

**ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МАЛОГО
ПОЛИМИКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА ДЛЯ ПЕРИОДА ОТКРЫТОЙ ВОДЫ**

© 2022 г. Н. И. Пальшин^{a, *}, Т. В. Ефремова^{a, **}, С. Р. Богданов^{a, ***},
А. Ю. Тержевик^{a, ****}, Г. Э. Здоровеннова^{a, *****}, Р. Э. Здоровеннов^{a, *****}

^aИнститут водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

*E-mail: npalshin@mail.ru

**E-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

***E-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru

****E-mail: ark1948@list.ru

*****E-mail: zdorovennova@gmail.com

*****E-mail: romga74@gmail.com

Поступила в редакцию 14.09.2021 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 24.02.2022 г.

Исследовано влияние погодных условий на формирование термической структуры малого полимиктического озера умеренной зоны в период открытой воды на основе анализа данных ежедневных многолетних (2007–2020 гг.) натуральных измерений. Показано, что в период весенне-летнего нагревания озера Вендюрское (Карелия) с мая по первую половину августа на температуру верхнего слоя воды (горизонт ~2 м) основное воздействие оказывает синоптическая изменчивость температуры воздуха. На средних глубинах (горизонт ~6 м) влияние синоптических колебаний температуры воздуха на температуру воды существенно уменьшается, при этом возрастает роль сезонных изменений в аккумуляции тепла. В придонном слое (горизонт ~11 м) флуктуации температуры воды, главным образом, определяются эпизодами полного перемешивания озерной водной массы при прохождении циклонов, то есть зависят от усиления ветров, приводящих к полному разрушению стратификации. В период охлаждения озера со второй половины августа до установления ледяного покрова (ноябрь–декабрь), на фоне снижения роли синоптической изменчивости возрастает влияние сезонной изменчивости температуры воздуха на температуру воды. Колебания температуры воздуха объясняют более 50% дисперсии данных температуры воды эпилимниона в период весенне-летнего нагревания и всех слоев водной толщи в период осенне-зимнего охлаждения. Разработана эмпирическая модель зависимости температуры воды от синоптических и сезонных изменений температуры воздуха в период открытой воды. В модели не учитывается теплообмен с донными отложениями, т.к. в период открытой водной поверхности он на 1–2 порядка меньше величины суммарного теплообмена с атмосферой.

Ключевые слова: малое полимиктическое озеро, температура воды, термическая стратификация, температура воздуха, синоптическая изменчивость, сезонная изменчивость, климатическая изменчивость, эмпирическая модель

DOI: 10.31857/S0869607122020033

ВВЕДЕНИЕ

Термический режим — элемент экосистем водоемов, наиболее чувствительный к погодным и климатическим изменениям. Температура воды непосредственно влияет на протекание биохимических реакций, т.е. на гидрохимический режим и формирование биологических систем. В последние десятилетия обеспокоенность по поводу воздействия глобальных изменений климата на условия в водных экосистемах вызвала повышенный интерес к оценкам изменений температуры воды. Анализ натуральных данных многолетних измерений и спутниковых наблюдений показал, что повышение поверхностной температуры воды сезонно замерзающих озер в умеренных широтах Северной Америки и Европы происходит значительно быстрее, чем в среднем в мире [14, 19]. Наибольшие темпы повышения температуры воды поверхностного слоя отмечаются в крупных глубоководных озерах, причем летом температура поверхности воды в этих озерах растет быстрее, чем температура приземного слоя воздуха [21, 23]. В глубоких озерах повышение температуры воздуха оказывает влияние на температуру воды гипolimниона преимущественно в периоды до установления и после разрушения стратификации. Ранние сроки установления термической стратификации в озерах весной обычно приводят к более низким значениям температуры воды под термоклином в летний период [12, 15]. Температура воды в эпилимнионе в озерах в первую очередь связана с погодой, а во вторую — с морфометрией озер; в гипolimнионе температура воды преимущественно связана с морфометрией и перемешиванием весной и только во вторую очередь — с погодой летом [16].

Поскольку температура воды играет большую роль в экосистеме озера, возникает необходимость надежного ее прогнозирования. За последние три десятилетия были разработаны модели термического режима озер различной степени сложности, начиная от простых моделей регрессии [16, 18] до более сложных численных одномерных [13, 15] и трехмерных моделей [11, 17, 22].

Регрессионные модели разрабатываются по результатам анализа данных длительных натуральных измерений температуры воды в озерах; такие модели менее точны, чем численные, но в силу своей простоты более доступны для широкого круга исследователей [7, 10, 16]. Как правило, в регрессионных моделях температуры воды озер в качестве предиктора используется температура воздуха [10, 20], как один из главных показателей климатической и синоптической изменчивости в регионе исследований. Изменчивость погодных условий определяет направленность суммарного потока тепла на поверхности водоемов, а также развитие физических процессов в водной толще. Совместный анализ данных натуральных измерений температуры воздуха и температуры воды поверхностного слоя в различных озерах в периоды их нагревания и охлаждения показывает, что величина коэффициентов связи между этими параметрами изменяется в пределах от 0.5–0.7 до 0.9–1.0 [10, 16].

Целью данной работы было исследование реакции температуры воды малого полимиктического озера умеренной зоны на сезонную и синоптическую изменчивость температуры воздуха в период открытой воды с учетом инерционности нагревания/охлаждения верхнего, среднего и придонного слоев воды, и разработка простой эмпирической модели термической структуры озера в период открытой воды, используемой в качестве предиктора температуры воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — оз. Вендюрское — расположено в южной части Карелии ($62^{\circ}10'–62^{\circ}20' \text{ N}$, $33^{\circ}10'–33^{\circ}20' \text{ E}$), в нижней части водосбора р. Суны (притока Онежского озера). Батиметрическая карта озера приведена в [3]. Площадь водосбора озера 79.8 км^2 ; залесенность водосбора составляет 54%, заболоченность — 20%, озерность — 24%. Котловина озера ледникового происхождения. Площадь зеркала оз. Вендюрско-

го 10.1 км², длина 6.5 км, наибольшая ширина 2.9 км, объем вод 60.9 млн м³, средняя глубина 6.1, максимальная 12.1 м [6]. В озеро впадает р. Риндозерка и два ручья, период его условного водообмена составляет 2.5 года. По химическому составу воды озеро относится к гидрокарбонатному классу группы кальция (минерализация 19.4 мг/л); озеро мезотрофное, олигогумусное [6]. Глубина прозрачности по диску Секки достигает 3 м, коэффициент экстинкции составляет 1.0–1.2 м⁻¹. На берегу оз. Вендюрского расположена дер. Вендеры. Озеро используется в рекреационных целях и для любительского рыболовства, а в 2011 г. на его акватории были установлены садки для выращивания форели.

Начиная с 1994 г., в рамках различных научных программ ИВПС КарНЦ РАН проводились регулярные исследования озера Вендюрского с целью изучения гидрофизических процессов и их влияния на озерную экосистему. До 2007 г. основное внимание уделялось формированию зимнего термического и кислородного режимов озера.

С появлением в 2007 г. в лаборатории гидрофизики ИВПС КарНЦ РАН современных автономных приборов, появилась возможность проводить детальные комплексные исследования термической структуры озера в годовом цикле. В период с июля 2007 г. по октябрь 2020 г. в центральной глубоководной части озера Вендюрского проводились измерения температуры воды на автономной буйковой станции – термокесе, которая была оснащена высокочувствительными датчиками температуры (RBR Ltd, точность по температуре 0.002°C). Термодатчики были распределены через 0.5–1.5 м в водной толще и через 2–25 см в придонном слое, дискретность измерений по времени составляла одну минуту.

Анализ данных 1994–2020 гг. показал, что ледовый покров на озере устанавливается в ноябре–декабре при средней температуре столба воды в центральной глубоководной части озера 0.1–1.5°C, очищение ото льда обычно происходит в первой–второй декадах мая, а температура водной толщи в результате теплообмена с донными отложениями и весеннего подледного нагревания и конвективного перемешивания достигает 3.5–4.5°C к концу ледостава. Измерения 2007–2020 гг. позволили установить, что после освобождения ото льда водная толща озера полностью перемешивается и в течение мая нагревается; при этом периоды установления слабой стратификации сменяются эпизодами полного перемешивания. В целом в период весенне-летнего нагревания термическая стратификация в оз. Вендюрском неустойчива, что характерно для малых неглубоких водоемов умеренной зоны. Стратификация усиливается в течение июня и июля, и наибольший прогрев верхнего слоя озера (эпилимниона), как правило, наблюдается во второй половине июля – первой декаде августа. По среднемноголетним данным температура верхнего слоя воды (эпилимниона) оз. Вендюрского в этот период почти в 1.5 раза выше, чем температура придонного слоя на глубинах более 10 м (гиполимниона). Температура воды придонных слоев глубоководных котловин постепенно повышается в течение мая–июля, обычно достигая максимальных значений в августе при разрушении сезонного термоклина. Этап осеннего перемешивания начинается в середине–конце августа и продолжается до конца октября, при этом водная толща охлаждается в состоянии гомотермии, изредка переходя в состояние слабой стратификации на фоне кратковременных повышений температуры воздуха и ослабления ветровой нагрузки.

Таким образом, за годы измерений накоплен большой объем натуральных данных, достаточный для разработки эмпирической модели температуры воды в озере в период открытой воды. В модели не учитывается теплообмен с донными отложениями, т.к. в период открытой водной поверхности он на 1–2 порядка меньше величины суммарного теплообмена с атмосферой [3].

Данные по температуре воздуха и ветру за 2007–2020 гг. по метеостанции (МС) Петрозаводск (расстояние от оз. Вендюрского 70 км) были получены на сайте “Расписание погоды” [8]. Для характеристики изменчивости регионального климата южной

Карелии использовались данные по температуре воздуха, полученные на сайте Мирового центра данных [2].

Для оценки климатической изменчивости температуры воздуха в регионе исследований за последние 70 лет были проанализированы тренды температуры воздуха в 1950–2020 гг. для каждого месяца года. Статистическая значимость трендов оценивалась по критерию Стьюдента и непараметрическому тесту Манна–Кендалла. Данные обрабатывались с использованием пакетов Excel и Statistica. Для периода с мая по ноябрь в 1961–1990 гг. (климатическая норма) и в 1991–2020 гг. вычислены среднесуточные значения температуры воздуха. Рассчитаны отклонения среднемесячной температуры воздуха от климатической нормы 1961–1990 гг. для месяцев с мая по ноябрь в 1991–2020 гг., а также дополнительно в относительно прохладный сезон открытой воды 2008 г. и аномально теплый сезон открытой воды 2010 г.

Выполнен спектральный анализ методом простого преобразования Фурье рядов температуры воздуха по МС Петрозаводск и рядов температуры воды оз. Вендюрского в верхнем (2 м), среднем (6 м) и придонном (11 м) горизонтах. Данные по температуре воздуха за период с мая по ноябрь по каждому году, начиная с 2007 г. и заканчивая 2020 г., объединялись в один непрерывный ряд, который затем анализировался. Такая же процедура была проделана с данными по температуре воды для выбранных горизонтов измерений термокосы (2, 6, 11 м). Дискретность рядов температуры воздуха составила 3 часа (восьмисрочные наблюдения на МС); исходные минутные данные измерений температуры воды были осреднены по три часа для того, чтобы ряды данных температуры воздуха и воды были соизмеримы. При проведении спектрального анализа сезонный ход температуры воздуха и воды не устранялся.

Связь между температурой воды на горизонте z на конкретную дату измерений d и температурой воздуха за каждые сутки предшествующего месяца можно представить в виде:

$$T_{wz} = \sum_{d=30} q_d T_{ad}, \quad (1)$$

где T_{wz} и T_{ad} – температура воды на горизонте на конкретную дату и температура воздуха в разные дни предшествующего месячного периода, q_d – весовой коэффициент влияния температуры воздуха каждых отдельных суток предшествующего месяца; значения этого коэффициента, вероятно, должны возрастать по мере приближения к дате наблюдения температуры воды.

Для упрощения вычислений использовалась двухполосная модель, отражающая инерцию в нагревании/охлаждении слоев воды под воздействием относительно быстрой смены синоптических погодных условий, а также аккумуляцию/потерю тепла в водной толще за длительный период в результате внутрисезонных межгодовых колебаний погоды:

$$T_{z,d} = \bar{T}_{z,d} + \Delta T_{z,d}, \quad (2)$$

$$\Delta T_{z,d} = a_z + b_z \Delta T_{a,i} + c_z \Delta T_{a,j}, \quad (3)$$

где $\bar{T}_{z,d}$ и $\Delta T_{z,d}$ – среднееголетняя температура воды на горизонте z на текущую дату d и отклонения от нее измеренных значений; $\Delta T_{a,i}$ и $\Delta T_{a,j}$ – отклонения температуры воздуха на текущую дату от среднееголетних значений (\bar{T}_{ai} и \bar{T}_{aj}), обусловленные сезонной (индекс – i) и синоптической (индекс – j) изменчивостью; a_z , b_z и c_z – эмпирические параметры на горизонте z .

Модельные кривые усредненных многолетних циклов температуры воздуха и температуры воды на трех горизонтах водной толщи (2, 6 и 11 м) оз. Вендюрского за многолетний период (2007–2019 гг.) были получены в результате аппроксимации натуральных данных полиномами шестой степени. Временные ряды температуры воздуха

предварительно сглаживались фильтрами скользящего среднего по разным периодам усреднения (3 и 27 суток, 5 и 25 суток) за месяц, предшествующий измерениям температуры воды. Вычитание усредненных многолетних данных из измеренных значений на каждую дату позволило получить данные по отклонениям для температуры воздуха и воды за все годы наблюдений. В результате множественного регрессионного анализа отклонений температуры воды и воздуха были подобраны (в соответствии с максимальными коэффициентами детерминации) необходимые периоды усреднения для температуры воздуха, которые отражали бы сезонную (6–30 предшествующие сутки от даты измерений температуры воды) и синоптическую (1–5 предшествующие сутки) изменчивость. Измерения температуры воды в оз. Вендюрском в 2020 г. не входили в выборку для разработки эмпирической модели, а были использованы для верификации модельных расчетов.

В фазах роста и понижения температуры воды интегральные потоки тепла на поверхности озера отличаются: в условиях нагревания воды происходит усиление плотностной стратификации, а при осеннем охлаждении интенсифицируется свободная конвекция, т.е. доминирующие механизмы перемешивания водной толщи различаются, поэтому регрессионные уравнения были получены отдельно для этапов весенне-летнего нагревания и осеннего охлаждения. Для этапа осеннего охлаждения, когда водная толща озера находилась в состоянии гомотермии, данные по температуре воды на разных горизонтах объединялись в одну выборку.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным МС Петрозаводск за период 1950–2020 гг. установлены значимые положительные линейные тренды температуры воздуха ($p < 0.05$) для января–мая и июля–сентября. В июне и октябре–декабре температура воздуха также повышалась, но тренды были статистически не значимы. Скорость повышения температуры воздуха в рассмотренный период была наибольшей в январе–марте и достигала $0.05^\circ\text{C}/\text{год}$. В мае и декабре температура повышалась в среднем на $0.04^\circ\text{C}/\text{год}$, в июле, сентябре и ноябре – на $0.03^\circ\text{C}/\text{год}$. Меньшая скорость повышения температуры наблюдалась в апреле и августе – $0.02^\circ\text{C}/\text{год}$, а в июне и октябре не превышала $0.01^\circ\text{C}/\text{год}$.

На рис. 1а приведены среднесуточные значения температуры воздуха по МС Петрозаводск за периоды 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг. соответственно. Также показаны значения температуры воздуха в аномально жаркий 2010 г. и относительно прохладный 2008 г. Положительные отклонения средних температур воздуха (рис. 1б) за все месяцы в 1991–2020 гг. от климатической нормы указывают на потепление регионального климата.

В результате спектрального анализа временных рядов установлены преобладающие периоды колебаний температуры воздуха и воды (рис. 2б); доверительные интервалы с вероятностью 0.95 и 0.05 составляли 0.48 и 1.66 от значений пиков в дискретных энергонесущих зонах. Совпадающие в низкочастотной области колебания температуры воздуха и воды с периодами 6.5 и 2.2 года характеризуют межгодовую изменчивость. В сезонных флуктуациях установлены близкие по энергии колебания для температуры воздуха и воды с периодами: 79–82, 53–62, 37–43, 30–33, 21, 10, 7–8, 3.5 и 1 сутки (рис. 2б).

Периодичности колебаний температуры воздуха и воды близки, но на энергии колебаний температуры воды сказывается инерция в нагревании/охлаждении, что приводит к уменьшению их спектральной плотности мощности по сравнению с температурой воздуха. Особенно это заметно для колебаний температуры воды с периодами меньше одного месяца, для которых спектральная плотность мощности постепенно уменьшается и отличается от температуры воздуха на один–полтора порядка, а для колебаний с периодом синоптической изменчивости (3–7 суток) – почти на два порядка

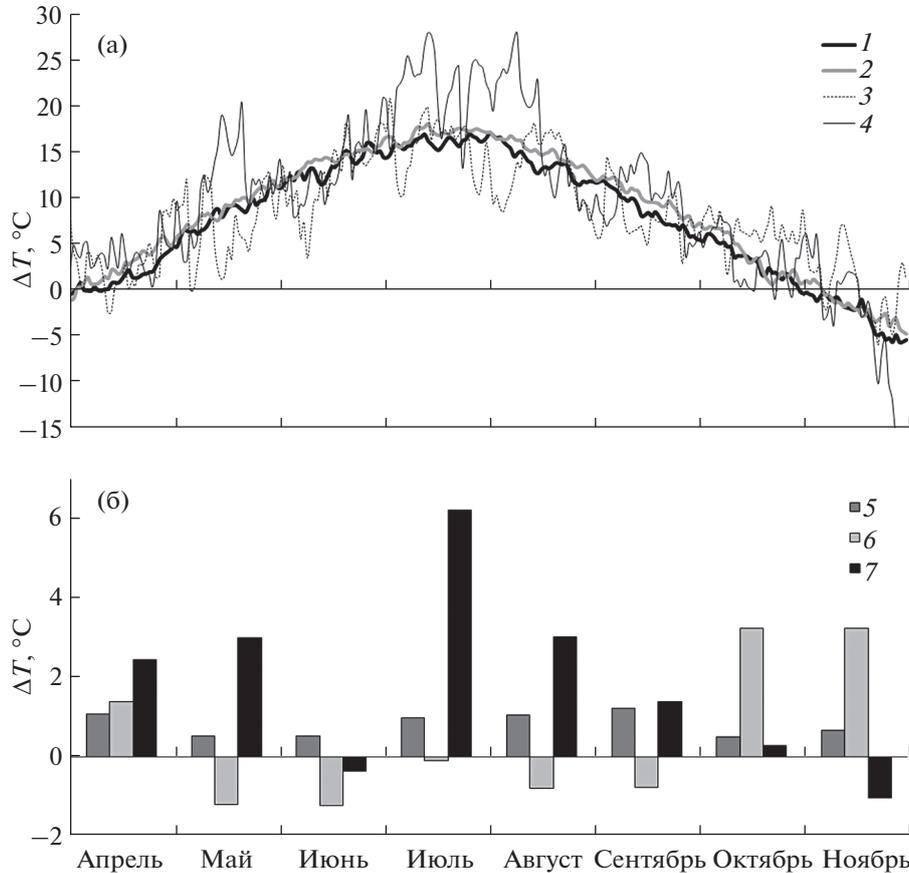


Рис. 1. а – Среднесуточные значения температуры воздуха по метеостанции Петрозаводск в апреле–ноябре: 1 – 1961–1990 гг., 2 – 1991–2020 гг., 3 – 2008 г., 4 – 2010 г.; б – Отклонения среднемесячной температуры воздуха в 1991–2020 гг. (5), 2008 г. (6) и 2010 г. (7) от климатической нормы 1961–1990 гг.

Fig. 1. а – Average daily air temperatures at the Petrozavodsk meteorological station in April–November: 1 – 1961–1990, 2 – 1991–2020, 3 – 2008, 4 – 2010; б – Deviations of the average monthly air temperature in 1990–2020 (5), 2008 (6), and 2010 (7) from the baseline 1961–1990.

(колебания температуры воздуха на 10°C приводят к изменениям температуры воды на 1°C).

Существенный вклад в дисперсию данных вносят также суточные колебания – как для температуры воздуха, так и для температуры воды, включая придонный слой, но по спектральной плотности мощности они отличаются почти на три порядка: колебания температуры воздуха на 10°C приводят к изменениям температуры воды на 0.3°C . Визуальное сравнение колебаний температуры воздуха и воды на глубине 2 м за периоды открытой водной поверхности в мае–ноябре 2007–2020 гг. показано на рис. 2а.

Изменчивость температуры воздуха и воды на трех горизонтах в оз. Вендюрском с мая по ноябрь в 2007–2019 гг., а также аппроксимация данных полиномами шестой степени приведены на рис. 3. На рисунке хорошо видны отклонения измеренных значений в разные годы от усредненных циклов. Наибольший разброс данных на стадии нагревания озера с мая по первую декаду августа соответствует температуре воздуха,

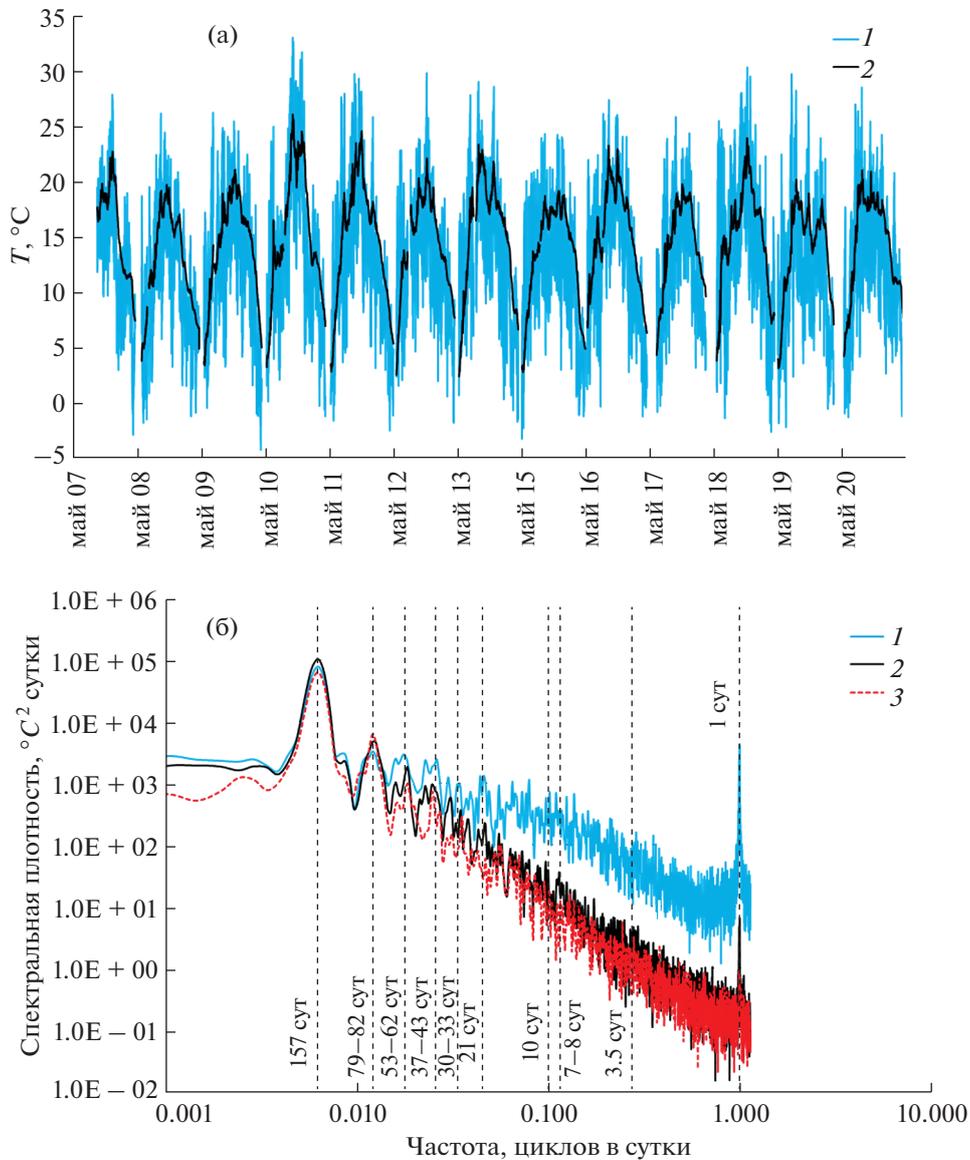


Рис. 2. а – Температура воздуха по метеостанции Петрозаводск (1) и температура воды в оз. Вендюрском на глубине 2 м (2) в мае–ноябре 2007–2020 гг.; б – спектры температуры воздуха (1) и температуры воды на глубинах 2 м (2) и 11 м (3) за период открытой воды в 2007–2020 гг.

Fig. 2. а – Air temperature according to MS Petrozavodsk (1) and water temperature in Lake Vendyurskoe at a depth of 2 m (2) in May–November 2007–2020; б – spectra of air temperature (1) and water temperature at a depth of 2 (2) and 11 m (3) for the open water period in 2007–2020.

осредненной за 5 суток (рис. 3а; стандартное отклонение температуры от модельных кривых 3.1°C , наибольшее $\pm 9^{\circ}\text{C}$), и среднесуточной температуре воды на верхнем горизонте (рис. 3б, стандартное отклонение 2.08°C , наибольшее $\pm 6^{\circ}\text{C}$). На горизонтах

Таблица 1. Периоды и горизонты (z) измерений температуры воды, и параметры регрессионной модели в периоды нагревания и охлаждения оз. Вендюрского: количество измерений (N_z), коэффициент корреляции (R_z), стандартная ошибка ($\pm \Delta T_z$, °C), свободный член (a_z , °C) и регрессионные коэффициенты сезонной (b_z) и синоптической изменчивости (c_z)

Table 1. Periods and depths (z) of water temperature measurements, and parameters of the regression model during periods of heating and cooling of the Lake Vendyurskoe: number of measurements (N_z), correlation coefficient (R_z), standard error ($\pm \Delta T_z$, °C), free term (a_z , °C) and regression coefficients of seasonal (b_z) and synoptic variability (c_z)

Период измерений, фаза	z , м	N_z	Вариант 1				Вариант 2				
			R_z	ΔT_z	a_z	b_z	R_z	ΔT_z	a_z	b_z	c_z
2 мая–15 августа, нагревание	2	1121	0.790	1.30	-0.029	0.864	0.908	0.89	-0.041	0.417	0.456
2 мая–19 августа, нагревание	6	1157	0.657	1.01	0.009	0.455	0.660	1.01	0.009	0.354	0.103
2 мая–22 августа, нагревание	11	1205	0.261	1.24	0.030	0.173	0.262	1.24	0.030	0.151	0.021
16 августа–10 декабря, охлаждение	2, 6, 11	3343	0.722	0.79	0.012	0.627	0.834	0.63	0.044	0.426	0.292

6 м и 11 м разброс данных в этот период не превышает $\pm 4^\circ\text{C}$, стандартные отклонения 1.33 и 1.31°C (рис. 3в, 3г). В период осеннего охлаждения озера в разные годы отклонения температуры воды от усредненных годовых циклов для всех горизонтов водной толщи не превышали $\pm 3^\circ\text{C}$, а стандартные отклонения составляли от 1.12 до 1.18°C .

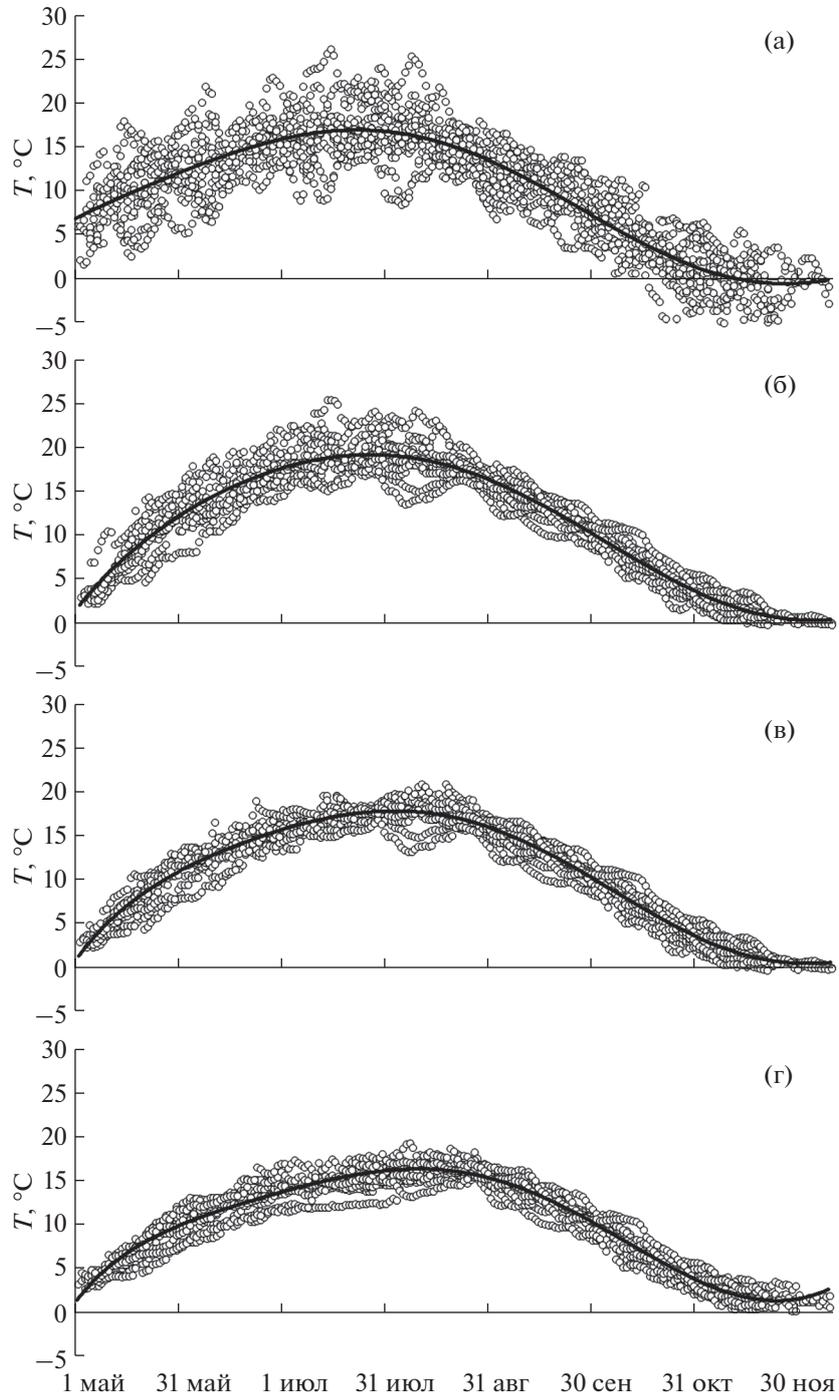
Отклонения температуры воздуха и воды от среднемноголетних циклов на стадиях нагревания и охлаждения озера существенно различаются (рис. 3); в связи с этим целесообразно полугодовые циклы температуры воздуха и воды разделить на две фазы: нагревания и охлаждения.

Для каждого из этих периодов регрессионный анализ данных был выполнен методом наименьших квадратов в двух вариантах (табл.): вариант 1 – с учетом сезонной изменчивости температуры воздуха, усредненной за 30 суток предшествующего периода; вариант 2 – с учетом сезонной и синоптической изменчивости температуры воздуха. При этом предшествующий месяц был разделен на два временных интервала: 6–30 суток и 1–5 суток от даты измерения температуры воды.

Сравнение коэффициентов корреляции и стандартных ошибок показало, что второй вариант расчета с учетом синоптической изменчивости предпочтительнее для верхнего горизонта (2 м) в период нагревания озера и для всего водного столба в период осеннего охлаждения. Стандартные ошибки в модельных расчетах обусловлены, главным образом, неучтенными эффектами в изменчивости интегрального потока тепла на границе воздух-вода с периодом ≤ 1 суток, а также эффекта ветрового перемешивания слоев воды. Для учета колебаний температуры воды с периодом меньше суток необходимо принимать во внимание изменчивость солнечной радиации, длинноволно-

Рис. 3. Температура воздуха по метеостанции Петрозаводск, осредненная за 5 суток, предшествующих дате измерений температуры воды (а, $R^2 = 0.797$), и среднесуточная температура воды в оз. Вендюрском на глубинах 2 м (б, $R^2 = 0.922$), 6 м (в, $R^2 = 0.950$) и 11 м (г, $R^2 = 0.937$) в период с мая по ноябрь в 2007–2019 гг. Сплошные линии – полиномиальная аппроксимация.

Fig. 3. Air temperature at the Petrozavodsk meteorological station, averaged over 5 days preceding the date of water temperature measurements (a, $R^2 = 0.797$), and the daily averaged water temperature in the Lake Vendyurskoe at depths of 2 m (б, $R^2 = 0.922$), 6 m (в, $R^2 = 0.950$) and 11 m (г, $R^2 = 0.937$) from May to November in 2007–2019. Solid lines mark polynomial approximation.



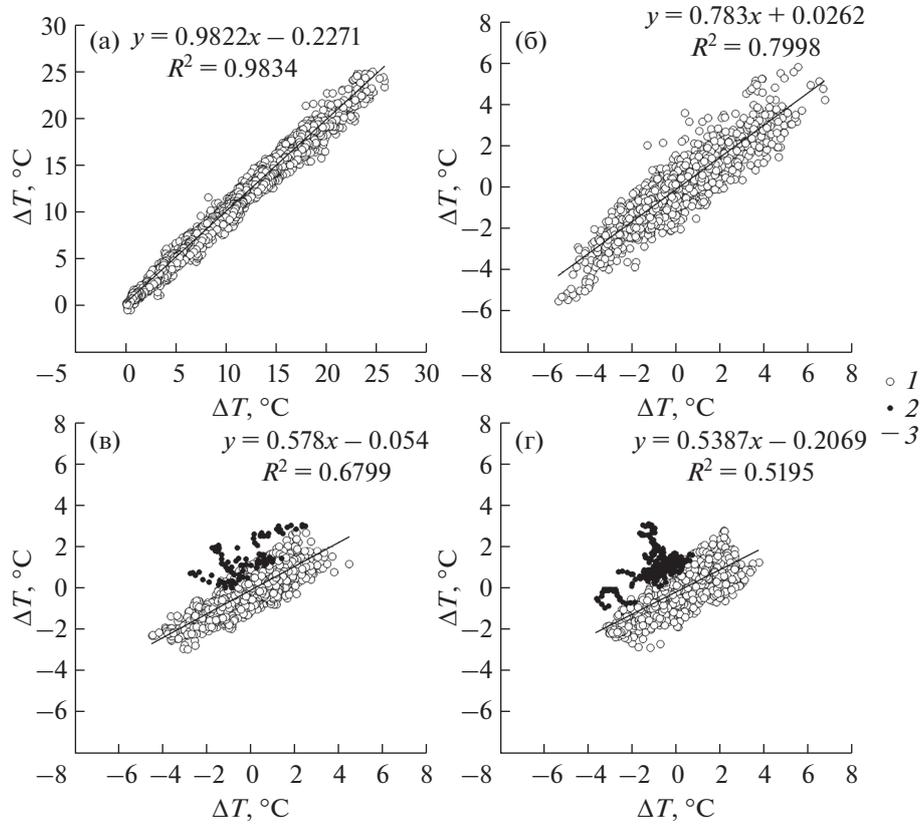


Рис. 4. а – отношение измеренной температуры воды на глубине 2 м в 2007–2019 гг. в период мая по ноябрь (ось ОХ) к рассчитанной по модели (ось ОУ), отношение отклонений температуры воды, измеренной (ось ОХ) и рассчитанной по модели (ось ОУ) на глубинах 2 м (б), 6 м (в) и 11 м (г) от значений, осредненных за период 2007–2019 гг.: 1 – водная толща перемешана, 2 – стратификация, 3 – линия тренда.

Fig. 4. а – ratio of the measured water temperature at a depth of 2 m in 2007–2019 from May to November (OX axis) to the model calculations (OY axis), the ratio of deviations of water temperature measured (OX axis) and modelled (OY axis) at depths of 2 m (б), 6 m (в), and 11 m (г) from the values averaged over the period 2007–2019: 1 – the water column is mixed, 2 – stratification, 3 – trend line.

вой радиации, чувствительного и скрытого потоков тепла на поверхности воды, что существенно усложнило бы модель для применения ее в прогностических целях.

При формировании стратификации в весенне-летний период синоптическая изменчивость оказывает существенно меньшее влияние на нагревание слоев воды ниже термоклина. Во втором варианте расчетов, в соответствии с установленными численными значениями регрессионных коэффициентов b_z и c_z на горизонтах 6 и 11 м, преобладают сравнительно медленные изменения температуры воды, обусловленные аккумуляцией тепла в результате внутрисезонной изменчивости.

Диаграммы сравнения измеренных и рассчитанных по второму варианту модели значений температуры воды (горизонт 2 м) и отклонений температуры воды на трех горизонтах (2, 6, 11 м) от значений, усредненных за период 2007–2019 гг., приведены на рис. 4.

Для верхнего слоя (горизонт 2 м) регрессионная модель достаточно хорошо описывает изменения температуры воды. При уменьшении интенсивности ветрового перемешивания в период весенне-летнего нагревания температура воды в верхнем слое увеличивается даже с несколько большей скоростью, чем при средних условиях, а на горизонтах 6 и 11 м рост температуры воды подавляется усилением плотностной стратификации, которая оказывает влияние на перемешивание. На рис. 4в, 4г точки, относящиеся к маловетренным периодам и выпадающие из общей закономерности, которую описывает регрессионная модель, окрашены в черный цвет.

Верификация модельных расчетов по данным измерений 2020 г. (рис. 5) показала удовлетворительное соответствие наблюдаемых и рассчитанных значений температуры воды почти на протяжении всего периода с 9 мая по 20 октября, за исключением периода с середины июня до второй декады июля, когда наблюдались маловетренные условия с усилением термической стратификации в озере. Расчеты для этого периода на стохастической модели, которая ориентирована на средние, наиболее типичные условия ветровой нагрузки, показали заниженные значения для горизонта 2 м по сравнению с натурными данными. Для горизонта 6 м измеренные и рассчитанные значения температуры воды были близкими, но для горизонта 11 м различия достигали 3°C, что в два раза превышает среднеквадратическое отклонение.

ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаруженные нами тенденции изменения температуры воздуха в 1950–2020 гг. в разные месяцы года по метеостанции Петрозаводск совпадают с ранее показанными трендами для различных метеостанций Карелии за период 1953–2011 гг. [5] и северо-запада России за период с 1990 г. до 2020 г. [9]. Положительные тренды температуры воздуха в Карелии соответствуют глобальным изменениям погоды в Европейской части России, для которой выделен период ускоренного роста температуры приземного воздуха с 1976 г. [4].

Спектральный анализ рядов температуры воздуха по метеостанции Петрозаводск и температуры воды в оз. Вендюрском с мая по ноябрь в 2007–2020 гг. позволил выделить колебания с близкими периодами, характеризующими межгодовую (6 лет и 2.2 года), сезонную и синоптическую изменчивость (от 1 до 82 суток). Колебания температуры воды с периодами от двух до шести лет, обнаруженные в озерах Карелии [5], соответствовали изменчивости индекса североатлантического колебания (NAO) за летний сезон, что может свидетельствовать о том, что формирование термического режима озер Карелии находится под активным влиянием Северной Атлантики. Обнаруженный двухлетний цикл температуры воды в оз. Вендюрском может быть обусловлен “квазидвухлетней цикличностью”, которая вносит наибольший вклад в дисперсию межгодовых колебаний температуры воздуха над западными территориями России (по данным 1886–1999 гг.); эту цикличность М.Ю. Бардин связывал с колебаниями погодных условий в направлении “запад–восток” [1].

Мы использовали температуру воздуха в качестве предиктора в эмпирической модели температуры воды оз. Вендюрского и показали, что отклонения температуры воздуха в разные годы объясняют более 50% дисперсии данных температуры воды в период охлаждения и температуры воды эпилимниона в период нагревания. Полуэмпирическая модель, представленная в работе [20], также хорошо оценивает температуру воды перемешанного поверхностного слоя разнотипных озер в зависимости только от температуры воздуха. В эмпирической модели для озера Мендота [16] получены регрессионные уравнения, связывающие температуру воды эпилимниона и гиполимниона со среднемесячной, максимальной и минимальной за месяц температурами воздуха, а также с другими метеорологическими параметрами: среднемесячной облачностью, скоростью ветра, максимальной суточной скоростью ветра. Авторы этой работы

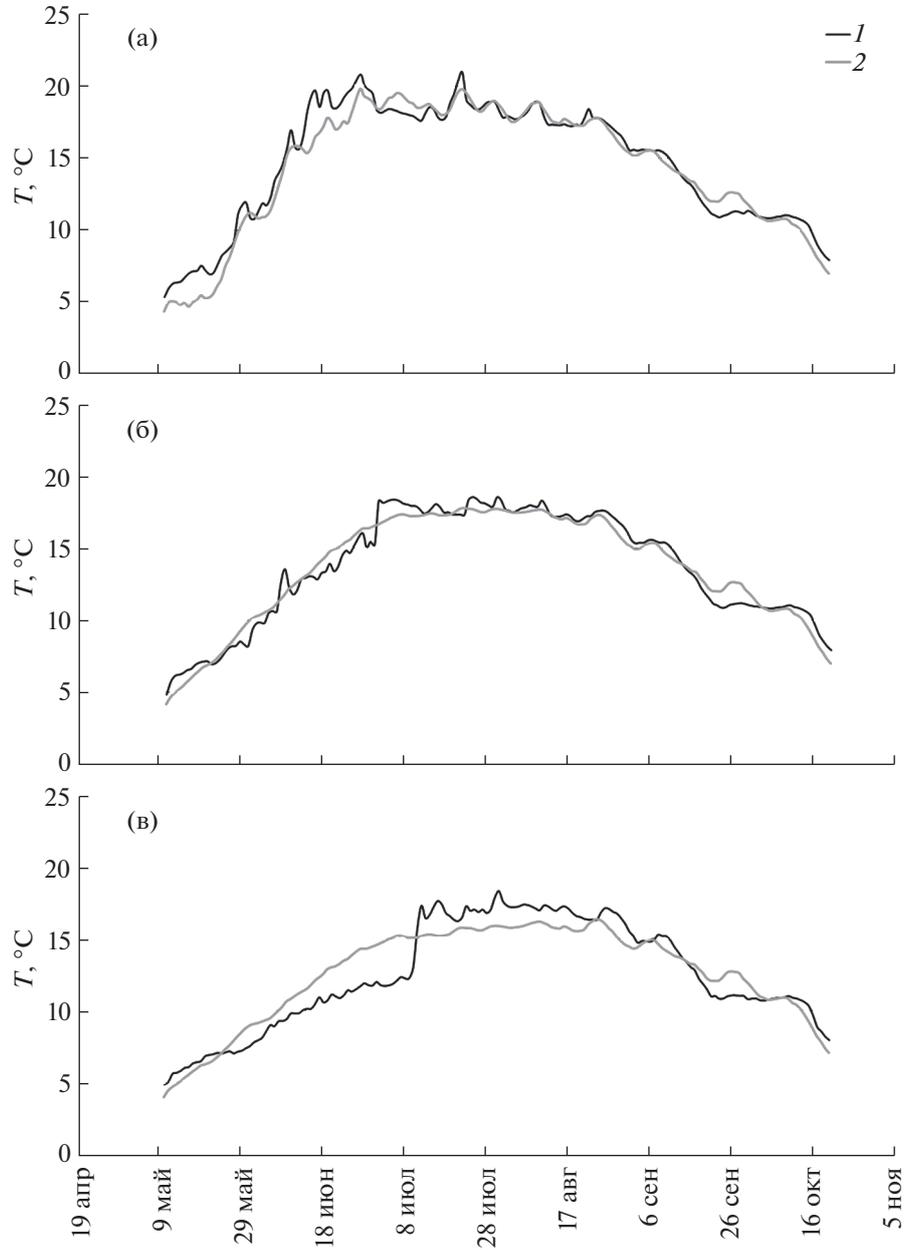


Рис. 5. Температура воды на глубинах 2 (а), 6 (б) и 11 м (в) в озере Вендюрском в мае-октябре 2020 г.: 1 – измеренные значения, 2 – рассчитанные по модели.

Fig. 5. Water temperature at depths of 2 (a), 6 (б) and 11 m (в) in Lake Vendyurskoe in May-October 2020: 1 – field data, 2 – model data.

показывают, что основное влияние на температуру эпилимниона оказывает среднемесячная температура воздуха за предшествующий месяц; зависимость температуры воды от среднемесячной скорости ветра проявляется лишь для гипolimниона весной

при неустойчивой стратификации, а от максимальной суточной скорости ветра для эпилимниона – в июне, что вызвано заглублением термоклина в периоды усиления ветров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа данных по метеостанции Петрозаводск за 70-летний период (1950–2020 гг.) установлены значимые положительные тренды и получены оценки скоростей роста температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) для разных месяцев теплой половины года: май – 0.38, июль – 0.31, август – 0.19, сентябрь – 0.29, ноябрь – 0.28. В июне и октябре линейные тренды незначимы. Потепление климата также показано в результате сравнения месячных значений температуры воздуха за два тридцатилетних периода: 1961–1990 и 1991–2020 гг.

В результате статистического анализа ежедневных многолетних натуральных измерений температуры воды (2007–2020 гг.) в оз. Вендюрском исследовано влияние изменчивости температуры воздуха на формирование его термической структуры. Отклонения температуры воздуха в разные годы объясняют более 50% дисперсии данных температуры воды всего водного столба в период охлаждения и эпилимниона в период нагревания. При повышении среднемесячных значений температуры воздуха в мае–августе на 1°C температура воды в верхнем слое (горизонт 2 м) увеличивается на 0.86°C , на глубине 6 м на 0.46°C , а у дна (11 м) только на 0.17°C . В период осеннего охлаждения (вторая половина августа–ноябрь) температура воды в перемешанном слое изменяется на 0.63°C на каждый градус изменения температуры воздуха.

В период нагревания озера с мая по август на температуру верхнего слоя воды большее влияние оказывает синоптическая изменчивость температуры воздуха, которая объясняет более 50% изменчивости температуры воды. На глубинах ниже термоклина (6 м) влияние синоптических колебаний температуры воздуха существенно уменьшается, а рост температуры воды происходит, главным образом, за счет аккумуляции тепла в результате сезонной изменчивости температуры воздуха. При осеннем охлаждении озера колебания температуры воды в перемешанном слое зависят как от синоптической, так и сезонной изменчивости температуры воздуха почти в равных долях.

В результате многолетних гидрохимических и гидробиологических исследований на оз. Вендюрском накоплены натурные данные, которые можно использовать для детального анализа. Разработанная эмпирическая модель позволяет реконструировать годовые циклы температуры воды для тех лет, по которым отсутствуют наблюдения за температурой воды. Предложенная модель может стать полезной для оценки влияния изменения климата на экосистему озера.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардин М.Ю. Изменчивость температуры воздуха над западными территориями России и сопредельными странами в XX веке // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 5–23.
2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation> (Дата обращения 10 сентября 2021 г.).
3. Гавриленко Г.Г., Здорвеннова Г.Э., Здорвеннов Р.Э., Пальшин Н.И., Митрохов А.В., Тержевик А.Ю. Теплопоток на границе вода-донные отложения в небольшом озере // Труды КарНЦ РАН. № 9. Сер. Лимнология. 2015. С. 3–9. <https://doi.org/10.17076/lim72>

4. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.
5. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белашев Б.З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 228–238.
6. *Озера Карелии*. Справочник. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
7. Пальшин Н.И., Ефремова Т.В. Стохастическая модель годового хода температуры поверхности воды в озерах // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 85–94.
8. Расписание погоды. URL: <http://gr5.ru>. (Дата обращения 10 сентября 2021 г.)
9. Резников А.И., Исаченко Г.А. Изменение климатических характеристик западной части тайги Европейской России в конце XX–начале XXI вв. // Известия РГО. 2021. Т. 153. № 1. С. 3–18. <https://doi.org/10.31857/S0869607121010055>
10. Kuusisto E. Suomen Vestöjen Lämpötilat Kaudella 1961–1975. Water temperature of lakes and rivers in Finland in the period 1961–1975. Vesihallitus – National board of waters, Finland, Helsinki, 1981. 40 p.
11. Liu W., Bocaniov S.A., Lamb K.G., Smith R.E.H. Three-dimensional modeling of the effects of changes in meteorological forcing on the thermal structure of Lake Erie // J. Great Lakes Research. 2014. 40, 4. P. 827–840. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.08.002>
12. Mammarella I., Gavrylenko G., Zdrovennova G., Ojala A., Erkkilä K.-M., Zdrovennov R., Stepanyuk O., Palshin N., Terzhevik A., Vesala T., Heiskanen J. Effects of similar weather patterns on the thermal stratification, mixing regimes and hypolimnetic oxygen depletion in two boreal lakes with different water transparency // Boreal Env. Res. 2018, 23. P. 237–247.
13. Mironov D.V. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model // COSMO Technical Report. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany. 11. 2008. 41 p.
14. O'Reilly C. M., et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // Geophysical Research Letters. 2015. 42, 24. 10773–10781. <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
15. Perroud M., Goyette S., Martynov A., Beniston M., Anneville O. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: a comparison of one-dimensional lake models // Limnol. Oceanogr. 2009. 54, 5. P. 1574–1594.
16. Robertson D.M., Ragotzkie R.A. Changes in thermal structure of moderate to large sizes lakes in response to change in air temperature // Aquatic Sciences. 1990. 52, 3. P. 360–380.
17. Rukhovets L.A., Filatov N.N. Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observations and Modeling. Springer, 2010. 308 p.
18. Sharma S., Walker S.C., Jackson D.A. Empirical modeling of lake water-temperature relationships: a comparison of approaches // Freshwater Biol. 2008. № 53. P. 897–911.
19. Schneider P., Hook S.J. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985 // Geophys. Res. Lett. 2010. 37, 22. P. 1–5. L22405, <https://doi.org/10.1029/2010GL045059>
20. Toffolon M., Piccolroaz S., Majone B., Soja A.-M., Peeters F., Schmid M., Wüest A. Prediction of surface temperature in lakes with different morphology using air temperature // Limnol. Oceanogr. 2014. 59(6). P. 2185–2202. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.6.2185>
21. Woolway R.I., Merchant C.J. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: A study of large Northern Hemisphere lakes // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2018. 123. P. 3087–3098. doi.org/10.1002/2017JD027661
22. Xue P., Pal J.S., Ye X., Lenters J.D., Huang C., Chu P.Y. Improving the Simulation of Large Lakes in Regional Climate Modeling: Two-Way Lake–Atmosphere Coupling with a 3D Hydrodynamic Model of the Great Lakes // Journal of Climate. 2017. 30, 5. P. 1605–1627. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0225.1>
23. Zhong Y., Notaro M., Vavrus S.J., Foster M.J. Recent accelerated warming of the Laurentian Great Lakes: Physical drivers // Limnol. Oceanogr. 2016. 61, 5. P. 1762–1786. doi.org/10.1002/lno.10331

Empirical Model of the Thermal Structure of a Small Polymictic Lake for Open Water Period

N. I. Palshin^{1, *}, T. V. Efremova^{1, **}, S. R. Bogdanov^{1, ***}, A. Yu. Terzhevnik^{1, ****},
G. E. Zdorovenova^{1, *****} and R. E. Zdorovenov^{1, *****}

¹*Northern water problems Institute Karelian Research Center of RAS, Petrozavodsk, Russia*

**E-mail: npalshin@mail.ru*

***E-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru*

****E-mail: Sergey.R.Bogdanov@mail.ru*

*****E-mail: ark1948@list.ru*

******E-mail: zdorovenova@gmail.com*

******E-mail: romga74@gmail.com*

The influence of weather conditions on the formation of the thermal structure of a small polymictic lake in the temperate zone during the open water period was investigated on the basis of an analysis of the data of daily long-term (2007–2020) field measurements. It is shown that during the spring-summer heating of the Lake Vendyurskoe (Karelia) from May to the first half of August, the temperature of the upper water layer (2 m) is mainly influenced by synoptic air temperature variability. At medium depths (6 m), the influence of synoptic fluctuations in air temperature on water temperature significantly decreases, while the role of seasonal changes in heat accumulation increases. In the bottom layer (11 m), fluctuations in water temperature are mainly determined by episodes of complete mixing of the lake water mass during the passage of cyclones, that is, they depend on the intensification of winds, leading to the complete destruction of stratification. During the cooling period of the lake from the second half of August to the ice cover formation (November–December), against the background of a decrease in the role of synoptic variability, the influence of seasonal air temperature variability on water temperature increases. Fluctuations in air temperature explain more than 50% of the dispersion of epilimnion water temperature during the spring-summer heating and all layers of the water column during the autumn-winter cooling. An empirical model of the dependence of water temperature at different depths of the water column on synoptic and seasonal changes in air temperature for open water period has been developed. The model does not take into account heat exchange with bottom sediments, since in the period of open water surface, it is 1–2 orders of magnitude less than the total heat exchange with the atmosphere.

Keywords: small polymictic lake, water temperature, thermal stratification, air temperature, synoptic variability, seasonal variability, climatic variability, empirical model

REFERENCES

1. Bardin M.Yu. *Izmenchivost' temperatury vozduha nad zapadnymi territoriyami Rossii i sproved'nymi stranami v XX veke* // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2002. № 8. S. 5–23.
2. Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut gidrometeorologicheskoy informacii - Mirovoj centr dannyh (VNIIGMI-MCzD). URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation> (Data obrashheniya 10 sentyabrya 2021 g.).
3. Gavrilenko G.G., Zdorovenova G.E., Zdorovenov R.E., Pal'shin N.I., Mitrosov A.V., Terzhevnik A.Yu. *Teplopotok na granice voda-donnye otlozheniya v nebol'shom ozere* // *Trudy KarNCz RAN*. № 9. Ser. *Limnologiya*. 2015. C. 3–9. <https://doi.org/10.17076/lim72>
4. Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. *Nablyudaemye i ozhidayemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozduxa*. Obninsk: VNIIGMI-MCzD, 2012. 194 s.
5. Efremova T.V., Pal'shin N.I., Belashev B.Z. *Temperatura vody raznotipnyh ozer Karelii v usloviyax izmeneniya klimata (po dannym instrumental'nyh izmerenij 1953–2011 gg.)* // *Vodnye resursy*. 2016. T. 43. № 2. S. 228–238.
6. *Ozera Karelii. Spravochnik*. Petrozavodsk: KarNCz RAN, 2013. 464 s.
7. Pal'shin N.I., Efremova T.V. *Stoxasticheskaya model' godovogo xoda temperatury poverxnosti vody v ozerax* // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2005. № 3. S.85–94.
8. *Raspisanie pogody*. URL: <http://rp5.ru>. (Data obrashheniya 10 sentyabrya 2021 g.)

9. Reznikov A.I., Isachenko G.A. Izmenenie klimaticheskix karakteristik zapadnoj chasti tajgi Evropejskoj Rossii v konce XX-nachale XXI vv. // *Izvestiya RGO*. 2021. T. 153. № 1. S. 3–18.
<https://doi.org/10.31857/S0869607121010055>
10. Kuusisto E. Suomen Vestöjen Lämpötilat Kaudella 1961–1975. Water temperature of lakes and rivers in Finland in the period 1961–1975. Vesihallitus – National board of waters, Finland, Helsinki, 1981. 40 p.
11. Liu W., Bocaniov S.A., Lamb K.G., Smith R. E.H. Three-dimensional modeling of the effects of changes in meteorological forcing on the thermal structure of Lake Erie // *J. Great Lakes Research*. 2014. 40, 4. P. 827–840.
<https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.08.002>
12. Mammarella I., Gavrylenko G., Zdorovenova G., Ojala A., Erkkilä K.-M., Zdorovenov R., Stepanyuk O., Palshin N., Terzhevik A., Vesala T., Heiskanen J. Effects of similar weather patterns on the thermal stratification, mixing regimes and hypolimnetic oxygen depletion in two boreal lakes with different water transparency // *Boreal Env. Res*. 2018, 23. P. 237–247.
13. Mironov D.V. Parameterization of lakes in numerical weather prediction. Description of a lake model // COSMO Technical Report. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany. 11. 2008. 41 p.
14. O'Reilly C. M., et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophysical Research Letters*. 2015. 42, 24. 10773–10781.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
15. Perroud M., Goyette S., Martynov A., Beniston M., Anneville O. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: a comparison of one-dimensional lake models // *Limnol. Oceanogr*. 2009. 54, 5. P. 1574–1594.
16. Robertson D.M., Ragotzkie R.A. Changes in thermal structure of moderate to large sizes lakes in response to change in air temperature // *Aquatic Sciences*. 1990. 52, 3. P. 360–380.
17. Rukhovets L.A., Filatov N.N. Ladoga and Onego – Great European Lakes: Observations and Modeling. Springer, 2010. 308 p.
18. Sharma S., Walker S.C., Jackson D.A. Empirical modeling of lake water-temperature relationships: a comparison of approaches // *Freshwater Biol*. 2008. № 53. P. 897–911.
19. Schneider P., Hook S.J. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985 // *Geophys. Res. Lett*. 2010. 37, 22. P. 1–5. L22405,
<https://doi.org/10.1029/2010GL045059>
20. Toffolon M., Piccolroaz S., Majone B., Soja A.-M., Peeters F., Schmid M., Wüest A. Prediction of surface temperature in lakes with different morphology using air temperature // *Limnol. Oceanogr*. 2014. 59(6). P. 2185–2202.
<https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.6.2185>
21. Woolway R.I., Merchant C.J. Intralake heterogeneity of thermal responses to climate change: A study of large Northern Hemisphere lakes // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018. 123. P. 3087–3098.
<https://doi.org/10.1002/2017JD027661>
22. Xue P., Pal J.S., Ye X., Lenters J.D., Huang C., Chu P.Y. Improving the Simulation of Large Lakes in Regional Climate Modeling: Two-Way Lake–Atmosphere Coupling with a 3D Hydrodynamic Model of the Great Lakes // *Journal of Climate*. 2017. 30, 5. P. 1605–1627.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0225.1>
23. Zhong Y., Notaro M., Vavrus S.J., Foster M.J. Recent accelerated warming of the Laurentian Great Lakes: Physical drivers // *Limnol. Oceanogr*. 2016. 61, 5. P. 1762–1786.
<https://doi.org/10.1002/lno.10331>