

УДК 551.57 (282.256.341)

**М. Н. ШИМАРАЕВ, Е. С. ТРОИЦКАЯ, Р. Ю. ГНАТОВСКИЙ**

**ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГЛУБИННЫХ ВОД ОЗЕРА БАЙКАЛ  
В 1972–2007 ГОДЫ**

*Проанализированы результаты измерений температуры воды в Байкале в 1972–2007 гг. Аномальное потепление в этот период сопровождалось постепенным повышением температуры верхнего 300-метрового слоя, но не отразилось на состоянии вод глубинной зоны. Колебания ее температуры в 1972–1992 гг. связаны главным образом с изменением динамического воздействия атмосферы на водную толщу, вызывавшим межгодовые колебания активности глубинной конвекции.*

Ключевые слова: озеро Байкал, климат, температура воды, верхняя и глубинная зоны, многолетние тренды, межгодовая изменчивость, глубинная конвекция.

© 2009 Шимараев М. Н. (shimarae@lin.irk.ru), Троицкая Е. С. (troitca@lin.irk.ru),  
Гнатовский Р. Ю. (gnat@lin.irk.ru)

*An analysis is made of the results of water temperature measurements in Baikal for the period 1972–2007. An anomalous warming in that period was accompanied by a gradual rise in temperature of the upper 300-meter layer but it had no effect on the state of the waters in the deep zone. Its temperature fluctuations during 1972–1992 were due mainly to changes in dynamical effects of the atmosphere on the water layer which caused interannual variations in activity of the deep-water convection.*

Keywords: Lake Baikal, climate, water temperature, upper and deep zones, long-term trends, interannual variability, deep-water convection.

Вопрос о реакции температуры вод оз. Байкал на изменения климата представляет безусловный интерес в связи с проблемой глобального потепления. Более раннее изучение температурного режима озера [1–4] не позволяло рассмотреть этот вопрос из-за недостатка наблюдений. Именно поэтому большое значение имеют материалы исследований, организованных в начале 1970-х гг. [4] и продолжающихся до настоящего времени.

В течение всего периода работ на постоянной сетке гидрологических станций изучалось распределение температуры от поверхности до дна. Полученные материалы дают возможность выяснить особенности изменения температуры в отдельных слоях глубинной зоны Байкала в период с 1972 по 2007 г., включающий максимальную за XX в. фазу глобального потепления.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Озеро Байкал простирается с юго-запада на северо-восток на 636 км, располагаясь между 51°28' и 55°47' с. ш. и 103°43' и 109°58' в. д. В морфометрическом отношении впадина озера делится глубоководными поднятиями дна (Селенгинское поднятие и Академический хребет) на Южный, Средний (максимальные глубины 1461 и 1642 м соответственно) и Северный Байкал (904 м). Материалы получены при термических съемках на акватории всего озера, включавших продольный разрез по его тальвегу (20 глубоководных станций) и 3–5 поперечных разрезов с 5-ю (с 1972 г.) или с 11-ю (с 2002 г.) станциями на каждом.

В 1972–1973 гг. съемки велись сначала ежемесячно с июня по декабрь, а после 1974 г. — в июне, июле, сентябре, ноябре и декабре. Зимой они проводились практически ежегодно в Южном Байкале, в 1972–1983 гг. — в Северном и только в 1972 г. — в Среднем Байкале из-за сложной ледовой обстановки в этой части озера. Температура измерялась глубоководными ртутными термометрами через 5–50 м до горизонта 300 м и глубже до дна через 100 м с точностью около  $\pm 0,02$  °С. В 1995–2007 гг. по той же схеме ежегодно (кроме 1996 г.) выполнялась одна съемка от поверхности до дна в период с июня по сентябрь STD-зондами SBE-25 с высокоточными датчиками температуры ( $\pm 0,002$  °С, разрешение 0,0001 °С) и глубины ( $\pm 30$ –60 см).

Для анализа использованы измерения на глубоких центральных участках котловин: в Южном Байкале — на центральных станциях разрезов пос. Листвянка–пос. Танхой и мыс Кадильный–р. Мишиха (глубины 1420–1461 м), в Среднем — разрезом мыс Хобой–мыс Крестовый, мыс Ухан–мыс Тонкий и в 10 км от мыса Ижемей на о. Ольхон (1600–1642 м), а в Северном — разрезом ГМС Солнечная–о. Бол. Ушканий, мыс Елохин–пос. Давша и в районе мыса Заворотный (888–904 м). Выбор центральных участков имел целью частично ослабить влияние на температуру динамических процессов, характерных для прибрежных зон (циркуляции в поле течений, сгонно-нагонные и другие явления).

Рассматривались осредненные в пределах выделенных участков котловин температуры в слоях 0–100 м, 100–200, 200–300, 200–400, 400–600 м, в основном глубинном слое от 600 м до горизонта в 200 м от дна и в придонном слое. В менее глубоком Северном Байкале за основной глубинный принят слой 500–700 м. При выделении слоев учитывались сведения о вертикальной структуре и изменчивости поля температуры [1–4], течений и обменных процессов [5]. При анализе также использована средняя месячная скорость ветра над Южным Байкалом в 1970–1995 гг., рассчитанная по методике (см. [3, 6]). Ветер на Среднем и Северном Байкале за этот же период характеризуется в работе данными наблюдений на метеостанции Солнечная, расположенной на границе этих частей озера.

Отметим следующие особенности полученных материалов. Данные о температуре представлены двумя рядами наблюдений, различными по частоте измерений внутри года. Наблюдения 1972–1992 гг. достаточно полно характеризуют многолетние изменения температуры в сезоны летного прогрева (июнь–сентябрь), предзимнего охлаждения (ноябрь–декабрь) и зимнего минимума температуры (март), для двух первых по месячным значениям вычислена средняя температура.

Эта информация дает возможность, во-первых, оценить глубину, до которой проявляются изменения климатического характера, во-вторых, на основе результатов наблюдений выделить слои, в

которых межгодовые изменения температуры воды имеют близкий характер в отдельные сезоны года. Такое выделение с согласованным изменением сезонных температур имеет значение для обоснования совместного использования наблюдений в 1972–1992 и 1995–2007 гг. при анализе многолетней динамики температуры глубинных вод. Исследования 1995–2007 гг. характеризуют температурные изменения только в период летнего прогрева, но отличаются более точной и детальной информацией о температуре в самых нижних, придонных, слоях воды.

### СИНХРОННОСТЬ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАЗНЫЕ СЕЗОНЫ

Степень согласованности изменений температуры для каждой из частей озера оценена по характеристике связи (коэффициент корреляции) между ее значениями в отдельные сезоны за время наблюдений (табл. 1).

В слоях 0–100 и 100–200 м в каждой из котловин эта связь статистически незначима и неустойчива по знаку. Причина этого — скорее всего, различие метеорологических условий и гидрологических процессов в отдельные сезоны, оказывающих воздействие на температуру воды. Близкая картина наблюдается и в 200-метровом придонном слое, температура которого испытывает воздействие усиления у дна течений [5], а также интрузий холодных вод из верхних слоев озера, имеющих нерегулярный и эпизодический характер [7–9].

В слое 200–400 м обнаруживаются признаки связи в изменении температуры в отдельные сезоны. Это выражается в положительных и значимых коэффициентах корреляции в марте и июне–сентябре в Южном и Северном, в июне–сентябре и ноябре–декабре в Среднем Байкале.

В диапазоне глубин от 400 м от поверхности до 200 м от дна во всех частях озера связь сезонных температур становится положительной и в большинстве случаев значимой (см. табл. 1). Эта область глубинной зоны находится ниже зоны развития свободной конвекции и дрейфовых течений, характеризуется ослабленными процессами переноса и перемешивания [5], и ее температура практически не испытывает кратковременных возмущений, вызываемых аномалиями погодно-климатических условий в верхних слоях. Показательно, что стандартное отклонение температуры в этой части глубинной зоны (0,005–0,008 °С) в два-пять раз меньше его значений в слое 200–400 м (0,01–0,025 °С) и придонном 200-метровом слое (0,02–0,04 °С).

Отмечаемая положительная связь температуры в отдельные сезоны указывает на наличие факторов, приводящих к длительному нарушению термического состояния вод этих слоев. Помимо этого она дает основание для использования при анализе данных о многолетних изменениях в глубинной зоне в течение одного и того же сезона года. С учетом особенностей полученного материала для этой цели нами использованы сведения о средней температуре периода июнь–сентябрь, полученные в 1972–1992 и 1995–2007 гг. (рис. 1).

Таблица 1

Коэффициенты корреляции сезонных значений температуры ( $T$ ) в слоях воды оз. Байкал (1972–1992 гг.)

Южный Байкал				Средний Байкал		Северный Байкал			
Слой воды, м	$T_{VI-IX}$ и $T_{XI-XII}$	$T_{VI-IX}$ и $T_{II-III}$	$T_{II-III}$ и $T_{XI-XII}$	Слой воды, м	$T_{VI-IX}$ и $T_{XI-XII}$	Слой воды, м	$T_{VI-IX}$ и $T_{XI-XII}$	$T_{VI-IX}$ и $T_{II-III}$	$T_{II-III}$ и $T_{XI-XII}$
0–100	0,26	0,09	–0,09	0–100	<b>–0,05</b>	0–100	–0,22	0,43	–0,56
100–200	0,39	0,30	–0,15	0–200	0,02	0–200	–0,19	0,39	–0,57
200–400	–0,03	<b>0,81</b>	0,05	200–400	<b>0,62</b>	200–400	0,11	<b>0,75</b>	–0,03
400–600	<b>0,69</b>	<b>0,72</b>	<b>0,64</b>	400–600	<b>0,54</b>	400–700	0,38	0,37	0,44
600–1200	<b>0,42</b>	<b>0,52</b>	0,39	600–1400	<b>0,60</b>	700–900	–0,10	–0,26	0,78
1200–1400	0,13	0,26	<b>0,64</b>	1400–1600	–0,05				

Примечание. Здесь и в табл. 5 шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции ( $p < 0,05–0,01$ ).

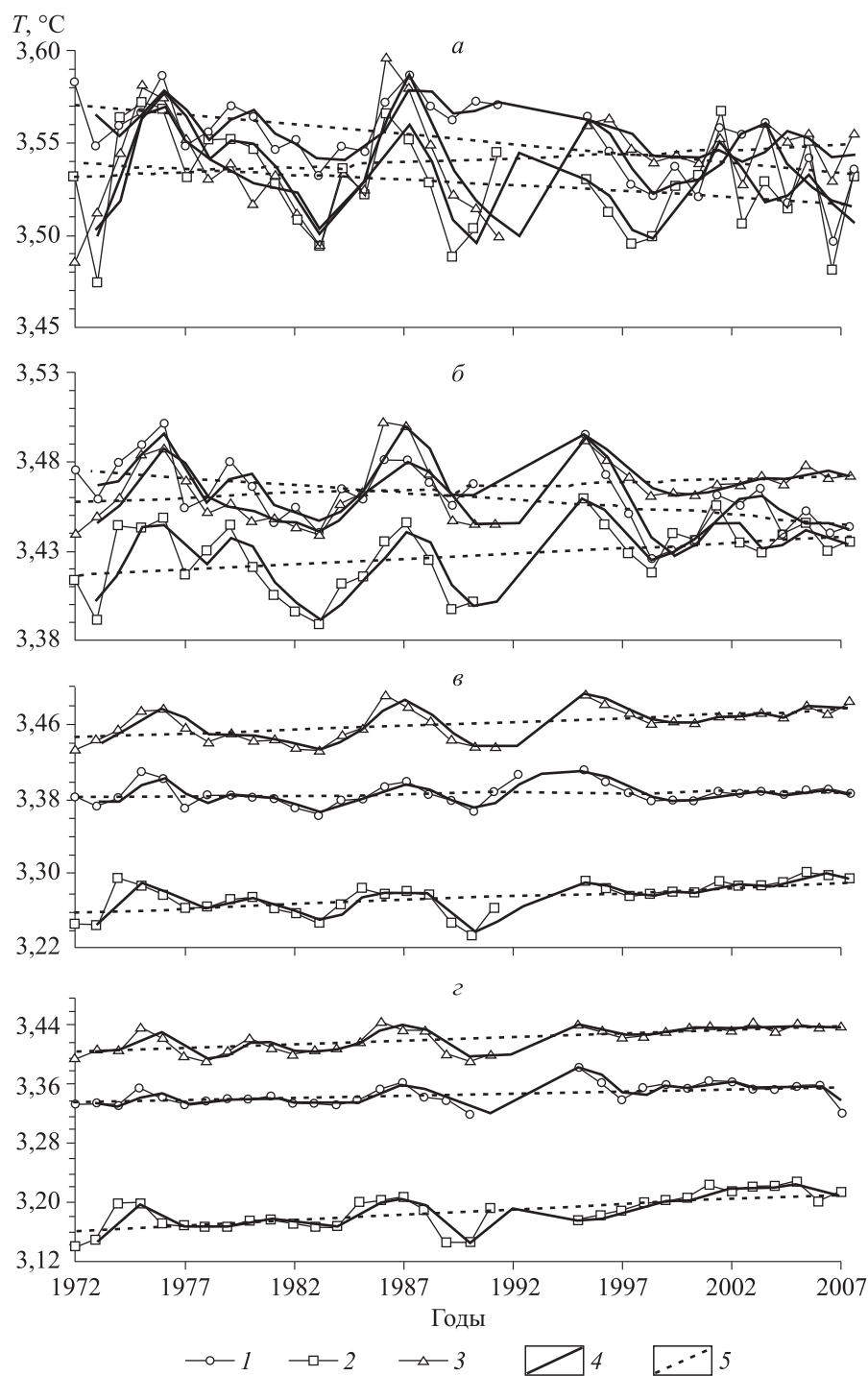


Рис. 1. Средние температуры отдельных слоев воды в Южном, Среднем и Северном Байкале в июне–сентябре (1972–2007 гг.).

*a* — слой воды 200–400 м глубины; *б* — 400–600 м; *в* — основной глубинный слой; *г* — слой воды 200 м от дна.  
 1 — Южный Байкал; 2 — Средний Байкал; 3 — Северный Байкал; 4 — 5-летние сглаженные значения; 5 — тренд.

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТРЕНДЫ В ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Деятельный слой (0–300 м).** Выявлено, что с начала 1970-х до середины 1990-х гг. усиление темпов потепления климата привело к быстрому росту температуры поверхностного слоя воды Байкала, превышающему  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  [10]. Для оценки размеров этого слоя по наблюдениям 1972–1992 гг. вычислены многолетние тренды температуры в отдельные месяцы и оценен уровень их значимости (табл. 2).

Потепление вызвало повышение температуры в слое до 300 м в июне и июле, до 200 м в декабре, марте (Южный и Северный Байкал) и ноябре–декабре (Средний Байкал) с самыми большими и значимыми положительными трендами в июне и июле (см. табл. 2). В сентябре (а в Южном и Северном Байкале и в ноябре) происходило незначительное понижение температуры. Тем не менее, средние за отдельные сезоны значения температуры заметно повышались в слоях до глубины 200 м. Глубже тренды месячных и сезонных температур оказались крайне малы ( $<0,01\text{--}0,001\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ). Таким образом, прямое воздействие потепления сказалось на повышении температуры верхнего деятельного слоя озера, нижняя граница которого соответствует глубине развития активного сезонного перемешивания под влиянием ветра и свободной температурной конвекции [1, 7, 11].

**Глубинные слои.** При анализе тенденций многолетних изменений данные о температуре в 1972–1992 и 1995–2007 гг. можно рассматривать как однородный ряд лишь с некоторым приближением ввиду различной дискретности и точности измерений в каждый из слагающих его периодов. Поэтому были рассмотрены тренды температуры как за весь период 1972–2007 гг., так и для наблюдений в 1972–1992 и 1995–2007 гг.

Результаты расчетов за весь период при предположении однородности данных показывают, что тренды температуры в слоях 200–400 и 400–600 м в отдельных частях озера могут иметь разный знак (см. рис. 1), а в более глубоких слоях они положительны, за исключением слоя 600–1200 м в Южном Байкале, где величина тренда близка к нулю. Во всех случаях значения трендов крайне невелики ( $0,002\text{--}0,015\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ). Реальность обнаруженных трендов вызывает сомнение, так как причиной их появления могут быть различия между средними за 1972–1992 и 1995–2007 гг. значениями температуры (табл. 3), обусловленные, как сказано выше, методическими особенностями их определения. В связи с этим отметим, что величина разности средней температуры отдельных слоев за эти периоды, как правило, не выходит за рамки стандартного отклонения (см. табл. 3).

Отдельный расчет для 21-го летнего ряда наблюдений в 1972–1992 гг. не обнаруживает никаких статистически значимых трендов температуры во всех глубинных слоях (табл. 4) на фоне устойчивого и значительного потепления верхних слоев озера. Большая длина ряда, включающего несколько полных циклических колебаний температуры (см. рис. 1), позволяет с уверенностью говорить о надежности полученных величин трендов, свидетельствующих об отсутствии тенденций длительного изменения температуры глубинных слоев в этот период.

Данные ряда за 1995–2007 гг., содержащего более точную информацию о температуре, позволяют выявить разные по знаку тенденции изменения, которые могут быть связаны с колебаниями, близкими по продолжительности к длине этого ряда. В Южном Байкале глубже 200 м обнаруживается

Таблица 2

**Тренды температуры воды ( $^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ ) в верхних слоях воды оз. Байкал по месяцам (1972–1992 гг.)**

Слой воды, м	Месяцы					
	III	VI	VII	IX	XI	XII
<i>Южный Байкал</i>						
0–100	0,08	<b>0,36</b>	<b>0,31</b>	–0,011	–0,132	0,05
100–200	0,05	<b>0,097</b>	0,015	–0,022	–0,024	0,021
200–300	0,005	<b>0,025</b>	–0,003	–0,009	0,016	–0,002
<i>Средний Байкал</i>						
0–100		<b>0,265</b>	0,227	0,008	0,104	0,129
100–200		<b>0,13</b>	0,014	–0,004	0,101	0,031
200–300		0,022	0	–0,03	0,014	–0,014
<i>Северный Байкал</i>						
0–100	0,515	0,205	<b>0,478</b>	–0,205	–0,264	0,234
100–200	0,142	<b>0,114</b>	<b>0,087</b>	– <b>0,053</b>	–0,03	0,175
200–300	0,008	0,022	0,024	–0,038	0,003	0,028

Примечание. Здесь и в табл. 4 шрифтом выделены тренды с уровнем значимости  $p < 0,05\text{--}0,01$ .

Средняя температура глубинных слоев (в м) воды оз. Байкал

Годы	Южный Байкал				Средний Байкал				Северный Байкал			
	200–400	400–600	600–1200	1200–1400	200–400	400–600	600–1400	1400–1600	200–400	400–600	400–700	700–900
<i>Температура воды, °С</i>												
1972–1992	3,56	3,47	3,38	3,34	3,53	3,43	3,27	3,18	3,54	3,46	3,45	3,41
1995–2007	3,536	3,451	3,388	3,357	3,521	3,438	3,288	3,206	3,548	3,472	3,473	3,437
Разность	–0,03	–0,02	0,01	0,02	–0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02
<i>Стандартное отклонение, °С</i>												
1972–1992	0,017	0,016	0,012	0,011	0,027	0,019	0,017	0,021	0,03	0,02	0,018	0,016
1995–2007	0,020	0,019	0,009	0,014	0,023	0,011	0,008	0,016	0,012	0,009	0,01	0,006

Таблица 4

Тренды температуры (°С/10 лет) в глубинных слоях воды оз. Байкал

Южный Байкал			Средний Байкал			Северный Байкал		
Слой воды, м	1972–1992 гг.	1995–2007 гг.	Слой воды, м	1972–1992 гг.	1995–2007 гг.	Слой воды, м	1972–1992 гг.	1995–2007 гг.
200–400	0,002 $R^2 = 0,0036$	–0,016 $R^2 = 0,0975$	200–400	–0,01 $R^2 = 0,042$	0,006 $R^2 = 0,0084$	200–400	–0,001 $R^2 = 0,0005$	–0,006 $R^2 = 0,0367$
400–600	–0,007 $R^2 = 0,0635$	–0,019 $R^2 = 0,1428$	400–600	–0,008 $R^2 = 0,0473$	–0,007 $R^2 = 0,0511$	400–600	0,001 $R^2 = 0,0019$	–0,006 $R^2 = 0,06$
600–1200	$8 \cdot 10^{-4}$ $R^2 = 0,0015$	–0,008 $R^2 = 0,1262$	600–1400	$-4 \cdot 10^{-3}$ $R^2 = 0,0172$	<b>0,014</b> <b><math>R^2 = 0,4659</math></b>	500–700	$1 \cdot 10^{-4}$ $R^2 = 1 \cdot 10^{-5}$	–0,001 $R^2 = 0,0028$
1200–1400	0,002 $R^2 = 0,0135$	–0,018 $R^2 = 0,241$	1400–1600	0,007 $R^2 = 0,045$	<b>0,032</b> <b><math>R^2 = 0,5893</math></b>	700–900	0,003 $R^2 = 0,0104$	0,007 $R^2 = 0,1955$
200–100 от дна		–0,01 $R^2 = 0,2252$			<b>0,032</b> <b><math>R^2 = 0,8545</math></b>			0,002 $R^2 = 0,0186$
100–5 от дна		<b>–0,03</b> <b><math>R^2 = 0,3025</math></b>			<b>0,032</b> <b><math>R^2 = 0,3197</math></b>			<b>0,012</b> <b><math>R^2 = 0,2767</math></b>
5 от дна		–0,038 $R^2 = 0,2661$			0,03 $R^2 = 0,0786$			<b>0,033</b> <b><math>R^2 = 0,3972</math></b>

Примечание.  $R^2$  – коэффициент детерминации.

очень слабое понижение температуры, усиливающееся в 100-метровом придонном слое. Наоборот, в Среднем Байкале глубже 600 и в Северном глубже 700 м температура повышалась с наиболее выраженным трендом в нижней части водной толщи. Для всех слоев, кроме 200-метрового слоя вблизи дна, величины трендов температуры малы и не превышают 0,016 °С/10 лет.

Исходя из приведенного анализа, можно заключить, что в отличие от температуры верхней зоны озера, возраставшей в последние 35 лет, тенденция к повышению температуры в глубинной зоне Байкала отсутствовала.

### МЕЖГОДОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

На фоне очень слабых многолетних трендов в изменении температуры воды отдельных слоев хорошо заметны межгодовые колебания (см. рис. 1). Отметим их особенности для самого верхнего слоя 0–100 м по наблюдениям в 1972–1992 гг. При постепенном росте температуры наибольший вклад в изменения вносили колебания с амплитудой 0,6–1,0 °С и продолжительностью 2–7 лет, характерной для атмосферных процессов. Из-за большой широтной протяженности озера и связанных с этим заметных погодно-климатических различий эти колебания могут быть несинхронными в отдельных частях озера. По таким условиям выделяется Южный Байкал, изменения температуры в котором практически не связаны с таковыми в других частях озера ( $r = 0,07–0,14$ ). Более согласованны изменения температуры в Среднем и Северном Байкале ( $r = 0,66$ ,  $p < 0,01$ ), что можно объяснить близостью погодно-климатических условий районов наблюдений.

В слоях 200–400 и 400–600 м преобладающими становятся колебания температуры длительностью около 7–10 лет, которые близки по фазе во всех частях озера (см. рис. 1). Максимумы приходятся на

1974–1976, 1986–1987, 1994–1996 и 2001–2005 гг., а минимумы — на 1972–1973, 1983, 1989–1991, 1997–1998 и 2006 гг. С глубиной амплитуда колебаний уменьшается от 0,07–0,1 °С в слое 200–400 до 0,06–0,07 °С в слое 400–600 м, и усиливается их согласованность в пределах озера. На это указывает увеличение коэффициентов корреляции связи между температурой отдельных котловин от 0,59 ( $p < 0,05$ ) в слое 200–400 м до 0,7–0,8 ( $p < 0,01$ ) в слое 400–600 м.

В основном глубинном слое (от 600 до 1200–1400 м в Южном и Среднем и от 500 до 700 м в Северном Байкале) сохраняется выраженная синхронность изменений температуры теплого периода ( $r = 0,62–0,78$ ,  $p < 0,001$ ) с амплитудой колебаний 0,03–0,06 °С. Значимая связь между температурой в разных котловинах характерна и для отдельных месяцев. В июне коэффициенты корреляции составляют 0,58–0,69 ( $p < 0,05–0,01$ ), в июле 0,58 ( $p < 0,05$ ), а в сентябре — 0,54 ( $p < 0,05$ ). По сравнению со слоями 200–400 и 400–600 м колебания температуры имеют более сглаженный характер, а после 1997–1998 гг. ее изменение становится монотонным и не несет следов максимума в 2001–2005 гг., характерного для вышележащих слоев.

Сходные черты имеют и колебания температуры в 200-метровом придонном слое. Их особенность — различия в тенденции изменения температуры в разных частях озера после 1995 г., которая повышалась в Среднем и Северном Байкале и понижалась в Южном.

Остановимся на возможных причинах колебаний температуры глубинных слоев. Как уже показал предварительный анализ, в многолетнем изменении сезонных температур глубже 400 м обнаруживается значимая положительная корреляция, указывающая на длительное (в течение года) сохранение температурных возмущений во всех слоях глубинной зоны, что проявляется и в синхронном характере межгодовых колебаний температуры. Мы полагаем, что причиной таких возмущений могут быть атмосферные воздействия на водную толщу, приводящие к изменению баланса тепла глубинных слоев. Основные составляющие этого баланса — турбулентный поток тепла в период прямой и интрузионный поток холодных вод в период обратной температурной стратификации, направленные из верхних слоев в глубинные.

В многолетнем плане оба потока компенсируют друг друга, что объясняет устойчивость температурного состояния глубинных вод [11, 12]. Изменение соотношения между этими потоками в отдельные годы должны вызывать колебания температуры глубинных слоев. Интенсивность потоков определяется в основном динамическим воздействием атмосферы на водную толщу, которое с некоторым приближением можно характеризовать скоростью ветра. Роль ветра заключается в активизации динамических процессов, усиливающих в период прямой стратификации турбулентную передачу тепла в нижние слои, а в период обратной стратификации создающих условия для появления термобарической неустойчивости и развития глубинной конвекции, вызывающей охлаждение глубинных вод.

Подробный анализ влияния ветра выполнен на примере Южного Байкала по данным о температуре воды в июне–сентябре 1972–1992 гг. и аномалиях скорости ветра в периоды развития глубинной конвекции (май–июнь и декабрь–январь), а также в период передачи тепла в глубинные слои турбулентными процессами (июль–сентябрь). Оказалось, что скорость ветра в июле–сентябре оказывает очень слабое влияние на температуру слоев глубже 400 м, столь же невелико влияние ветра во все периоды на изменения температуры в слое 200–400 м (табл. 5). В обоих случаях коэффициенты корреляции связи малы и статистически недостоверны.

В то же время обнаруживается устойчивая обратная зависимость температуры слоев ниже 400 м от скорости ветра в периоды декабрь–январь и май–июнь, причем наибольшее воздействие оказывает ветер в январе и мае, а также средний ветер за эти месяцы. Связи температуры со скоростью ветра в указанное время четко выражены для основного глубинного слоя (600–1200 м) и всей глубинной зоны ниже 400 м в Южном Байкале, а также в других котловинах озера. Для определения ис-

Таблица 5

**Коэффициенты корреляции температуры в июне–сентябре с аномалиями скорости ветра в Южном Байкале в отдельные месяцы и периоды**

Слой воды, м	Месяцы					Периоды		
	XII	I	V	(I, V)/2*	VI	XII–I	V–VI	VII–IX
200–400	–0,1	–0,29	–0,05	–0,19	–0,29	–0,26	–0,22	–0,09
400–600	–0,43	–0,42	–0,37	<b>–0,46</b>	–0,35	–0,40	<b>–0,54</b>	–0,34
600–1200	–0,22	<b>–0,50</b>	<b>–0,51</b>	<b>–0,59</b>	–0,18	<b>–0,45</b>	<b>–0,57</b>	–0,31
1200–1400	0,11	–0,27	<b>–0,44</b>	–0,43	0,03	–0,08	–0,39	–0,25
400–1400	–0,22	<b>–0,47</b>	<b>–0,49</b>	<b>–0,57</b>	–0,22	–0,43	<b>–0,57</b>	–0,15

\* Средняя аномалия скорости ветра для января и мая.

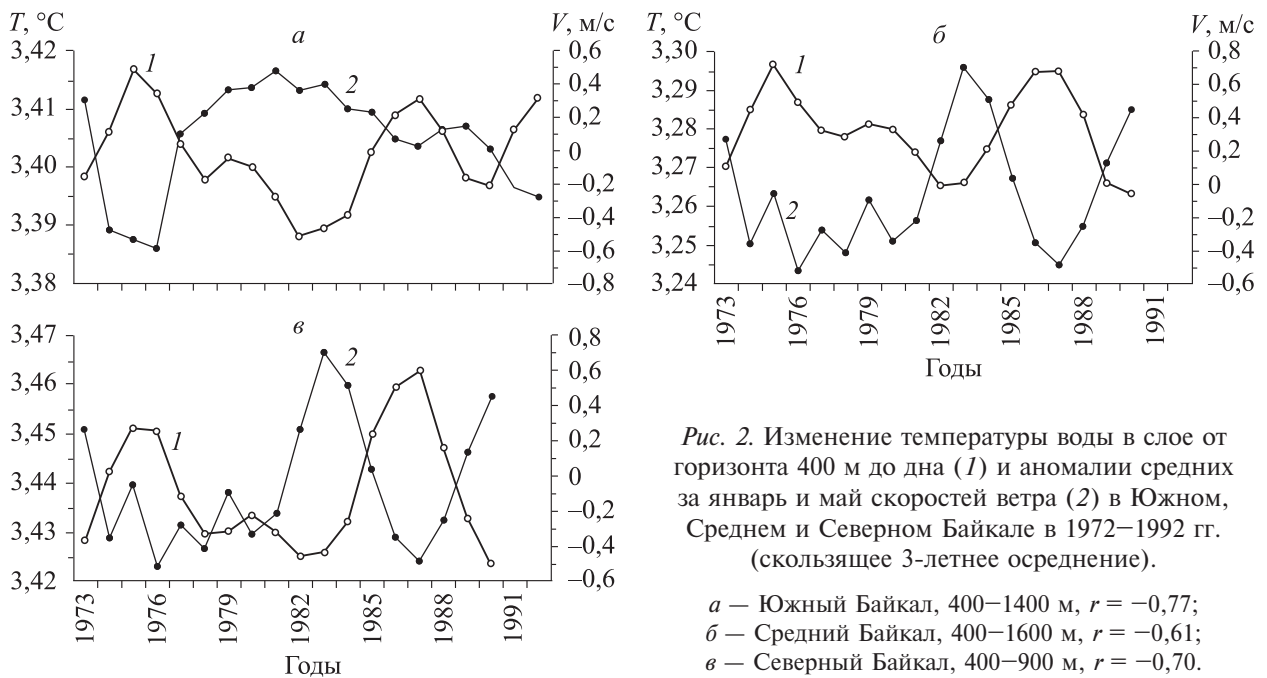


Рис. 2. Изменение температуры воды в слое от горизонта 400 м до дна (1) и аномалии средних за январь и май скоростей ветра (2) в Южном, Среднем и Северном Байкале в 1972–1992 гг. (скользящее 3-летнее осреднение).

*a* – Южный Байкал, 400–1400 м,  $r = -0,77$ ;  
*б* – Средний Байкал, 400–1600 м,  $r = -0,61$ ;  
*в* – Северный Байкал, 400–900 м,  $r = -0,70$ .

пользованы данные о ветре на метеостанции Солнечная (рис. 2). Отдельные расчеты для температуры в июне и июле также подтвердили ее значимую зависимость от ветра в январе и мае ( $r = -0,5 \div -0,6$ ,  $p < 0,05$ ). Для придонного слоя (глубже 1200 м) значимой оказалась только связь с ветром в мае. Неустойчивость характеристик связи для этого слоя может объясняться неточностью определения его средней температуры из-за большой дискретности измерений в 1972–1992 гг.

Наличие значимой обратной связи температуры глубинных слоев со скоростью ветра в декабре–январе и мае–июне и отсутствие таковой со скоростью ветра в июле–сентябре дают основание полагать, что основной причиной наблюдавшихся в 1972–1992 гг. колебаний температуры было изменение интенсивности глубинной конвекции. Влияние на эти колебания турбулентного переноса тепла из верхних слоев, напрямую связанного со скоростью ветра в летне-осенние месяцы, практически не отмечено. Возможной причиной этого могут быть менее выраженная межгодовая изменчивость ветра в теплый период года, постоянство вертикального градиента температуры в глубинной части водной толщи, а также сохранение до ноября слоя скачка плотности, затрудняющего передачу тепла из верхних слоев.

Ведущая роль вынужденной глубинной конвекции в колебаниях температуры глубоких слоев косвенно подтверждается наблюдениями в 1995–2007 гг. Как отмечено выше, температура воды в этих слоях понижалась в Южном и повышалась в Среднем и Северном Байкале, особенно вблизи дна. Причиной этих разнонаправленных тенденций можно считать нарушение баланса тепла глубинных вод, заключающееся в усилении в Южном Байкале охлаждающего влияния холодных интрузий и его ослаблении в Среднем и Северном Байкале. Такому предположению соответствуют результаты исследования холодных придонных интрузий в котловинах озера в 1993–2007 гг. [13].

Так, в этот период в Южном Байкале интрузии появлялись чаще в 8 раз и в 60 % случаев охватывали всю придонную область котловины, тогда как в Среднем и Северном они отмечались реже и в основном в области максимальных глубин. Как следует из данных табл. 4, в 1995–2007 гг. признаки охлаждения проявлялись в Южном Байкале, в толще воды глубже 200 м. Этот факт свидетельствует о влиянии глубинной конвекции на охлаждение как придонного слоя, так и других слоев глубинной зоны. Близкий эффект глубинной конвекции отмечен ранее в ходе наблюдений в весенне-летние периоды 1972–1974 гг. [4, 10].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа указывают на разную реакцию температуры верхней и глубинной частей водной толщи Байкала на изменения климата в последние десятилетия. В слоях до глубин 200–300 м потепление приводило к росту температуры, особенно заметному в июне и июле. В глубинной части озера многолетние тренды температуры или не прослеживаются, или крайне малы, что свидетель-



стствует об отсутствии сколько-нибудь значимого влияния происходившего потепления. Наблюдаемые в глубинных слоях межгодовые колебания температуры продолжительностью 7–10 лет с амплитудой в сотые и десятые доли градуса обусловлены изменением соотношения между процессами, определяющими потоки тепла и холода из верхних слоев, которые зависят от динамического (ветрового) воздействия атмосферы на водную толщу в разные сезоны. В период исследований это воздействие должно было меняться из-за значительных колебаний барико-циркуляционных условий в зимне-весенние месяцы [14–17].

Анализ связи температуры со скоростью ветра позволяет сделать вывод, что преобладающее влияние на колебания температуры глубинных вод оказывает процесс их охлаждения холодными интрузиями в периоды развития глубинной конвекции, интенсивность которого меняется в зависимости от скорости ветра. Из анализа данных за 1995–2007 гг. следует, что разная активность этого процесса может приводить к различиям в тенденциях изменения температуры глубинных и придонных слоев в отдельных частях Байкала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (09–05–00222) и Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН 7.9 (№ 23).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Верещагин Г. Ю.** Основные черты вертикального распределения динамики водных масс на Байкале // Академику В. И. Вернадскому к 50-летию научной и педагогической деятельности. — М., 1936. — Т. 2. — С. 1207–1230.
2. **Россолимо Л. Л.** Некоторые черты температурного режима Малого моря: Труды Байкал. лимнол. станции АН СССР. — 1959. — Т. 16. — 551 с.
3. **Верболов В. И., Сокольников В. М., Шимараев М. Н.** Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. — М., Л.: Наука, 1965. — 374 с.
4. **Шимараев М. Н.** Элементы теплового режима озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1977. — 149 с.
5. **Верболов В. И.** Течения и водообмен в Байкале // Водн. ресурсы. — 1996. — Т. 23, № 4. — С. 413–423.
6. **Афанасьев А. Н.** Водный баланс оз. Байкал // Труды Байкал. лимнол. станции АН СССР. — 1960. — Т. 18. — С. 155–241.
7. **Weiss R. F., Carmack E. C., Koropalov V. M.** Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature. — 1991. — Vol. 349. — P. 665–669.
8. **Shimaraev M. N., Granin N. G., Zhdanov A. A.** Deep ventilation of Lake Baikal waters due to spring thermal bars // Limnol. and Oceanogr. — 1993. — Vol. 38 (5). — P. 1068–1072.
9. **Wuest A., Ravens T. M., Granin N. G. et al.** Cold intrusion in Lake Baikal: direct observational evidence for deep-water renewal // Limnol. and Oceanogr. — 2005. — Vol. 50 (1). — P. 184–196.
10. **Троицкая Е. С., Шимараев М. Н., Цехановский В. В.** Межгодовая изменчивость температуры поверхности воды в озере Байкал // География и природ. ресурсы. — 2003. — № 3. — С. 68–73.
11. **Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P.** Physical limnology of Lake Baikal: a review. — Irkutsk, Okayama, 1994. — 80 p.
12. **Шимараев М. Н., Гранин Н. Г.** К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Докл. АН СССР. — 1991. — Т. 321, № 2. — С. 381–385.
13. **Шимараев М. Н., Жданов А. А., Гнатовский Р. Ю. и др.** Холодные придонные интрузии на Байкале: пространственные масштабы явления по наблюдениям в 1993–2007 гг. // Потоки и структуры в жидкостях: Избр. доклады междунар. конференции. Санкт-Петербург, 2–5 июля 2007 г. — М.: Изд-во Ин-та проблем механики РАН, 2008. — С. 275–280.
14. **Jones P. D., Jynsson T., Wheeler D.** Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland // Intern. Journ. of Climatology. — 1997. — Vol. 17. — P. 1433–1450.
15. **Panagiotopoulos F., Shahgedanova M., Hannachi A., Stephenson D. B.** Observed Trends and Teleconnections of the Siberian High: A Recently Declining Center of Action // Journ. of Climate. — 2005. — Vol. 18 (9). — P. 1411–1422.
16. **Todd M. C., Mackay A. W.** Large-scale climate controls on Lake Baikal ice cover // Journ. of Climate. — 2003. — Vol. 16. — P. 3186–3199.
17. **Шимараев М. Н.** Циркуляционные факторы изменений ледово-термического режима Байкала // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 4. — С. 54–60.