

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 328—344.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):328—344.

ГИДРОЛОГИЯ. В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

Научная статья

УДК [556.555.8+556.555.4](282.247.212)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344

Связаны ли параметры устойчивой плотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера?

Михаил Арсеньевич Науменко, Вадим Викторович Гузиватый

Институт озероведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН), Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН),
г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: m.a.naumenko@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются разработанные авторами регрессионные зависимости для определения параметров вертикальной стратификации в центральной части Ладожского озера для периодов нагревания и охлаждения воды. Четыре критерия согласия подтвердили приемлемость этих зависимостей для исследования термических процессов в озере. Получено эмпирическое уравнение, связывающее температуру поверхности озера с глубинами границ слоя скачка. Установлены количественные соотношения между скоростями изменения температуры воды, заглубления границ слоя скачка и температурой поверхности воды. Впервые выявлен гистерезис параметров слоя скачка в период открытой воды в Ладожском озере и показана возможность оценки параметров вертикальной стратификации Ладожского озера дистанционными методами.

Ключевые слова: Ладожское озеро, температура поверхности воды, параметры слоя скачка, климатические соотношения, гистерезис.

Благодарности. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания СПб ФИЦ РАН (ИНОЗ РАН) FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

Для цитирования: Науменко М. А., Гузиватый В. В. Связаны ли параметры устойчивой плотностной стратификации с температурой поверхности Ладожского озера? // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 328—344. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344.

Original article

Are the parameters of stable density stratification related to the surface temperature of Lake Ladoga?

Mikhail A. Naumenko, Vadim V. Guzivaty

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (IL RAS), St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, 196105, Russia

Summary. Establishing the relationship between the surface temperature of a large lake and its vertical distribution is important both from the point of view of theoretical developments and will contribute to the assessment of in-water processes using remote sensing methods. Vertical temperature stratification in the largest European dimictic Lake Ladoga is formed after the passage of the spring frontal zone (thermobar), when the surface temperature begins to exceed the maximum density temperature by 4 °C. The physically based regression dependences, previously developed by the authors to determine the parameters of vertical stratification for the central part of Lake Ladoga, were verified using independent data for the heating and cooling period. Four criteria of agreement confirmed the acceptability of these dependencies for the study of thermal processes in the lake. An empirical equation relating lake surface temperature to the depths of the thermocline layer boundaries was derived. Quantitative relations between the rates of change of water temperature, depth of the thermocline layer boundaries and water surface temperature have been established. They indicate that the deepening of the surface mixed layer (epilimnion) and the thermocline layer from the moment of its occurrence until it reaches the bottom does not proceed linearly with time, accelerating in late autumn. Empirical dependencies can be the basis for verifying one-dimensional models of the seasonal evolution of vertical water temperature profiles in lakes.

The hysteresis of the thermocline layer parameters during the period of open water in Lake Ladoga was revealed for the first time and the possibility of estimating the parameters of vertical stratification of Lake Ladoga using remote sensing methods was shown.

Keywords: surface water temperature, parameters of the thermocline layer, climatic relationships, hysteresis, dimictic lake, Lake Ladoga.

Acknowledgments. Financial support of the research was mainly provided by the federal budget funds for the state task FFZF-2024-0001 “Ecosystems of Lake Ladoga, water bodies of its basin and adjacent territories under the influence of natural and anthropogenic factors against the background of climatic changes”.

For citation: Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Are the parameters of stable density stratification related to the surface temperature of Lake Ladoga? *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):328—344 (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-328-344.

Введение

Озёра являются репрезентативными индикаторами изменения климата, которые выражаются в вариациях термических и динамических условий, влияющих на биотические процессы [1]. В современный климатический период, начиная с девяностых годов прошлого века, обнаруживаются разномасштабные быстрые и нерегулярные вариации температуры поверхности воды и водной толщи крупных озёр мира, в том числе межгодовые [2]. Чрезвычайно важно фиксировать и оценивать термические изменения относительно их средноклиматического хода, что позволит использовать данные в диагнозе экологической ситуации в озере.

Известно, что температурные вариации влияют на процессы эвтрофирования, усвоение биогенных элементов, развитие микроводорослей и т. п. Установление взаимосвязи между температурой поверхности крупного озера и её вертикальным распределением имеет большое значение, как с точки зрения теоретических разработок, так и будет способствовать оценкам внутриводных процессов с использованием дистанционных методов.

Настоящая статья является продолжением статьи [3], в которой на основе методических разработок и анализа большого объёма данных с 1897 г. по 2017 г. нами был определен среднеклиматический сезонный ход восьми основных параметров, характеризующих вертикальное распределение температуры в период стратификации в центральной части Ладожского озера, а именно:

- 1) температуры верхнего квазиоднородного слоя ВКС (эпилимниона) T_w ;
- 2) толщины верхнего квазиоднородного слоя h_w (верхней границы слоя скачка);
- 3) максимального градиента плотности в слое скачка G_{\max} ;
- 4) глубины максимального значения градиента плотности в слое скачка $h_{G_{\max}}$;
- 5) температуры на глубине максимума градиента плотности в слое скачка $T_{G_{\max}}$;
- 6) глубины нижней границы слоя скачка (металимниона) h_l ;
- 7) температуры на нижней границе слоя скачка T_{hl} ;
- 8) температуры у дна T_b .

Эти параметры будут использованы ниже.

Среднеклиматический сезонный ход параметров устойчивой вертикальной стратификации закономерно изменяется с начала весенней стратификации до полного осеннего перемешивания в центре крупнейшего европейского озера — Ладожского [4].

В настоящее время существует несколько одномерных моделей, используемых в качестве исследовательского инструментария для оценки сезонной эволюции вертикальных профилей температуры воды в озерах в зависимости от атмосферного форсинга [5—9]. Сложность моделирования среднеклиматической изменчивости вертикальной термической структуры озера и ее влияния на динамику экосистем требует соответствующих упрощений, поэтому был использован анализ более 1000 вертикальных профилей температуры воды и статистический подход конструирования для временной аппроксимации основного сезонного цикла выбранных параметров стратификации центральной части Ладожского озера с глубинами от 50 м до 70 м.

Физически обоснованные эмпирические временные зависимости были разработаны для нескольких указанных параметров с высокими коэффициентами детерминации (более 0,85). Для среднеклиматического сезонного хода температуры поверхности озера T (верхнего квазиоднородного слоя T_w) и температуры на глубине максимума градиента плотности в слое скачка $T_{G_{\max}}$ было использовано следующее уравнение:

$$T(t) = a_1 \times t^d \times e^{ct}, \quad (1)$$

где $t = x/100$, x — количество суток от начала года (рис. 1 а). Разность температуры между верхней T и нижней границей ВКС не превышала 0,5 °С [3].

Для среднеклиматической временной зависимости изменения глубины границ слоя скачка в период весенне-летней стратификации использовалась показательная функция:

$$h(t) = a_2^{t+r}. \quad (2)$$

Глубину каждой из трех границ слоя скачка: верхней границы слоя скачка h_w , максимального градиента плотности воды $h_{G_{\max}}$ и нижней границы слоя скачка h_l , с конца июня до начала ноября можно определить на основе (2) (рис. 1 б). Эволюция климатического режима термической структуры водной толщи озера в период устойчивой стратификации указывает на нелинейную зависимость заглубления ВКС и слоя скачка от момента его возникновения до достижения дна и является основой для верификации одномерных моделей сезонной эволюции вертикальных профилей температуры воды в озерах.

Целью настоящей статьи заключается в нахождении (установлении) климатических зависимостей между температурой поверхности воды Ладожского озера и параметрами устойчивой весенне-летней стратификации для двух потенциально отличных режимов: нагревания и охлаждения озера.

Верификация эмпирических зависимостей

Количество, разнообразие и сложность математических и вычислительных моделей климатических, гидрологических и экологических систем за последние несколько десятилетий увеличилось. Одновременно возрастает интерес к сравнению и объективной оценке моделей для определения, какие модели являются более точными, т. е. наиболее соответствующими проведенным надежным измерениям [10]. Верификация любых моделей природных процессов, тем более эмпирических, необходима как для возможного прогнозирования, так и для количественной оценки неизвестных параметров на основе известных предикторов, а также для совершенствования климатических моделей. Обычно модель верифицируется с использованием статистических подходов для сравнения модельных оценок с независимыми наблюдаемыми значениями.

На рис. 1 приведены климатические кривые сезонного хода температуры поверхности и температуры слоя скачка, а также трех глубин слоя скачка для периодов нагревания и охлаждения, рассчитанные по формулам (1) и (2).

Климатические кривые достаточно хорошо соответствуют максимальным значениям температуры поверхности (отличаясь не более 1 °С) и датам её возникновения, приведенным в атласе Ладожского озера [11].

Важный параметр — среднеклиматическая продолжительность устойчивой стратификации в центральной части Ладожского озера с очевидностью определяется по рис. 1 а. Это временной интервал между крайними вертикальными штриховыми прямыми, указывающими на весеннюю и осеннюю вертикальную изотермию. Он составляет 142 суток и может служить климатической нормой (репером) при анализе возможных межгодовых колебаний.

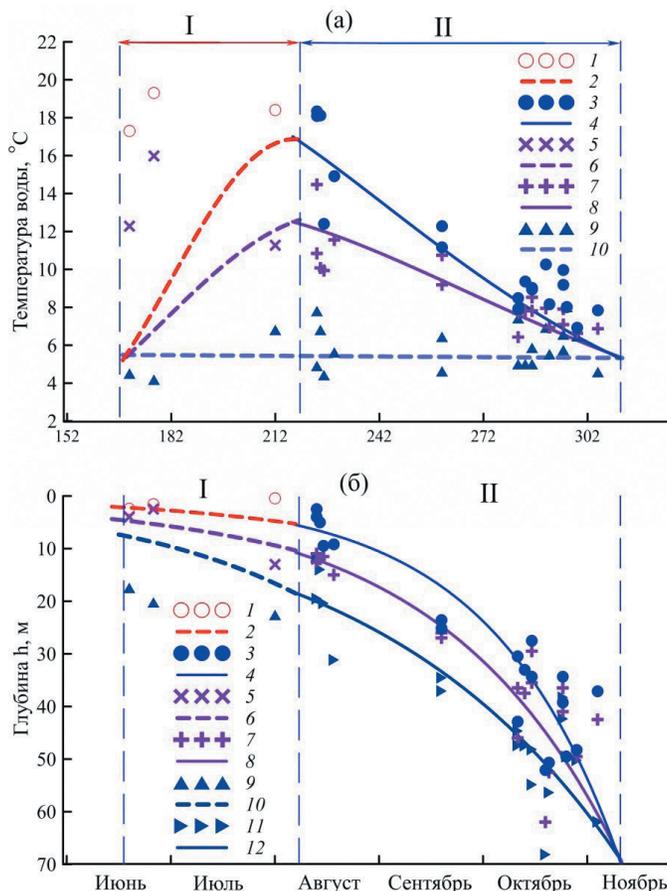


Рис. 1. Климатические зависимости сезонного хода параметров устойчивой стратификации с точками независимых наблюдений для периодов нагревания и охлаждения (I, II) в центральной части Ладожского озера:

a) температура поверхности T_w (2, 4) и независимые наблюдения (1, 3); температура в слое скачка $T_{G_{\max}}$ (6, 8) и независимые наблюдения (5, 7); температура на нижней границе T_{hl} (10) и независимые наблюдения (9); *б)* глубина верхнего квазиоднородного слоя h_w (2, 4) и независимые наблюдения (1, 3); глубина максимального градиента плотности воды G_{\max} (6, 8) и независимые наблюдения (5, 7); глубина нижней границы слоя скачка h_l (10, 12) и независимые наблюдения (9, 11).

Fig. 1. Climatic dependences of the seasonal courses of stable stratification parameters with points of independent observations for heating and cooling periods (I, II) in the central part of Lake Ladoga:

a) surface temperature T_w (2, 4) and independent observations (1, 3); temperature in the depth of the maximum water density gradient $T_{G_{\max}}$ (6, 8) and independent observations (5, 7); temperature at the lower boundary of the thermocline layer T_{hl} (10) and independent observations (9); *b)* depth of the upper quasi-homogeneous layer h_w (2, 4) and independent observations (1, 3); depth of the maximum water density gradient G_{\max} (6, 8) and independent observations (5, 7); depth of the lower boundary of the thermocline layer h_l (10, 12) and independent observations (9, 11).

Разработанные ранее физически обоснованные регрессионные зависимости с известными эмпирическими коэффициентами для центральной части Ладожского озера [3] были в настоящей статье верифицированы с использованием независимых данных для периода наблюдений с 2018 г. по 2022 гг. (рис. 1). Для этого были использованы четыре безразмерные критерия, характеризующие степень связи между измеренными параметрами $X_{изм}$ и модельными величинами $X_{мод}$. Результаты приведены в таблице.

Индекс согласия Уиллмотта WS [10] указывает на абсолютное соответствие модели измерениям при $WS = 1$, при $WS = 0$ нет никакого соответствия между измеренными и модельными величинами, однако индекс чувствителен к экстремальным значениям.

$$WS = 1 - \frac{\sum (X_{мод} - X_{изм})^2}{\sum (|X_{мод} - \bar{X}_{изм}| + |X_{мод} - \bar{X}_{изм}|)^2}. \quad (3)$$

Усовершенствованный индекс Уиллмотта d_r [12], по мнению авторов, в целом более рационально связан с точностью модели и ограничен значениями $-1,0$ и $1,0$.

$$d_r = 1 - \frac{\sum |X_{мод} - X_{изм}|}{c \sum |X_{изм} - \bar{X}_{изм}|}. \quad (4)$$

Третий критерий, использованный при верификации трехмерной модели течений озера Мичиган [13] и озера Онтарио [14], указывает на лучшее соответствие модельных значений измеренным при меньших величинах F_n .

$$Fn = \left(\frac{\sum |X_{мод} - X_{изм}|^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\sum |X_{изм}|^2}{n} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Четвертый критерий k_d — это коэффициент детерминации, который представляет процент объясненной дисперсии между исследуемыми параметрами, при $k_d = 1$ связь идеальная.

Всего было верифицировано двенадцать эмпирических зависимостей для глубины и температуры трех границ слоя скачка для периодов нагревания и охлаждения поверхности Ладожского озера (табл. 1). Очевидно, что для периода нагревания каждый из четырех критериев указывает на меньшее соответствие между модельными величинами и измерениями, что объясняется непредсказуемостью динамического воздействия атмосферы, приводящей к вынужденной конвекции при создании эмпирических климатических зависимостей. В период охлаждения, как уже подчеркивалось выше, конвективное перемешивание за счёт архимедовых сил постоянно воздействует на вертикальное распределение температуры, происходит заглупление ВКС, что в климатическом аспекте приводит к лучшему

соответствию между измеренными и модельными величинами [15]. Обращает внимание, что результаты расчета по формулам 3 и 5 (табл. 1) указывают на удовлетворительное соответствие постоянства температуры воды ($5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) как в период нагревания, так и в период охлаждения на нижней границе слоя скачка, хотя k_d — практически 0. В результате блокирующей роли слоя скачка, затрудняющего обмен теплом с нижележащими слоями, температура воды на нижней границе слоя скачка практически не реагирует на изменения поверхностной температуры.

Таблица 1

Индексы согласия и коэффициенты детерминации между аналитическими зависимостями $X_{\text{мод}}$ и независимыми измерениями $X_{\text{изм}}$
Indices of agreement and coefficients of determination between analytical dependencies $X_{\text{мод}}$ and independent measurements of $X_{\text{изм}}$

Граница	Параметр	*	Формула (3)	Формула (4)	Формула (5)	Коэф. детерминации
верхнего квазиоднородного слоя	Глубина	н	0,46	0,61	0,60	0,44
		о	0,99	0,78	0,24	0,77
	Температура	н	0,27	-1,72	0,35	0,15
		о	0,69	0,47	0,29	0,85
максимального градиента плотности	Глубина	н	0,74	0,68	0,37	0,73
		о	0,93	0,78	0,21	0,77
	Температура	н	0,40	-0,45	0,38	0,13
		о	0,92	0,70	0,13	0,74
нижней границы слоя скачка	Глубина	н	0,50	0,03	0,62	0,47
		о	0,93	0,78	0,17	0,76
	Температура	н	0,42	0,18	0,20	—
		о	0,37	0,49	0,19	—

*н — период нагревания, о — период охлаждения.

Таким образом, верификация регрессионных зависимостей подтверждает правомерность их использования для оценки параметров стратификации в центральной части Ладожского озера.

Зависимости между температурой поверхности и глубинами трех границ слоя скачка для периода стратификации

Вертикальная температурная стратификация в Ладожском озере формируется после прохождения весенней фронтальной зоны (термобара), когда температура поверхности начинает превышать температуру наибольшей плотности $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4, 16]. Сроки наступления стратификации в различных районах озера являются важным индикатором климатических изменений [17, 18]. Критериями для выбора начальных вертикальных профилей для анализа параметров слоя скачка может быть температура поверхности более $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и минимальное значение вертикального градиента плотности воды $0,05\text{ кг/м}^4$ [19]. В центре Ладожского озера с глубинами, изменяющимися от 50 до 70 м для средноклиматических условий, стратификация

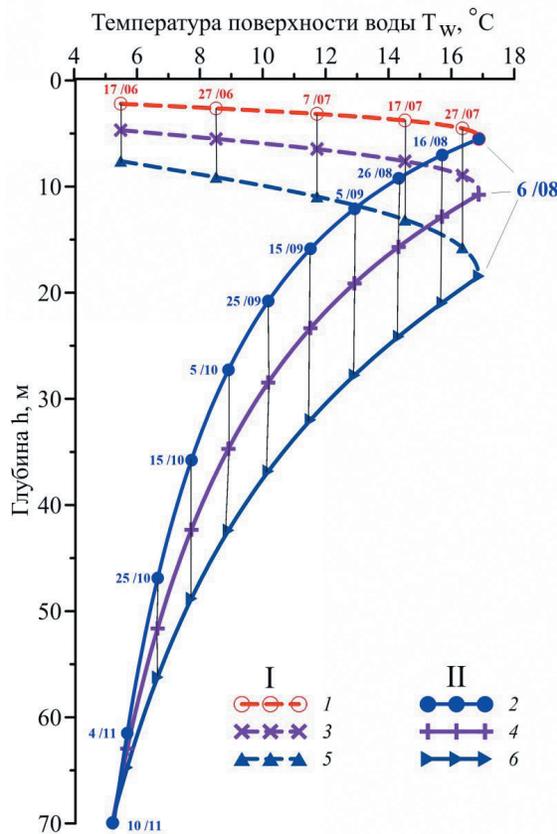


Рис. 2. Климатические зависимости трех границ слоя скачка в центральной части Ладожского озера от температуры поверхности воды T_w для периода нагревания и охлаждения (I, II): глубины верхней границы слоя скачка h_w (толщины верхнего квазиоднородного слоя (1, 2); максимального градиента плотности воды G_{max} (3, 4) и нижней границы слоя скачка h_l (5, 6). Тонкие вертикальные прямые показывают соответствие дат.

Fig. 2. Climatic dependences of the three boundaries of the thermocline layer in the central part of Lake Ladoga on water surface temperature T_w for the heating and cooling periods (I, II): the depth of the upper boundary of the thermocline layer h_w (thickness of the upper quasi-uniform layer (1, 2); the maximum water density gradient G_{max} (3, 4) and the lower boundary of the thermocline layer h_l (5, 6). The thin vertical straight lines show the correspondence of the dates.

возникает с 15 июня (170-ые сутки с начала года), а переход от нагревания поверхности озера к охлаждению — 6 августа (рис. 1 и рис. 2).

Для установления связей между хорошо определяемым единственным входным параметром: температурой поверхности T_w (ВКС) озера и глубинами трех искомых границ слоя скачка решим систему уравнений из двух эмпирических

зависимостей (1) и (2). В результате получено трансцендентное уравнение для каждой границы слоя с известными регрессионными коэффициентами a_1 , d , c , a_2 , r .

$$h = a_2 \left(r + \frac{d}{c} \times \mathbf{W} \left(\frac{c}{d} \times \left(\frac{T_w}{a_1} \right)^{\frac{1}{d}} \right) \right) \quad (6)$$

В полученное уравнение входит многозначная функция Ламберта \mathbf{W} [20]. При расчетах при среднеклиматических условиях для периода нагревания (верхние ветви рис. 2) следует использовать \mathbf{W}_0 до 6 августа, для периода охлаждения (нижние ветви рис. 2) после 6 августа — \mathbf{W}_{-1} . Решение данного уравнения может быть получено в системе статистических вычислений R [21]. Полученные эмпирические результаты полностью соответствуют теоретическим представлениям одномерной модели сезонного термоклина Крауса—Тернера [9].

С момента начала устойчивой стратификации в период нагревания глубина границ слоя скачка изменяется незначительно, не более чем на 10 метров за полтора месяца (рис. 2).

С начала периода охлаждения поверхности озера тепло из верхних слоев начинает постоянно поступать в глубинные слои посредством свободной конвекции. Три границы слоя скачка, указанные выше, в том числе глубина максимального градиента плотности слоя скачка, продолжают погружаться и за три месяца достигают дна. Пересечение кривых (трех границ слоя скачка) при осеннем перемешивании в одной точке при температуре поверхности (5,5 °C) указывает на возникновение изотермии по вертикали, когда конвекция достигает дна и, следовательно, эпилимнион занимает все пространство от поверхности до дна. В этот период (первой декаде ноября) температура эпилимниона становится равной температуре придонной воды, достигшей своего максимума.

Зависимость (6), приведенная на рисунке 2, позволяет оценить климатические параметры глубины трех границ слоя скачка в зависимости от температуры поверхности Ладожского озера, что расширяет использование дистанционных ИК-измерений для анализа термического состояния Ладожского озера.

Температура поверхности, скорости изменения температуры воды и скорости погружения границ слоя скачка

Годовой цикл температурных изменений в озере тесно связан с сезонными колебаниями теплообмена «атмосфера—поверхность воды» и динамическими процессами в водной толще [22]. Процессы турбулентного обмена теплом в период стратификации во время нагревания и охлаждения поверхности протекают различно [23]. В период нагревания большая часть тепла, поступающая на поверхность озера, перераспределяется в верхнем квазиоднородном слое и приводит к повышению его температуры. В августе, после того, как температура поверхности воды достигает максимума, начинается регулярное понижение температуры

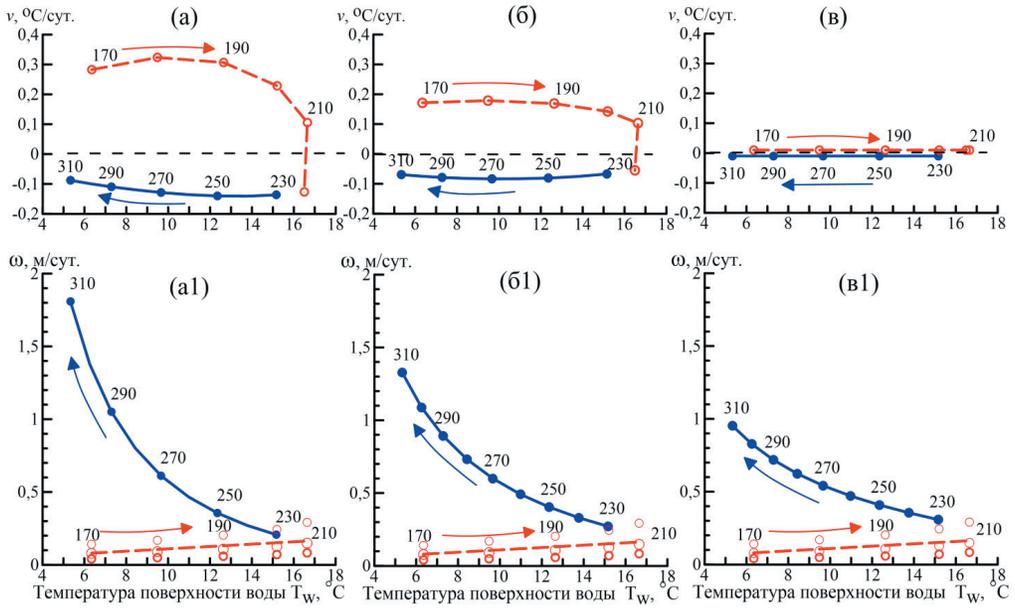


Рис. 3. Скорости изменения параметров стратификации для центральной части Ладожского озера в зависимости от температуры поверхности воды T_w для периода нагревания (красная линия) и охлаждения (синяя линия): температуры (а) и глубины ВКС (а1); температуры (б) и глубины (б1) максимального градиента температуры (плотности); температуры (в) и глубины (в1) нижней границы слоя скачка.

Цифры у точек — сутки от начала года.

Fig. 3. Rates of change of stratification parameters for the central part of Lake Ladoga as a function of water surface temperature T_w for the heating (red line) and cooling (blue line) periods: temperature (a) and depth of the upper quasi-uniform layer (а1); temperature (б) and depth (б1) of the maximum temperature (density) gradient; temperature (в) and depth (в1) of the lower boundary of the thermocline layer.

Numbers at the points are days from the beginning of the year.

поверхности, определяющее возникновение и развитие свободного конвективно-го перемешивания. Вместе с вынужденной конвекцией это приводит к увеличению толщины квазиоднородного слоя и заглублению слоя скачка.

Дифференцируя выражения (1) и (2), можно получить количественные оценки скоростей изменения температуры воды v (°/сутки) и скорости погружения ω (м/сутки) трех границ слоя скачка в зависимости от температуры поверхности воды для среднеклиматических условий.

Наибольшие скорости увеличения температуры поверхности воды наблюдаются на поверхности Ладожского озера в период нагревания, переход к остыванию поверхности и свободной конвекции происходит в первую — вторую декаду августа. Очевидно, согласно рис. 3, что скорости уменьшения температуры

поверхности в период охлаждения примерно в три раза меньше, чем скорость увеличения при нагревании. Наибольшая температура на глубине максимального градиента плотности на 30 % меньше, чем на поверхности.

Как уже было отмечено, скорость погружения трех слоев в период нагревания примерно одинакова (около 0,1—0,2 м/сутки) без значительного заглубления верхней границы слоя скачка, тогда как в период охлаждения эти скорости резко увеличиваются и для верхней границы слоя скачка они наибольшие до 1,5—1,8 м/сутки в первой декаде ноября, когда свободная конвекция достигает дна.

Средняя граница слоя скачка (глубина максимального градиента плотности воды) погружается в период охлаждения поверхности с меньшими скоростями, но аналитическая форма выражения для скорости погружения, соответствующая показательной функции одна и та же для трех границ слоя скачка. Как видно на рис. 3 *в1*, наименьшие скорости погружения относятся к нижней границе слоя скачка, температура которой остается неизменной во времени (рис. 3 *в*).

Подводя итог этому разделу, можно подчеркнуть, что количественные оценки временных изменений температуры и глубин параметров слоя скачка могут быть получены на основе температуры поверхности озера в период стратификации для нагревания и охлаждения.

Особенности изменчивости параметров слоя скачка в течение периода устойчивой стратификации

В статьях [24, 25] показано, что в озерах с ярко выраженным сезонным ходом температуры воды существует явление гистерезиса. Возвращение величины лимнического параметра, находящегося в начале периода нагревания, к той же самой величине в период охлаждения не происходит в обратной последовательности по одной и той же временной траектории. На рис. 4 приведен временной ход трех параметров слоя скачка в зависимости от температуры поверхности Ладожского озера. Вертикальная штриховая прямая на совмещенных графиках показывает пример различий между параметрами слоя скачка при одной и той же температуре (10,7 °С) для периода нагревания и охлаждения. Стрелки указывают направления изменений при нагревании и охлаждении.

Средние максимальные вертикальные градиенты температуры воды в термоклине G_{\max} (осредненные за декаду для устранения случайных колебаний) изменяются нелинейно от минимального (нулевого значения) в момент возникновения стратификации до максимальной величины в период нагревания, причем максимальное значение градиента достигается до возникновения максимума температуры поверхности воды. В период охлаждения градиенты изменяются линейно до наступления изотермии в первой декаде ноября. Вертикальный градиент температуры (плотности) меняется в зависимости от периода нагревания (охлаждения) поверхности и, следовательно, меняется степень вертикального турбулентного обмена.

Температура поверхности максимального градиента температуры (плотности) в термоклине $T_{G_{\max}}$ при нагревании (рис. 4 *б*) ниже, чем при охлаждении

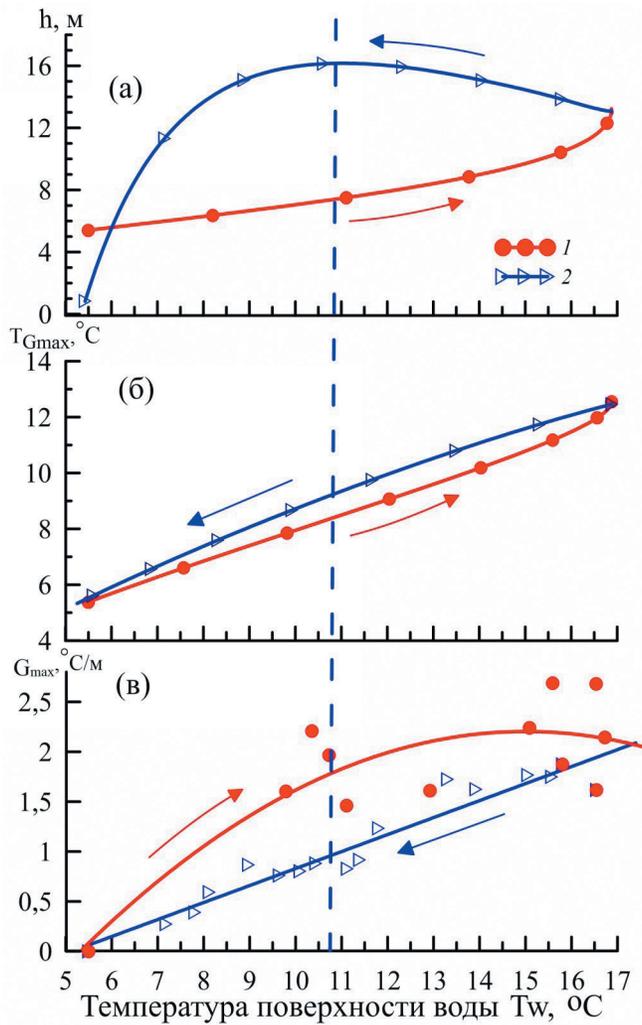


Рис. 4. Изменение параметров слоя скачка в период устойчивой стратификации для периода нагрева (красная линия и символы) и охлаждения (синяя линия и символы) в зависимости от температуры поверхности воды T_w :

a) толщина слоя скачка h ; *б)* температура поверхности максимального градиента температуры (плотности) $T_{G_{max}}$; *в)* максимальный вертикальный градиент температуры воды в термоклине G_{max} .

Fig. 4. Variation of thermocline layer parameters during the period of stable stratification for the heating (red line and symbols) and cooling (blue line and symbols) periods as a function of water surface temperature T_w :

a) thickness of the thermocline h ; *б)* surface temperature of the maximum temperature (density) gradient $T_{G_{max}}$; *в)* maximum vertical gradient of water temperature in the thermocline G_{max} .

при одной и той же температуре поверхности воды озера. Максимум температуры в термоклине наступает практически одновременно при достижении максимума температуры ВКС, однако разность между ними составляет более 4,5 °С. В период охлаждения поверхности озера в результате воздействия свободной конвекции, переносящей тепло с поверхности вглубь, возникает гистерезисный характер изменения температуры термоклина. Температура термоклина выше, чем в период нагревания при одной и той же температуре поверхности озера.

Толщина слоя скачка $h = h_l - h_w$ непостоянна в сезонном цикле. На рис. 4 в очевиден гистерезисный характер изменения толщины слоя скачка. В период нагревания, начиная с нескольких метров, толщина достигает 12 м при максимальной температуре поверхности озера и продолжает увеличиваться в период охлаждения до 16 м при температуре поверхности воды около 10,7 °С. Далее толщина уменьшается до 0 м в период осенней изотермии при той же температуре поверхности, что и в начале периода нагревания. Учёт конечной толщины слоя скачка, несомненно, позволит уточнить количественные характеристики обмена количеством движения и тепла между эпи — и гиполимнионом.

Итак, три рассмотренные параметра слоя скачка в центральной части Ладожского озера могут быть оценены на основе дистанционного определения температуры поверхности воды с явным явлением гистерезиса (рис. 4).

Заключение

Эволюция термической структуры водной толщи центральной части Ладожского озера от начала возникновения устойчивой плотностной стратификации в середине июня до возникновения осенней гомотермии в первой декаде ноября охарактеризована различными параметрами вертикального распределения температуры: температурой и вертикальными градиентами температуры слоя скачка, его толщиной, скоростями изменения температуры воды и скорости погружения границ слоя скачка [26]. Такой подход послужил основой для разработки физически обоснованных эмпирических формул для оценки среднеклиматической взаимосвязи температуры поверхности воды озера с параметрами стратификации, в том числе с учетом гистерезисного характера изменений параметров. На независимых наблюдениях эти зависимости верифицированы, что подтвердило их приемлемость и перспективность в использовании дистанционной информации для изучения внутриозерных процессов и для верификации термогидродинамических моделей Ладожского озера.

Для практических оценок климатических параметров вертикальной структуры водной толщи в Ладожском озере целесообразно использовать установленные эмпирические зависимости, соответствующие физическим закономерностям для периода нагревания и охлаждения. Получены новые характеристики термоклина в Ладожском озере, которые ранее не оценивались и не воспроизводились с использованием одномерных моделей стратификации.

Систематические в период открытой воды отклонения от разработанных зависимостей будут указывать на возможные климатические вариации [27].

Действительно, изменения глубины и величины вертикальных градиентов в термоклине, а также сроки его возникновения и диссипации будут не только индцировать внутригодовые изменения, но и оказывать влияние на экологические процессы в озере [28].

Список литературы

1. Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H. et al. Lakes as sentinels of climate change // *Limnol. Oceanogr.* 2009. V. 54 (6). P. 2283—2297. doi: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
2. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D. K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42 (24). P. 10773—10781. doi: org/10.1002/2015GL066235.
3. Naumenko M. A., Guzivaty, V. V. Methodological Approaches and Results of an Analysis of the Climatic Seasonal Course of Stable Stratification Parameters of a Dimictic Lake (Case Study of the Central Part of Lake Ladoga) // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. V. 58 (1). P. 44—53. doi: 10.1134/S0001433822010108.
4. Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Л.: Наука 1982. 232 с.
5. Sundaram T. R., Rehm R. G. The seasonal thermal structure of deep temperate lakes // *Tellus*. 1973. V. 25 (2). P.157—167. doi: 10.1111/j.2153-3490.1973.tb01602.x.
6. McCormik M. J., Scavia D. Calculation of Vertical Profiles of Lake-Averaged Temperature and Diffusivity in Lakes Ontario and Washington // *Water Resources Research*. 1981. V. 17 (2). P. 305—310. doi:10.1029/WR017i002p00305.
7. Fang X., Stefan H. G. Long-term lake water temperature and ice cover simulations/measurements // *Cold Reg Sci Tech*. 1996. V. 24 (3). P. 289—304. doi: org/10.1016/0165-232X(95)00019-8.
8. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage // *Environmental Modelling Software*. 2011. V. 26 (5). P. 683—684. doi: org/10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
9. Kraus E. B., Turner J. S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline. II. The general theory and its consequences // *Tellus*. 1967. V. 1. P.98—106.
10. Willmott C. J. On the validation of models // *Phys. Geogr.* 1981. V. 2. P. 184—194.
11. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Под. ред. В. А. Румянцева. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
12. Willmott C. J., Robeson S. M., Matsuura K. A refined index of model performance // *Int. J. Climatol.* 2012. V. 32. P. 2088—2094. doi: org/10.1002/joc.2419.
13. Beletsky D., Schwab D. Modeling circulation and thermal structure in Lake Michigan: Annual cycle and interannual variability // *J. Geoph. Res.* 2001. V. 106. № C 9. P. 19745—19771. doi: 10.1029/2000JC000691.
14. Huang A., Rao Y. R., Lu Y., Zhao J. Hydrodynamic modeling of Lake Ontario: An intercomparison of three models // *J. Geoph. Res.* 2010. V. 115. C12076. doi:10.1029/2010JC006269.
15. Bouffard D., Wuest A. Convection in Lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019. 51(1). P. 189—215. doi: org/10.1146/annurev-fluid-010518-040506.
16. 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. doi: 10.7868/S2073667321020076.
17. Kraemer B. M., Anneville O., Chandra S. et al. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change // *J. Geoph. Res. Let.* 2015. № 42. P. 4981—4988.
18. Piccolroaz S. M., Toffolon M., Majone B. The role of stratification on lakes' thermal response: The case of Lake Superior // *Water Resour. Res.* 2015. V 51. № 10. P. 7878—7894.
19. Молчанов И. В. Ладожское озеро. М.—Л.: Гидрометеониздат, 1945. 558 с.
20. Дубинов А. Е., Дубинова И. Д., Сайков С. К. W-функция Ламберта и ее применение в математических задачах физики. Учебное пособие для вузов. Саров: Российский федеральный ядерный центр. 2006. 160 с.

21. The R Project for Statistical Computing. Available at: <https://www.r-project.org/> (дата обращения: 03.05.2024).
22. Imberger J., Patterson J. C. Physical limnology. *Adv. Appl. Mech.* 27. 1990. 303—475.
23. Winslow L. A., Read J. S., Hansen G. J. et al. Seasonality of change: Summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures // *Limnol. Oceanogr.* 2017. V. 62. P. 2168—2178. doi: 10.1002/lno.10557.
24. Форш-Меншуткина Т. Б. Кислородный гистерезис в олиготрофных озерах. Вопросы современной лимнологии / Под. ред. С. В. Калесника. Л.: Наука. 1973. С. 94—101.
25. Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Climate Relationships between Air Temperature and Water Temperatures in the Different Limnetic Zones of Lake Ladoga // *Geography and Natural Resources.* 2022. V. 43 (1). P. 69—76. doi: 10.1134/S1875372822010097.
26. Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga. *Limnological Review.* 2023. 23 (3). P. 177—189.
27. Woolway R. I., Sharma S., Weyhenmeyer G. A. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change // *Nat Commun.* 2021. V. 12. P. 2318. doi: org/10.1038/s41467-021-22657-4.
28. Edlund M. B., Almendinger J. E., Fang X. et al. Effects of Climate Change on Lake Thermal Structure and Biotic Response in Northern Wilderness Lakes // *Water.* 2017. V. 9. P. 678. doi: org/10.3390/w9090678.

References

1. Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H. et al. Lakes as sentinels of climate change. *Limnol. Oceanogr.* 2009; 54(6): 2283—2297. doi: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
2. O'Reilly C. M., Sharma S., Gray D.K. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters.* 2015; 42(24): 10773—10781. doi: org/10.1002/2015GL066235.
3. Naumenko M. A., Guzivaty, V. V. Methodological Approaches and Results of an Analysis of the Climatic Seasonal Course of Stable Stratification Parameters of a Dimictic Lake (Case Study of the Central Part of Lake Ladoga). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2022; 58(1): 44—53. doi: 10.1134/S0001433822010108.
4. Tikhomirov A. I. Termika krupnikh ozer = *Thermal state of large lakes*. Leningrad: Nauka, 1982: 232 p. (In Russ.).
5. Sundaram T. R., Rehm R. G. The seasonal thermal structure of deep temperate lakes. *Tellus.* 1973; 25(2): 157—167. doi: 10.1111/j.2153-3490.1973.tb01602.x.
6. McCormik M. J., Scavia D. Calculation of Vertical Profiles of Lake—Averaged Temperature and Diffusivity in Lakes Ontario and Washington. *Water Resources Research.* 1981; 17(2): 305—310. 10.1029/WR017i002p00305.
7. Fang X., Stefan H. G. Long-term lake water temperature and ice cover simulations/measurements. *Cold Reg. Sci. Tech.* 1996; 24(3): 289—304. doi: org/10.1016/0165-232X(95)00019-8.
8. Kirillin G., Hochschild J., Mironov D. et al. FLake-Global: Online lake model with worldwide coverage. *Environmental Modelling & Software.* 2011; 26(5): 683—684. doi: org/10.1016/j.envsoft.2010.12.004.
9. Kraus E. B., Turner J. S. A one-dimensional model of the seasonal thermocline. II. The general theory and its consequences. *Tellus.* 1967; 1: P. 98—106.
10. Willmott C. J. On the validation of models. *Phys. Geogr.* 1981; 2: 184—194.
11. *Ladozhskoye ozero i dostoprimechatel'nosti yego poberezh'ya. Atlas.* = *Lake Ladoga and the sights of its coast. Atlas.* Ed. Rumyantsev V.A. St.Petersburg: Nestor-History, 2015; 200 p. (In Russ.).
12. Willmott C. J., Robeson S.M., Matsuura K. A refined index of model performance. *Int. J. Climatol.* 2012; 32: 2088—2094. doi: org/10.1002/joc.2419.
13. Beletsky D., Schwab D. Modeling circulation and thermal structure in Lake Michigan: Annual cycle and interannual variability. *J. Geoph. Res.* 2001; 106(C9): 19745—19771. doi: 10.1029/2000JC000691.
14. Huang A., Rao Y. R., Lu Y., Zhao J. Hydrodynamic modeling of Lake Ontario: An intercomparison of three models. *J. Geoph. Res.* 2010; 115: C12076. doi: 10.1029/2010JC006269.

15. Bouffard D., Wuest A. Convection in Lakes. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2019; 51: 189—215. doi: org/10.1146/annurev-fluid-010518-040506.
16. Naumenko M. A. Features of climatic relationships between surface water-air temperature during vernal heating period in Lake Ladoga. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and applied hydrophysics.* 2021; 14(2): (78—88). doi: 10.7868/S2073667321020076. (In Russ.).
17. Kraemer B. M., Anneville O., Chandra S. et al. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change. *J. Geoph. Res. Let.* 2015; 42: 4981—4988.
18. Piccolroaz S. M., Toffolon M., Majone B. The role of stratification on lakes' thermal response: The case of Lake Superior. *Water Resour. Res.* 2015; 51(10): 7878—7894.
19. Molchanov I. V. *Ladozhskoye ozero = Lake Ladoga.* Moskva—Leningrad: Hydrometeoizdat, 1945; 558 p. (In Russ.).
20. Dubinov A. E., Dubinova I. D., Saikov S. K. *W-funktsiya Lamberta i yeye primeneniye v matematicheskikh zadachakh fiziki = Lambert's W-function and its application to mathematical problems in physics.* Textbook for universities. Sarov: Russian Federal Nuclear Center. 2006; 160 p. (In Russ.).
21. The R Project for Statistical Computing. Available at: <https://www.r-project.org/> (date of the application: 03.05.2024).
22. Imberger J., Patterson J. C. Physical limnology. *Adv. Appl. Mech.* 1990; 27: 303—475.
23. Winslow L. A., Read J. S., Hansen G. J. et al. Seasonality of change: Summer warming rates do not fully represent effects of climate change on lake temperatures. *Limnol. Oceanogr.* 2017; 62: 2168—2178. doi: 10.1002/lno.10557.
24. Forsh-Menshutkina T. B. *Kislorodnyy gisterezis v oligotrofnnykh ozerakh. = Oxygen hysteresis in oligotrophic lakes.* Issues of modern limnology. Ed. Kalesnik S.V. Leningrad: Nauka Press. 1973; C. 94—101. (In Russ.).
25. Naumenko M. A., Guzivaty V. V. Climate Relationships between Air Temperature and Water Temperatures in the Different Limnetic Zones of Lake Ladoga. *Geography and Natural Resources.* 2022; 43(1): 69—76. doi: 10.1134/S1875372822010097.
26. Naumenko M. A., Guzivaty V.V. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga. *Limnological Review.* 2023; 23(3): 177—189. doi: org/10.3390/limnolrev23030011.
27. Woolway R. I., Sharma S., Weyhenmeyer G. A. et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nat Commun.* 2021; 12: 2318. doi:org/10.1038/s41467-021-22657-4.
28. Edlund M. B., Almendinger J. E., Fang X. et al. Effects of Climate Change on Lake Thermal Structure and Biotic Response in Northern Wilderness Lakes. *Water.* 2017; 9: 678. doi: org/10.3390/w9090678.

Информация об авторах

Михаил Арсеньевич Науменко, доктор географических наук, профессор, руководитель Лаборатории географии и гидрологии, Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», m.a.naumenko@mail.ru.

Вадим Викторович Гузиватый, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Лаборатории географии и гидрологии, Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук», guzivaty@gmail.com.

Information about authors

Mikhail Arsenievich Naumenko, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Geography and Hydrology, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (IL RAS), St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), m.a.naumenko@mail.ru.

Vadim Viktorovich Guzivaty, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Geography and Hydrology, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences (IL RAS), St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), guzivaty@gmail.com.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 20.09.2023

Принята к печати после доработки 14.05.2024

The article was received on 20.09.2023

The article was accepted after revision on 14.05.2024