

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 556.555.4 + 504.455

DOI: 10.15372/GIPR20220109

М.А. НАУМЕНКО, В.В. ГУЗИВАТЫЙ

Институт озероведения РАН, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9, Россия,
m.a.naumenko@mail.ru, guzivatyy@gmail.com

КЛИМАТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА И ТЕМПЕРАТУРАМИ ВОДЫ РАЗЛИЧНЫХ ЛИМНИЧЕСКИХ РАЙОНОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

На основе обширной базы данных показано, что для различных лимнических районов Ладожского озера существует явление температурного гистерезиса для периода открытой воды с мая по ноябрь. Выявлены особенности нагревания и охлаждения как поверхности воды, так и интегральной температуры водной толщи шести различных районов озера в зависимости от температуры приповерхностного слоя воздуха. Аппроксимация зависимостей между указанными параметрами — полиномами второй и третьей степеней — показала, что существуют устойчивые значимые связи ($p < 0,05$) между ними с коэффициентом детерминации 0,8–0,9. Аналитические зависимости позволили рассчитать приращение температуры воды при изменении температуры воздуха на один градус. На Ладожском озере обнаружена зависимость скорости изменения температуры поверхности воды от температуры воздуха. Наибольшие изменения происходят в период нагревания. В августе при максимальных температурах воздуха скорость роста температуры поверхности воды, особенно в глубоководном районе, превышает скорость роста температуры воздуха. Канадские лимнологи получили аналогичные результаты на оз. Онтарио. Выявлены два важных периода при охлаждении Ладожского озера: первый, когда температура поверхности имеет постоянную величину с минимальной пространственной дисперсией; второй, когда вся водная толща озера имеет одинаковую температуру воды с минимальной пространственной дисперсией. Эти периоды и значения температур воды и воздуха могут служить климатическими реперами (нормами) при климатических исследованиях. Установлено, что климатические изменения температуры воздуха по-разному будут влиять на повышение температуры воды в разные сезоны и разных районах крупного озера.

Ключевые слова: температурный гистерезис, димиктическое озеро, интегральная температура водной толщи, сезонный ход параметров приповерхностного слоя воды, климатическая норма, периоды нагревания и охлаждения озера.

M.A. NAUMENKO, V.V. GUZIVATY

Institute of Limnology Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences, 196105, St. Petersburg, ul. Sevastyanova, 9, Russia,
m.a.naumenko@mail.ru, guzivatyy@gmail.com

CLIMATIC RELATIONSHIPS BETWEEN AIR TEMPERATURE AND WATER TEMPERATURES IN DIFFERENT LIMNIC AREAS OF LAKE LADOGA

Based on an extensive database, it is shown that for different limnetic regions of Lake Ladoga there occurs a temperature hysteresis phenomenon for the period of open water from May to November. The heating and cooling features of both the water surface and the integral water temperature of six different areas of the lake have been revealed, depending on air temperature of near surface layer. The approximation of dependencies between these parameters, the second- and third-degree polynomials, has shown that there are stable, meaningful relationships ($p < 0.05$) between them, with the determination coefficient of 0.8–0.9.

Analytical dependencies allowed to calculate the increase in water temperature when the air temperature changes by one degree. On Lake Ladoga, a dependence of the rate of change in water surface temperature on air temperature is found. The biggest changes occur during the heating period. In August, at maximum air temperatures, the rate of increase in water surface temperature, especially in the deep-sea region, exceeds the rate of increase in air temperature. Canadian limnologists obtained similar results on Lake Ontario. Two important periods have been identified when the lake cools: the first one, when the surface temperature has a constant value with minimal spatial variance; and the second one, when the entire water thickness of the lake has the same water temperature with minimal spatial variance. These periods and values of water and air temperatures can serve as climatic norms in climate studies. Climatic changes in air temperature will affect the increase in water temperature in different ways in different seasons and in different areas of a large lake.

Keywords: temperature hysteresis, dimictic lake, integral temperature of the water column, seasonal course of parameters of the near-water layer, climatic norm, heating and cooling periods of the lake.

ВВЕДЕНИЕ

Температура поверхности воды океанов, морей и озер представляет собой одну из важнейших физических величин, имеющую климатическое значение, поскольку она во многом определяет взаимодействие водной среды с прилегающими слоями воздуха, а также контролирует широкий спектр биологических и геохимических состояний экосистем [1–3]. Для димиктических озер, расположенных в зоне умеренного климата с ярко выраженным годовым ходом температуры воздуха и поверхности воды, современные климатические изменения, безусловно, значимы и идентифицируются в повышении температуры окружающей среды, уменьшении ледового покрова, изменении параметров вертикальной стратификации водной толщи [4, 5].

Климатические изменения проявляются, прежде всего, в колебаниях температуры воздуха, которые отражаются в вариациях температуры поверхности озер Мира [6]. Оценки показывают, что температура поверхности воды озер может повыситься на 70–85 % от увеличения температуры воздуха [7]. Модельные расчеты для Великих американских озер демонстрируют, что суммарный эффект изменений температуры воздуха и приходящей радиации на температуру поверхности воды в июле составляет от 49,3 до 57,7 %. Было показано, что летом поверхностные слои глубокого озера Верхнее нагреваются сильнее, чем оз. Эри [8]. Для оз. Онтарио за 1970–2009 гг. температура воздуха зимой и осенью росла быстрее, чем температура поверхности воды, а весной и летом температура воды увеличивалась с большей скоростью по сравнению с температурой воздуха [9].

М.Н. Шимараев [10] показал, что колебания суммарного теплового потока через поверхность оз. Байкал за год более чем на 30 % определяются температурой воздуха, в течение года наибольший вклад зависит от месяца и максимален в ноябре–декабре. Для оз. Байкал проведены оценки изменений ледово-термического режима и, в частности, изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках в условиях современного потепления [11, 12]. Сезонная термическая реакция различных районов Ладожского озера на разномасштабные потоки тепла во многом определяется распределением глубин. Для центральной части озера было показано, что значимые климатические тренды температуры поверхности воды существуют не весь период открытой воды с мая по ноябрь, а имеют место в течение довольно коротких промежутков времени (дни–недели) [13]. Позже эта особенность была подтверждена для озер Северной Америки. Она свидетельствует, что существуют вариации в величинах трендов в период открытой воды от месяца к месяцу [14], определяемые взаимодействием поверхности воды и прилежащего воздуха.

Цель настоящей работы заключается в установлении взаимосвязей между температурой воздуха (T_a) и температурами поверхности (T_{ws}) и средней интегральной температурой воды (T_W) лимнических районов Ладожского озера в течение периода открытой воды, а также в количественной оценке изменений температуры воды при изменении температуры воздуха для выявления влияния климатических изменений температуры приводного слоя воздуха на термический режим озера.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Атмосферное воздействие на границе раздела воздух–вода — основной фактор, определяющий особенности теплового баланса Ладожского озера. Таким образом, межгодовые, сезонные и синоптические вариации взаимодействия поверхности воды и приводного слоя воздуха оказывают большое влияние на тепловые характеристики водоема. Ладожское озеро расположено в умеренной климатической зоне, что определяет его димиктический статус, ледовый режим и четко выраженную после-

довательность термических состояний в течение года [15]. Среднегодовая температура водной массы озера составляет 3,8 °С, а среднегодовая температура поверхности озера — 5,5 °С при среднегодовой амплитуде температуры поверхности ~17 °С.

Среднегодовая температура воздуха по м/с Сортавала, начиная с 2013 г., всегда превышала 4,5 °С, достигнув 4,9 °С в 2018 г., что на 1 °С больше средней за период 1979–2018 гг. Среднегодовая амплитуда среднемесячных температур воздуха по м/с Сортавала равна 25,5 °С.

Морфометрия озера представляет собой его важнейшую первичную лимническую характеристику, которая определяет процессы обмена веществом и энергией как внутри водной массы, так и на границе взаимодействия поверхности воды и прилегающего слоя воздуха [16]. Крупнейшее европейское озеро — Ладожское — имеет площадь поверхности 17 765 км² и объем 847,8 км³. На основе созданных цифровых батиметрических моделей Ладожского озера [17, 18] было проведено лимническое районирование и выделено шесть районов (зон): 1 — мелководный с глубинами от 0 до 18 м; 2 — переходный (18–50), 3 — район озерного уступа (50–70), 4 — склоновый (70–100), 5 — глубоко-водный (100–140), 6 — впадины, не соединяющиеся друг с другом, с глубинами >140 м. Термические особенности этих районов обсуждаются в [19, 20]. Существует ярко выраженная термическая дифференциация этих районов в течение годового цикла. В зависимости от площади и объема воды тепло-содержание лимнических районов изменяется по сезонам, пропорционально изменяется средняя интегральная температура водной толщи каждого района [21].

Для оценки влияния климатических изменений температуры приводного слоя воздуха на температуры воды Ладожского озера были рассмотрены и оценены возможные связи между ними. Графики взаимосвязи температуры воздуха и температуры поверхности воды, а также температуры всей водной толщи для каждой лимнической зоны (рис. 1) достаточно традиционны и демонстрируют наличие двух ветвей: нижней (восходящей), характеризующей период нагревания, и верхней (нисходящей), отвечающей за период охлаждения. При построении графиков использованы данные почти за столетний период [22] из базы данных Института озероведения РАН [23], включающей в настоящее время более 300 000 измерений гидрометеорологических параметров, выполненных по стандартной методике гидрометеорологической службы. Чтобы избежать влияния межгодовых флуктуаций при исследовании годового цикла температуры воды и воздуха Ладожского озера, данные осреднялись для каждой декады с временным сдвигом пять суток, что позволило получить наиболее корректный климатический ход. Для каждого лимнического района при построении зависимостей (см. рис. 1) использовано 44 точки среднедекадных значений температур воздуха и воды с мая по ноябрь, которые всегда превышали 0 °С. Явление температурного гистерезиса можно наблюдать на рис. 1. При одних и тех же температурах воздуха процесс нагревания поверхности воды (или температуры воды всей водной толщи) отличается от процесса охлаждения [24–26]. В начале весны скорость нагревания поверхности воды небольшая, а к лету она увеличивается. При летне-осеннем выхолаживании всей водной толщи происходит медленное остывание водной поверхности, тогда как в предзимнее время скорость остывания увеличивается. Для одного из Великих американских озер — Верхнего — приводится аналогичное соотношение между температурой поверхности и приводного слоя воздуха в [27].

Из рис. 1 выявляются тесные связи между температурами воды и температурой воздуха для периода нагревания и охлаждения, однако характер связей для каждой из лимнических зон различен и не линеен.

Для количественной оценки связей был применен корреляционный анализ и построение уравнений регрессии, наиболее оптимальный вид которых — полиномиальный (рис. 2):

$$T_{ws} = a + b \cdot T_a + c \cdot T_a^2, \quad (1)$$

$$TW = a + b \cdot T_a + c \cdot T_a^2 + d \cdot T_a^3, \quad (2)$$

где T_{ws} — температура поверхности воды, T_a — температура воздуха, TW — средняя интегральная температура воды, a , b , c , d — коэффициенты.

Оценка корреляционных связей для каждой из двух ветвей (нисходящей и восходящей) между температурой воздуха и температурами поверхности воды и водной толщи каждой лимнической зоны показала, что существуют устойчивые значимые связи между ними (коэффициент детерминации $R^2 > 0,8$ – $0,9$ при уровне значимости 0,05). Приведены коэффициенты регрессии для каждой зоны для периодов нагревания и охлаждения (см. таблицу). Данные коэффициенты будут полезны для сравнения с показателями по другим димиктическим озерам.

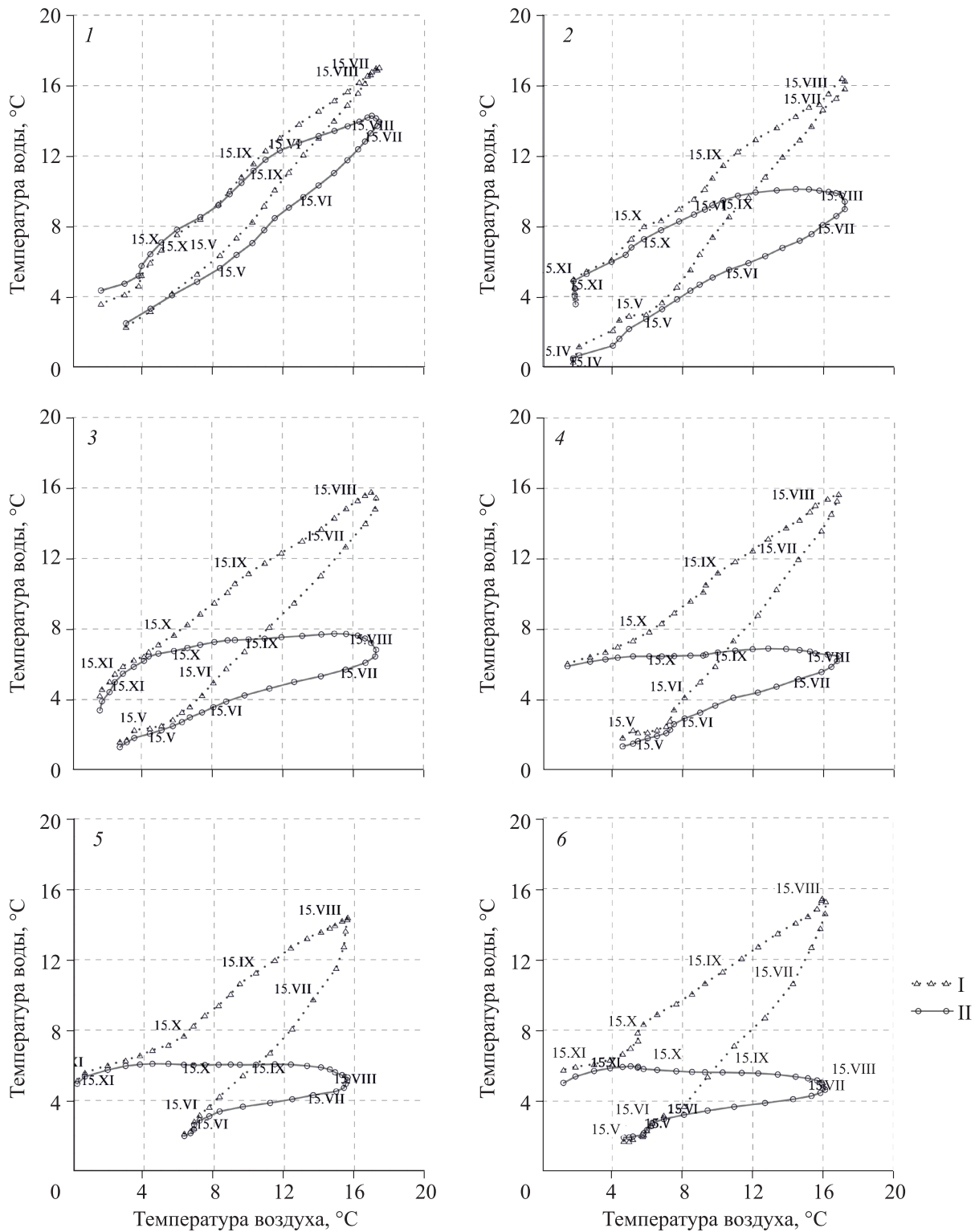


Рис. 1. Зависимость между температурой воздуха и температурой поверхности воды (I), температурой воздуха и средней интегральной температурой водной толщи (II) для районов с различными глубинами дна.

1–6 — лимнические районы.

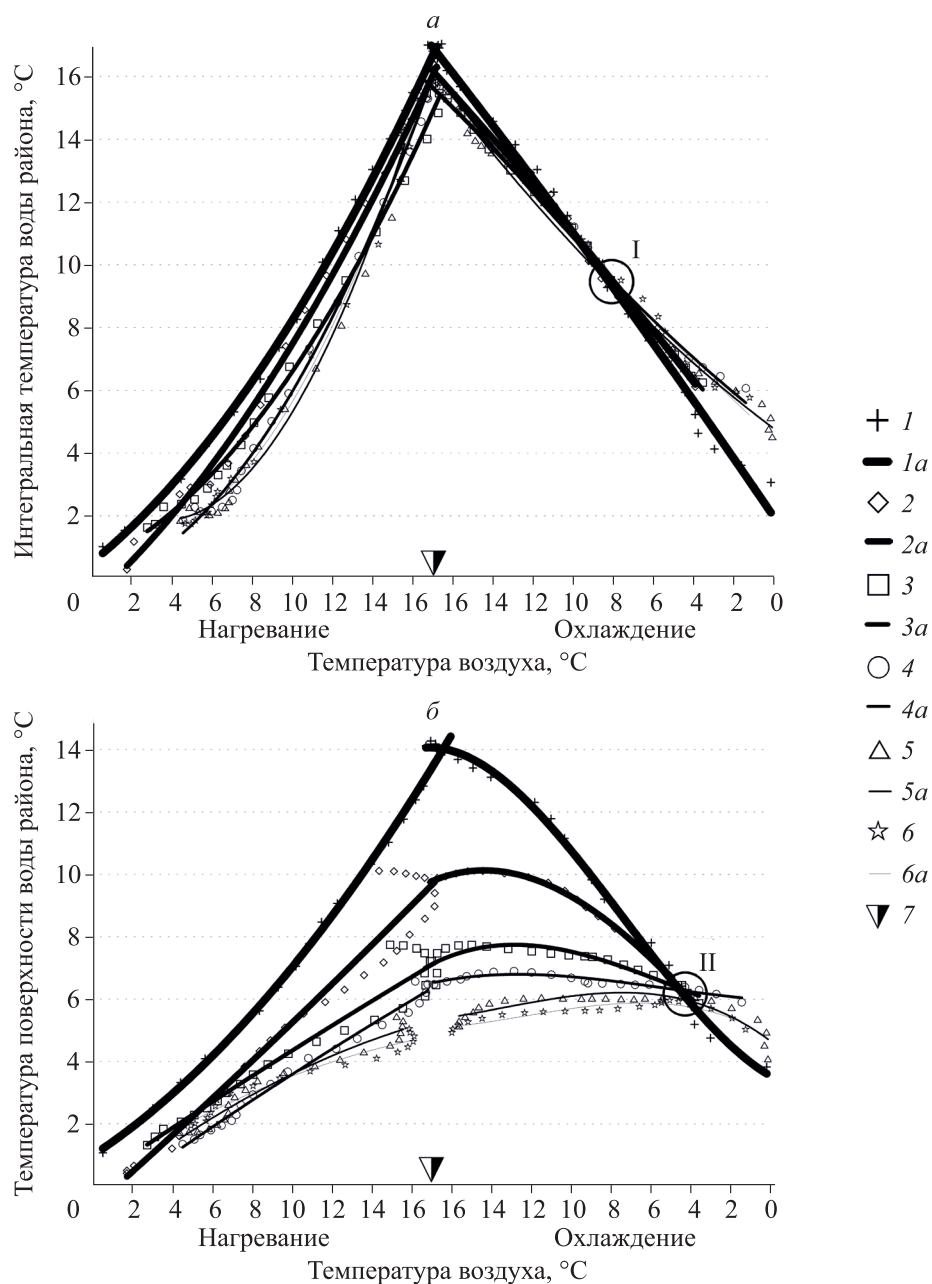


Рис. 2. Изменения температуры поверхности воды (а) и интегральной температуры лимнических районов (б) в зависимости от температуры воздуха для периода нагревания и охлаждения Ладожского озера.

1–6 — исходные данные для лимнических районов; 7 — переход от нагревания к охлаждению воздуха; 1a–6a — аппроксимационные кривые для лимнических районов. Период: I — одинаковой температуры поверхности озера (2–12 октября), II — одинаковой температуры всей водной массы озера (26 октября–6 ноября).

Коэффициенты регрессии a , b , c и детерминации R^2 для лимнических зон Ладожского озера

Температура, °C	Период	Коэффициент	Зоны и их глубины, м					
			1, 0–18	2, 18–50	3, 50–70	4, 70–100	5, 100–140	6, >140
Поверхности T_{ws}	Нагревание	a	0,508	–0,681	0,496	–0,118	2,865	1,422
		b	0,516	0,574	0,271	0,125	–0,578	–0,236
		c	0,026	0,024	0,034	0,048	0,082	0,066
		R^2	0,999	0,996	0,996	0,995	0,990	0,994
	Охлаждение	a	1,933	2,853	3,056	4,875	4,763	4,468
		b	0,942	0,861	0,855	0,497	0,479	0,585
		c	–0,004	0,004	–0,007	0,01	0,010	0,006
		R^2	0,994	0,994	0,998	0,994	0,991	0,991
Интегральная TW	Нагревание	a	0,964	–0,703	0,131	–0,807	–0,544	0,178
		b	0,420	0,568	0,435	0,462	0,512	0,423
		c	0,018	0,002	–0,002	0,002	–0,001	–0,009
		R^2	0,998	0,950	0,934	0,987	0,962	0,964
	Охлаждение	a	3,543	2,921	5,362	5,970	4,660	4,795
		b	0,371	0,817	0,158	0,040	0,479	0,379
		c	0,065	–0,009	0,019	0,009	–0,045	–0,040
		d	–0,003	–0,001	–0,001	–0,000	0,001	0,001
		R^2	0,996	0,998	0,860	0,870	0,804	0,852

Дифференцируя выражения (1) и (2), получаем приращение температуры поверхности воды (или интегральной температуры) Δ при увеличении (уменьшении) температуры воздуха на 1 °C:

$$\frac{\Delta T_{ws}}{\Delta T_a} = b + 2 \cdot c \cdot T_a, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta TW}{\Delta T_a} = b + 2 \cdot c \cdot T_a + 3 \cdot d \cdot T_a^2. \quad (4)$$

Очевидно, что приращения зависят от температуры воздуха T_a . Этот важный вывод указывает на то, что в течение года в различные периоды нагревания и охлаждения изменения температуры воды ΔT_{ws} (или ΔTW) будут определяться современными и ожидаемыми климатическими изменениями температуры приводного слоя воздуха и, таким образом, они могут быть оценены количественно с помощью выражений (3) и (4).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Среднеклиматический ход температуры поверхности воды T_{ws} различных районов Ладожского озера синхронно следует за температурой воздуха (см. рис. 2, *a*). Максимумы температуры T_{ws} всех районов возникают при достижении наибольшей температуры воздуха в каждом районе (см. рис. 2, *a*), однако существует временной сдвиг между экстремумами температуры воды; самый большой — две недели — между прибрежным мелководным районом и глубоководными впадинами.

Интегральная температура воды TW каждого района Ладожского озера пропорционально увеличивается только в период повышения температуры воздуха (см. рис. 2, *b*). Когда начинается ее понижение, лишь прибрежный мелководный район начинает практически одновременно охлаждаться, в отличие от всех более глубоководных районов. В последних в результате свободной конвекции, приводящей к поступлению тепла на глубину, продолжается нагревание водной массы.

Рисунок 2 и анализ пространственного распределения температуры поверхности воды всего озера позволили определить две важные даты, которые могут служить климатическими нормами. Первый период, когда поверхность всего озера имеет одинаковую температуру воды при минимальной дисперсии $8,8 \pm 0,1$ °C, — с 2 по 12 октября при средних климатических условиях при отсутствии апвеллингов (см. рис. 2, *a*, I). В это время средняя температура воздуха над акваторией Ладожского озера составляет 7,4 °C. Второй период, когда вся водная масса озера имеет среднюю одинаковую темпе-

ратуру по вертикали при минимальной дисперсии, $5,9 \pm 0,2$ °С (см. рис. 2, б, II). При средних климатических условиях это происходит с 27 октября по 6 ноября, средневзвешенная температура воздуха в этот период равна 2,9 °С.

Оценить скорости изменения температуры поверхности воды в зависимости от температуры приводного воздуха позволили выражения (3) и (4) с использованием коэффициентов таблицы. Отношение приращения температуры поверхности воды на один градус температуры воздуха — величина безразмерная; если, например, это отношение равно 1, то при изменении температуры воздуха на один градус температура воды также меняется на один градус. На рис. 3 приведены эти зависимости.

Очевидно увеличение приращения температуры поверхности воды $\frac{\Delta T_{ws}}{\Delta T_a}$ при росте температуры воздуха в диапазоне температур от 2 до 9–10 °С. Для мелководных районов в начале прогрева скорости составляют $-0,6 \div -0,7$, а для глубоководных $-0,1 \div -0,2$ (см. рис. 3). При температуре воздуха 10 °С

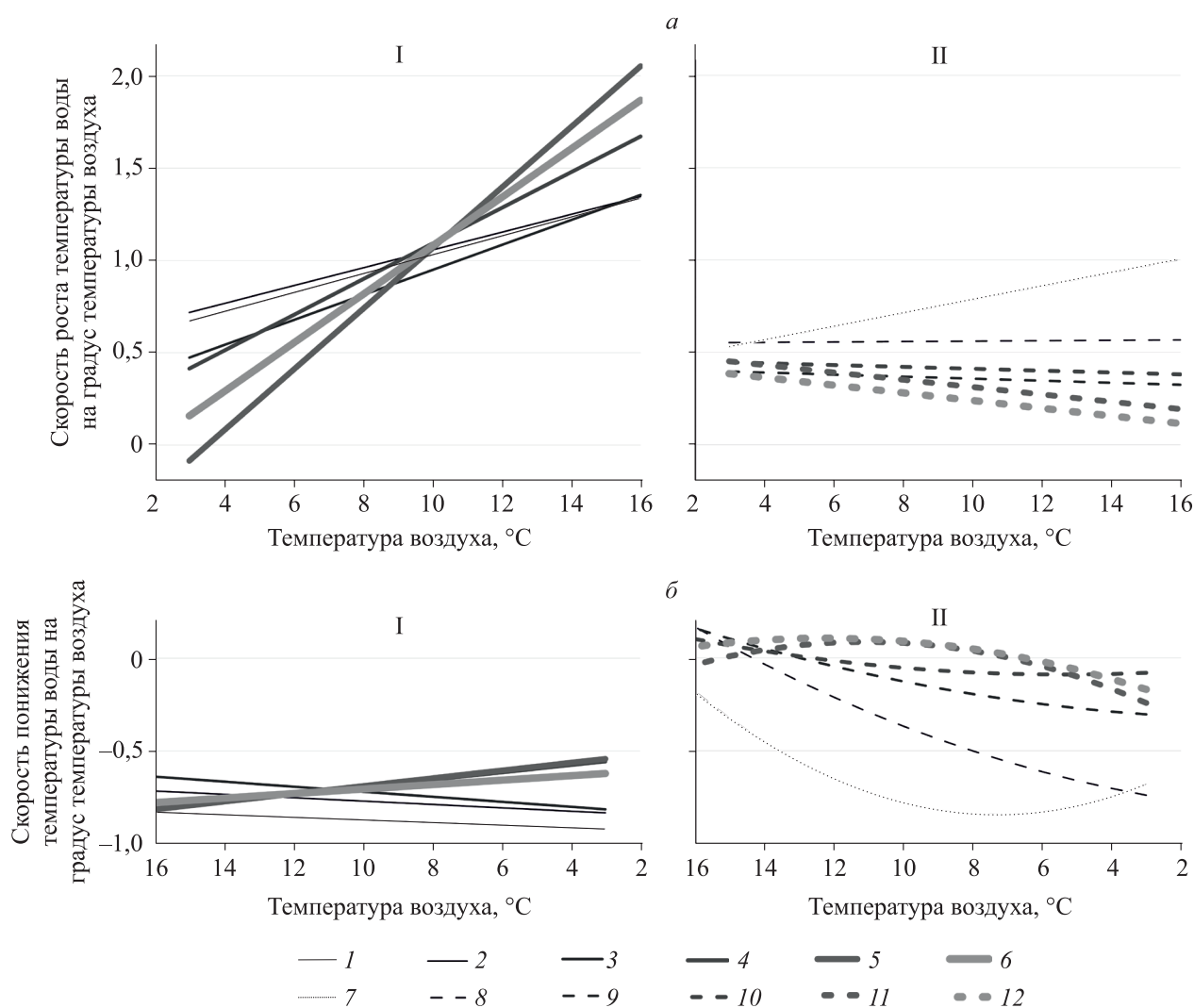


Рис. 3. Зависимости изменений температуры поверхности и интегральной температуры воды различных районов Ладожского озера при изменении температуры приводного слоя воздуха на один градус в периоды нагревания (а) и охлаждения (б).

Графики: I — температуры поверхности воды, II — температуры всей водной массы. Зависимости изменений температуры поверхности: 1 — района 1, 2 — района 2, 3 — района 3, 4 — района 4, 5 — района 5, 6 — района 6. Зависимости изменений интегральной температуры воды: 7 — района 1, 8 — района 2, 9 — района 3, 10 — района 4, 11 — района 5, 12 — района 6.

для всех районов скорости сравниваются, достигая 1. Это означает, что приращение температуры воздуха на 1 °С повышает температуру поверхности на эту же величину. При дальнейшем увеличении температуры воздуха вплоть до максимального значения скорости роста температуры поверхности продолжают расти, превышая скорость роста температуры воздуха. Это происходит в августе, что соответствует аналогичным результатам по оз. Онтарио [9]. Для глубоководных районов Ладожского

озера скорости $\frac{\Delta T_{ws}}{\Delta T_a}$ превышают скорости роста для мелководных районов на 50–60 %.

Скорость роста интегральных температур $\frac{\Delta T W}{\Delta T_a}$ районов, характеризующих теплозапасы, меньше $\frac{\Delta T_{ws}}{\Delta T_a}$. Скорость роста температуры воды $\Delta T W$ всегда выше у мелководных районов, увеличиваясь с возрастанием T_a , тогда как для глубоководных она уменьшается с возрастанием температуры воздуха. Это происходит из-за увеличения гидростатической устойчивости верхнего слоя воды.

При охлаждении поверхности воды скорость понижения практически постоянна при любой температуре воздуха (0,7–0,8) для всех районов озера с небольшим увеличением при низких температурах.

Скорости охлаждения поверхности $\frac{\Delta T_{ws}}{\Delta T_a}$ и понижения интегральных температур $\frac{\Delta T W}{\Delta T_a}$ мелководных районов, начиная с температуры воздуха 12 °С, что происходит в первой декаде сентября, когда Ладожское озеро достигает максимального теплосодержания, практически одинаковы.

Скорость понижения интегральных температур минимальна у самых глубоководных районов и примерно в 5–6 раз меньше, чем у мелководных.

Изменения температуры воды в озерах определяются изменениями составляющих теплового баланса, оценка каждой составляющей требует использования нескольких гидрометеорологических переменных, которые обычно не доступны. С. Пикколроаз и др. [28] разработали модель, связывающую температуры приводного слоя воздуха и поверхности воды озера для средних климатических условий и демонстрирующую при определенных гипотезах, что изменение температуры воздуха неявно содержит надлежащую информацию о других основных процессах, таких как приход коротковолновой радиации и ветровое воздействие, и поэтому может рассматриваться как единственная входная переменная модели. Данная модель была применена для оценки реакции оз. Верхнего на изменение климата для временных масштабов от месяца до нескольких лет [27]. Было показано, что вклад температуры воздуха в изменение температуры поверхности озера различается от месяца к месяцу, что определяется толщиной верхнего квазиоднородного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе натуральных данных и значимых корреляционных связей между средними климатическими циклами температуры воздуха, температуры поверхности воды и интегральной температуры лимнических районов мы получили оценки изменения температуры воды при изменении температуры воздуха на один градус. Эти приращения зависят от абсолютной температуры воздуха и, следовательно, от даты, когда эта температура возникает. Для периода нагревания максимальное приращение температуры воды происходит при максимальных температурах воздуха, причем это имеет место в самом глубоководной районе при формировании устойчивой стратификации. В первой декаде июля заканчивается свободная конвекция в глубоководной части озера, что приводит к формированию первичной стратификации всего озера, температура воздуха приводного слоя достигает 15–16 °С [29]. В этот период скорость роста температуры поверхности Ладожского озера максимальна.

Выводы, полученные на основе анализа климатических соотношений между измеренными температурами воздуха и воды Ладожского озера, подтверждают модельные расчеты [28]. При одной и той же температуре воздуха в период открытой воды для режимов нагревания и охлаждения изменения температуры воды различны для разных районов крупного озера. Повышение температуры воздуха по-разному будет влиять на рост температуры воды в разные сезоны. Скорость изменения температуры воды зависит от T_a , и, следовательно, по прогнозируемой температуре воздуха можно оценить климатическое повышение температуры поверхности воды Ладожского озера [13].

Таким образом, следует подчеркнуть, что необходимо более тщательно анализировать климатические тренды температуры воды и воздуха, их сезонную изменчивость в период открытой воды, не ограничиваясь традиционными среднемесячными величинами, а обращая внимание на более короткие периоды, которые могут иметь большую значимость для оценки трендов.

Климатические соотношения между температурой воздуха и температурами воды Ладожского озера, полученные впервые, полезны для сравнения с другими озерами Мира, что имеет важное значение для установления географических закономерностей климатических изменений в крупных озерах. Методическая основа статьи может быть применена для аналогичных оценок других озер.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института озероведения РАН по теме 0154–2019–0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schneider P., Healey N.C., Hulley G.C., Hook S.J. Lake Surface Temperature // In book Taking the Temperature of the Earth. — Amsterdam: Elsevier, 2019. — Ch. 4. — P. 129–150.
2. Фёдоров К.Н., Островский А.Г. Климатически значимые физические параметры океана. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 42 с.
3. Adrian R., O'Reilly C.M., Zagarese H., Baines S.B., Hessen D.O., Keller W., Livingstone D.M., Sommaruga R., Straile D., Donk E.V., Weyhenmeyer G.A., Winder M. Lakes as sentinels of climate change // Limnol. Oceanogr. — 2009. — Vol. 54, N 6. — P. 2283–2297.
4. O'Reilly C.M., Sharma S., Gray D.K., Hampton S.E., Read J.S., Rowley R.J., Schneider P., Lenters J.D., McIntyre P.B., 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.D., 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., Soylu 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, N 24. — P. 10773–10781.
5. Magee M.R., Wu Chin H. Response of water temperatures and stratification to changing climate in three lakes with different morphometry // Hydrol. Earth Syst. Sci. — 2017. — Vol. 21. — P. 6253–6274.
6. Stefan H.G., Fang X., Hondzo M. Simulated climate change effects on year-round water temperatures in temperate zone lakes // Climatic Change. — 1998. — N 40. — P. 547–576.
7. Schmid M., Hunziker S., Wüest A. Lake surface temperatures in a changing climate: a global sensitivity analysis // Climatic Change. — 2014. — N 124. — P. 301–315.
8. Zhong Y., Notaro M., Vavrus S.J., Foster M.J. Recent accelerated warming of the Laurentian Great Lakes: Physical drivers // Limnol. Oceanogr. — 2016. — N 61. — P. 1762–1786.
9. Huang A., Rao Y.R., Zhang W. On recent trends in atmospheric and limnological variables in Lake Ontario // Journ. of Climate. — 2012. — Vol. 25. — P. 5807–5816.
10. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал. — Новосибирск: Наука, 1977. — 150 с.
11. Шимараев М.Н., Троицкая Е.С. Тенденции изменения температуры верхнего слоя воды на прибрежных участках Байкала в современный период // География и природ. ресурсы. — 2018. — № 4. — С. 95–104.
12. Шимараев М.Н., Сизова Л.Н., Троицкая Е.С., Куимова Л.Н., Якимова Н.И. Ледово-термический режим озера Байкал в условиях современного потепления (1950–2017 гг.) // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 10. — С. 67–76.
13. Наumenko М.А., Гузиватый В.В., Каретников С.Г. О климатических трендах температуры поверхности воды Ладожского озера в безледный период // ДАН. — 2006. — Т. 408, № 5. — С. 675–678.
14. Winslow L.A., Read J.S., Hansen G.J.A., Rose K.C., Robertson D.M. Seasonality of change: Summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures // Limnol. Oceanogr. — 2017. — N 62. — P. 2168–2178.
15. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. — Л.: Наука, 1982. — 232 с.
16. Kraemer B.M., Anneville O., Chandra S., Dix M., Kuusisto E., Livingstone D.M., Rimmer A., Schladow S.G., Silow E., Sitoki L.M., Tamatamah R., Vadeboncoeur Y., McIntyre P.B. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change // Geophysical Research Letters. — 2015. — N 42. — P. 4981–4988.
17. Наumenko М.А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2013. — № 1. — С. 62–72.
18. Naumenko M.A. Lake Ladoga digital bathymetric models: development approaches and insight for limnological investigations // Limnological Review. — 2020. — Vol. 20, N 2. — P. 65–80.
19. Naumenko M.A., Karetnikov S.G., Tikhomirov A.A. Main features of the thermal regime of Lake Ladoga during ice-free period // Hydrobiologia. — 1996. — Vol. 322, N 1–3. — P. 69–73.
20. Наumenko М.А., Каретников С.Г., Гузиватый В.В. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера // ДАН. — 2000. — Т. 373, № 2. — С. 247–250.

21. **Науменко М.А., Гузиватый В.В.** Климатические вариации температурного режима Ладожского озера для периода открытой воды // Региональная экология. — 2010. — Т. 3, № 29. — С. 104–108.
22. **Гузиватый В.В., Каретников С.Г., Науменко М.А.** Опыт создания и использования банка термических данных Ладожского озера // География и природ. ресурсы. — 1998. — № 3. — С. 89–96.
23. **Сайт** Института озераедения РАН, Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН [Электронный ресурс]. — <http://limno.ru> (дата обращения 20.10.2020).
24. **Пилипенко А.В.** Эмпирические зависимости между параметрами теплообмена поверхности Ладожского озера и приводного слоя воздуха для периода открытой воды // Уч. зап. Росс. Гидромет. ун-та. — 2019. — Вып. 55. — С. 99–107.
25. **Pilipenko A.V., Naumenko M.A.** Spatial inhomogeneity of thermal interaction of Lake Ladoga surface with air boundary layer // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 321. — P. 012006.
26. **Эдельштейн К.К.** Лимнология. 2-е изд., испр. и доп. — М.: Изд-во «ЮРАЙТ», 2020. — 387 с.
27. **Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B.** The role of stratification on lakes' thermal response: The case of Lake Superior // Water Resour. Res. — 2015. — Vol. 51, N 10. — P. 7878–7894.
28. **Piccolroaz S., Toffolon M., Majone B.** A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperatures in lakes // Hydrol. Earth Syst. — 2013. — Vol. 17. — P. 3323–3338.
29. **Науменко М.А.** Особенности климатических соотношений температуры поверхности воды и приводного слоя воздуха в период весеннего прогрева Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2021. — Т. 14, № 2. — С. 78–88.

Поступила в редакцию 05.11.2020

После доработки 14.04.2021

Принята к публикации 13.10.2021