) датчики 5-1 измеряют температуру осадков до глубины 140—150 см ниже поверхности дна, а датчики 6—8 — температуру в метровом придонном слое воды. В качестве датчиков температуры использовались терморезисторы. Регистрация температуры по всем каналам через 1.5 ч (16 измерений в сутки) осуществлялась электронным автономным измерителем температуры, описание которого содержится в работах [Дучков и др., 2005, 2007]. Точность измерения абсолютных значений температуры определяется возможностями градуировки температурных датчиков и составляет 0.01—0.02 °С, относительные изменения температуры регистрируются с разрешением до 0.002 °С. Достоинствами автономного регистратора являются высокая разрешающая способность, большой объем памяти, малое общее энергопотребление, возможность длительной автономной работы, простота в обращении и обслуживании.

Мониторинг был начат 8 октября 2005 г. По ряду технических причин (перерывы в навигации, ремонт теплохода) подъем термографа был выполнен только в июне 2006 г. В итоге выяснилось, что аппаратура работала только в течение первых трех месяцев (октябрь—декабрь 2005 г.). Затем, вследствие неисправности в системе микроконтроллера, полностью разрядился источник питания, и запись прекратилась.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА

Результаты мониторинга приведены на рис. 2 в виде графиков изменения температуры придонной воды и верхнего слоя осадков в октябре—декабре 2005 г. Мы не знаем точно глубину погружения датчиков в осадки, однако известно, что внедрение зонда в осадки ограничивается нижним фланцем контейнера и поэтому ясно, что верхние два графика (датчики 6 и 8) характеризуют вариации температуры придонного метрового слоя воды ( $T_w$ ). Запись датчиком 7 забракована.

Датчики 5-1 измеряли температуру осадков ( $T_s$ ). Датчик 5 располагался, по-видимому, чуть ниже поверхности дна. Об этом свидетельствуют отличный от  $T_w$  уровень температур и отсутствие на графике 5 высокочастотных вариаций температуры. Расположение остальных датчиков относительно датчика 5 определяется сравнительно точно (ошибка 1—2 см). Так, если датчик 5 находился на дне, то датчики 4, 3,

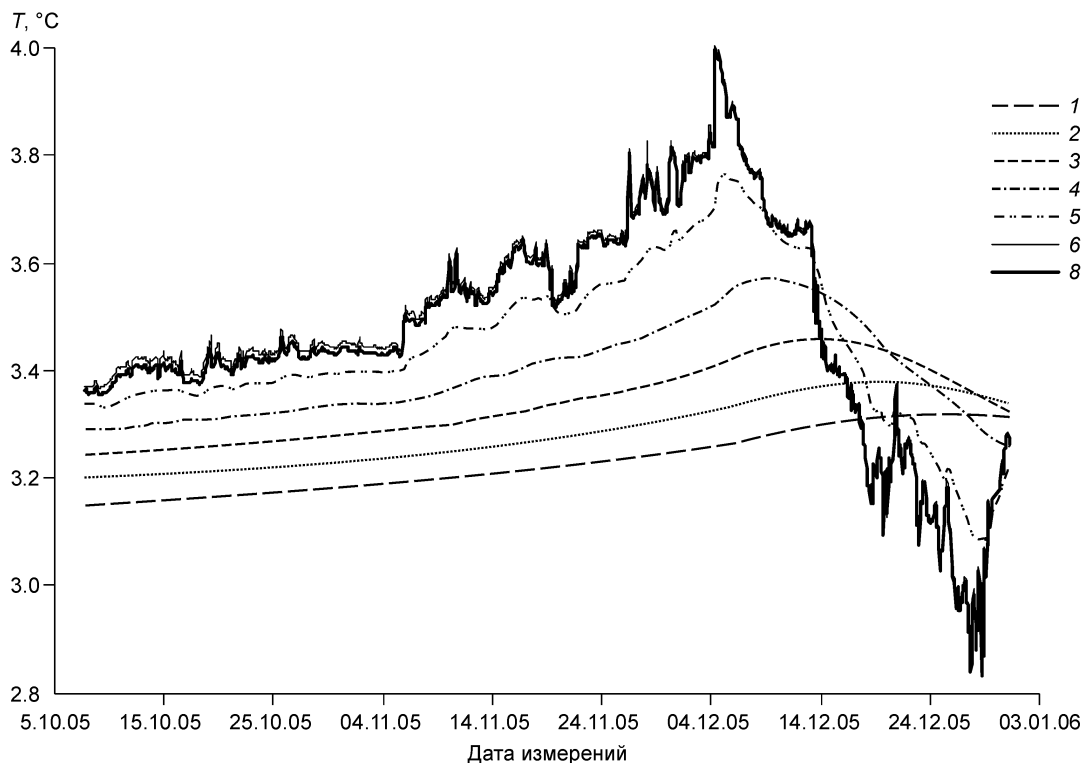


Рис. 2. Результаты мониторинга изменений температуры дна (вода и осадки) центральной части Телецкого озера в октябре—декабре 2005 г.

1—8 — номера датчиков. Пояснения см. в тексте.

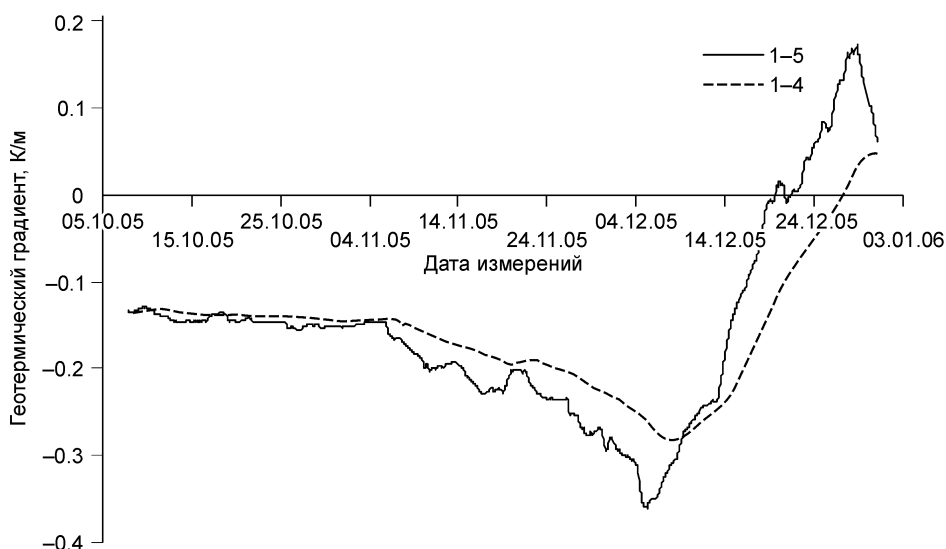
2 и 1 измеряли температуру осадков соответственно на глубинах 35, 70, 105 и 140 см. Отметим, что для оценки средних значений  $T_s$  по результатам длительного мониторинга важно точно знать расположение нижних датчиков относительно верхнего.

В процессе мониторинга зафиксированы значительные изменения температуры дна Телецкого озера на глубине более 300 м. Вплоть до 5 декабря температура придонной воды увеличилась примерно на 0.6 °С. В дальнейшем произошло ее резкое уменьшение более чем на 1 °С. Изменения температуры в осадках в целом следуют за изменениями  $T_w$  с учетом сдвига по фазе. В целом можно констатировать, что мониторинг зафиксировал происходящую в декабре резкую смену температурного режима в системе вода—осадки. Рассмотрим более подробно зафиксированные вариации  $T_w$  и  $T_s$ .

В начале мониторинга (октябрь—первая декада ноября) наблюдалось сравнительно медленное (~0.003 °С в сутки) нарастание температуры воды. Высокочастотные вариации  $T_w$  в это время не превышали 0.03—0.04 °С за несколько часов. Можно считать этот период сравнительно спокойным. В начале ноября темп роста  $T_w$  увеличился в 5—6 раз (~0.016 °С в сутки). Максимальный скачок  $T_w$  на 0.18 °С за 13 ч произошел 4 декабря. 5 декабря произошла смена температурного режима: началось резкое уменьшение придонной температуры, прерванное 27—28 декабря на уровне ~2.9 °С. За это время (22 дня)  $T_w$  уменьшилась по каким-то причинам (возможно, вследствие интрузии холодных поверхностных вод) на 1.15 °С. Темп спада составил примерно 0.05 °С в сутки. Таким образом, уменьшение температуры придонной воды шло почти в 3 раза быстрее, чем ее рост в предшествующий период. Спад  $T_w$ , так же как и рост, происходил не монотонно: зафиксирована серия резких вариаций температуры разного знака с амплитудой до 0.2 °С и продолжительностью от 7—8 до 50—60 ч. После достижения минимума температура воды снова начала расти (вплоть до 31 декабря, когда измерения прекратились).

Выше уже отмечалось, что изменения температуры в осадках вызваны проникновением в них температурной волны, формирующейся в придонном водном слое. Об этом свидетельствует простое сопоставление графиков (см. рис. 2). График 5 показывает, что практически все вариации  $T_w$  проникли в самый верхний слой осадков. Датчики, расположенные глубже (графики 4—1), зафиксировали фактически только смену температурного режима. По мере прохождения в осадки амплитуда колебаний температуры уменьшается с глубиной, соответственно изменяется и сдвиг по фазе, что характерно для кондуктивного теплопереноса, регулируемого коэффициентом температуропроводности осадков (2).

Интересно посмотреть, как изменяется геотермический градиент ( $g_{изм}$ ) в верхнем слое донных осадков. На рис. 3 приведены графики геотермического градиента, рассчитанные для всего изученного слоя мощностью 140 см (между датчиками 1 и 5) и для нижней, более плотной, его части (между датчиками 1 и 4). До середины декабря в осадках сохраняются отрицательные и убывающие значения геотермического градиента. В „спокойный“ период (до начала ноября)  $g_{изм}$  изменяется мало (в среднем порядка -140 мК/м). В это время сохраняются постоянными также и значения градиента в слоях между датчи-



**Рис. 3.** Результаты мониторинга изменений геотермического градиента в осадках центральной части Телецкого озера в октябре—декабре 2005 г.

Сплошная линия — геотермический градиент в интервале между датчиками 1 и 5, штриховая — то же, между датчиками 1 и 4.

ками 4 и 3, 3 и 2, 2 и 1 (см. рис. 2), что может свидетельствовать об однородности тепловых свойств осадков в этой части разреза (40—140 см). В самом верхнем слое (между датчиками 5 и 4) градиент заметно выше, возможно, вследствие уменьшения на 15—20 % теплопроводности осадков из-за большей влажности самого верхнего слоя осадков. В начале декабря в связи с уменьшением  $T_w$  начался быстрый рост геотермического градиента и кардинальная смена температурного режима осадков. В третьей декаде декабря в слое установились положительные значения  $g_{\text{изм}}$ .

В период наблюдений геотермический градиент изменялся в изучаемом слое от  $-360$  до  $+170$  мК/м. Экспериментальные данные неоспоримо свидетельствуют о нестационарности температурного поля верхнего слоя (более 1.5 м) донных осадков Телецкого озера и о невозможности оценить стандартными методами на этом фоне глубинную составляющую геотермического градиента (теплового потока), которая даже в рифтовых озерах в среднем составляет 80—100 мК/м.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнен в октябре—декабре 2005 г. практически непрерывный мониторинг температуры дна (воды и осадков) в одном из пунктов центральной, наиболее глубокой части Телецкого озера. В это время температура придонной воды изменялась от 2.9 до 4 °С, а геотермический градиент в верхнем слое осадков изменялся от  $-360$  до  $+170$  мК/м. Вариации температуры осадков и геотермического градиента в них вызваны проникновением в осадки температурной волны, формирующейся в нижних горизонтах водной толщи. Температурный мониторинг в течение 83 сут зафиксировал нестационарность температурного поля поддонных осадков на глубину более 1.5 м. Эти экспериментальные данные подтвердили вывод о невозможности измерить глубинный геотермический градиент (тепловой поток) в существующей обстановке без применения специальных методических приемов. Использование термографов с длинными (до 8—10 м) зондами на Телецком озере невозможно из-за отсутствия соответствующих плавсредств. Поэтому только длительный мониторинг (более 1 года) температуры в осадках на разных глубинах в слое 1.5—2 м может дать достаточно материала для оценки глубинного геотермического градиента (и теплового потока).

Авторы благодарны Д.Е. Аюнову, М.Е. Пермякову, С.Г. Морозову и команде НИС „Биосфера“ за помощь при проведении полевых работ.

Исследования поддержаны РФФИ (грант № 04-05-64433-а) и интеграционными проектами СО РАН № 87 и 16.3.

### ЛИТЕРАТУРА

**Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Результаты изучения теплового потока через дно озер // Теоретические и экспериментальные исследования по геотермике морей и океанов. М., Наука, 1984, с. 104—113.

**Дучков А.Д., Казанцев С.А.** Автономная аппаратура для режимных измерений температуры // Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. М., Наука, 1992, с. 365—373.

**Дучков А.Д., Казанцев С.А., Селегей В.В., Селегей Т.С., Велинский В.В.** Геотермические исследования на Телецком озере // Геология и геофизика, 1980 (4), с. 111—118.

**Дучков А.Д., Клеркс Ж., Казанцев С.А.** Тепловой поток Телецкого озера // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 143—153.

**Дучков А.Д., Казанцев С.А., Клеркс Я., Дучков А.А.** Тепловой поток и температурное поле осадочного наполнения впадины Телецкого озера // Physical and geological environment of Lake Teletskoye / Ed. V. Selegei, B. Dehandshutter, J. Klerkx, E.M. Vysotsky. Tervuren, Belgique: Musee Royal de L’Afrique Centrale, 2001, v. 105, p. 283—302.

**Дучков А.Д., Казанцев С.А., Дучков А.А.** Экспериментальное изучение вариаций температуры дна глубоководной части Южно-Байкальской впадины // Докл. РАН, 2005, т. 403, № 5, с. 682—684.

**Дучков А.Д., Казанцев С.А., Дучков А.А.** Мониторинг температуры дна оз. Байкал // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (4), с. 472—480.

**Селегей В.В., Селегей Т.С.** Телецкое озеро. Л., Гидрометеиздат, 1978, 142 с.

**Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. М., Наука, 1966, 724 с.