



DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-6)

EDN <https://elibrary.ru/jpzjvv>

УДК 556.555.4

© М. А. Науменко*, В. В. Гузиватый, 2025

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Институт озероведения РАН, ул. Севастьянова, 9, г. Санкт-Петербург, 196105 Россия

*m.a.naumenko@mail.ru

Характерные черты климатического годового хода придонной температуры различных районов Ладожского озера

Статья поступила в редакцию 29.04.2025, после доработки 06.11.2025, принята в печать 17.11.2025

Аннотация

В настоящее время не существуют количественные оценки среднеклиматического годового хода параметров придонных температур в Ладожском озере, позволяющие судить о их межгодовых вариациях. Предложена феноменологическая модель среднеклиматической годовой изменчивости придонной температуры Ладожского озера в зависимости от глубины лимнического района. На основе анализа большого массива измерений температуры за столетний период определены характерные температуры и даты сезонного возникновения и диссипации вертикальной стратификации в течение года в связи с вариациями придонной температуры. Проведена оценка дисперсии и скорости изменения придонных температур в различные сезоны.

Начиная с глубины 100 м, в течение летнего периода существуют очень малые колебания придонной температуры в Ладожском озере. В зимний сезон эти колебания составляют примерно 1,5 °С и во многом зависят от даты возникновения и продолжительности периода открытой воды акватории и интенсивности вертикальной и горизонтальной конвекции. Эти показатели могут служить базовыми для оценки отклика реально измеренных или смоделированных термических параметров Ладожского озера на вариации климата, а также для сравнения с другими димиктическими озерами мира. Созданные эмпирические зависимости изменения придонной температуры от глубины дна для среднеклиматического года с ледовым покрытием и теплого (с не полным ледоставом) имеют прогностическое значение.

Ключевые слова: годовой ход придонной температуры, весенняя и осенняя изотермия, лимнические районы, димиктическое Ладожское озеро

© М. А. Naumenko*, V. V. Guzivaty, 2025

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, 9, Sevastyanova st., St. Petersburg, 196105, Russia

m.a.naumenko@mail.ru

Characteristic features of climatic annual variations of bottom temperature in different regions of Lake Ladoga

Received 29.04.2025, Revised 06.11.2025, Accepted 17.11.2025

Abstract

At present, there are no quantitative estimates of the mean climatic annual course of bottom temperature parameters in Lake Ladoga that allow us to judge their interannual variations. A phenomenological model of the mean climatic annual variability of the Lake Ladoga bottom temperature depending on the depth of the limnic region is proposed. Based on analysis of a large array

Ссылка для цитирования: Науменко М.А., Гузиватый В.В. Характерные черты климатического годового хода придонной температуры различных районов Ладожского озера // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 4. С. 80–93. EDN Jpzjvv. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-6)

For citation: Naumenko M.A., Guzivaty V.V. Characteristic features of climatic annual variations of bottom temperature in different regions of Lake Ladoga. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(4):80–93.

[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-6)

of temperature measurements for a century period, characteristic temperatures and dates of seasonal occurrence and dissipation of vertical stratification during the year in connection with variations in bottom temperature are determined. The dispersion and rate of change of near-bottom temperatures in different seasons were estimated.

Starting from a depth of 100 m, there are very small variations of the bottom temperature in Lake Ladoga during the summer period. In the winter season, these fluctuations are about 1.5 °C and largely depend on the date of occurrence and duration of the open water period of the water area and the intensity of vertical and horizontal convection. These indices can serve as a baseline for evaluating the response of real measured or modeled thermal parameters of Lake Ladoga to climate variations, as well as for comparison with other dimictic lakes of the world. The created empirical dependences of the near bottom temperature change on the floor depth for an average climatic year with ice cover and a warm year (with incomplete ice cover) has prognostic value.

Keywords: annual variation of bottom temperature, spring and fall isothermia, limnic regions, dimictic Lake Ladoga

1. Введение

Общее потепление озер наблюдается по всему миру [1–3], что в крупных димиктических озерах приводит к изменениям в режимах весеннего и осеннего полного перемешивания, интенсификации и удлинению периода летней стратификации [4, 5] и сокращению площади ледяного покрова [6–8].

Температура водной массы крупного озера, как правило, слабее реагирует на кратковременные колебания метеорологических параметров, чем на более долгосрочные климатические форсинги [9]. В синоптических масштабах температура поверхностного слоя демонстрирует быстрый квазисинхронный отклик на атмосферное воздействие, который обычно ослабевает с глубиной. Значительный годовой отклик термического состояния озера на интенсивное в течение года атмосферное воздействие проявляется в температуре воды эпилимниона и металимниона [10, 11]. Ниже термоклина, однако, толща воды может не реагировать на форсинг на поверхности озера, что приводит к значительному затуханию годового отклика в гипolimнионе. Наличие стратификации препятствует вертикальному перемешиванию и переносу кислорода и биогенов между слоями. В умеренных широтах в глубоких димиктических озерах два раза в год возникающее весеннее и осеннее полное вертикальное перемешивание, связанное с температурой максимальной плотности пресной воды 3,98 °C, является одним из важных процессов передачи тепла от поверхности до дна и «вентиляции» придонных горизонтов [12].

Анализ публикаций о долговременных круглогодичных измерениях придонной температуры в димиктических озерах [13–15] свидетельствует о резком отличии сезонного хода придонной температуры от сезонного хода температуры поверхности воды. Годовой диапазон изменений придонных температур (ПТ) в глубоких димиктических озерах очень небольшой по сравнению с изменениями температуры поверхности озера (ТПО), но процессы, определяющие пространственное распределение температуры у дна, различаются для водоемов с различными глубинами и зависят от зимнего ледового режима озера и вертикального обмена теплом. Однако все еще не существуют количественные оценки среднеклиматического хода параметров придонных температур в Ладожском озере, позволяющие судить о климатических вариациях относительно этого хода. Вопрос о климатических воздействиях на придонный слой воды в глубоком озере остается открытым. Климатические изменения могут привести к непосредственному изменению придонной температуры, и придонная температура может характеризовать межгодовую «память» озера. Именно по этой причине время наступления полного перемешивания значительно зависит от межгодовой изменчивости атмосферного воздействия на глубоководную температуру и практически является индикатором климатических вариаций [16]. Более того, придонная температура важна не только как гидрофизический параметр, но ее вариации влияют на структуру экосистемы, в частности на распределение популяции рыб и донных организмов.

В настоящее время нет публикаций о пространственно-временной изменчивости придонной температуры воды в крупнейшем европейском озере — Ладожском. Целью настоящей статьи является характеристика среднеклиматической (фоновой) изменчивости придонной температуры лимнических районов Ладожского озера, определение характерных температур и дат сезонного возникновения и диссипации вертикальной стратификации в течение года. Эти показатели могут служить базовыми для оценки отклика реально измеренных или смоделированных термических параметров Ладожского озера на вариации климата.

2. Исходные данные и определение характерных параметров придонной температуры

Значимые результаты по анализу годового хода придонной температуры для глубоких димиктических озер Верхнего (Канада — США) [13], Мичиган [15] и озера Паяярви (Финляндия) [14] были получены на основе многолетних измерений с временной дискретностью несколько минут — несколько часов на придонных горизонтах 170 м (оз. Верхнее), 110 м (оз. Мичиган), а также озера Паяярви на 75 м. Измерения в каждом озере выполнялись на глубине не более 10–15 м от дна.

Для крупнейшего в Европе Ладожского озера (максимальная глубина 230 м) в настоящее время знания о режиме придонной температуры все еще скудны из-за отсутствия долгосрочных круглогодичных измерений температуры воды в каком-либо лимническом районе от поверхности до дна с высоким пространственно-временным разрешением [17–19]. Однако, основываясь на архивных данных 1901 и 1903 г., А.И. Тихомиров указывает, что на максимальных глубинах озера придонная температура в зимне-весенний период была около 2,5–2,8 °С, т. е. значительно ниже температуры максимальной плотности ($T_{\text{мп}}$) на этих глубинах. Подтверждением этих наблюдений были измерения температуры воды от поверхности до дна в глубоководной части Ладожского озера с августа 1959 г. по октябрь 1960 г. с дискретностью около месяца, которые зафиксировали придонные температуры в марте–апреле 1960 г. около 2,6–2,8 °С [20].

Пространственно-временное распределение придонной температуры воды в любом крупном димиктическом озере в конечном счете зависит от распределения глубин [5, 21]. Чтобы охарактеризовать средний климатический сезонный ход температуры придонного горизонта (ПТ) были подготовлены массивы данных с декадным осреднением для периода открытой воды с мая по ноябрь, не зависимо от года наблюдений для каждой из лимнических зон озера, выделенных ранее. Акватория Ладожского озера была разбита на шесть районов: 1) мелководный с глубинами дна до 18 м; 2) переходный с глубинами от 18 до 50 м; 3) район озёрного уступа с глубинами от 50 до 70 м; 4) склоновый с глубинами от 70 до 100 м; 5) глубоководный с глубинами от 100 до 140 м; 6) впадины с глубинами более 140 м [22]. В базе данных Ладожского озера содержится более 400000 измерений температуры на различных горизонтах с 1897 г., характеризующих распределение температуры на стандартных разрезах и станциях ИНОЗ РАН и Гидрометеослужбы [19, 23]. В табл. 1 представлено распределение исходных данных для расчета статистических характеристик и построения графиков на рис. 1.

Таблица 1

Table 1

Количество использованных данных по районам и месяцам
 Number of data used by regions and month

	1 Район			2 Район			3 Район			4 Район			5 Район			6 Район		
	a*	b*	c*	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	0 м	10 м	15 м	0 м	20 м	40 м	0 м	30 м	50 м	0 м	50 м	100 м	0 м	80 м	130 м	0 м	100 м	210 м
Май	1434	189	59	1278	344	58	385	119	116	146	66	27	148	28	45	74	57	51
Июнь	2558	241	99	2761	595	119	928	236	200	462	167	52	436	83	63	212	113	88
Июль	2969	358	136	2180	753	156	864	229	237	595	279	91	567	105	99	365	161	84
Август	2304	347	99	1867	628	143	763	258	240	479	250	109	525	170	166	252	108	179
Сентябрь	1728	194	80	1164	361	67	494	135	125	287	153	49	367	90	79	220	93	69
Октябрь	1375	148	53	852	237	39	336	74	69	188	101	31	262	58	53	144	74	51
Ноябрь	575	65	33	199	61	12	47	5	4	45	20	—	64	16	12	32	16	10

Примечание: a* — поверхность,
 b* — глубина промежуточного горизонта,
 c* — глубина придонного горизонта $h_{\text{пр}}$

Для сравнения и характеристики различий между ПТ и температурой поверхности воды ТПО на рис. 1 приведен временной ход температуры поверхности, промежуточного горизонта и придонного горизонта для периода открытой воды для шести указанных районов а также дисперсии температуры воды для десятидневного периода со сдвигом в 5 сут.

Эти графики представляют фоновый (среднеклиматический) ход исследуемых характеристик. В основном, для каждой декады с 5 мая по 26 ноября, не зависимо от года наблюдения, количество используемых данных было более 300–400 значений, но для некоторых периодов это количество могло не превышать несколько десятков значений.

С использованием рис. 1 для каждого района были выделены следующие параметры, связанные с определением характеристик придонной температуры и создана схема (рис. 2):

(А1) — начальная температура и дата возникновения весенней изотермии, т. е. годовой минимум придонной температуры ($T_{\text{мин}}$) на вертикали от поверхности до дна;

(Б) — дата начала прямой стратификации в весенний период при температуре максимальной плотности $T_{\text{мп}}$;

(В) — дата и значение годового максимума температуры поверхности воды ($T_{\text{макс}}$);

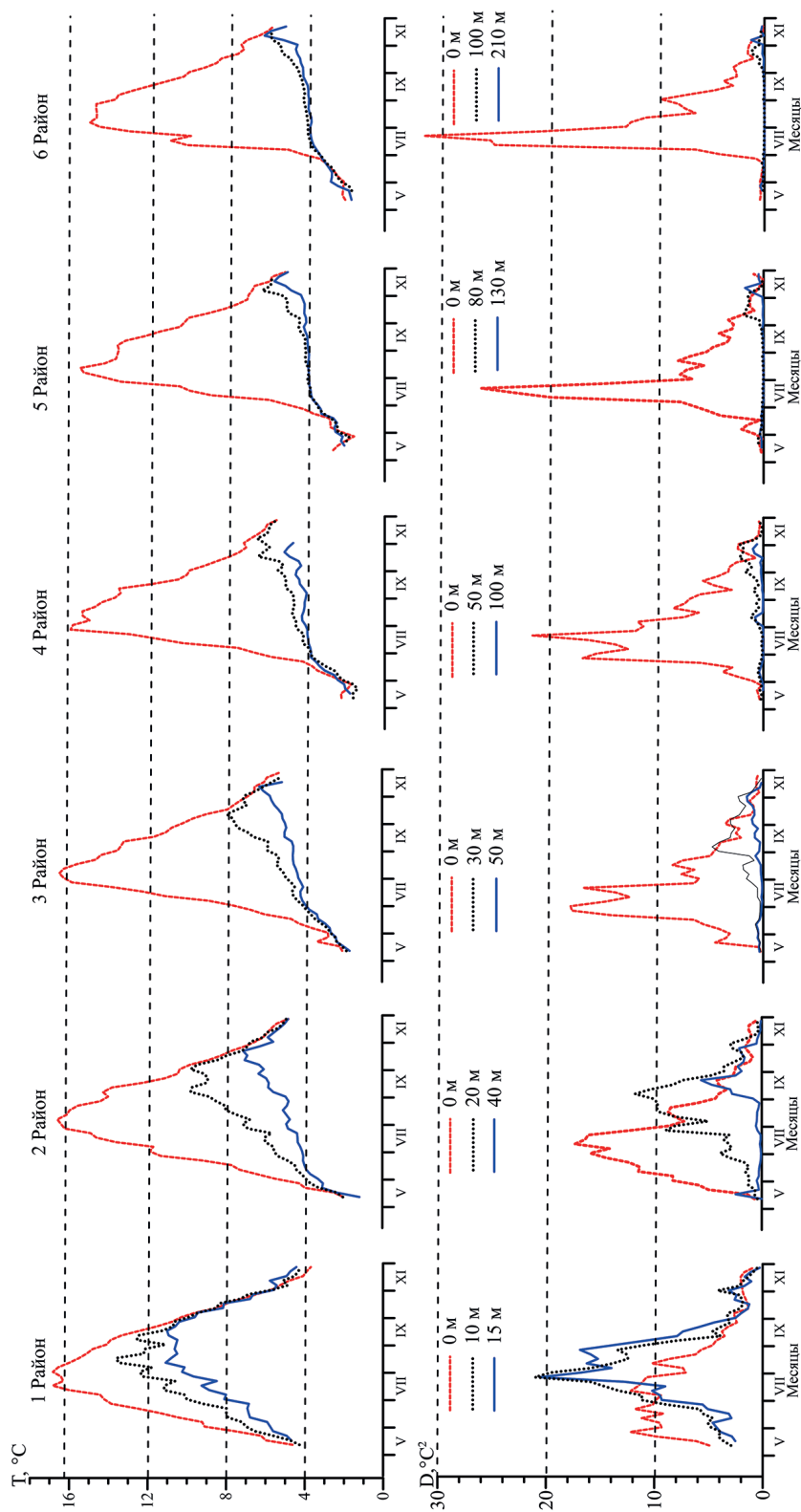


Рис. 1. Сезонный ход температуры воды T и ее дисперсии D на поверхности (красная линия), промежуточном горизонте (пунктирная) и у дна (синяя линия) для шести лимнических районов в период открытой воды

Fig. 1. Seasonal course of water temperature T and its dispersion D at the surface (red line), intermediate horizon (dashed line) and near the bottom (blue line) for six limnic regions during the open water period

(Г) — начальная температура и дата возникновения осенней изотермии, т. е. годовой максимум придонной температуры ($T_{\text{он}}$) на вертикали от поверхности до дна;
 (Д) — дата начала обратной стратификации в осенний период при температуре максимальной плотности $T_{\text{мп}}$;
 (А2, А1) — дата возникновения годового минимума придонной температуры $T_{\text{мин}}$.

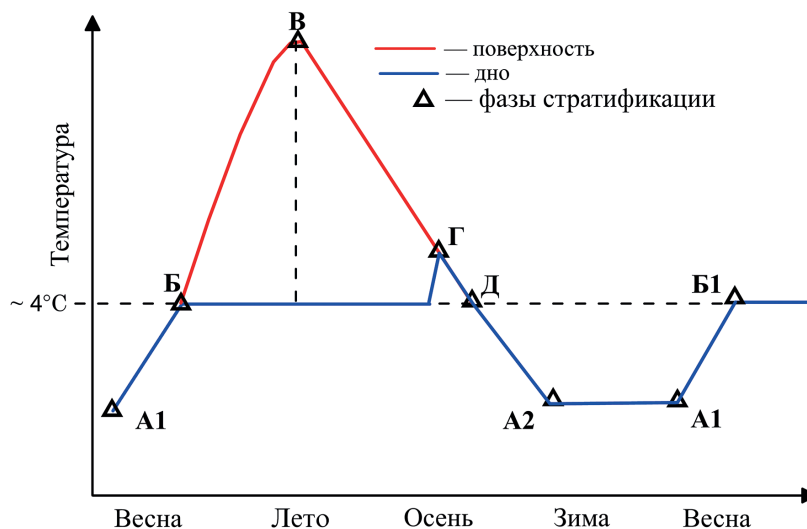


Рис. 2. Схематическое изображение сезонного хода придонной температуры (синяя линия) по сравнению с температурой поверхности воды (красная линия) в димиктическом озере

Fig. 2. Schematic representation of the seasonal course of near bottom temperature (blue line) versus water surface temperature (red line) in a dimictic lake

Некоторые из этих параметров, предложены в [15] и дополнены авторами статьи декадными дисперсиями температуры поверхности и придонного горизонта.

За дату начала весенней изотермии принимается дата полного вертикального перемешивания (А), когда температуры поверхности и придонного горизонта равны друг другу и меньше температуры наибольшей плотности пресной воды. Придонная температура является минимальной за год и может возникать еще при ледовом покрытии. Далее в результате радиационного прогрева вертикальное конвективное перемешивание продолжается до тех пор, пока температура придонной воды сравняется с температурой наибольшей плотности 3,98 °С. Эта дата определяет окончание полной весенней изотермии (Б), и дальнейшее непрерывное нагревание поверхностного слоя приводит к возникновению прямой устойчивой стратификации.

Осеннее полное вертикальное конвективное перемешивания начинается, когда на выбранной вертикали возникает изотермия и придонная температура достигает своего годового максимума в точке Г и заканчивается при изотермии по вертикали при температуре наибольшей плотности. После этого формируется обратная устойчивая вертикальная стратификация.

Таким образом, предложена физически обоснованная схема изменения придонной температуры, показанная на рис. 2. Это феноменологическая модель позволяет дать представления об изменениях придонной температуры в Ладожском озере, начиная с глубины дна 100 м (четвертый район) при средних ледовых условиях.

Придонная температура в весенний период в Ладожском озере растет от минимальной величины до температуры наибольшей плотности. С июня по октябрь в период прямой стратификации температура остается практически постоянной, что подтверждается ее минимальными дисперсиями и указывает на практически неизменяющуюся от года к году температуру у дна. Небольшой период в ноябре придонная температура может превышать $T_{\text{мп}}$, когда в результате свободной конвекции возникает вертикальная изотермия и придонная температура достигает своего годового максимума в точке Г. Единственный период в годовом цикле, когда придонная температура понижается, это период между точками Г и А2.

Одним из важных в годовом цикле является период зимнего постоянства придонной температуры А2—А1, в этот период при наличии сплошного ледового покрова придонная температура достигает своего го-

дового минимума, на который указывают публикации по озеру Мичиган [15] и Паэярви (Финляндия) [14], а также результаты моделирования [24, 25]. Длительное постоянство придонной температуры свидетельствует о препятствии проникновения тепла вглубь при наличии ледового покрова и зимнего термоклина в период обратной стратификации. Однако, в этот период могут генерироваться внутренние волны от высокочастотных колебаний до сейшевых и способствовать горизонтальным движениям [26].

Для более мелководных первых трех районах с глубинами дна до 80–90 м в период открытой воды придонная температура растет от температуры максимальной плотности до своего максимума примерно с постоянной скоростью от точки Б до точки Г с мая по ноябрь (рис. 1).

Параметры, приведенные выше, являются климатическими параметрами для каждого димиктического озера. Следует заметить, что годовые максимумы и минимумы придонных температур в разных частях озера различны и наступают в разные сроки, что связано с различием глубины дна, прозрачностью, ледовыми условиями и ветровой вынужденной конвекцией.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Период открытой воды

Представление пространственно-временной изменчивости температуры воды для лимнических районов схемой рис. 2 позволило определить характерные даты возникновения и диссипации вертикальной стратификации для периода открытой воды в Ладожском озере, которые могут служить реперами (нормами) для обнаружения отклонений от среднеклиматического хода. Результаты обобщены в табл. 2 с использованием данных годового цикла температуры воды Ладожского озера из атласа [19]. Для каждого района были определены девять указанных выше параметров поверхностной и придонной температуры воды.

Важными, ранее не определяемыми для Ладожского озера, являются длительности периодов весенней (рис. 2, А1–Б) и осенней изотермии (рис. 2, Д–Г). Подчеркнем, что весенняя изотермия в результате свободной конвекции имеет место при нагревании от минимальной придонной температуры до температуры максимальной плотности $T_{мп}$, а осенняя изотермия также в режиме свободной конвекции происходит при охлаждении от максимальной придонной температуры до $T_{мп}$.

Для мелководного района весенняя изотермия начинается от минимальной температуры около 0,4 °С в середине апреля, а в глубоководном районе этот процесс начинается на месяц позже с температуры 2,6 °С (табл. 2). На оз. Мичиган аналогичный процесс в глубоководной части с глубинами около 180 м начинается в первой декаде мая [27] и заканчивается в конце июня, когда придонная температура достигает температуры максимальной плотности на этой глубине ~3,6 °С.

Начало осенней изотермии в мелководном районе Ладожского озера начинается в середине сентября с температуры 11,4 °С, максимальной на придонном горизонте. Наибольшая разница между максимальными придонными температурами на мелководье и в глубоководной части составляет около 6 °С, а временной интервал между ними т. е. в датах возникновения осенней изотермии, составляет около двух месяцев.

Несомненно, что продолжительность весенней изотермии увеличивается с увеличением глубины дна, и, начиная с глубины 50 м, равняется 35–40 сут (табл. 2), что подтверждается измерениями аналогичного процесса в Петрозаводской губе Онежского озера, однако, чем раньше сойдет лед, тем продолжительность весенней изотермии будет больше [28]. Продолжительность осенней изотермии уменьшается с увеличением глубины с двух месяцев на мелководье до трети месяца в глубоководной зоне.

Самое раннее возникновение минимальной температуры у дна происходит в мелководном районе в середине декабря, примерно через полмесяца — в глубоководном районе. Продолжительность периода (А1–А2) постоянной минимальной придонной температуры в Ладожском озере в зимний период изменяется от трех месяцев в первом мелководном районе до четырёх с половиной месяцев в районе с глубинами более 200 м.

Таблица 3 с очевидностью свидетельствует, что продолжительность периода прямой стратификации (с температурами выше 4 °С) значительно изменяется от мелководного района до глубоководного: для первого района составляет 195 сут, а самого глубоководного — не более 168 сут.

Отметим, что период нагревания и охлаждения поверхности воды ни для одного из районов не являются равными друг другу, т. е. сезонный год не является симметричным относительно прямой, проведенной через максимум температуры (рис. 2). Период нагревания поверхности изменяется от 27 % в глубоководном районе до 38 % в мелководном районе относительно продолжительности летней стратификации (табл. 3). Продолжительность нагревания придонного слоя изменяется от минимума 130 сут (70 % от продолжительности периода стратификации) в мелководном районе до 148 сут (90 %) в глубоководном районе.

Таблица 2
Table 2

Среднеклиматические даты и температуры различных этапов вертикальной стратификации Ладожского озера
Mean climatic dates and temperatures of different stages of vertical stratification of Lake Ladoga

Параметры	1 Район *h _{гпр.} = 15 м		2 Район h _{гпр.} = 40 м		3 Район h _{гпр.} = 50 м		4 Район h _{гпр.} = 100 м		5 Район h _{гпр.} = 130 м		6 Район h _{гпр.} = 219 м	
	Дата	Т, °С	Дата	Т, °С	Дата	Т, °С	Дата	Т, °С	Дата	Т, °С	Дата	Т, °С
(А1) начало весенней изотермии	15 апр	0,4	29 апр	1,3	4 май	1,7	11 май	2,2	15 май	2,2	18 май	2,6
(Б) начало прямой стратификации	9 май	4,0	28 май	4,0	7 июня	4,0	16 июня	4,0	21 июня	4,0	27 июня	4,0
(В) максимальная температура на поверхности	20 июля	17,5	31 июля	16,7	2 авг	16,5	7 авг	16,3	9 авг	15,6	11 авг	15,1
(Г) начало осенней изотермии	16 сен	11,4	18 окт	7,4	5 ноя	5,5	11 ноя	5,4	17 ноя	5,3	22 ноя	5,3
(Д) начало обратной стратификации	14 ноя	4,0	21 ноя	4,0	30 ноя	4,0	5 дек	4,0	7 дек	4,0	12 дек	4,0
(Б-А1) осенняя изотермия	24		29		35			35	38			40
(Д-Г) осенней изотермия	59		34		25		24		20			20
(А2) возникновение головного мнимума придонной температуры	13 дек	0,4	18 дек	1,3		1,7	5 янв	2,2	4 янв		2 янв	2,6

Примечание: *h_{гпр.} — глубина придонного горизонта в данном районе

Таблица 3
Table 3

Среднеклиматические продолжительности различных этапов стратификации Ладожского озера
Mean climatic durations of different stages of Lake Ladoga stratification

Район	1 Район h _{гпр.} = 15 м		2 Район h _{гпр.} = 40 м		3 Район h _{гпр.} = 50 м		4 Район h _{гпр.} = 100 м		5 Район h _{гпр.} = 130 м		6 Район h _{гпр.} = 219 м	
	нагр.	охл.	нагр.	охл.	нагр.	охл.	нагр.	охл.	нагр.	охл.	нагр.	охл.
Продолжительность, сутки	72	117	64	113	55	120	52	120	48	120	45	123
Поверхность	130	59	143	34	150	25	148	24	149	20	148	20
Придонный слой												
(Д-Б) — прямая стратификация	189		177		175		172		169		168	
(Б-Д) — обратная стратификация	176		188		190		193		196		197	
(А1-А2) продолжительность * T _{мин.}	93		125		130		134		138		137	

Примечание: *T_{мин.} — минимальная придонная температура.

Характерные черты климатического годового хода придонной температуры различных районов Ладожского озера Characteristic features of climatic annual variations of bottom temperature in different regions of Lake Ladoga

Соотношение между длительностью периода прямой (Д–Б) и обратной (Б1–Д) стратификации изменяется от мелководья к глубоководным районам (табл. 3). Только в первом районе продолжительность прямой стратификации в годовом цикле превышает продолжительность обратной стратификации на 13 сут; тогда как в шестом глубоководном районе обратная стратификация продолжается на месяц дольше прямой стратификации.

Годовая амплитуда придонной температуры уменьшается с увеличением глубины дна от 11 °С в мелководном районе до 2,7 °С на глубинах более 200 м (табл. 4). Временной сдвиг между годовым максимумом температуры поверхности и дна на мелководье составляет 58 сут, в глубоководном районе более трех месяцев, а разность температур — 6,1 °С и 9,8 °С соответственно.

Таблица 4

Table 4

Среднеклиматические амплитуды и скорости изменений поверхностной и придонной температуры Ладожского озера

Mean climatic amplitudes and rates of change of surface and near-bottom temperature of Lake Ladoga

Параметры	1 район	2 район	3 район	4 район	5 район	6 район
Годовая амплитуда придонной T , °С	11,0	6,1	3,8	3,2	3,1	2,7
Разность $**T_{\text{макс}}$ на поверхности и у дна, °С	6,1	9,3	11,0	10,9	10,3	9,8
Разность дат $T_{\text{макс}}$ на поверхности и у дна, сутки	58	79	95	96	101	103
Скорость увеличения T весной от $*T_{\text{мин}}$ до 4 °С (А1–Б), °С/сут	0,15	0,09	0,07	0,05	0,05	0,03
Скорость уменьшения осенью от $T_{\text{макс}}$ до 4 °С, °С/сут	0,13	0,10	0,06	0,06	0,06	0,07
Скорость заглубления $T_{\text{макс}}$, м/сутки	0,3	0,5	0,5	1,0	1,3	2,1
Отношение амплитуд T у дна к T поверхности, %	62,9	36,5	23,0	19,6	19,8	17,8

Примечание: $*T_{\text{мин}}$ — минимальная придонная температура. $**T_{\text{макс}}$ — максимальная температура.

Скорости изменения придонной температуры в период нагревания от минимума до температуры максимальной плотности (А1 — Б) и соответствующий период охлаждения (Г — А2) наибольшие в мелководной части Ладожского озера (0,13–0,15 град/сут) и примерно постоянны в более глубоких районах (начиная с глубины 70 м) — 0,03–0,07 град/сут, что согласуется с непосредственными измерениями в оз. Мичиган [27].

Скорость заглубления максимума температуры, характеризующая скорость свободного конвективного перемешивания в период охлаждения поверхности воды, увеличивается от мелководного района к глубоководному, достигая максимума около 2 м/сут над глубинами 200 м в ноябре, что подтверждает полученные ранее результаты [10, 11].

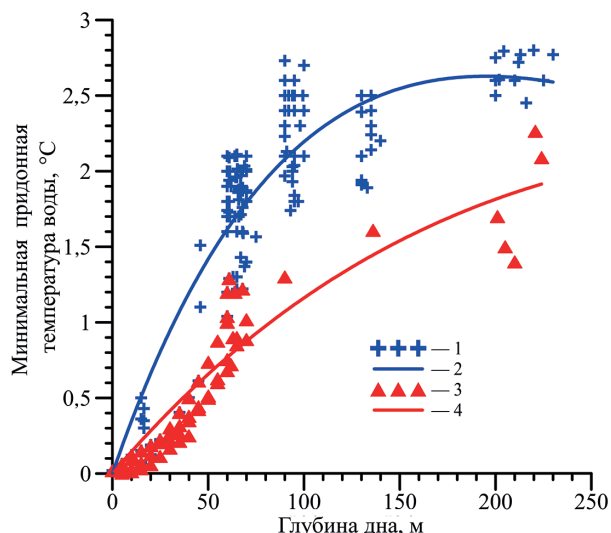
Отношение годовой амплитуды поверхностной и придонной температуры указывает на значительную изменчивость (мобильность) температуры в мелководном районе по сравнению с глубоководным, и, следовательно, на большую стабильность температуры в глубоководных районах (табл. 4). Динамика гипolimниона на глубине более 200 м слабо связана с поверхностным воздействием. Годовая амплитуда придонной температуры составляет лишь около 18 % годовой амплитуды поверхностной температуры воды.

Показатели изменчивости (дисперсии) температуры поверхности и придонного горизонта кардинально отличаются друг от друга (рис. 1, нижняя панель). Для всех шести зон Ладожского озера дисперсии температуры поверхности достигают своих максимальных величин в период нагревания до того, как температура поверхности достигнет своего максимума. Наибольшие экстремумы дисперсий имеют место в самом глубоководном районе, но временной диапазон их существования короче по сравнению с мелководными районами.

Придонные температуры имеют малые величины дисперсий, что указывает на их незначительную изменчивость в период открытой воды. Постоянство температуры свидетельствует об отсутствии как вертикального, так и горизонтального обмена теплом. Единственные экстремумы проявляются в периоды осеннего полного перемешивания, (Г) (рис. 2) что еще раз свидетельствует о важности этого периода в термике димиктического озера и вероятности возможных климатических вариаций в ноябре — декабре в Ладожском озере.

3.2. Зимний период

А.И. Тихомиров [29] обнаружил, что придонная температура зависит от состояния ледового покрова и его продолжительности. В холодные зимы с длительным сплошным ледовым покровом придонные температуры выше, чем в теплые зимы, когда Ладожское озеро полностью не покрывается льдом, что связано



с большим выхолаживаем водной толщи. Эта особенность была подтверждена на озере Верхнем [13]. Мы выбрали из базы данных немногочисленные придонные температуры с начала года до периода, когда температура была не выше температуры наибольшей плотности. Изменения придонной температуры в зависимости от глубины дна представлены двумя эмпирическими зависимостями (рис. 3).

Рис. 3. Зависимость минимальной придонной температуры в Ладожском озере от глубины дна для средней и теплой зимы: 1, 3 — измерения, 2, 4 — аппроксимационные кривые

Fig. 3. Dependence of the minimum bottom temperature in Lake Ladoga on the floor depth for average and warm winter: 1, 3 — measurements, 2, 4 — approximation curves

Аппроксимация для среднеклиматической зимы (синяя кривая) соответствует формуле

$$T_{\min} = a \cdot X \cdot \text{EXP}(c \cdot X), \quad (1)$$

где X — глубина дна (м); $a = 0,03667$; $c = -0,00513$; $n = 152$; коэффициент детерминации = 0,854.

Для теплой зимы, когда озеро не полностью покрыто льдом (красная кривая) вид формулы остается прежним, меняются коэффициенты $a = 0,01488$; $c = -0,00247$; $n = 63$; коэффициент детерминации = 0,866.

Эти зависимости соответствуют физическому смыслу распределения придонных температур в Ладожском озере, а именно, придонные температуры увеличиваются с глубиной дна, как и в Великих американских озерах [13, 14]. Табл. 2 указывает, что минимальные придонные температуры изменяются от 0,4 в мелководной прибрежной зоне до 2,5–2,8 °C на глубинах более 200 м.

В холодные зимы (рис. 3, синяя кривая), когда нет непосредственного взаимодействия поверхности озера с атмосферой, при ярко выраженной обратной стратификации, минимальная температура у дна меньше температуры максимальной плотности, но ее величина в самой глубоководной части озера не опускается ниже 2,6–2,8 °C во второй половине июня до возникновения прямой устойчивой стратификации. Начиная с глубины дна 150 м. температура примерно постоянна, что указывает на наличие горизонтального турбулентного перемешивания, конвекцию, которая сопровождается течением по наклонному дну [30].

При отсутствии ледяного покрова происходят значительные потери тепла озером за счет испарения и эффективного излучения [18]. Малая вертикальная устойчивость обратной стратификации ($N^2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$) преодолевается вертикальным турбулентным обменом и действием ветра, что способствует понижению температуры у дна до 1,9–2,3 °C (рис. 3, красная кривая). Придонная температуры становится ниже, чем в год с полным ледовым покрытием.

Таким образом, основываясь на прогнозируемом климатическом потеплении, сравнение кривых для теплого и холодного года (рис. 3) позволяет оценить степень изменения придонных температур и дат возникновения прямой стратификации в Ладожском озере по сравнению со среднеклиматическими (табл. 2). По оценкам Тихомирова [29] минимальный теплозапас Ладожского озера при частичном ледоставе вдвое меньше, чем при полном ледоставе, что было обнаружено и для озера Верхнего [13]. Было показано, что в год с полным ледоставом минимальная придонная температура и теплозапас была выше, чем при неполном ледоставе и, следовательно, зимний ледовый режим во многом определяет возникновение весенней термической зоны в Ладожском озере и изменчивость сроков начала летней стратификации [31].

Тихомиров [29] показал, что в течение зимнего периода существуют различные фазы термического режима, в современных публикациях также выделяют различные типы термического состояния в течение зимы [32, 33]. В крупном димиктическом озере подледная циркуляция представляет собой несколько фаз в течение зимы, в каждую из которых на разных стадиях состояния ледового покрова доминируют различные механизмы обмена теплом и разная термическая структура. Зимнее охлаждение может быть вызвано вертикальной конвекцией и плотностными течениями, возникающие в результате дифференциального охлаждения, а также сейшевыми колебаниями [26]. Выделяют по крайней мере два режима вертикального распределения температуры подо льдом: первый — водная толща преимущественно стратифицирована без существенного проникновения теплового потока под лед и второй, который начинается с таяния снега

на льду и увеличения радиационного потока тепла через лед, водная толща активно перемешивается [34, 33, 32]. Вертикальное конвективное охлаждение часто считается доминирующим процессом для придонного горизонта. Однако долговременные измерения на Женевском озере показывают, что горизонтальная конвекция (боковая адвекция) может быть важным процессом охлаждения придонных горизонтов и этот процесс должен рассматриваться как трехмерный [35]. Вместе с этим, во время более холодных зим, боковая адвекция вносит значительный вклад в охлаждение и насыщение кислородом глубоких слоев [36].

4. Выводы

На основе долговременных измерений придонной температуры в димиктических озерах, представленных в публикациях [32, 12–15] и с учетом данных по Ладожскому озеру, предложена феноменологическая модель изменения придонной температур в зависимости от глубины лимнического района в предположении незначительного влияния придонного потока тепла [17]. В течение летнего периода существуют очень малые колебания придонной температуры, начиная с глубины 100 м, тогда, как в зимний период эти колебания составляют примерно 1,5 °C и во многом зависят от даты возникновения и продолжительности открытой воды акватории и интенсивности вертикальной и горизонтальной конвекции, тем самым указывая на возможные климатические воздействия на гипolimнион Ладожского озера.

Проведена количественная оценка значимых параметров летней и зимней стратификации в связи с вариациями придонной температуры. Эти параметры являются климатически значимыми физическими характеристиками, важными как для сравнения с другими димиктическими озерами мира, так и для анализа климатических изменений и верификации термогидродинамических моделей.

Созданная эмпирическая зависимость придонной температуры от глубины дна для среднеклиматического и теплого года имеет прогностическое значение. Зимний подледный режим придонных температур Ладожского озера требует особого рассмотрения.

Финансирование

Проведенные исследования выполнены по госзаданию FFZF-2024-0001 «Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий в условиях воздействия природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений».

Funding

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”.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Литература

1. Schneider P., Hook S.J., Radocinski R.G., et al. Satellite observations indicate rapid warming trend for lakes in California and Nevada // *Geophysical Research Letters*. 2009. No. 36. P. 22402. <https://doi.org/10.1029/2009GL040846>
2. Schneider P., Hook S.J. Space Observations of Inland Water Bodies Show Rapid Surface Warming since 1985 // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. P. L22405. <https://doi.org/10.1029/2010GL045059>
3. 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. Vol. 42, No. 24. P. 10773–10781. EDN WOYONH. <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
4. Woolway R.I., Sharma S., Weyhenmeyer G.A., et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. 2318. EDN XGZONB. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4>
5. Kraemer B.M., Anneville O., Chandra S. et al. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change // *Geophysical Research Letters*. 2015. No. 42. P. 4981–4988. EDN VFRRDV. <https://doi.org/10.1002/2015GL064097>

6. Fang X., Stefan H.G. Simulations of climate effects on water temperature, dissolved oxygen, and ice and snow covers in lakes of the contiguous United States under past and future climate scenarios // *Limnology and Oceanography*. 2009. No. 54. P. 2359–2370. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2359
7. Butcher J.B., Nover D., Johnson T.E., et al. Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change // *Climatic Change*. 2015. No. 129. P. 295–305. EDN UQGUHF. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1326-1>
8. Austin J.A. What controls the onset of winter stratification in a deep, dimictic lake? // *Limnology and Oceanography*. 2024. Vol. 69. P. 2791–2800. EDN UAAXOB. <https://doi.org/10.1002/lno.12704>
9. Livingstone D.M. Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: A short-term climatic change indicator? // *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*. 1993. Vol. 25. P. 75–81.
10. Науменко М.А., Гузиватый В.В. Методические подходы и результаты анализа климатического сезонного хода параметров устойчивой стратификации димиктического озера (на примере центральной части Ладожского озера) // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2022. Т. 58, № 1. С. 52–62. EDN JBDDAL. <https://doi.org/10.31857/S0002351522010102>
11. Naumenko M., Guzivaty V. Seasonal Evolution of Stable Thermal Stratification in Central Area of Lake Ladoga // *Limnological Review*. 2023. Vol. 23, No. 3. P. 177–189. EDN UDPBII. <https://doi.org/10.3390/limnolrev23030011>
12. Jansen J., MacIntyre S., Barrett D.C., et al. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. 126. e2020JG006237. EDN LMRTBN. <https://doi.org/10.1029/2020JG006237>
13. Titze D., Austin J. Winter thermal structure of Lake Superior // *Limnology and Oceanography*. 2014. Vol. 59, No. 4. P. 1336–1348. EDN UTQMRF. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.4.1336>
14. Salonen K., Pulkkanen M., Salmi P., Griffiths R.W. Interannual variability of circulation under spring ice in a boreal lake // *Limnology and Oceanography*. 2014. Vol. 59, No. 6. P. 2121–2132. EDN URYVHF. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.6.2121>
15. Anderson E.J., Stow C.A., Gronewold A.D., et al. Seasonal overturn and stratification changes drive deep-water warming in one of Earth's largest lakes // *Nature Communications*. 2021. No. 12. 1688 p. EDN GNMQDB. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21971-1>
16. Ambrosetti W., Barbanti L. Deep water warming in lakes: an indicator of climatic change // *Journal of Limnology*. 1999. 58 (1). P. 1–9. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.1999.1>
17. Дучков А.Д., Казанцев С.А. Результаты изучения теплового потока через дно озер // *Теоретические и экспериментальные исследования по геотермике морей и океанов*. М.: Наука, 1984. С. 104–113.
18. Тихомиров А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера // *Тепловой режим Ладожского озера*. Л.: Издательство Ленинградского университета. 1966. С. 144–217.
19. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / Под ред. Румянцев В.А. СПб.: Нестор-История, 2015. 200 с.
20. Науменко М.А., Каретников С.Г., Гузиватый В.В. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера // *Доклады РАН*. 2000. Т. 373, № 2. С. 247–250. EDN MUCREV
21. Деньгина Р.С. Сезонная динамика зоопланктона в глубоководной части Ладожского озера. В сб.: *Элементы режима Ладожского озера*. М.–Л.: Наука, 1964. С. 80–107.
22. Науменко М.А. Анализ морфометрических характеристик подводного рельефа Ладожского озера на основе цифровой модели // *Известия РАН. Серия географическая*. 2013. № 1. С. 62–72. EDN PUWVHJ
23. Гузиватый В.В., Каретников С.Г., Науменко М.А. Опыт создания и использования банка термических данных Ладожского озера // *География и природные ресурсы*. 1998. № 3. С. 89–96. EDN IBWWHX
24. Jones I., Sahlberg J., Persson I. Modelling the Impact of Climate Change on the Thermal Characteristics of Lakes / In: George G. (eds) *The Impact of Climate Change on European Lakes*. Aquatic Ecology Series. Dordrecht. Springer, 2010. Vol. 4. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2945-4_7
25. Ye X., Anderson E.J., Chu P.Y., Huang C., Xue P. Impact of Water Mixing and Ice Formation on the Warming of Lake Superior: A Model-guided Mechanism Study // *Limnology and Oceanography*. 2019. Vol. 64. P. 558–574. EDN QZUYDO. <https://doi.org/10.1002/lno.11059>
26. Kirillin G., Aslamov I., Leppäranta M., Lindgren E. Turbulent mixing and heat fluxes under lake ice: The role of seiche oscillations // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. P. 6493–504. EDN CAKJZM. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6493-2018>
27. Austin J.A. Observations of radiatively driven convection in a deep lake // *Limnology and Oceanography*. 2019. Vol. 64. P. 2152–2160. EDN DJUVEE. <https://doi.org/10.1002/lno.11175>

28. Здорovenнова Г.Э., Здорovenнов Р.Э., Пальшин Н.И., Ефремова Т.В. Сезонная и межгодовая изменчивость температуры воды в Петрозаводской губе Онежского озера // Известия Русского географического общества. 2023. Т. 155, № 3–4. С. 47–61. EDN RRKKBK. <https://doi.org/10.31857/S0869607123030126>
29. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
30. Чубаренко И.П. Горизонтальная конвекция над подводными склонами / Калининград: Терра Балтика, 2010. 256 с. EDN UBCINF
31. 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. URL: <https://hydrophysics.spbrc.ru/jour/article/view/80> (дата обращения: 20.03.2025). EDN SIZOND. <https://doi.org/10.7868/S2073667321020076>
32. Hughes K.S., Forrest A.L., Cortés A., Bombardelli F.A. Transitional circulation patterns from full ice cover to ice-off in a seasonally ice-covered lake // Aquatic Sciences. 2024. 86. 40. EDN GRMDEW. <https://doi.org/10.1007/s00027-024-01044-3>
33. Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., et al. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review // Aquatic Sciences. 2012. Vol. 74. P. 659–682. EDN RGOEET. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0279-y>
34. Mironov D., Terzhevik A., Kirillin G., et al. Radiatively driven convection in ice-covered lakes: Observations, scaling, and a mixed layer model // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2002. Vol. 107, No. 4. EDN GWPPZP. <https://doi.org/10.1029/2001JC000892>
35. Lemmin U. Insights into the dynamics of the deep hypolimnion of Lake Geneva as revealed by long-term temperature, oxygen, and current measurements // Limnology and Oceanography. 2020. Vol. 65. P. 2092–2107. EDN CQSMAX. <https://doi.org/10.1002/lno.11441>
36. Yang B., Young J., Brown L., Wells M. High-frequency observations of temperature and dissolved oxygen reveal under-ice convection in a large lake // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, P. 12218–12226. EDN YENAVF. <https://doi.org/10.1002/2017GL075373>

References

1. Schneider P, Hook SJ, Radocinski RG, et al. Satellite observations indicate rapid warming trend for lakes in California and Nevada. *Geophysical Research Letters*. 2009;36: L22402. <https://doi.org/10.1029/2009GL040846>
2. Schneider P, Hook SJ. Space observations of inland water bodies show rapid surface warming since 1985. *Geophysical Research Letters*. 2010;37(22): L22405. <https://doi.org/10.1029/2010GL045059>
3. O'Reilly CM, Sharma S, Gray DK, 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>
4. Woolway RI, Sharma S, Weyhenmeyer GA, et al. Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nature Communications*. 2021;12(1):2318. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4>
5. Kraemer BM, Anneville O, Chandra S, et al. Morphometry and average temperature affect lake stratification responses to climate change. *Geophysical Research Letters*. 2015;42(12):4981–4988. <https://doi.org/10.1002/2015GL064097>
6. Fang X, Stefan HG. Simulations of climate effects on water temperature, dissolved oxygen, and ice and snow covers in lakes of the contiguous United States under past and future climate scenarios. *Limnology and Oceanography*. 2009;54(6, part 2):2359–2370. https://doi.org/10.4319/lno.2009.54.6_part_2.2359
7. Butcher JB, Nover D, Johnson TE, et al. Sensitivity of lake thermal and mixing dynamics to climate change. *Climatic Change*. 2015;129(1–2):295–305. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1326-1>
8. Austin JA. What controls the onset of winter stratification in a deep, dimictic lake? *Limnology and Oceanography*. 2024;69(12):2791–2800. <https://doi.org/10.1002/lno.12704>
9. Livingstone DM. Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: A short-term climatic change indicator? *Verhandlungen des Internationalen Vereins für Limnologie*. 1993;25:75–81.
10. Naumenko MA, Guzivaty VV. 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. <https://doi.org/10.1134/S0001433822010108>
11. Naumenko M, Guzivaty V. Seasonal evolution of stable thermal stratification in central area of Lake Ladoga. *Limnological Review*. 2023;23(3):177–189. <https://doi.org/10.3390/limnolrev23030011>
12. Jansen J, MacIntyre S, Barrett DC, et al. Winter limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021;126(4): e2020JG006237. <https://doi.org/10.1029/2020JG006237>

13. Titze D, Austin J. Winter thermal structure of Lake Superior. *Limnology and Oceanography*. 2014;59(4):1336–1348. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.4.1336>
14. Salonen K, Pulkkanen M, Salmi P, Griffiths RW. Interannual variability of circulation under spring ice in a boreal lake. *Limnology and Oceanography*. 2014;59(6):2121–2132. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.6.2121>
15. Anderson EJ, Stow CA, Gronewold AD, et al. Seasonal overturn and stratification changes drive deep-water warming in one of Earth's largest lakes. *Nature Communications*. 2021;12(1):1688. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21971-1>
16. Ambrosetti W, Barbanti L. Deep water warming in lakes: an indicator of climatic change. *Journal of Limnology*. 1999;58(1):1–9. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.1999.1>
17. Duchkov AD, Kazancev SA. Results of the study of heat flow through the bottom of lakes. In: *Theoretical and experimental studies on geothermics of seas and oceans*. Moscow: Nauka; 1984:104–113. (In Russ).
18. Tikhomirov AI. Temperature regime and heat contents of Lake Ladoga. In: *Thermal regime of Lake Ladoga*. Leningrad: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta; 1966:144–217. (In Russ).
19. *Lake Ladoga and sights of its coast. Atlas*. Rumyantsev VA, editor. St Petersburg: Nestor-History; 2015. 200 p. (In Russ).
20. Naumenko MA, Karetnikov SG, Guzivaty VV. Spatiotemporal thermal differentiation of the Lake Ladoga water. *Doklady Earth Sciences*. 2000;373A(9):923–926.
21. Dengina RS. Seasonal dynamic of zooplankton in deep part of the Lake Ladoga. In: *Regime elements of the Lake Ladoga*. Moscow-Leningrad: Nauka; 1964:80–107. (In Russ).
22. Naumenko MA. Analysis of morphometric characteristics of bottom relief of Lake Ladoga on the basis of the digital model. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2013;(1):62–72. (In Russ).
23. Guzivaty VV, Karetnikov SG, Naumenko MA. Experience of creation and use of the thermal data bank of Lake Ladoga. *Geografia i Prirodnye Resursy*. 1998;(3):89–96. (In Russ).
24. Jones I, Sahlberg J, Persson I. Modelling the impact of climate change on the thermal characteristics of lakes. In: George G, editor. *The Impact of Climate Change on European Lakes*. Aquatic Ecology Series, vol 4. Dordrecht: Springer; 2010. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2945-4_7
25. Ye X, Anderson EJ, Chu PY, Huang C, Xue P. Impact of water mixing and ice formation on the warming of Lake Superior: A model-guided mechanism study. *Limnology and Oceanography*. 2019;64(2):558–574. <https://doi.org/10.1002/lno.11059>
26. Kirillin G, Aslamov I, Leppäranta M, Lindgren E. Turbulent mixing and heat fluxes under lake ice: The role of seiche oscillations. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018;22(12):6493–6504. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6493-2018>
27. Austin JA. Observations of radiatively driven convection in a deep lake. *Limnology and Oceanography*. 2019;64(5):2152–2160. <https://doi.org/10.1002/lno.11175>
28. Zdorovenova GE, Zdorovenov RE, Palshin NI, Efremova TV. Seasonal and inter-annual variability of water temperature in Petrozavodsk Bay of Lake Onega. *Bulletin of the Russian Geographical Society*. 2023;155(3–4):47–61. <https://doi.org/10.31857/S0869607123030126> (In Russ).
29. Tikhomirov AI. *Thermic state of large lakes*. Leningrad: Nauka; 1982. 232 p. (In Russ).
30. Chubarenko IP. *Horizontal convection over underwater slopes*. Kaliningrad: Terra Baltica; 2010. 256 p. (In Russ).
31. Naumenko MA. Features of climatic relationships between surface water-air temperature during vernal heating period in Lake Ladoga. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021;14(2):78–88. URL: <https://hydrophysics.spbr.ru/jour/article/view/80> (date of access: 20.03.2025). <https://doi.org/10.7868/S2073667321020076> (In Russ).
32. Hughes KS, Forrest AL, Cortés A, Bombardelli FA. Transitional circulation patterns from full ice cover to ice-off in a seasonally ice-covered lake. *Aquatic Sciences*. 2024;86(2):40. <https://doi.org/10.1007/s00027-024-01044-3>
33. Kirillin G, Leppäranta M, Terzhevik A, et al. Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquatic Sciences*. 2012;74(4):659–682. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0279-y>
34. Mironov D, Terzhevik A, Kirillin G, et al. Radiatively driven convection in ice-covered lakes: Observations, scaling, and a mixed layer model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2002;107(C4):3032. <https://doi.org/10.1029/2001JC000892>
35. Lemmin U. Insights into the dynamics of the deep hypolimnion of Lake Geneva as revealed by long-term temperature, oxygen, and current measurements. *Limnology and Oceanography*. 2020;65(9):2092–2107. <https://doi.org/10.1002/lno.11441>
36. Yang B, Young J, Brown L, Wells M. High-frequency observations of temperature and dissolved oxygen reveal under-ice convection in a large lake. *Geophysical Research Letters*. 2017;44(24):12218–12226. <https://doi.org/10.1002/2017GL075373>

Об авторах

НАУМЕНКО Михаил Арсеньевич, доктор географических наук, профессор, руководитель Лаборатории географии и гидрологии, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Институт озероведения РАН, ORCID: 0000-0002-3055-2629, WoS ResearcherID: K-9415-2013, Scopus AuthorID: 6604078329, SPIN-код (РИНЦ): 5494-8867, e-mail: m. a.naumenko@mail.ru

ГУЗИВАТЫЙ Вадим Викторович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Лаборатории географии и гидрологии, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), Институт озероведения РАН, ORCID: 0000-0001-6359-9290, WoS ResearcherID: AFN-5197-2022, Scopus AuthorID: 15725052900, SPIN-код (РИНЦ): 4281-6621, e-mail: guzivaty@gmail.com