

**М.Н. ШИМАРАЕВ, Е.С. ТРОИЦКАЯ**Лимнологический институт СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия, shimarae@lin.irk.ru, elena.troitskaya@lin.irk.ru**ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОДЫ  
НА ПРИБРЕЖНЫХ УЧАСТКАХ БАЙКАЛА В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД**

*Проанализированы особенности изменения температуры поверхностного (0,2–0,5 м) слоя воды в прибрежной зоне Байкала по данным 17 пунктов метеонаблюдений. Определено, что в 1970–2016 гг. тренд средней температуры в мае–сентябре возрастал от Южного к Среднему и Северному Байкалу; причиной стало сочетание физико-географических особенностей (приход тепла от солнца, орография прибрежных гор и подводных склонов, ветровые условия, динамика вод) в котловине озера. Установлено, что низкая величина тренда в Южном Байкале обусловлена относительно малой защищенностью его акватории Приморским хребтом (высотой около 800 м) от сильных ветров западной четверти. Выявлено, что более заметное ветро-волновое перемешивание в верхних слоях, а также частое возникновение апвеллингов/даунвеллингов, при которых в обмен с верхними слоями вовлекаются и воды глубинных слоев, связаны с повышенной ветровой активностью. В котловине Среднего Байкала наиболее заметно воздействие водной массы на циркуляцию в приводном слое воздуха, проявляющееся в повышенной прозрачности атмосферы и уменьшении облачности над озером, как следствие — большем приходе в верхние слои воды солнечной радиации. Повышенные по сравнению с другими частями Байкала значения тренда температуры приходятся на самую защищенную от сильных западных ветров Байкальским хребтом (с высотами до 2500 м) северную котловину Байкала. Установлено, что в 1994–2016 гг. заметно снизился тренд прогрева поверхностного слоя воды в Южном Байкале наряду с возрастанием скорости прогрева в Среднем и Северном Байкале. С использованием материалов глубоководного мониторинга температуры в Южном Байкале оценены пространственные масштабы одинаковой реакции температуры поверхности и водной толщи озера на колебания климата.*

*Ключевые слова: изменение климата, орография берегов, ветер, течения, солнечная радиация, прогрев поверхностного и глубинного слоев.*

**M.N. SHIMARAEV, E.S. TROITSKAYA**Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
64033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 3, Russia, shimarae@lin.irk.ru, elena.troitskaya@lin.irk.ru**CURRENT TRENDS IN UPPER WATER LAYER TEMPERATURE  
IN COASTAL ZONES OF BAIKAL**

*Based on the data from 17 meteorological stations, we have analysed the characteristics of the temperature change within the surface water layer (0,2–0,5 m) in the coastal zone of Lake Baikal. It was determined that during 1970–2016, the average temperature trend in May–September was increasing from Southern Baikal to Central and Northern Baikal due to a combination of physical-geographical features (heat from the sun, orography of the coastal mountains and underwater slopes, wind conditions, and water dynamics) in the lake basin. It was established that the low value of the trend in Southern Baikal is due to a relatively poor protection of its water area by the Primorskii Ridge (approximately 800 m high) from strong winds of the western quarter. It was found that an increased wind activity causes a more pronounced wind-wave mixing in the upper layers as well as more frequent upwellings/downwellings which also involve the waters from the deeper layers in the exchange with the upper water layers. In the Central Baikal basin, the influence of the water mass on the atmospheric circulation in the surface layer is the most obvious. Its consequence implies high atmospheric transparency and decreased cloudiness over the lake leading to an increase in incident solar radiation in the upper water layers. The high temperature trends, compared to the other parts of Baikal, correspond to the Northern Baikal basin best protected from the strong westerly winds by the Baikalskii Ridge (up to 2500 m high). Over the past two decades (1994–2016), the trend of warming of the surface water layer has decreased significantly, along with an increase in the warming rate of Central and Southern Baikal. Using data of deep-water temperature monitoring in Southern Baikal, we estimated the spatial scales of the identical response of the surface temperature and the lake water column to climate change.*

*Keywords: climate change, shore orography, wind, currents, solar radiation, warming of the surface and deep layers.*

## ВВЕДЕНИЕ

Температура воды в озерах — один из основных факторов, влияющих как на гидрологические, так и на биологические процессы в водной толще. Для оз. Байкал этот показатель интересен прежде всего в плане изучения причин межгодовых и многолетних изменений фито- и зоопланктона [1, 2]. Актуальность вопроса о современных тенденциях колебаний температуры воды особенно усилилась с начала 1970-х гг., когда на фоне глобального потепления и ощутимого повышения температуры воздуха и воды стали более заметны изменения в первичной продукции, численности и биомассе, структуре и других показателях фито- и зоопланктона в пелагиали и прибрежных районах Байкала [3–5]. Отметим, что сведения о температуре нужны также в тех случаях, когда основное влияние могут оказывать и другие, например антропогенные, факторы [6]. Наряду с прямым и косвенным воздействием на биологические процессы изменение температуры воды может отразиться на элементах водного и теплового баланса озера, ледово-термическом режиме, на активности сезонной (свободной) температурной конвекции, а также на глубинной вынужденной температурной конвекции, с которой связано обновление глубинных и придонных слоев воды в Байкале, а также на ряде других гидрологических процессов.

Цель настоящей работы — изучение особенностей временного и пространственного изменения температуры поверхности воды  $T_b$  в период активного потепления (1970–2016 гг.).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы данные байкальских гидрометеостанций (ГМС) о температуре поверхностного слоя воды оз. Байкал ( $T_b$ ) за период с его положительным тепловым балансом (май–сентябрь), а также о температуре воздуха  $T_a$ , в том числе со станций с длительными рядами наблюдений (ГМС Бабушкин, Нижнеангарск и Иркутск). Для анализа изменений температуры поверхности воды приняты ее средние за май–сентябрь значения на 17 береговых и островных ГМС (табл. 1). Для количественной оценки реакции температуры поверхностных вод Байкала на климатические изменения определены тренды средней за май–сентябрь (для Нижнеангарска за июнь–октябрь) температуры воды  $T_b$  за все время наблюдений на станциях, а также за периоды 1970–2016 и 1994–2016 гг. (рис. 1; см. табл. 1). Значимость трендов  $p$  устанавливалась на основе таблиц некоррелированной совокупности объектов для четырех уровней значимости. При анализе причин неоднородности прогрева поверхностных вод привлекались материалы учащенных судовых наблюдений за ветром, организованных в 1960-е гг. [7].

Температура поверхностного слоя воды связана с температурой деятельного, динамически активного слоя 0–300 м, в котором свободная температурная конвекция и динамические процессы дважды в год приводят к полному перемешиванию вод. Следовательно, колебания температуры верхнего слоя из-за климатических изменений должны отразиться на температурах всего деятельного слоя.

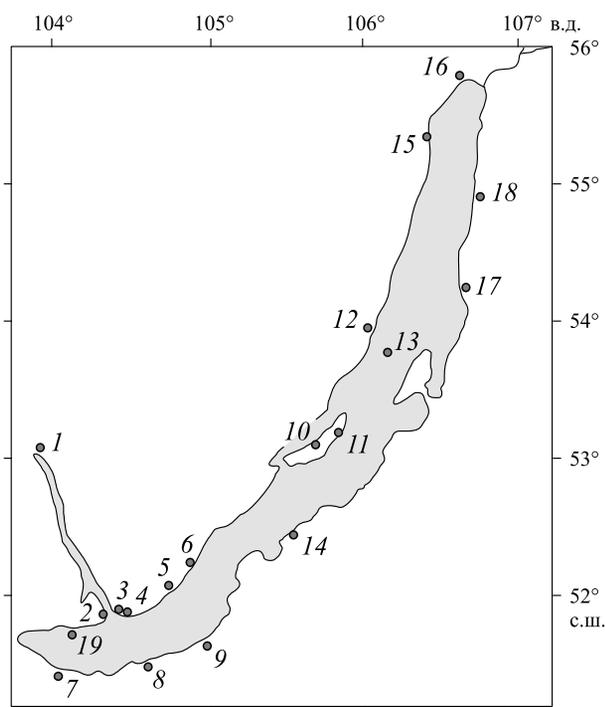


Рис. 1. Схема расположения гидрометеостанций.

Пункты наблюдений (ГМС): 1 — Иркутск, 2 — порт Байкал, 3 — Исток р. Ангары, 4 — Лимнологического института СО РАН в пос. Листвянка, 5 — Большое Голоустное, 6 — Песчаная, 7 — Байкальск, 8 — Танхой, 9 — Бабушкин, 10 — Хужир, 11 — Узуры, 12 — Солнечная, 13 — Большой Ушканий остров, 14 — р. Сухая, 15 — Байкальское, 16 — Нижнеангарск, 17 — Давша, 18 — Томпа, 19 — буйковая станция.

Таблица 1

Значения трендов  $T_b$  ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) и средней  $T_b$  в мае–сентябре на байкальских станциях для разных периодов наблюдений

Станция (ГМС)	Весь период наблюдений			1970–2016 гг.		1994–2016 гг.	
	Годы	$T_b$	Тренд $T_b$	$T_b$	Тренд $T_b$	$T_b$	Тренд $T_b$
пирс ЛИН СО РАН в пос. Листвянка	1941–2016	7,87	$\frac{0,037}{>0,1}$	7,95	$\frac{0,109}{>0,1}$	8,1	$\frac{-0,525}{>0,1}$
исток р. Ангары	1962–2016	7,46	$\frac{0,373}{<0,001}$	7,63	$\frac{0,352}{<0,001}$	8,3	$\frac{0,071}{>0,1}$
порт Байкал	1936–2016	6,98	$\frac{0,018}{>0,1}$	7,17	$\frac{0,253}{<0,01}$	7,34	$\frac{-0,143}{>0,1}$
Большое Голоустное	1970–2016	9,52	$\frac{0,354}{<0,001}$	9,52	$\frac{0,354}{<0,001}$	10	$\frac{-0,04}{>0,1}$
Песчаная	1936–2016	8,46	$\frac{0,339}{<0,001}$	9,05	$\frac{0,332}{<0,001}$	9,44	$\frac{0,078}{>0,1}$
Байкальск	1965–2016	9,45	$\frac{0,263}{<0,01}$	9,55	$\frac{0,232}{<0,05}$	9,58	$\frac{-0,165}{>0,1}$
Танхой	1941–2016	9,05	$\frac{0,322}{<0,001}$	9,47	$\frac{0,529}{<0,001}$	10,1	$\frac{0,548}{0,1}$
Бабушкин	1945–2016	9,87	$\frac{0,275}{<0,001}$	10,18	$\frac{0,375}{<0,001}$	11,1	$\frac{0,202}{>0,1}$
Среднее для Южного Байкала		8,58	0,247	8,82	0,317	9,244	0,003
Хужир	1964–2016	9,21	$\frac{0,453}{<0,001}$	9,33	$\frac{0,471}{<0,001}$	9,8	$\frac{0,723}{<0,05}$
Узуры	1957–2015	8,66	$\frac{0,472}{<0,001}$	8,97	$\frac{0,480}{<0,001}$	9,45	$\frac{0,627}{0,05}$
Большой Ушканий остров	1952–2016	10,2	$\frac{0,437}{<0,001}$	10,48	$\frac{0,503}{<0,001}$	11	$\frac{0,876}{<0,05}$
Солнечная	1952–2016	7,41	$\frac{0,442}{<0,01}$	7,78	$\frac{0,543}{<0,001}$	8,32	$\frac{0,881}{<0,01}$
Сухая	1975–2016	11,42	$\frac{0,49}{<0,01}$	11,42	$\frac{0,49^*}{<0,01}$	11,80	$\frac{0,674}{<0,01}$
Среднее для Среднего Байкала		9,38	0,459	9,60	0,497	10,07	0,756
Байкальское	1960–2016	8,58	$\frac{0,552}{<0,001}$	8,83	$\frac{0,510}{<0,05}$	9,4	$\frac{0,853}{<0,05}$
Нижнеангарск	1941–2016	11,28	$\frac{0,417}{<0,001}$	11,84	$\frac{0,676}{<0,001}$	13,55	$\frac{1,355}{<0,01}$
Томпа	1949–2016	9,08	$\frac{0,414}{<0,001}$	8,53	$\frac{0,392}{<0,001}$	8,91	$\frac{0,523}{0,1}$
Давша	1975–2016	9,55	$\frac{0,577}{<0,001}$	9,55	$\frac{0,577^*}{<0,001}$	9,9	$\frac{0,97}{0,01}$
Среднее для Северного Байкала		9,62	0,482	9,69	0,538	10,44	0,925
Среднее для Байкала		9,1	0,391	9,38	0,453	9,94	0,545

Примечание. В числителе — значения трендов, в знаменателе — уровень значимости.

\* Период наблюдений на ГМС Сухая и Давша — 1975–2016 гг.

Для исследования связи изменений температуры поверхностного слоя и толщи воды Южного Байкала использовались наблюдения на буйковой станции, расположенной в 3,5 км от мыса Ивановского на глубине 1367 м. Непрерывные (с интервалом от 15 с до 20 мин) измерения проводились в 2000–2016 гг. термисторами серии TR фирмы RBR—Company (Канада) с точностью  $\pm 0,002$   $^{\circ}\text{C}$ . Расчет

выполнялся для ряда слоев, выделенных с учетом вертикальной структуры поля температуры [8, 9]: разделенные горизонтами 15 и 100 м (верхняя часть деятельного слоя), 100–300 (нижняя часть деятельного слоя), 300–1100 (глубинный слой) и 1100–1363 м (придонный слой). Для каждого слоя средняя температура вычислена как средневзвешенная с учетом ее значений на промежуточных стандартных горизонтах.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение температуры воздуха  $T_a$  на Байкале с середины–конца XIX в. до настоящего времени (рис. 2) соответствовало глобальному потеплению в Северном полушарии. Вековой тренд на юге (Бабушкин 1,34 °C/100 лет) и севере (Нижнеангарск 2,24 °C/100 лет) оз. Байкал в 2–4 раза превосходил тренд температуры в Северном полушарии (0,60 °C/100 лет). Кроме векового тренда, в изменении годовой и сезонной температуры воздуха происходили квазициклические внутривековые (около 20–40 лет) колебания с фазами роста и понижения: 1912–1936 (1926), 1937–1969 (1943) и 1970–1994 (1994) гг. (в скобках указаны годы максимума). Последний цикл имел длительную фазу роста  $T_a$  (1970–1994 гг.) при тренде 0,8 °C/10 лет. После максимума этого цикла в 1994 г. происходило относительно медленное (тренд –0,39 °C/10 лет) понижение, закончившееся, ориентировочно, в 2010–2011 гг., и далее наблюдалось незначительное повышение.

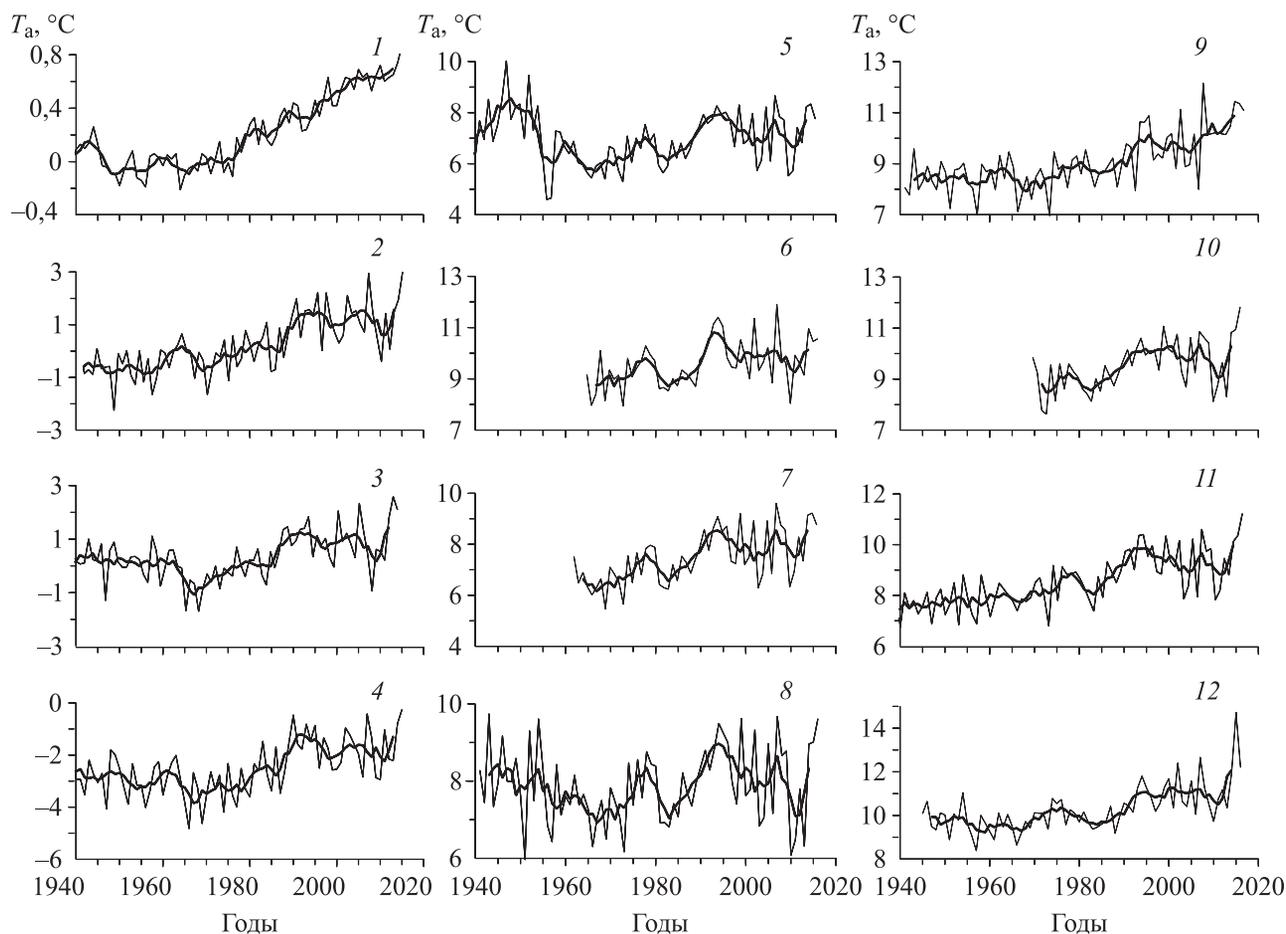


Рис. 2. Средняя годовая температура воздуха (1–4) и средняя за май–сентябрь температура поверхности воды в 1941–2016 гг. на ГМС Южного Байкала (5–12) и их пятилетние скользящие значения.

1 — Северное полушарие, 2 — Иркутск, 3 — Бабушкин, 4 — Нижнеангарск, 5 — порт Байкал, 6 — Байкальск, 7 — исток Ангары, 8 — Листвянка, 9 — Танхой, 10 — Большое Голоустное, 11 — бухта Песчаная, 12 — Бабушкин. Здесь и на рис. 3 тонкой линией обозначена температура, жирной — скользящее среднее значение.

**Температура поверхности воды.** Материалы длиннорядных станций указывают на устойчивость связей  $T_B$  и  $T_a$  за период их совместного наблюдения. Для ГМС Бабушкин в Южном Байкале в 1945–2015 гг. связь между средними за май–сентябрь значениями  $T_B$  и  $T_a$  выражается уравнением

$$T_B = 0,932 \times T_a - 0,212 \quad (R^2 = 0,632, r = 0,80, p < 0,001). \quad (1)$$

Статистически значима связь  $T_B$  в пос. Листвянка с  $T_a$  на ГМС Бабушкин, расположенной на удалении 40 км от Листвянки:

$$T_B = 0,762 \times T_a - 1,988 \quad (R^2 = 0,512, r = 0,72, p < 0,001). \quad (2)$$

В Нижнеангарске (север Байкала) в период 1941–2015 гг. связь выражается уравнением

$$T_B = 1,089 \times T_a - 0,999 \quad (R^2 = 0,599, r = 0,77, p < 0,001). \quad (3)$$

Как следует из [10, 11], на фазе подъема внутривекового цикла (1970–1994 гг.) тенденции изменения средних за май–сентябрь (в Нижнеангарске — июнь–октябрь) значений  $T_B$  на прибрежных и островных байкальских ГМС и  $T_a$  совпадали.

При одинаковой положительной тенденции изменения  $T_B$  на большинстве байкальских станций тренд  $T_B$  не очевиден. Это хорошо заметно по разной скорости роста температуры поверхностного слоя воды уже для станций с различным периодом наблюдений (см. табл. 1). Для корректного рассмотрения вопроса нами выбран отрезок 1970–2016 гг. с одинаковыми по длительности рядами измерений температуры воды на 17 береговых и островных станциях. Данный период включает фазы потепления (1970–1994 гг.) и похолодания (1994–2010 гг.) в текущем внутривековом цикле климата и последующие после 2010 г. изменения, не совсем четкие по направленности процесса (см. рис. 2; рис. 3).

Для 1970–2016 гг. в Южном Байкале тренды повышения температуры на всех станциях (кроме Листвянки) имеют высокий уровень значимости  $p$  ( $< 0,01$ – $0,001$ ) при коэффициентах корреляции  $r = 0,4$ – $0,67$ . Тренд  $T_B$  в Листвянке малозначим ( $p > 0,1$ ;  $r = 0,15$ ). Среднее арифметическое значение тренда  $T_B$  для пяти станций западного побережья равно  $0,28$  °C/10 лет, для трех станций восточного побережья —  $0,38$ , а для всей котловины —  $0,32$  °C/10 лет при крайних значениях тренда на всех станциях  $0,11$ – $0,53$  °C/10 лет.

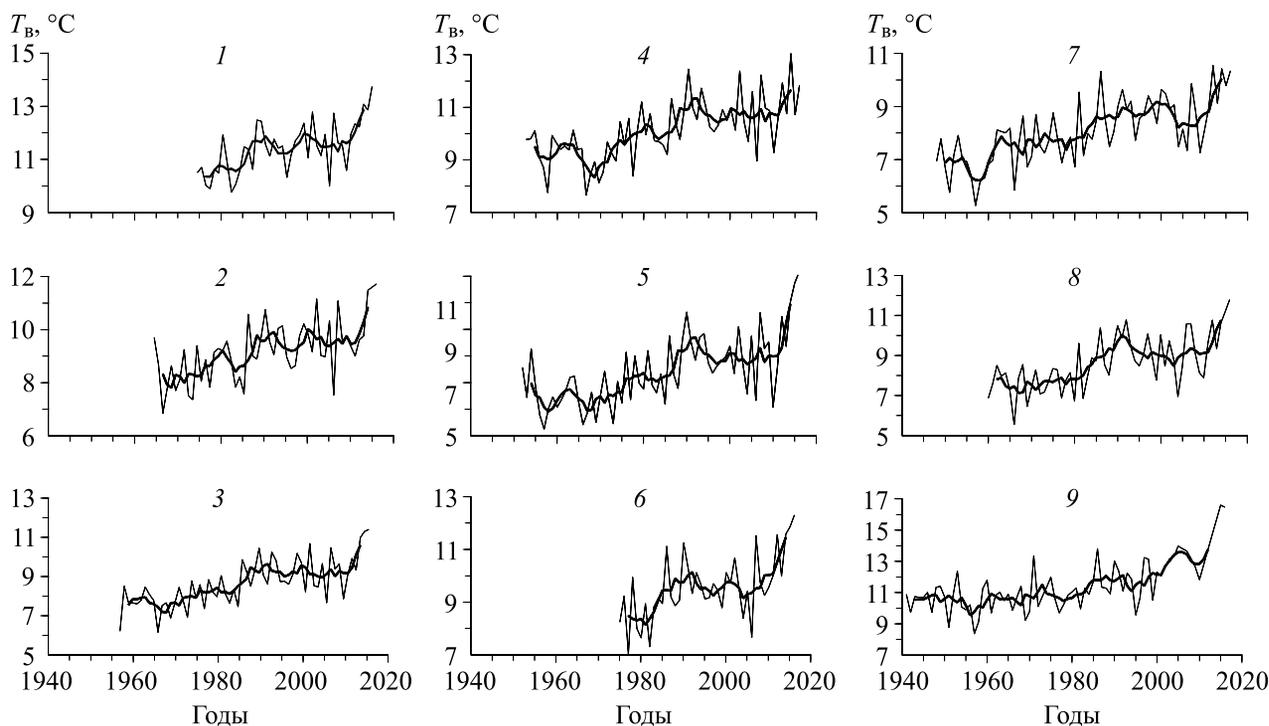


Рис. 3. Средние за май–сентябрь температуры поверхности воды на ГМС Среднего (1–5) и Северного (6–9) Байкала и их пятилетние скользящие значения.

ГМС: 1 — Сухая, 2 — Хужир, 3 — Узуры, 4 — о. Большой Ушканий, 5 — Солнечная, 6 — Давша, 7 — Томпа, 8 — Байкальское, 9 — Нижнеангарск.

В Среднем Байкале тренды  $T_B$  для всех станций варьируют в диапазоне от 0,47 до 0,54 °C/10 лет при уровне значимости  $p < 0,01$ –0,001 и коэффициентах корреляции 0,58–0,61. Среднее значение тренда в Среднем Байкале (0,50 °C/10 лет) превышает аналогичный показатель в Южном Байкале в 1,42 раза (см. табл. 1).

В Северном Байкале среднее значение тренда для станций северной оконечности озера (Байкальское, Нижнеангарск, Томпа) равно 0,53 °C при уровне значимости в диапазоне  $p < 0,05$ –0,001, коэффициенте корреляции — в диапазоне 0,37–0,64. На станции Давша на восточном берегу тренд 0,58 °C/10 лет,  $r = 0,58$ ,  $p < 0,001$ . Средняя для котловины величина тренда 0,54 °C/10 лет.

Как показывают данные, общая тенденция пространственного распределения тренда  $T_B$  для этого периода — возрастание его значений от юга к северу озера. Этому распределению соответствует и повышение средней за теплый период температуры поверхности с юга на север по данным ГМС (см. табл. 1). Наряду с этим отмечается большая пространственная изменчивость значений тренда — от 0,11 °C/10 лет в Листвянке до 0,68 °C/10 лет в Нижнеангарске.

Отдельно рассмотрен временной интервал от максимума внутривекового цикла в 1994 г. до настоящего времени, характеризуемый данными о  $T_B$  и ее тренде (см. табл. 1, рис. 2, 3). В этот период и до 2010–2011 гг. температура воды сначала уменьшалась, а затем вновь возрастала к 2016 г. Мы полагаем, что понижение 1994–2010 гг. характеризует фазу снижения внутривекового цикла, начавшегося в 1970 г., а повышение после 2011 г. — начало фазы подъема нового внутривекового цикла. При этом в зависимости от соотношения величины отрицательного и положительного приращения температуры общий тренд изменения  $T_B$  в котловинах в 1994–2016 гг. оказался различным. При сохранении широтного возрастания тренда его распределение становится более контрастным, чем в целом за 1970–2016 гг.

В Южном Байкале тренд  $T_B$  оказался практически не значимым для всех станций. Среднее значение тренда для станций западного побережья было отрицательным (–0,175 °C/10 лет), а восточного побережья — положительным (0,195 °C/10 лет). Коэффициенты корреляции на станциях западного побережья (ГМС Песчаная, Исток р. Ангары, порт Байкал) составляли от –0,3 до 0,3 при  $p > 0,1$ . На ГМС восточного побережья величины  $r$  менялись от –0,12 до 0,37 при  $p = 0,1$  (Танхой). Средняя для южной котловины величина тренда (0,004 °C/10 лет) намного меньше, чем за период 1970–2016 гг. В отличие от южной котловины, в средней и северной для всех станций отмечен положительный и значимый тренд температуры.

В Среднем Байкале тренд на всех станциях был значимым и варьировал в диапазоне от 0,63 до 0,88 °C/10 лет при коэффициентах корреляции в пределах 0,4–0,5 и  $p < 0,01$ –0,05. Средняя величина тренда (0,756 °C/10 лет) была на 52 % выше, чем за 1970–2016 гг.

Самое существенное усиление летнего прогрева отмечено в северной котловине, где в Нижнеангарске тренд достигал максимального для Байкала в этот период значения (1,355 °C/10 лет).

Можно констатировать, что в последние 20 лет росла скорость повышения летней температуры в средней и северной котловинах, в то время как в южной тренд практически отсутствовал, принимая на отдельных станциях слабые положительные или отрицательные значения.

Средний для всех станций тренд поверхностной температуры Байкала в 1970–2016 гг. (0,45 °C/10 лет) близок к средней за 1965–2009 гг. величине тренда летних температур для 235 озер всего мира (0,34 °C/10 лет) [12]. Разброс величин тренда для этих водоемов составляет от –0,7 до 1,3 °C/10 лет. На Байкале для отдельных станций в период 1970–2016 гг. он равен 0,11–0,68 °C/10 лет, для средних котловинных значений — от 0,32 до 0,54 °C/10 лет, для 1994–2016 гг. — от –0,52 до 1,35 °C/10 лет. Вместе с тем ни для одного из рассмотренных в [12] озер нет сведений о пространственных различиях скорости прогрева в их акватории. Причиной этих различий на Байкале могут быть климатические и метеорологические особенности, орография котловины, речной приток, динамические процессы в водной толще и другие факторы, наблюдаемые в пределах озерной котловины.

Наиболее устойчивы и масштабны в пределах Байкала различия в величине тренда поверхностной температуры воды отдельных котловин [11], обусловленные климатическим и орографическим факторами, которые связаны с процессами вертикальной передачи тепла в водной толще.

В ходе исследований теплового баланса Байкала обнаружено неравномерное поступление в водную толщу озера солнечной энергии в летний период. По многолетним данным [5, 13], суммы поглощенной в июне–сентябре солнечной радиации в южной, средней и северной котловинах озера равны 46,4, 48,6 и 46,3 ккал/см<sup>2</sup> соответственно. Повышенный на 5 % приход солнечной энергии в Среднем Байкале определяется более высокой прозрачностью атмосферы и пониженной облачностью

Таблица 2

**Средняя скорость ветра и повторяемость штилей по данным байкальских ГМС и 4399 судовым наблюдениям в июне–августе 1948–1960 гг. [7] и энергия ветрового волнения летом [14]**

Параметры	Южный Байкал	Средний Байкал	Северный Байкал
Средняя скорость ветра по данным ГМС, м/с	3	2,8	2,1
Средняя скорость ветра по судовым наблюдениям, м/с	2,6	2,9	2,2
Число штилей по судовым наблюдениям	13	12	23
Энергия ветрового волнения в июне–августе, млн тоннометров на 1 погонный метр фронта волн	0,2–3,0	0,5–1,3	0,1–0,5

вследствие более выраженного, чем в других котловинах, влияния водной массы на атмосферу и местную циркуляцию воздушных масс. Превышение поглощенной радиации в средней котловине может объяснить более высокие, чем в южной, значения летней температуры и ее тренда.

Основная причина максимального летнего прогрева поверхностного слоя воды в Северном Байкале, как показано нами ранее [11], — уменьшение ветровой активности в этой части озера из-за орографического фактора — северная котловина закрыта высокими хребтами: Байкальским на западном и Баргузинским на восточном побережье. При преобладающих ветрах западной четверти увеличение высоты прибрежных хребтов западного побережья от 800–1000 м в Южном и Среднем Байкале (Приморский хребет) до 2000–2800 м в Северном Байкале (Байкальский хребет) способствует большому числу штилей и, одновременно, снижению скорости ветра и ветро-волновой активности (табл. 2).

По данным одновременных учащенных наблюдений за ветром на ГМС и на акватории Байкала с судов разных ведомств (АН СССР, Гидрометслужба, Байкальское пароходство) в 1948–1960 гг. [7], средняя за лето скорость ветра понижается от южной и средней частей Байкала к северной на 20–25 %, а число штилей возрастает в 1,7 раза. Значительно ослабевает от Южного к Среднему и затем к Северному Байкалу энергия ветрового волнения (см. табл. 2). Эти условия благоприятствуют формированию летом в Северном Байкале хорошо прогретого неглубокого эпилимниона, отделенного от глубинных вод слоем температурного скачка с повышенными вертикальными градиентами температуры. По многолетним судовым наблюдениям, средняя мощность эпилимниона в Южном и Среднем Байкале в месяцы с максимальным прогревом составляет 7–10 м, а в Северном Байкале — всего около 2 м; средний за июль–сентябрь вертикальный градиент температуры в этих частях озера равен 0,35, 0,6 и 0,6 °С/м соответственно [15]. Неглубокий эпилимнион, отделенный от глубинных вод мощным термоклином, создает условия для повышенной «теплоемкости» поверхностных вод в Северном Байкале. Более высокие темпы летнего прогрева вод Северного Байкала имеют устойчивый характер, сохраняясь для рядов наблюдений разной продолжительности (см. табл. 1).

Отметим, что локальным фактором аномального возрастания тренда может быть влияние теплых вод крупных притоков и мелководных заливов — соров. Примером такого воздействия служит Нижнеангарск, прибрежные воды вблизи которого летом формируются теплыми водами Верхней Ангары и обширного мелководного залива Ангарский сор.

Аномально низкими темпами прогрева постоянно выделяется Южный Байкал, особенно приглубый, с большой крутизной подводного склона, участок западного побережья от истока р. Ангары (ГМС исток р. Ангары, порт Байкал) до Большого Голоустного и бухты Песчаной (см. табл. 1). Низкие значения тренда указывают на повышенную динамическую активность в верхних слоях этой части озера, усиливающую передачу поступающего в воду солнечного тепла в нижние слои. Причина этого, помимо ветрового перемешивания, заключается в преобладании циклонической системы горизонтальных течений, с которой связаны крупномасштабные вертикальные движения вод (апвеллинг) в центральной части озера. Апвеллинг возникает часто и в прибрежных районах, как за счет прямого сгонного эффекта при сильных северо-западных ветрах с берега, так и из-за воздействия силы Кориолиса на вдольбереговую компоненту скорости течений, вызываемых ветрами с западной составляющей [16, 17]. По наблюдениям на этом участке озера, сильный апвеллинг летом приводит к подъему к поверхности вод с глубин не менее 100 м, что вызывает размывание слоя температурного скачка и понижение температуры поверхности до 4 °С [16–18]. Отметим, что апвеллинг развивается и вдоль других участков западного побережья, с чем, вероятно, связаны пониженный тренд  $T_v$  и низкая температура воды на ГМС Узур в Среднем Байкале, ГМС Солнечная и Байкальское в Северном Байкале.

Причинами снижения темпов прогрева могут быть и другие процессы: циркуляция вод на весеннем термобаре [19], горизонтальные и вертикальные циркуляции в поле течений, возникающие под

**Коэффициенты корреляции между средними за май–сентябрь значениями температуры воды в слоях 15–100 и 100–300 м на буйковой станции и температурой поверхности воды на ГМС западного и восточного побережья в Южном Байкале**

Станция (ГМС)	Слой, м	Коэффициент корреляции	Уровень значимости коэффициента корреляции
<b>Западное побережье</b>			
порт Байкал	15–100	0,47	<0,1
	100–300	0,64	<0,01
исток р. Ангары	15–100	0,80	<0,001
	100–300	0,50	0,05
пирс Лин СО РАН в пос. Листвянка	15–100	0,60	<0,01
	100–300	0,50	0,05
Большое Голоустное	15–100	0,52	<0,05
	100–300	0,50	0,05
Песчаная	15–100	0,52	<0,05
	100–300	0,56	<0,05
<b>Восточное побережье</b>			
Байкальск	15–100	0,11	>0,01
	100–300	0,32	>0,1
Танхой	15–100	0,28	>0,1
	100–300	0,28	>0,1
Бабушкин	15–100	0,31	>0,1
	100–300	0,63	0,01

влиянием топографии берегов и дна. Локальное охлаждающее влияние летом могут оказывать отдельные реки восточного побережья с областью их питания в холодных верховьях высоких прибрежных хребтов. По-видимому, с их влиянием связаны невысокие темпы прогресса и низкая температура воды на ГМС восточного побережья на юге (Байкальск) и севере Байкала (Томпа).

Рассмотрим влияние климатически обусловленных изменений  $T_b$  на ГМС на тепловое состояние водной толщи на примере связи между средними за май–сентябрь значениями температуры в слоях воды 15–100, 100–300, 300–1100 и 1100–1367 м на глубоководной буйковой станции и  $T_b$  на ГМС Южного Байкала в 2000–2016 гг.

Расчеты коэффициентов корреляции показали, что достоверная с уровнем значимости <0,05 связь имеет место только для слоев 15–100 и 100–300 м с температурой станций западного побережья (табл. 3). Результаты расчета коэффициентов корреляции: 1) не выявили достоверной связи температуры глубинных слоев 300–1100 и 1100–1357 м с температурой поверхности воды на всех ГМС Южного Байкала; 2) определили, что достоверная (уровень значимости <0,05) связь температуры слоев 15–100 и 100–300 м с  $T_b$  станций восточного побережья отсутствует.

Таким образом, деятельный слой прибрежных вод вдоль западного побережья Южного Байкала очевидным образом реагирует на изменения климата. Это может свидетельствовать о единообразии таких факторов, как режим ветра и течений, вертикальной циркуляции, рельефа гор и подводных склонов, малое число впадающих рек. Отсутствие связей температуры слоев водной толщи на БС с  $T_b$  на ГМС восточного побережья объясняется разнообразием местных факторов, влияющих на локальные особенности температуры поверхности воды (большое число притоков, сложный рельеф дна и горных склонов, ветровые условия с участием горно-долинной циркуляции, характера прибрежных течений и др.).

Использование данных о  $T_b$  на прибрежных станциях на западном побережье Среднего и Северного Байкала (Хужир, Узуры, Солнечная, Байкальское), близких по некоторым физико-географическим условиям к Южному Байкалу, не выявили значимых связей между их температурой и температурой верхних слоев воды на БС. Это свидетельствует о различиях метеорологических и гидрологических факторов, влияющих на температуру верхнего слоя воды отдельных котловин Байкала. Мы полагаем, что масштаб проявления связей ограничивается размерами макроциркуляций, характерных для некоторых котловин Байкала.

Полученный результат можно рассматривать как следствие близости динамических процессов вдоль западного побережья Южного Байкала, связанных с однообразием и крутизной подводного склона, сходством ветровых условий, отсутствием крупных притоков и др.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа наблюдений на 17 ГМС на побережье и островах Байкала выявлены пространственные особенности реакции температуры поверхностного слоя воды в прибрежной зоне на изменения климата в зависимости от макронеоднородностей рельефа горного обрамления, солнечной радиации и динамики вод. Взаимосвязь этих климатообразующих факторов различается в отдельных котловинах Байкала. Южная часть озера, обрамленная на западном побережье невысоким (максимально до 800–1000 м) Приморским хребтом с глубокими его расчленениями долинами рек, наиболее подвержена влиянию ветров. Учитывая, что передаваемая воде энергия ветра пропорциональна кубу его скорости, нетрудно оценить, по данным о ветре на ГМС (см. табл. 2), что ветро-волновое перемешивание верхних слоев воды в Южном Байкале должно превосходить аналогичный показатель для Среднего Байкала на четверть, а для Северного — в три раза. Повышенное энергетическое воздействие атмосферы объясняет более глубокое залегание летнего термоклина с ослабленными значениями вертикального градиента температуры в нем в Южном Байкале [11, 15] по сравнению с другими частями озера. Помимо прямого воздействия ветра на перемешивание, он способствует возникновению в прибрежной и открытой части Южного Байкала апвеллинга/даунвеллинга, усиливающего вертикальный теплообмен верхних и глубоких слоев воды.

Поверхностный слой воды в Среднем Байкале накапливает больше тепла, чем в Южном, благодаря выраженному влиянию огромной водной массы озера на метеорологические процессы в его котловине. Это выражается летом в понижении облачности и повышении прозрачности атмосферы, что способствует усилению притока в верхние слои солнечной энергии. Данный фактор, наряду с некоторым понижением энергетического воздействия атмосферы, определяет повышенные значения тренда температуры поверхностного слоя воды.

В Северном Байкале высокий прогрев верхнего слоя воды летом и самые высокие тренды температуры преимущественно связаны с ослаблением ветрового воздействия из-за высокого горного обрамления котловины — Байкальского и Баргузинского хребтов высотой до 2000–2800 м.

В последние 20 лет тренды прогрева поверхностного слоя воды заметно снизились в Южном Байкале и одновременно возросли в Среднем и Северном Байкале. Эти особенности могут быть связаны с локальными изменениями в циркуляции атмосферы и требуют специальных исследований. Полученный вывод о различиях тренда температуры воды летом в пределах котловины Байкала необходимо учитывать при изучении сложного воздействия внешних (природных и антропогенных) факторов на биологические процессы в прибрежной зоне этого уникального озера.

*Работа выполнена в рамках госзадания «Оценка и прогноз экологического состояния озера Байкал и сопряженных территорий в условиях антропогенного воздействия и изменения климата» (0345–2016–0008).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожов М.М. Биология озера Байкал. — М.: Наука АН СССР, 1962. — 316 с.
2. Lake Baikal evolution and biodiversity / Ed. by O.M. Kozhova and L.R. Izmet'eva. — Leiden: Backhuys Publishers, 1998. — 447 p.
3. Афанасьева Э.Л., Шимараев М.Н. Многолетние изменения зоопланктона пелагиали озера Байкал в период глобального потепления // Сб. науч. работ «Состояние и проблемы продукционной гидробиологии» по материалам докл. на Междунар. конф. «Водная экология на заре XXI века», посвященной столетию со дня рождения профессора Г.Г. Винберга. — М.: Товарищество научных изданий «КМК», 2006. — С. 253–266.
4. Izmet'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E., Ferwerda C.J., Gray D.K., Woo K.H., Pislegina H.V., Krashchuk L.S., Shimaraeva S.V., Silow E.A. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // Journ. of Great Lakes Research. — 2015 [Электронный ресурс]. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.006> (дата обращения 20.02.2018).
5. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1977. — 150 с.
6. Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N., Tomberg I.V., Malnik V.V., Shimaraev M.N., Troitskaya E.S., Shirokaya A.A., Sinyukovich V.N., Zaitseva E.P., Domyшева V.M., Yamamuro M., Poberezhnaya A.E.,

- Timoshkina E.M.** Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia) // Journ. of Great Lakes Research. — 2018. — N 44. — P. 230–244.
7. **Шимараев М.Н.** Некоторые особенности ветровых условий над поверхностью Байкала в навигационный период // Тр. Лимнол. ин-та СО АН СССР. — 1964. — Т. 5 (25). — С. 114–135.
  8. **Верещагин Г.Ю.** Основные черты вертикального распределения водных масс на Байкале // Академику В.И. Вернадскому к пятидесятилетию научной и педагогической деятельности. — М.: Изд-во АН СССР, 1936. — Ч. 2. — С. 1207–1230.
  9. **Россолимо Л.Л.** Температурный режим озера Байкал // Труды Байкал. лимнол. станции Вост.-Сиб. филиала АН СССР. — 1957. — Т. 16. — 552 с.
  10. **Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В.** Климат и гидрологические процессы в бассейне озера Байкал в XX столетии // Метеорология и гидрология. — 2002. — № 3. — С. 71–78.
  11. **Троицкая Е.С., Шимараев М.Н., Цехановский В.В.** Многолетние изменения температуры воды в Байкале // География и природ. ресурсы. — 2003. — № 2. — С. 47–50.
  12. **O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K., Hampton S.E., Read J.S., Rowley R.J., Schneider Ph., Lenters J.D., McIntyre P.V., Kraemer B.M., Weyhenmeyer G.A., Straile D., Dong B., Adrian R., Allan M.G., Anneville O., Arvola L., Austin J., Bailey J.L., Baron J.S., Brookes J.D., Eyto E. de, Dokulil M.T., Hamilton D.P., Havens K., Hetherington A.L., Higgins S.N., Hook S., Izmet'eva L.R., Joehnk K.D., Kangur K., Kasprzak P., Kumagai M., Kuusisto E., Leshkevich G., Livingstone D.M., MacIntyre S., May L., Melack J.M., Mueller-Navarra D.C., Naumenko M., Noges P., Noges T., North R.P., Plisnier P.-D., Rigosi A., Rimmer A., Rogora M., Rudstam L.G., Rusak J.A., Salmaso N., Samal N.R., Schindler D.E., Schladow S.G., Schmid M., Schmidt S.R., Silow E., Soyly M.E., Teubner K., Verburg P., Voutilainen A., Watkinson A., Williamson C.E., Zhang G.** Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophysical Research Letters. — 2015. — Vol. 42 (24). — P. 10.733–10.781.
  13. **Верболов В.И., Сокольников В.М., Шимараев М.Н.** Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. — М.; Л.: Наука, 1965. — 374 с.
  14. **Гречищев Е.К., Мамонтов Н.В.** Энергия ветрового волнения по периодам // Карта ветрового волнения озера Байкал. — Иркутск: Изд-во Ин-та геологии СО АН СССР, Вост.-Сиб. бас. управление пути, Ирк. управление гидрометеорол. службы при СМ СССР, 1959. — Л. 2.
  15. **Верболов В.И., Покатилова Т.Н., Шимараев М.Н., Фёдоров В.Н., Гранин Н.Г., Жданов А.А.** Формирование и динамика байкальских вод. — Новосибирск: Наука, 1986. — 119 с.
  16. **Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Блинов В.В., Иванов В.Г., Гнатовский Р.Ю.** Об апвеллингах в озере Байкал // Докл. РАН. — 2012. — Т. 442, № 5. — С. 696–700.
  17. **Troitskaya E., Blinov V., Ivanov V., Zhdanov A., Gnatovsky R., Sutyryna E., Shimaraev M.** Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal // Aquatic Sciences. — 2015. — Vol. 77 (2). — P. 171–182.
  18. **Верещагин Г.Ю.** Некоторые данные о режиме глубинных вод Байкала в районе Маритутя // Тр. Комиссии по изучению оз. Байкал. — 1927. — Т. 2. — С. 77–138.
  19. **Shimaraev M.N., Granin N.G., Zhdanov A.A.** Deep ventilation of Lake Baikal waters due to spring thermal bars // Limnology and Oceanography. — 1993. — Vol. 38 (5). — P. 1068–1072.

*Поступила в редакцию 11 апреля 2018 г.*