

УДК 551.57 (282.256.341)

Л. Н. СИЗОВА, Л. Н. КУИМОВА, М. Н. ШИМАРАЕВ

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

## ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ НА ЛЕДОВО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА БАЙКАЛЕ В 1950–2010 ГОДЫ

*Изучено влияние крупномасштабной атмосферной циркуляции, описываемой индексами Northern Hemisphere Teleconnection Patterns, на температуру воздуха и ледово-термические характеристики оз. Байкал в 1950–2010 гг. Получены уравнения множественной линейной регрессии, которые объясняют 46–67 % изменений температуры воздуха в сезоны зимы, весны и осени и 18 % летом. Основной вклад в изменение температуры воздуха в отдельные сезоны (кроме лета) и ледово-термических характеристик вносят колебания индексов АО и NAO, характеризующих западно-восточный перенос воздушных масс, и индексов блокирующих этот перенос механизмов SCAND и Sh. Менее значителен вклад остальных циркуляционных механизмов.*

Ключевые слова: температура воздуха, ледовые явления, температура воды, атмосферная циркуляция.

*A study is made of the influence of the large-scale atmospheric circulation, described by the indices of Northern Hemisphere Teleconnection Patterns, on air temperature and ice-thermal characteristics of Lake Baikal for the time interval 1950–2010. Multiple linear regression equations have been obtained to account for 46–67 % of the air temperature changes during the winter, spring and autumn seasons, and for 18 % during the summer season. The main contribution to air temperature change for separate seasons (except in the summertime) and ice-thermal characteristics is made by the fluctuations of the AO and NAO indices characterizing the west-east transport of air masses, and of the SCAND and Sh indices, blocking the mechanism of this transport. The contribution of the remaining circulation mechanisms is less significant.*

Keywords: air temperature, ice phenomena, water temperature, atmospheric circulation.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Озеро Байкал, расположенное в центре Азиатского континента, как открытая природная система испытывает влияние внешних воздействий, которые отражаются в первую очередь на состоянии абиотических условий водной среды. Основным фактором, вызывающим масштабные изменения ледово-термических процессов, являются колебания климатических условий.

Существует множество доказательств изменения климата в районе Байкала. За период наблюдений (1896–2000 гг.) годовая температура воздуха на Байкале увеличивалась со средней скоростью 1,2 °C/100 лет, а температура зимы, весны, лета и осени — на 2, 1,4, 0,8 и 0,5 °C/100 лет соответственно [1]. Во все сезоны происходят внутривековые колебания температуры со скоростью ее роста/понижения, намного превышающей величину многолетнего тренда. За последние 10–15 лет на фоне глобального потепления наблюдается тенденция к понижению зимних и весенних температур воздуха. По наблюдениям, в последние 60 лет постепенно возростала температура поверхности и верхних слоев воды в теплую часть года [2–5].

Значительные изменения произошли в ледовом режиме Байкала. В XX в. продолжительность ледостава в Южном Байкале сократилась на 18 суток в результате запаздывания сроков замерзания (на 11 суток) и более раннего вскрытия ледяного покрова (на 7 суток). В период 1949–2000 гг. толщина льда уменьшалась в среднем на 2,4 см за 10 лет [1].

Ледяной покров и снег на льду играют важную роль в формировании гидрофизических полей и влияют на первичную продуктивность и весеннее цветение эндемичных диатомовых водорослей [6] — основного корма для мелких ракообразных Байкала и байкальской рыбы. По мнению некоторых исследователей [7], дальнейшее сокращение продолжительности ледостава может ограничить рост диатомовых водорослей.

Учитывая важную роль ледяного покрова в протекании физических, химических и биологических процессов в Байкале, исследование влияния атмосферной циркуляции на ледово-термические характеристики представляет значительный интерес, особенно для периода активного потепления 1970–1995 гг. и последних 10–15 лет.

Совершенно очевидно, что происходящие на фоне тренда медленного потепления колебания климата в районе Байкала являются результатом воздействия крупных изменений атмосферной циркуляции. Как показано в [8–11], крупномасштабные аномалии температуры воздуха и осадков зимой на территории Евразии вызываются изменением активности зонального переноса, характеризуемого индексами североатлантического (NAO) и арктического (АО) колебаний. Несмотря на важную роль зонального переноса, индексы АО и NAO могут не в полной мере учитывать воздействие циркуляции на климат и гидрологические процессы. Так, изменение индексов АО и NAO объясняет лишь 23–34 % изменчивости температуры воздуха на Байкале зимой, весной и осенью [12].

Ранее влияние атмосферной циркуляции на ледовые характеристики Байкала исследовалось только у пос. Листвянка [11, 13]. В [13] показано, что 14 % изменчивости дат вскрытия льда в период 1869–1996 гг. объясняются вариацией активности NAO с января по март. Автор отмечает также, что существенное влияние NAO на температуру воздуха и даты вскрытия проявляется только во второй половине XX в., а в начале века было, вероятно, незначительным. В [11] обнаружено, что наиболее сильные связи наблюдаются между ледовыми характеристиками и индексами скандинавского (SCAND), сибирского максимума высокого давления (Sh) и АО. В [2] рассмотрено влияние NAO и Sh на вскрытие льда и температуру воды летом в разных частях Байкала. Наибольшее влияние NAO отмечалось в 1970–1995 гг., и это связано с одновременным возрастанием его активности и падением активности Sh. В последующий после 1995 г. период при снижении активности NAO наметилась тенденция к понижению температуры воды, а также к более раннему замерзанию и более позднему вскрытию ледяного покрова.

Для получения максимально полного представления о наблюдаемых изменениях климата в районе Байкала в данной работе использован комплекс циркуляционных индексов Северного полушария, известных как Northern Hemisphere Teleconnection Patterns [14]. В отличие от [2, 3, 11, 13], при анализе данных мы не ограничивались определением парных корреляций, а оценивали вклад отдельных циркуляционных индексов методом пошаговой множественной регрессии с учетом более полной информации (1950–2010 гг.) о ледово-термических характеристиках в Южном, Среднем и Северном Байкале, а также на отдельных станциях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При описании изменений крупномасштабной циркуляции атмосферы использовались циркуляционные индексы, рассчитанные для периода 1950–2010 гг. в Центре прогнозов климата США (NOAA) [15]. Индексы получены путем разложения по естественным ортогональным функциям (ЕОФ) колебаний поля геопотенциала изобарической поверхности 700 гПа для внетропической зоны Северного полушария. Индексы характеризуют ряд циркуляционных мод (механизмов циркуляции) атмосферы [14], широко используемых для изучения крупномасштабной циркуляции и долгосрочного прогноза погоды. Для анализа приняты индексы следующих циркуляционных механизмов: NAO, полярно-евразийский (POL), восточноатлантический (EA) и восточноатлантический-западнороссийский (EAWR) — показатели активности зональной циркуляции; блокирующий зональный перенос SCAND; тихоокеанско-североамериканский (PNA), западнотихоокеанский (WP). За показатель зонального переноса принимался также АО, полученный при разложении на ЕОФ колебаний поля геопотенциала изобарической поверхности 1000 гПа [10], изменения которого более строго, чем NAO, соответствуют колебаниям приземной температуры на евразийском континенте [10, 16]. Дополнительно использован Sh, полученный нами путем осреднения и стандартизации доступных данных по приземному давлению в период с декабря по февраль в 1950–2010 гг. для территории 40–65° с. ш., 80–120° в. д. (станции Туруханск, Ербогачён, Енисейск, Минусинск, Киренск, Иркутск, Чита) [17].

Для выявления связи ледово-термических характеристик с индексами циркуляции атмосферы использовались методы статистического анализа. Определялись коэффициенты парной корреляции ( $r$ ), детерминации ( $R^2$ ) и множественной корреляции ( $R$ ). С применением метода пошаговой линейной регрессии оценен сравнительный вклад индексов циркуляции в изменчивость ледово-термических характеристик. Найдена стандартная ошибка ( $S$ ) — среднеквадратическое отклонение от модели.

При анализе влияния циркуляции на температуру воздуха в 1950–2008 гг. использовались ее сезонные и годовые значения для всего озера, осредненные по наблюдениям девяти байкальских метеостанций. Такие параметры, как сроки замерзания, вскрытия и толщина льда, использованы для трех участков озера, выделенных с учетом различий в их широтном положении. Первый включал

шесть метеостанций в Южном Байкале, второй — три станции в центральной части озера на границе Среднего и Северного Байкала и третий — три станции на севере озера. Для каждого участка по наблюдениям в период с 1950 по 2010 г. рассчитаны средние сроки замерзания и разрушения льда, его максимальная толщина. Для характеристики температуры поверхности воды определены ее средние с мая по сентябрь (на севере озера с июня по октябрь) значения для этих же участков Байкала по наблюдениям девяти станций в период с 1950 по 2006 г.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Температура воздуха ( $T_a$ ).** Зимой (декабрь—февраль) температура воздуха находится в прямой зависимости от NAO ( $r = 0,39$ ), AO ( $r = 0,51$ ) и EAWR ( $r = 0,40$ ) и в обратной — от SCAND ( $r = -0,61$ ) и Sh ( $r = -0,61$ ). Уравнение множественной регрессии учитывает 65 % изменчивости  $T_a$  с основным вкладом Sh, SCAND и NAO (табл. 1). Составленное с учетом всех этих индексов уравнение воспроизводит разные по продолжительности колебания  $T_a$ , включая большинство лет с ее аномальными значениями (рис. 1, а) при величине  $S = \pm 1,4$  °C.

В период возрастания активности зонального переноса (1970—1995 гг.) теснота связи  $T_a$  с NAO ( $r = 0,68$ ) и AO ( $r = 0,65$ ) усилилась, вклад NAO в изменение  $T_a$  возрос до 60 %. Теснота связи  $T_a$  с SCAND и Sh практически не изменилась ( $r = -0,58$ ), но вклад SCAND понизился до 6 %, а Sh — до 28 %. Влияние других механизмов циркуляции оказалось статистически незначимым. Уравнение множественной регрессии для этого периода учитывает изменения  $T_a$  полнее и точнее ( $R^2 = 0,78$ ,  $S = \pm 1$  °C), чем уравнение для периода 1950—2008 гг.

Весной основное влияние на изменение  $T_a$  оказывает AO ( $r = 0,49$ ), доля которого в учитываемой уравнением изменчивости  $T_a$  равна 41 %. Менее тесной становится связь со SCAND ( $r = -0,38$ ) и Sh ( $r = -0,27$ ), их вклад 12 и 7 % соответственно. Значимую роль играют EA ( $r = 0,34$ , вклад 8 %) и WP ( $r = -0,35$ , вклад 18 %). Уравнение множественной регрессии ( $R = 0,77$ ) объясняет 60 % изменений  $T_a$  при величине  $S = \pm 0,8$  °C (см. рис. 1, б).

Летом связь  $T_a$  с индексами циркуляции атмосферы существенно ослаблена. Значительное влияние на изменения  $T_a$  оказывают только EA ( $r = 0,30$ , вклад 47 %) и SCAND ( $r = -0,29$ , вклад 25 %). Уравнение регрессии объясняет 18 % изменений  $T_a$  и позволяет описать лишь их долговременную тенденцию в 1950—2008 гг. при  $S = \pm 0,8$  °C (см. рис. 1, в).

Осенью влияние атмосферных процессов на  $T_a$  усиливается. Уравнение регрессии учитывает 46 % колебаний  $T_a$ , которые зависят в основном от активности AO ( $r = 0,52$ , вклад 61 %) и SCAND ( $r = -0,50$ , вклад 25 %). Несмотря на значимую корреляцию  $T_a$  с индексом POL ( $r = 0,35$ ), его вклад в изменчивость  $T_a$  практически отсутствует. Также при слабой тесноте связи  $T_a$  с индексами NAO и PNA их общий вклад составляет 13 %. Межгодовые колебания рассчитанных по уравнению значений  $T_a$  довольно близки к колебаниям ее фактических значений при  $S = \pm 0,8$  °C (см. рис. 1, г).

Таблица 1

Характеристики связи температуры воздуха зимой в котловине Байкала с индексами атмосферной циркуляции (1951—2008 гг.)

Параметр	$r$	$B$	$S$	$t$	p-level	Объясненная дисперсия ( $D$ )	
$a$	—	<b>-15,5</b>	<b>0,2</b>	<b>-81,7</b>	<b>0,000</b>	—	—
Sh	<b>-0,610</b>	<b>-0,9</b>	<b>0,2</b>	<b>-4,6</b>	<b>0,000</b>	0,37	57 %
SCAND	<b>-0,607</b>	<b>-1,4</b>	<b>0,3</b>	<b>-4,2</b>	<b>0,000</b>	0,20	30 %
NAO	<b>0,386</b>	<b>0,7</b>	<b>0,3</b>	<b>2,6</b>	<b>0,013</b>	0,04	6 %
PNA	0,210	0,5	0,3	2,0	0,055	0,02	4 %
POL	0,171	0,5	0,3	2,0	0,111	0,02	3 %
Сумма						$R^2 = 0,65$	100 %

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3:  $a$  — свободный член в уравнении;  $r$  — коэффициент парной корреляции;  $B$  — коэффициент в уравнении множественной линейной регрессии;  $S$  — стандартная ошибка для коэффициентов  $B$ ;  $t$  — коэффициент Стьюдента; p-level — уровень значимости;  $D$  — сравнительный вклад индексов в изменчивость характеристики;  $R^2$  — коэффициент детерминации. Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты.

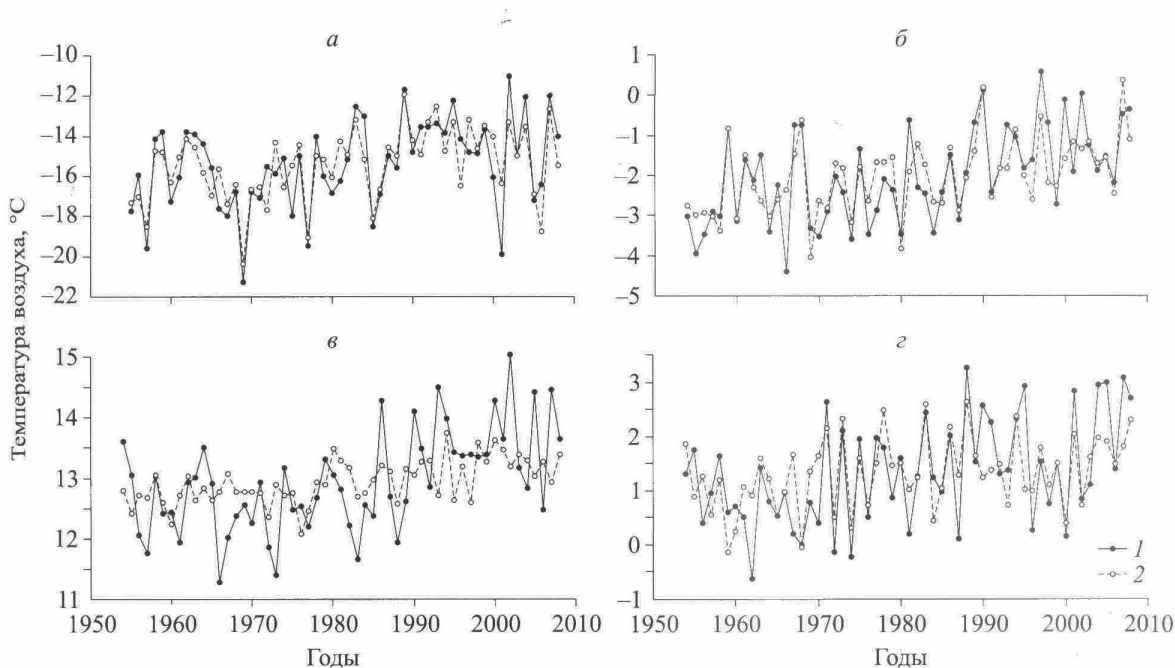


Рис. 1. Средняя в декабре–феврале (а), марте–мае (б), июне–августе (в) и сентябре–ноябре (г) температура воздуха на Байкале.

1 – по наблюдениям, 2 – по расчетам по регрессионным зависимостям.

Основную роль в изменчивости годовой температуры играют механизмы циркуляции, характеризующие глобальный западно-восточный перенос или его региональные проявления АО, NAO, EA ( $r = 0,33-0,54$ ) и блокирующий этот перенос SCAND ( $r = -0,51$ ), а также Sh ( $r = -0,51$ ). Уравнение регрессии ( $R = 0,82$ ,  $S = \pm 0,6$  °C) учитывает 67 % изменчивости  $T_a$  (вклад АО, SCAND, PNA, Sh — 44; 8; 29 и 10 % соответственно).

Таким образом, учитываемые Teleconnection Patterns циркуляционные механизмы описывают 46–67 % изменений годовой температуры и температуры зимой, весной и осенью. Летом вклад циркуляции в изменение температуры снижается до 18 %. Более значительную роль играет, по-видимому, радиационный прогрев, эффект которого ослабевает при усилении зональной циркуляции [3]. К основным циркуляционным механизмам, влияющим на повышение годовой и сезонной (кроме летней) температуры на Байкале, относятся АО и NAO, а на понижение — SCAND и Sh. Наряду с этим заметна роль EAWR зимой, EA и WP — весной, EA — летом. Влияние и вклад других механизмов циркуляции статистически не значимы.

**Ледовые явления.** Вызываемые циркуляционными процессами изменения температуры воздуха в зимние месяцы оказывают заметное воздействие на ледовый режим Байкала. Так, в Южном Байкале (пос. Листвянка) сроки замерзания связаны с  $T_a$  в ноябре–декабре ( $r = 0,75$ ), определяющей скорость выхолаживания верхнего слоя воды перед замерзанием озера [11, 18], а максимальная толщина льда — с  $T_a$  в январе–феврале ( $r = 0,89$ ). В свою очередь, толщина льда, наряду с тепловыми и динамическими факторами весеннего периода [6, 13], может оказывать влияние на сроки вскрытия ледяного покрова. Поэтому динамика ледовых процессов рассматривалась в сопоставлении с индексами циркуляции в зимние месяцы.

При анализе сроков замерзания использовались средние индексы циркуляции за ноябрь и декабрь предыдущего года.

Для Южного Байкала (станции Маритуй, порт Байкал, Листвянка, Бол. Голоустное, Танхой, Бабушкин) и центральной части озера (станции Узур, Солнечная, о. Бол. Ушканий) обнаруживается значимая положительная связь сроков замерзания с индексами АО ( $r = 0,35$ ), EAWR ( $r = 0,28 \div 0,35$ ) и отрицательная с SCAND ( $r = -0,55 \div -0,69$ ), Sh ( $r = -0,27 \div -0,47$ ) и POL ( $r = -0,31$ ). Годы позднего замерзания соответствуют возрастанию активности зонального переноса воздушных масс из

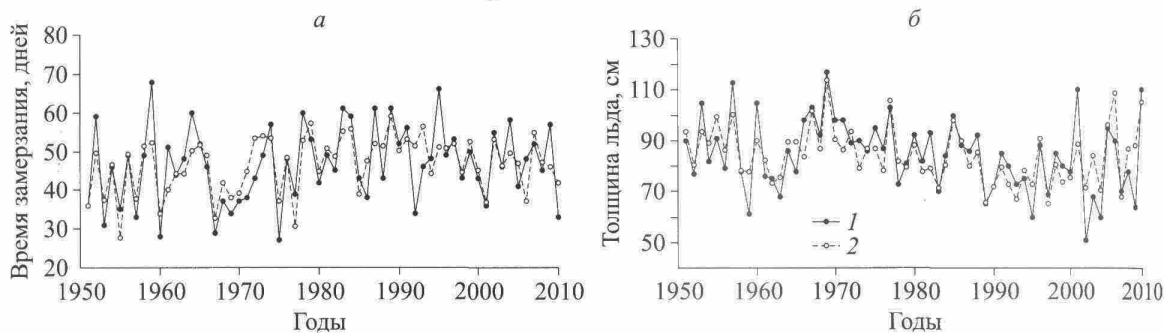


Рис. 2. Время замерзания (в отклонениях от 1 декабря) (а) и толщина льда (б) в Южном Байкале (пос. Листвянка).

1 — по наблюдениям, 2 — по расчетам по регрессионным зависимостям.

Таблица 2

Характеристики связи сроков замерзания в Южном Байкале (пос. Листвянка) с индексами атмосферной циркуляции в ноябре и декабре (1950–2010 гг.)

Параметр	$r$	$B$	$S$	$t$	p-level	Объясненная дисперсия ( $D$ )	
$a$	—	46,3	0,9	49,8	0,000	—	—
SCAND	-0,601	-5,2	1,3	-3,9	0,000	0,36	71 %
Sh	-0,473	-3,0	1,0	-3,0	0,004	0,11	22 %
EAWR	0,382	2,5	1,3	1,9	0,068	0,03	5 %
POL	-0,297	-1,6	1,4	-1,2	0,247	0,01	2 %
Сумма						$R^2 = 0,51$	100 %

Атлантики (индексы АО, EAWR), а годы раннего замерзания — усилению блокирующего этот перенос индекса SCAND, а также Sh. Уравнения множественной регрессии объясняют 39–58 % изменчивости сроков замерзания с величиной стандартного отклонения  $S = \pm 6-7$  дней (рис. 2, а, табл. 2). Основной вклад (78–83 %) в учитываемую уравнениями изменчивость сроков замерзания вносит SCAND.

В северной части Байкала (станции Байкальское, Нижнеангарск, Томпа) процессы циркуляции объясняют 34 % изменения сроков замерзания ( $S = \pm 7$  дней). Связь с отдельными индексами циркуляции значима только для SCAND ( $r = -0,51$ ), вклад которого в учитываемую изменчивость сроков замерзания составляет 77 %.

Как и для зимней температуры воздуха, в 1970–1995 гг. вклад АО и NAO в изменение времени замерзания во всех частях озера повысился до 18–50 %, а вклад SCAND понизился до 32–68 %. Доля учитываемой уравнениями регрессии изменчивости времени замерзания увеличилась с 34–58 до 52–68 % при  $S = \pm 5,6-6,4$  дня.

Межгодовая и внутривековая изменчивость толщины ледяного покрова ( $H_{\text{л}}$ ) сопоставлена с процессами циркуляции в декабре–феврале. В Южном и Среднем Байкале отмечается значимая обратная связь толщины льда с индексами АО ( $r = -0,48 \div -0,55$ ), NAO ( $r = -0,36 \div -0,39$ ), EAWR ( $r = -0,32 \div -0,35$ ) и прямая связь с индексами SCAND и Sh ( $r = 0,38-0,58$ ). Вклад основных циркуляционных механизмов в учитываемую уравнением множественной регрессии изменчивость  $H_{\text{л}}$  для этих частей озера неодинаков. Если в Южном Байкале для SCAND, АО, Sh он составляет 67, 10 и 20 %, то в Среднем Байкале — 8, 60 и 14 % соответственно. Уравнение регрессии для Южного Байкала ( $R^2 = 0,50$ ,  $S = \pm 8,9$  см) учитывает влияние циркуляции на изменения толщины льда точнее, чем для Среднего Байкала ( $R^2 = 0,38$ ,  $S = \pm 10,8$  см). В Северном Байкале уравнение регрессии объясняет 23 % изменений толщины льда при  $S = \pm 14,3$  см. Существенной оказывается связь  $H_{\text{л}}$  только с индексами АО ( $r = -0,46$ ) и NAO ( $r = -0,34$ ), основной вклад в изменение толщины льда вносит АО (89 %).

Подобный анализ для отдельных станций показал, что связь толщины льда с индексами циркуляции ослаблена для участков с преобладанием постоянно заснеженного льда. Причина этого заклю-

чается в снижении теплопроводности ледово-снежного покрова и, как следствие, в замедленной реакции толщины льда на вызываемые процессами циркуляции изменения температуры воздуха. Для менее заснеженных участков у западного побережья Южного Байкала на станциях Листвянка (см. рис. 2, б) и Бол. Голоустное уравнения регрессии учитывают 49–59 % изменчивости  $H_{\text{л}}$  с погрешностью  $\pm 10,7$  см и хорошо описывают тренд, межгодовые колебания, отдельные годы с аномально большой толщиной льда (1969, 1977, 1985, 2001 и 2010 гг.).

Для станций восточного побережья Южного Байкала, а также центральной и особенно северной части озера, где толстый снег обычно полностью покрывает лед, вклад процессов циркуляции в изменение толщины льда снижается до 23–33 %.

Для периода 1970–1995 гг. отмечается усиление связи толщины льда с индексами зональной циркуляции АО и NAO. Их вклад в учитываемую уравнениями изменчивость составил в отдельных частях озера 73–87 %, тогда как для SCAND он уменьшился до 4 % в южной части, а для других частей озера отсутствовал. Величина коэффициентов детерминации для этого периода возросла по сравнению с 1950–2010 гг. до 65 % в южной, 69 % в средней и 47 % в северной частях озера, величина  $S$  снизилась с 8,9–14,3 до 7,1–10,6 см.

Изменение сроков вскрытия ледяного покрова  $D_{\text{вскр}}$  (в отклонениях от 1 мая) определяется на 50–56 % процессами циркуляции атмосферы в декабре–марте (табл. 3). Для выделенных участков озера и отдельных станций на  $D_{\text{вскр}}$  заметно воздействуют NAO и АО ( $r = -0,48 \div -0,60$ ), EA ( $r = -0,29 \div -0,36$ ), SCAND ( $r = 0,30-0,41$ ) и Sh ( $r = 0,28-0,54$ ), в Северном Байкале значимое влияние оказывает PNA ( $r = -0,27$ ). Вклад NAO в учитываемую уравнениями изменчивость  $D_{\text{вскр}}$  (53–64 %) является основным и намного превышает вклад EA (3–17 %), SCAND (5–11 %), Sh (17–28 %) и в Северном Байкале PNA (7 %). Учет индексов этих циркуляционных механизмов в уравнениях множественной регрессии позволяет описать тренд и межгодовые колебания, а также большинство лет с аномальными сроками вскрытия при  $S = \pm 5,3-6,1$  дня (рис. 3, а).

Таблица 3

Характеристики связи сроков вскрытия в Среднем Байкале (о. Бол. Ушканий) с индексами атмосферной циркуляции в декабре–феврале (1950–2010 гг.)

Параметр	$r$	$B$	$S$	$t$	p-level	Объясненная дисперсия ( $D$ )	
$a$	—	<b>13,1</b>	<b>0,8</b>	<b>15,7</b>	<b>0,000</b>	—	—
NAO	<b>-0,486</b>	<b>-4,2</b>	<b>1,2</b>	<b>-3,6</b>	<b>0,001</b>	0,24	48 %
Sh	<b>0,473</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>0,049</b>	0,16	32 %
PNA	-0,243	-1,9	1,1	-1,7	0,100	0,05	11 %
EA	<b>-0,362</b>	-2,4	1,3	-1,8	0,075	0,02	3 %
SCAND	<b>0,355</b>	1,8	1,3	1,4	0,176	0,02	3 %
POL	-0,053	-1,6	1,4	-1,2	0,251	0,02	3 %
Сумма						$R^2 = 0,50$	100 %

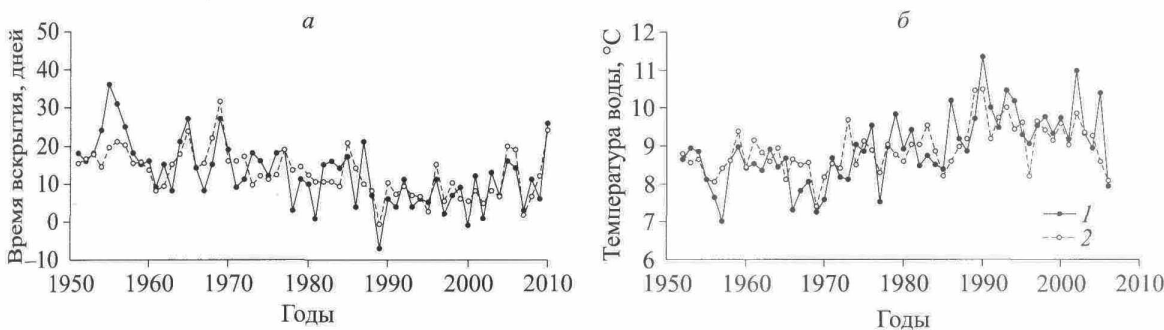


Рис. 3. Время вскрытия (в отклонениях от 1 мая) (а) и средняя в июне–октябре температура поверхности воды (б) в Среднем Байкале (ст. о. Бол. Ушканий).

1 – по наблюдениям, 2 – по расчетам по регрессионным зависимостям.

Таким образом, ледовый режим Байкала в современный период отражает общий характер изменений климата в регионе озера, характеризующихся температурой воздуха. Сохраняется связанный с потеплением устойчивый и умеренный по величине многолетний тренд запаздывания времени замерзания и более раннего наступления вскрытия. Одновременно происходят существенные изменения скорости этих показателей ледового режима и даже меняется знак приращения на ветвях роста и спада внутривековых и особенно малых (4–7 лет) циклов климата, вызываемых колебаниями процессов циркуляции атмосферы.

Рассматривая общие особенности изменения температуры воздуха и ледовых явлений в зависимости от циркуляции атмосферы зимой, отметим основную роль активности зонального переноса, определяемого индексами АО и NAO, и блокирующих этот перенос механизмов, характеризующихся индексами SCAND и Sh. Изменение соотношения между циркуляционными индексами обусловило основные тенденции температуры воздуха и характеристик ледового режима Байкала. Так, уменьшению индексов АО и NAO и усилению SCAND и Sh с начала 1950-х до начала 1970-х гг. соответствовали холодные зимы и суровость ледовых условий этого периода. В 1970–1995 гг. постоянное увеличение индексов АО и NAO при одновременном снижении SCAND и Sh сопровождалось исключительно сильным потеплением зимой и значительным смягчением ледовых условий. После 1995 г. на фоне глобального потепления постепенное усиление суровости зим соответствует ослаблению индексов зонального переноса при росте SCAND и Sh.

**Температура поверхности воды.** Активное прогревание Байкала начинается в мае сразу после вскрытия ледяного покрова, когда резко возрастает радиационный прогрев водной толщи. В это время поток солнечной радиации к поверхности озера близок к максимальному за год, альбедо водной поверхности мало (6 %). Поэтому время вскрытия, зависящее от зимних процессов циркуляции атмосферы, является фактором, влияющим на температуру верхнего слоя воды  $T_b$  весной и в последующие летние месяцы [2]. Данная связь объясняет влияние зимних процессов циркуляции атмосферы на температуру воды в период нагревания Байкала (май–сентябрь).

Расчеты парной корреляции  $T_b$  для отдельных станций и выделенных частей озера со средними в декабре–марте индексами циркуляции свидетельствуют о значимой положительной связи  $T_b$  с NAO ( $r = 0,30-0,50$ ), АО ( $r = 0,32-0,53$ ) во всех частях озера, в Северном Байкале также с EAWR ( $r = 0,31$ ), об отрицательной связи с SCAND ( $r = -0,25 \div -0,42$ ) и Sh ( $r = -0,34$ ) в центральной части озера. Уравнения множественной регрессии описывают 12 % изменчивости  $T_b$  в Южном, 43 % в Среднем и 39 % в Северном Байкале с величиной  $S = \pm 0,8-0,9$  °C. Как и для сроков вскрытия, преобладающий вклад в изменение  $T_b$  во всех частях озера вносит АО (45–82 %). Вторым по значимости в Южном Байкале является WP (18 %), в Среднем и Северном — PNA (15–18 %).

Из отдельных станций можно выделить о. Бол. Ушканий (см. рис. 3, б) и исток Ангары. Для островной станции в открытой части Байкала характерно ослабленное по сравнению с прибрежными участками влияние локальных ветров и прибрежной динамики вод на изменчивость температуры воды. Процессы циркуляции объясняют 46 % колебаний температуры с  $S = \pm 0,7$  °C. Значимое воздействие оказывают АО ( $r = 0,54$ , вклад 63 %) и NAO ( $r = -0,43$ , вклад 4 %), а также EA ( $r = 0,33$ , вклад 21 %), SCAND ( $r = -0,42$ , вклад 8 %) и Sh ( $r = -0,43$ , вклад 4 %). Учет индексов циркуляции позволяет детально отразить наблюдавшиеся в 1950–2006 гг. коротко- и долгопериодные колебания  $T_b$ .

Для станции в истоке Ангары, сток которой формируется поступлением вод из озера с глубины не менее 50 м, основное влияние на изменение температуры оказывает NAO ( $r = 0,35$ ) и в меньшей степени EA ( $r = 0,19$ ). Из-за сложной динамики вод этого района, воздействия на температуру частых сгонно-нагонных явлений при ветрах из долины р. Ангары влияние процессов циркуляции, хотя статистически значимо, но объясняет только 15 % изменений  $T_b$  ( $S = \pm 0,9$  °C). Как и для ст. о. Бол. Ушканий, на эти изменения (84 %) в основном влияет индекс зональной циркуляции NAO, который намного превышает вклад EA (16 %).

Исследование ледово-термических процессов на Байкале представляет большой лимнологический и экологический интерес. Температура воздуха, сроки замерзания, вскрытия, максимальная толщина льда и температура поверхности воды существенно влияют на экосистемные процессы оз. Байкал. Результаты показывают, что изменение характеристик ледово-термического режима тесно связано с колебанием АО, NAO, Sh и SCAND. Изменение соотношения между этими циркуляционными индексами определило основные тенденции температуры воздуха и характеристик ледового режима Байкала.

## ВЫВОДЫ

Крупномасштабные изменения атмосферной циркуляции в Северном полушарии в последние 60 лет стали основной причиной коротко- и долгопериодных (внутривековых) колебаний климата и характеристик ледово-термического режима Байкала. Результаты анализа свидетельствуют о влиянии механизмов циркуляции атмосферы, учитываемых индексами Northern Hemisphere Teleconnection Patterns, на температуру воздуха. Зимой, весной и осенью с ними связано 46–67 % изменений температуры. В эти сезоны основную роль играет усиление/ослабление индексов, характеризующих активность зонального (западно-восточного) переноса воздушных масс (АО и NAO) или их блокировки (SCAND и Sh), которые описывают суммарно от 36 до 92 % изменений температуры, учитываемых уравнениями регрессии. Летом связь температуры воздуха с индексами циркуляции атмосферы существенно ослаблена.

Зимой и весной АО, NAO, SCAND и Sh вносят основной вклад в изменчивость характеристик ледового режима, объясняя не менее 80 % от ее величины, учитываемой уравнением линейной регрессии. Отметим, что на изменение сроков замерзания и толщины льда преобладающее влияние оказывают колебания SCAND и Sh, тогда как их роль в изменении сроков вскрытия озера становится второстепенной, уступая первое место колебаниям индексов зонального переноса. Использование индексов циркуляционных механизмов в уравнениях множественной регрессии позволяет адекватно описывать как крупно-, так и мелкомасштабные колебания зимней температуры воздуха и связанных с ней сроков замерзания и вскрытия, а также максимальной толщины льда.

Процессы циркуляции атмосферы в зимний период, влияющие на толщину льда и сроки разрушения ледяного покрова, оказывают значимое воздействие на температуру верхних слоев воды в теплую часть года. При этом преобладающий вклад в ее изменчивость вносят индексы зональной циркуляции (АО и NAO).

Соотношение между вкладом основных циркуляционных механизмов в колебания температуры воздуха зимой и отдельных характеристик ледовых явлений менялось во времени. Если в среднем за 1950–2010 гг. вклад SCAND и Sh значительно превосходил вклад АО и NAO, то в период усиления активности зонального переноса (1970–1995 гг.) АО и NAO играли решающую роль в изменении зимней температуры воздуха, сроков замерзания, а также максимальной толщины льда. Уравнения множественной регрессии для данного периода учитывали изменчивость этих характеристик более полно и точно, чем для периода 1950–2010 гг.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (12–05–31268 мол\_а; 13–05–91051–НЦНИ\_а) в рамках Программы фундаментальных исследований СО РАН (проект VII.62.1.5).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шимараев М. Н., Куимова Л. Н., Синюкович В. Н., Цехановский В. В. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии // Докл. Академии наук. — 2002. — Т. 383, № 3. — С. 397–400.
2. Шимараев М. Н. Циркуляционные факторы изменения ледово-термического режима Байкала // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 4. — С. 54–60.
3. Шимараев М. Н. О влиянии североатлантического колебания (NAO) на ледово-термические процессы на Байкале // Докл. Академии наук. — 2008. — Т. 423, № 3. — С. 397–400.
4. Троицкая Е. С., Шимараев М. Н., Цехановский В. В. Многолетние изменения температуры поверхности воды в Байкале // География и природ. ресурсы. — 2003. — № 2. — С. 47–50.
5. Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Moore M. V. et al. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake — Lake Baikal, Siberia // Global Change Biology. — 2008. — Vol. 14. — P. 1–12.
6. Kouraev A. V., Semovski S. V., Shimaraev M. N. et al. The ice regime of Lake Baikal from historical and satellite data: Relation to air temperature, dynamical, and other factors // Limnol. Oceanogr. — 2007. — Vol. 52, N 3. — P. 1268–1286.
7. Moore M. V., Hampton S. E., Izmet'eva L. R. et al. Climate change and the World's «Sacred Sea» — Lake Baikal, Siberia // BioScience. — 2009. — Vol. 59, N 5. — P. 405–417.
8. Попова В. В., Шмакин А. Б. Циркуляционные механизмы крупномасштабных аномалий температуры воздуха зимой в Северной Евразии в конце XX столетия // Метеорология и гидрология. — 2006. — № 12. — С. 15–25.



9. **Hurrell J. W.** Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation // *Science*. — 1995. — Vol. 269. — P. 676–679.
10. **Li J., Wang J.X.L.** A modified zonal index and its physical sense // *Geophys. Res. Lett.* — 2003. — Vol. 30, N 12. — P. 1632.
11. **Todd M. C., Mackay A. W.** Large-scale climate controls on Lake Baikal ice cover // *Journ. of Climate*. — 2003. — Vol. 16. — P. 3186–3199.
12. **Шимараев М. Н., Старыгина Л. Н.** Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007 гг.) // *География и природ. ресурсы*. — 2010. — № 3. — С. 62–68.
13. **Livingstone D. M.** Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation // *Limnol. Oceanogr.* — 1999. — Vol. 44, N 6. — P. 1486–1497.
14. **Barnston A. G., Livezey R. E.** Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // *Mon. Weather Rev.* — 1987. — Vol. 115. — P. 1083–1126.
15. **Standardized Northern Hemisphere Teleconnection Indices.** — <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>
16. **Thompson D. W. J., Wallace J. M.** The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* — 1998. — Vol. 25, N 9. — P. 1297–1300.
17. **Архив данных ВНИИГМИ-МЦД.** — <http://www.meteo.ru>
18. **Верболов В. И., Сокольников В. М., Шимараев М. Н.** Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. — М.: Наука, 1965. — 372 с.

*Поступила в редакцию 14 ноября 2012 г.*