

УДК 556.555.4

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКОГО СЕЗОННОГО ХОДА ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ДИМИКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА)

© 2022 г. М. А. Науменко^а, *, В. В. Гузиватый^а, **

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

*e-mail: m.a.naumenko@mail.ru

**e-mail: guzivaty@gmail.com

Поступила в редакцию 12.08.2021 г.

После доработки 27.09.2021 г.

Принята к публикации 07.10.2021 г.

На основе общих физических представлений о термике димиктического озера и предложенных методических разработок воспроизведен среднелиматический ход параметров слоя скачка в период устойчивой стратификации для центральной части Ладожского озера. Рассматривается совместное распределение сезонного хода температуры поверхности воды, температуры верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), отличающейся не более 0.5°C , и заглубления верхней границы слоя скачка, глубины максимального градиента плотности, глубины нижней границы слоя скачка, характеризующие их климатический ход. Статистический анализ вертикальных профилей температуры, измеренной за длительный период времени с 1897 по 2017 гг., позволил впервые разработать эмпирические количественные соотношения между параметрами стратификации с высокими коэффициентами детерминации. Исходя из различия физических особенностей процессов нагривания и охлаждения поверхности озера, для каждого из периодов найдены полезные регрессионные зависимости, которые описывают сезонный ход термических параметров Ладожского озера. Оценены скорости изменения температуры воды и изменения параметров слоя скачка. Формы предложенных аппроксимационных зависимостей могут быть применены для изучения термики других димиктических озер.

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

DOI: 10.31857/S0002351522010102

ВВЕДЕНИЕ

Современные наблюдаемые изменения климата оказывают воздействие на термогидродинамическую структуру крупных озер. Одним из важных аспектов этого воздействия является взаимодействие поверхности воды и приводного слоя воздуха, приводящее к изменениям в вертикальном распределении температуры воды и устойчивости водной толщии. Термическая структура крупного озера характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, которая определяется сезонными изменениями прихода тепла на поверхность озера и его распространением вглубь, синоптической изменчивостью процессов, распределением глубин в озере и удаленностью от берегов. Знания параметров вертикальной устойчивости водной толщии такого крупного димиктического озера, как Ладожское, представ-

ляет значительный интерес для понимания процессов, связанных с распространением солнечного тепла вглубь озера, возникновения стратификации, процессов обмена теплом между районами с различным распределением глубин [1, 2]. Формирование, эволюция и диссипация слоя скачка являются неотъемлемыми элементами изучения ежегодной изменчивости вертикальной структуры вод в крупных озерах и морях [3–5] и предпосылками оценивания воздействия климата на их термический режим. Климатические изменения могут привести к непосредственному изменению в вертикальной термической структуре озера, параметров слоя скачка, величин вертикальных градиентов температуры, глубины термоклина, различиям между температурами эпи- и гипolimниона [6, 7]. Вместе с этим, озера или районы озера с

различными глубинами по-разному реагируют на климатические вариации [8].

В настоящее время внимание к определению параметров вертикальной структуры вод озер и слоя скачка в частности, резко возросло в связи с возможностью проведения длительных (до нескольких месяцев) непрерывных измерений с малой (несколько минут) дискретностью в определенных точках озера и необходимостью их объективного анализа. Однако все еще не существуют количественные оценки средноклиматического хода параметров слоя скачка в Ладожском озере, позволяющие судить о климатических вариациях относительно этого хода. Для единообразного определения параметров слоя скачка в крупном озере необходимо создание методики и программного обеспечения, позволяющего обрабатывать большие массивы данных о вертикальном распределении температуры воды, однозначно указывающего на искомую величину. Наиболее популярен для этих целей вычислительный комплекс "Lake Analyzer", который направлен на вычисление некоторых термических и энергетических характеристик озера на основе длительных температурных измерений [9].

В лимнологической литературе для периода устойчивой стратификации обычно различают трехслойную структуру водной толщи озера [1, 3]. С точки зрения океанологической терминологии: 1) эпилимнион это верхний квазиоднородный слой (ВКС), 2) металимнион – слой скачка, имеющий определенную толщину, с наибольшими вертикальными градиентами температуры (плотности), 3) гипolimнион – нижний слой с незначительным увеличением плотности с глубиной и наиболее низкими температурами воды. Нижняя граница эпилимниона является верхней границей металимниона. Нижняя граница металимниона является верхней границей гипolimниона.

По сравнению с [9] комплекс необходимых параметров для описания вертикальной структуры Ладожского озера был расширен. Мы предполагаем, что в определенный момент времени вертикальный профиль распределения температуры воды от поверхности до дна Н может быть достаточно полно охарактеризован следующими восьмью основными характерными параметрами:

1) температура поверхности воды T_w (температура верхнего квазиоднородного слоя T_s отличается от T_w не более, чем 0.5°C);

2) толщина верхнего квазиоднородного слоя h_s (верхняя граница слоя скачка);

3) максимальное значение градиента плотности в слое скачка G_{\max} ;

4) глубина максимального значения градиента плотности в слое скачка $h_{G_{\max}}$;

5) температура на глубине максимума градиента плотности в слое скачка $T_{G_{\max}}$;

6) глубина нижней границы термоклина (верхняя граница слоя гипolimниона) h_1 ;

7) температура на нижней границе термоклина T_{h_1} ;

8) температура у дна T_b .

Некоторые указанные параметры уже успешно использовались [4, 10] для изучения временных вариаций вертикального распределения температуры в морях и океанах. Обстоятельные методические разработки и исследования стратификации океана предприняты И.М. Белкиным на основе разработанного им морфолого-статистического анализа [11].

Цель настоящей статьи заключается в разработке методики и анализе особенностей климатического распределения параметров слоя скачка в центральной части димиктического Ладожского озера в течение периода развитой стратификации с начала возникновения до ее диссипации на основе анализа большого объема информации, которая хранится в специализированной базе данных Института озероведения РАН [12], существенно дополненной за последние годы. Под климатическим распределением мы понимаем регрессионные зависимости, полученные на основе всех имеющихся в базе данных измерений параметров развитой стратификации, которые могут служить базовыми распределениями для оценки отклика термических особенностей озера на вариации климата.

ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

Глубокое замерзающее Ладожское озеро (площадь акватории 17785 км^2 , средняя глубина 48.3 м , максимальная глубина 230 м), самое большое озеро Европы, расположено в умеренной климатической зоне, что определяет его ледовый режим и четко выраженную ежегодно повторяющуюся последовательность термических структур в течение года [2]. Димиктический статус Ладожского озера заключается в том, что каждый год оно претерпевает два периода полного вертикального перемешивания (в английской терминологии *overtun*): 1) осенью перед образованием льда и 2) весной после начала таяния льда, что связано с аномалией плотности пресной воды при температуре максимальной плотности 3.98°C [3]. В эти периоды в результате конвективного перемешивания происходит обмен различными субстанциями (кислородом, биогенами) от поверхности до дна. После этого весной возникает первичная устой-

чивая плотностная стратификация в прибрежных районах (с температурами выше 4°C) и весенняя термическая фронтальная зона (термический бар), осенью – аналогичная ситуация, но прибрежные районы имеют температуру ниже 4°C. В Ладожском озере в весенний период стратификация на определенной вертикали возникает после прохождения весенней термической фронтальной зоны, когда температура поверхности начинает превышать температуру наибольшей плотности.

Для анализа среднеклиматической изменчивости параметров стратификации была выбрана центральная часть Ладожского озера, которая имеет глубины от 50 до 70 м, и в силу летней циклонической циркуляции слой скачка расположен ближе к поверхности, чем в прибрежных районах [2]. Из термической базы данных Института озераведения РАН, для более чем 10000 станций с глубинами дна указанного диапазона, были выбраны вертикальные профили температуры за период с 1897 до 2017 г.

На первом этапе анализа изменчивости термической структуры центральной части Ладожского озера было проведено построение среднего распределения определяющих параметров, по всем данным не зависимо от года наблюдений. На рис. 1. показано распределение температуры воды, дисперсии температуры, частоты Вьяйсяля–Брента, осредненных по декадам со сдвигом в 5 суток и шагом по вертикали 5 м для периода стратификации, который для центральной части Ладожского озера начинается в середине июня и заканчивается полным осенним перемешиванием в первой декаде ноября. Между вертикальными распределениями указанных параметров существует заметное подобие, и, поэтому, эти довольно схематичные распределения позволяют выявить основные характерные черты изменений в стратификации и эволюции слоя скачка в исследуемом районе. Глубина верхней границы слоя скачка (толщина ВКС или эпилимниона) h_s была определена по максимальной температуре за период стратификации на каждом горизонте [13] (рис. 1б), этот подход полезен для анализа температурных данных, приведенных на этом рисунке. На рис. 1в показана дисперсия температуры воды, характеризующая степень ее изменчивости. Максимальные значения дисперсии имеют место на поверхности и связаны с межгодовыми вариациями температуры воды, на нижележащих горизонтах дисперсия указывает на флуктуации температуры в слое скачка, связанные с внутренними волнами, амплитуды которых могут достигать 10–15 м. Глубина поверхности слоя скачка h_{Gmax} определялась по максимальной величине вертикального градиента плотности или (что, то же самое) частоты Вьяйсяля–Брента $N = \sqrt{-\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}$, где $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ – вертикальный

градиент плотности воды (рис. 1г). Ось z направлена вверх. В качестве уравнения состояния пресной воды использовалось уравнение Чена–Миллера [14].

На рис. 1 показаны точками временной ход заглужения верхней границы слоя скачка (б), максимума дисперсии (в) и поверхности максимума $N(z)$. Наблюдается соответствие между этими параметрами, очевидно, что их заглужение со временем идет нелинейно, ускоряясь к октябрю–ноябрю.

Характеризуя последовательность изменений термической структуры Ладожского озера, можно выделить две стадии формирования верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и эволюции слоя скачка вплоть до полного перемешивания на определенной вертикали.

Во время первой стадии ВКС начинает формироваться после прохождения весенней термической зоны. Обычно его толщина не превышает 1–2 м при температуре поверхности воды около 5° и небольших скоростях ветра. В этот период увеличение толщины ВКС может осуществляться только за счет ветрового перемешивания (вынужденной конвекции), на малых глубинах образуется летний слой скачка. В этот период вертикальный градиент температуры в слое скачка увеличивается, достигая своего максимума. В связи с этим большая часть тепла, поступающая на поверхность озера, перераспределяется в верхнем квазиоднородном слое и приводит к повышению его температуры. В ночное время может формироваться суточный слой скачка с характерной свободной конвекцией.

В августе, после того, как температура поверхности воды достигает максимума, начинается процесс охлаждения (вторая стадия формирования ВКС), определяющий возникновение и развитие свободного конвективного перемешивания. Вместе с вынужденной конвекцией это приводит к увеличению толщины квазиоднородного слоя и заглужению слоя скачка. В свою очередь это приводит к понижению температуры поверхности и к повышению температуры на нижележащих горизонтах в результате турбулентной диффузии тепла через нижнюю границу квазиоднородного слоя.

Далее в первой половине ноября свободная конвекция достигает дна, что приводит к разрушению слоя скачка, полному перемешиванию и, следовательно, выравниванию температуры воды по вертикали. Толщина эпилимниона сравнивается с глубиной дна на рассматриваемой вертикали. Температура придонной воды становится максимальной за весь годовой цикл и равна температуре эпилимниона $T_w = T_b = 5.5^\circ\text{C}$ (рис. 1). Это означает, что именно в это время вертикальная устойчивость водной толщи (частота Вьяйсяля–

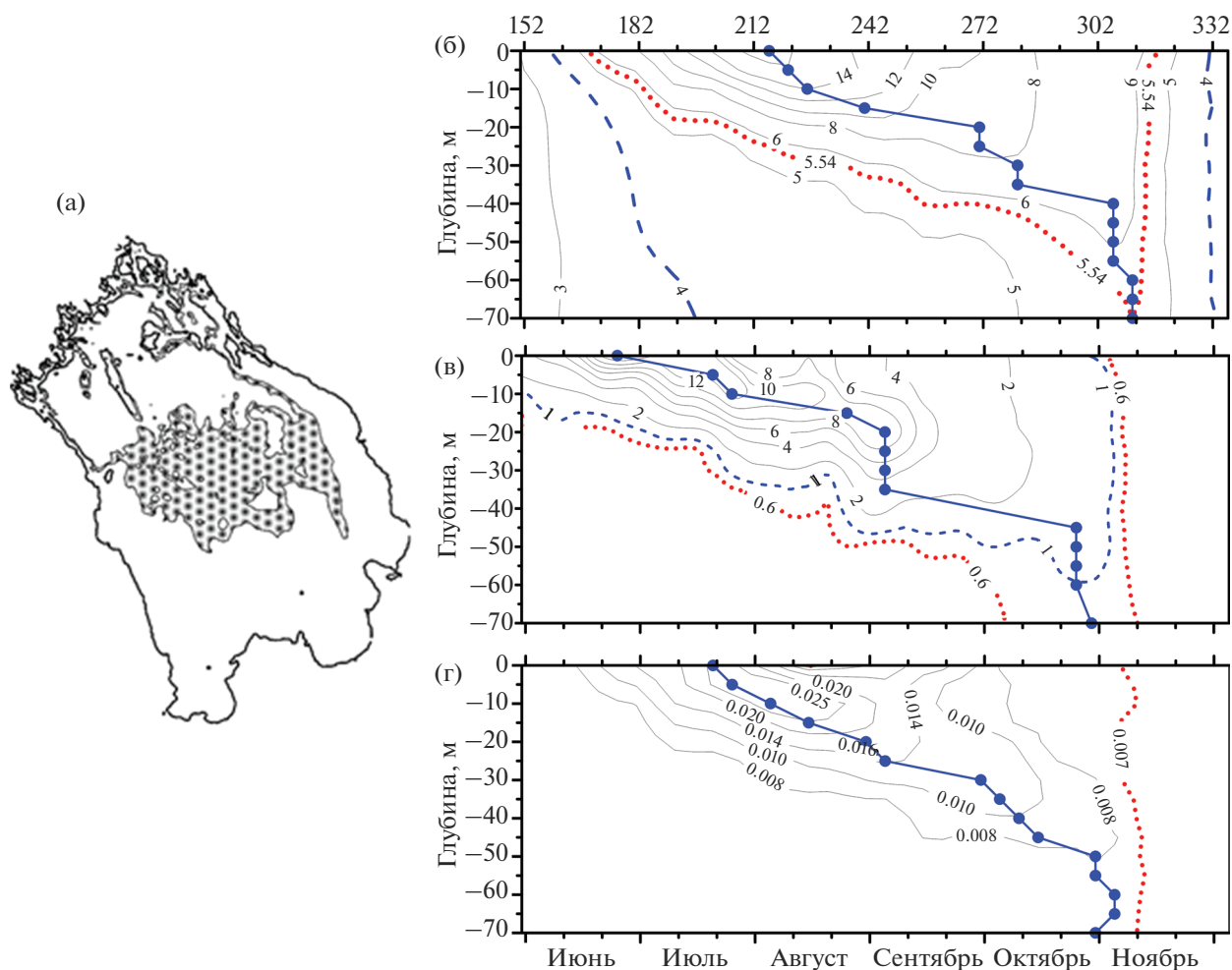


Рис. 1. Распределение температуры воды (б) и ее дисперсии(в), частоты Вьяйсяля–Брента (г) для периода стратификации для центральной части Ладожского озера(а). Точки, соединенные сплошными линиями, указывают максимальные значения параметров. На горизонтальной оси обозначены сутки от начала года.

Брента N) позволяет быстро опуститься водам с поверхности до придонных горизонтов. Сочетание минимальной частоты Вьяйсяля–Брента, равной 0.007 с^{-1} , и максимальной за год температуры придонных вод соответствует дате начала периода полного вертикального перемешивания, которое продолжается до того, как температура придонной воды сравняется с температурой наибольшей плотности 3.98°C в условиях вертикальной изотермии. После этого дальнейшее непрерывное охлаждение поверхностного слоя приводит к возникновению устойчивой обратной стратификации. Следует заметить, что максимальная придонная температура в разных частях озера различна и наступает в разные сроки, что связано с различием глубины дна и ветровой вынужденной конвекцией.

Общая закономерность, заключающаяся в ежегодной характерной последовательности возникновения термических структур в димиктиче-

ском озере и сочетание двух выше указанных стадий поступления тепла вглубь в период устойчивой стратификации, указывают на нелинейную зависимость заглублия ВКС от момента его возникновения до достижения дна.

Таким образом, феноменологическое описание физических процессов в период стратификации облегчает поставленную задачу, позволяет сделать общие выводы и дать рекомендации для оценивания количественных параметров вертикального распределения температуры воды.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ

Параметры, характеризующие вертикальное распределение температуры в период стратификации, характеристики ВКС, а именно его температура и глубина, должны быть четко опреде-

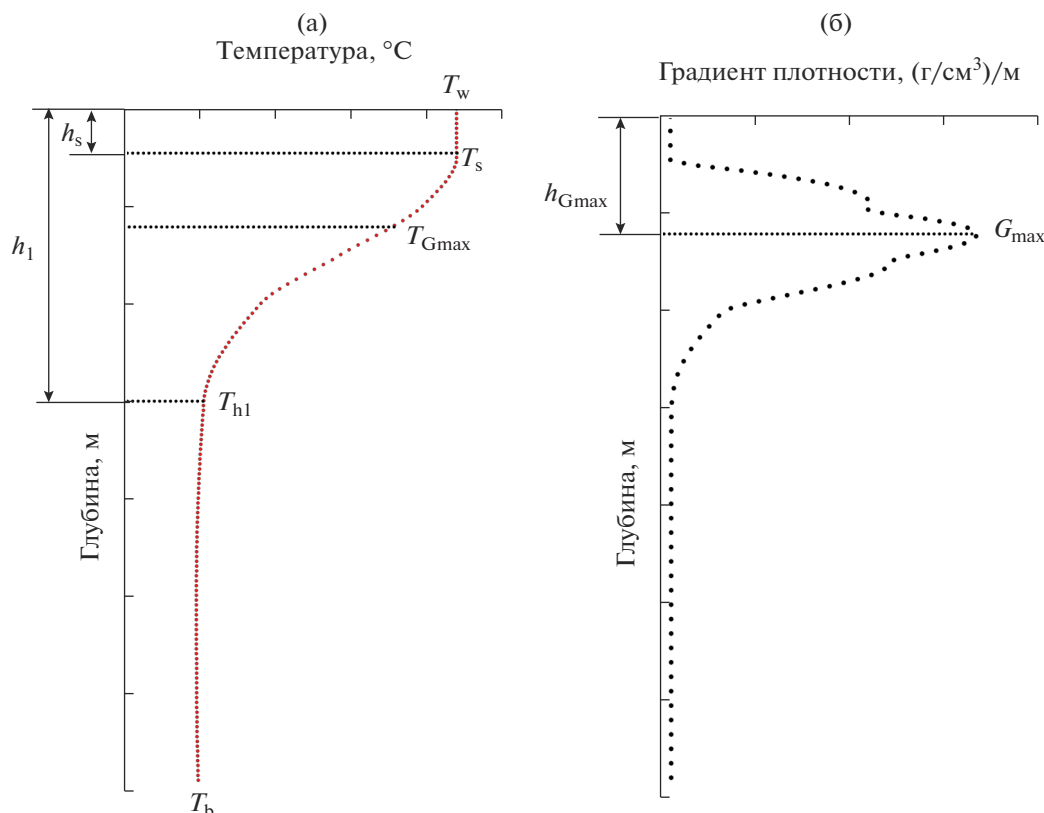


Рис. 2. Схема определения параметров слоя скачка на основе вертикального профиля температуры воды. Обозначения в тексте.

лены для выявления воздействия климатических изменений. Для того, чтобы рассчитать осредненные глубины залегания различных элементов вертикальной структуры и получить достаточно надежный климатический сезонный ход исследуемых характеристик, был выбран центральный район с мало изменяющимися глубинами дна и более, чем 10 000 вертикальных профилей температуры воды от поверхности до дна для периода устойчивой стратификации с мая по ноябрь с 1897 г. по настоящее время.

Важным и необходимым условием нахождения параметров слоя скачка является равномерное распределение значений температуры (плотности) воды на исследуемом вертикальном профиле. База данных [12] содержит нерегулярные и неравномерные по акватории озера измерения на гидрологических станциях температуры воды. Как правило, измерения проводились на стандартных горизонтах, с различной точностью: в двадцатом веке — опрокидывающимися термометрами, а в последние годы STD-зондами. Поэтому, для единообразного использования разновременных измерений температуры воды в Ладожском озере, на первом этапе опытным путем было найдено, что вертикальная дискретность

должна быть не более 0.5 м. Интерполирование значений температуры было выполнено с помощью кусочно-кубического полинома Эрмита, так как он не дает ложных максимумов и ложных перегибов и более корректно сглаживает данные вблизи локальных экстремумов [15]. Для корректного интерполирования минимальное количество измерений должно быть не менее семи на вертикали.

Второй этап обработки заключался в расчете параметров стратификации. На рис. 2 показано схематичное вертикальное распределение температуры на станции с указанием характерных точек для нахождения выбранных параметров слоя скачка.

Для определения верхней границу слоя скачка (или, что одно и то же, толщины верхнего квазиоднородного слоя) были протестированы три критерия [16, 17]. Первый и наиболее часто используемый заключается в задании разности температуры между верхней и нижней границей ВКС, обычно эта разность не должна превышать 0.5°C . Второй критерий основан на априорном задании предельного значения градиента температуры или плотности на нижней границе ВКС, третий — в вычислении параметра кривизны, ха-

рактизирующего переход от квазиизотермии к резкому увеличению градиентов плотности или температуры, для этого используется вычисление второй производной по глубине. В качестве оптимального варианта был выбран первый критерий для определения толщины ВКС, учитывая точность разновременных измерений температуры воды в Ладожском озере (с конца девятнадцатого века до первого десятилетия двадцать первого века), проведенных с использованием глубоководных термометров в двадцатом веке и STD зондов в 21 в. В монографии И.В. Молчанова “Ладожское озеро” [18] приведены данные, характеризующие осеннее перемешивание от поверхности до дна при разности между поверхностными и придонными температурами воды, которые не превышают 0.5°C в ноябре, что подтверждает адекватность сделанного выбора.

Глубина максимума градиента плотности $h_{G_{\max}}$ принята за глубину термоклина (рис. 2). Величина вертикального градиента плотности воды в слое скачка должна быть не менее $0.5 \times 10^{-4} \text{ г/см}^3/\text{м}$ [18].

Нижняя граница слоя скачка h_1 определялась по характерной глубине второй производной, максимуму кривизны вертикального профиля температуры. Эта глубина является верхней границей гипolimниона, и разность между глубиной станции Н и нижней границей слоя скачка h_1 составляет толщину гипolimниона.

Предлагаемый подход позволяет оценить все требуемые параметры, получить среднеклиматическое положение характеристик слоя скачка с начала возникновения до его диссипации в течение периода развитой стратификации на основе ансамбля профилей в данном районе.

Исходя из поставленной задачи, для получения климатического сезонного хода выбранных характеристик из анализа были исключены вертикальные профили температуры воды, выполненные в присутствии суточного слоя скачка, а также во время штормов, апвеллингов и фронтальных зон, которые значительно отличаются от трехслойной структуры озера. Вообще говоря, детальный анализ вертикальных профилей температуры, выполненных малоинерционными измерителями, демонстрирует “тонкую” термическую структуру, связанную с внутриволновыми процессами, горизонтальной адвекцией, интрузиями, что в свою очередь затрудняет получить обобщенную климатическую картину. Мы также старались исключить из анализа вертикальные профили температуры, связанных с синоптическими динамическими образованиями типа вихрей.

Для необходимых вычислений параметров слоя скачка в Ладожском озере было создано программное обеспечение в пакете MATLAB в соответствии с предложенной схемой и критериями.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климатический ход различных параметров стратификации полезно представить в виде гладкой непрерывной функции. Сезонный ход температуры поверхности воды изначально представлялся в виде синусоиды (задача Фурье—Шмидта), например, [19]. Позже было показано, что для димиктических озер продолжительность периода нагревания меньше периода охлаждения, что было отражено в разработанных формулах аппроксимационных кривых [20—22]. На рис. 3а приведен сезонный ход стратификации климатический сезонный ход температуры поверхности воды T_w , температуры слоя скачка $T_{G_{\max}}$ и температуры на нижней границе слоя скачка T_{hl} . Используются все данные, независимо от года наблюдений.

Первые две аппроксимирующие кривые представляют собой композицию степенной и экспоненциальной функции

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

где $t = x/100$, x — количество суток от начала года.

Исходя из различия указанных ранее физических особенностей процессов нагревания и охлаждения, мы определили для каждого из этих периодов аппроксимационные кривые: 1) до даты максимума температуры поверхности в выбранном районе и 2) после нее до полного вертикального перемешивания. За дату климатического максимума температуры поверхности воды центрального района Ладожского озера принято 6 августа, вертикальная прямая на рис. 3 и 4.

Для временной зависимости изменения глубины границ слоя скачка используется показательная функция

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

соответствующая быстрому увеличению глубины на заключительных этапах. На рис. 3б приведены климатические кривые, характеризующие заглубливание ВКС (верхней границы слоя скачка h_s), максимального градиента плотности воды $h_{G_{\max}}$ и нижней границы слоя скачка h_1 с конца июня до начала ноября, построенные на основе (2). Точки, характеризующие среднедекадные глубины ВКС с рис. 1б, подтверждают адекватность аппроксимации его заглубливания.

Всего было получено десять аппроксимационных кривых: две — для температуры воды (кривые 2 и 6 на рис. 3а) для периода нагревания и две для периода охлаждения (кривые 4 и 8 на рис. 3а). Для глубин слоя скачка было получено три кривые для периода нагревания (кривые 2, 6 и 10 на рис. 3б) и охлаждения (кривые 4, 8 и 12 на рис. 3б) соответственно. Этим кривым соответствуют регрессионные зависимости, приведены в табл. 1. Переход от одного периода к другому на рис. 3 показан цен-

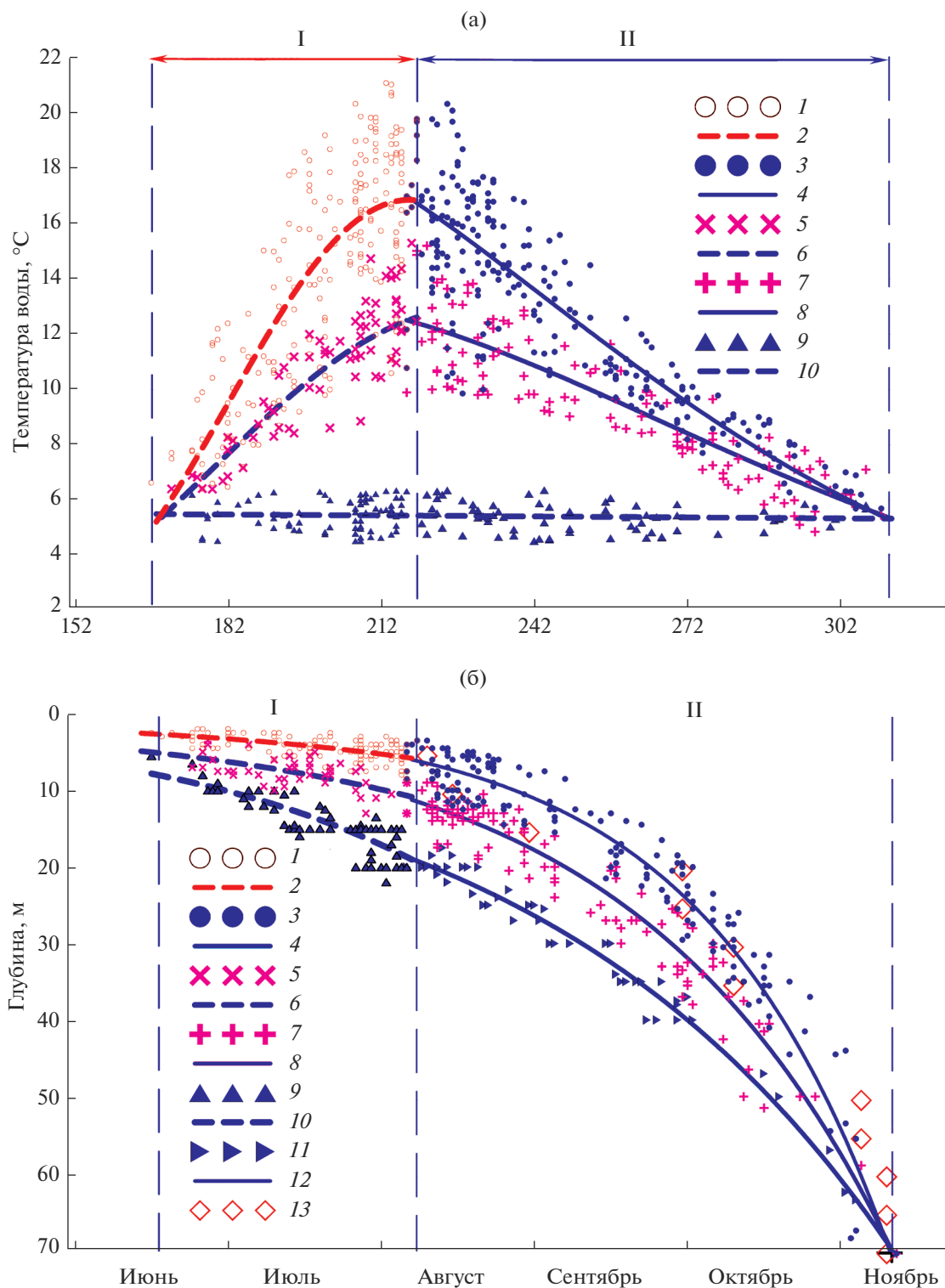


Рис. 3. Сезонный ход параметров устойчивой стратификации для периодов нагревания (I) и охлаждения (II): а) температуры поверхности (1, 3) и ее аппроксимация (2, 4), температуры в слое скачка (5, 7) и ее аппроксимация (6, 8), температуры на нижней границе (9) и ее аппроксимация (10); б) заглублиения верхнего квазигомогенного слоя (1, 3) и его аппроксимация (2, 4), заглублиения максимального градиента плотности воды (5, 7) и его аппроксимация (6, 8), заглублиения нижней границы слоя скачка (9, 11) и его аппроксимация (10, 12), среднедекадные глубины ВКС с рис. 16 (13).

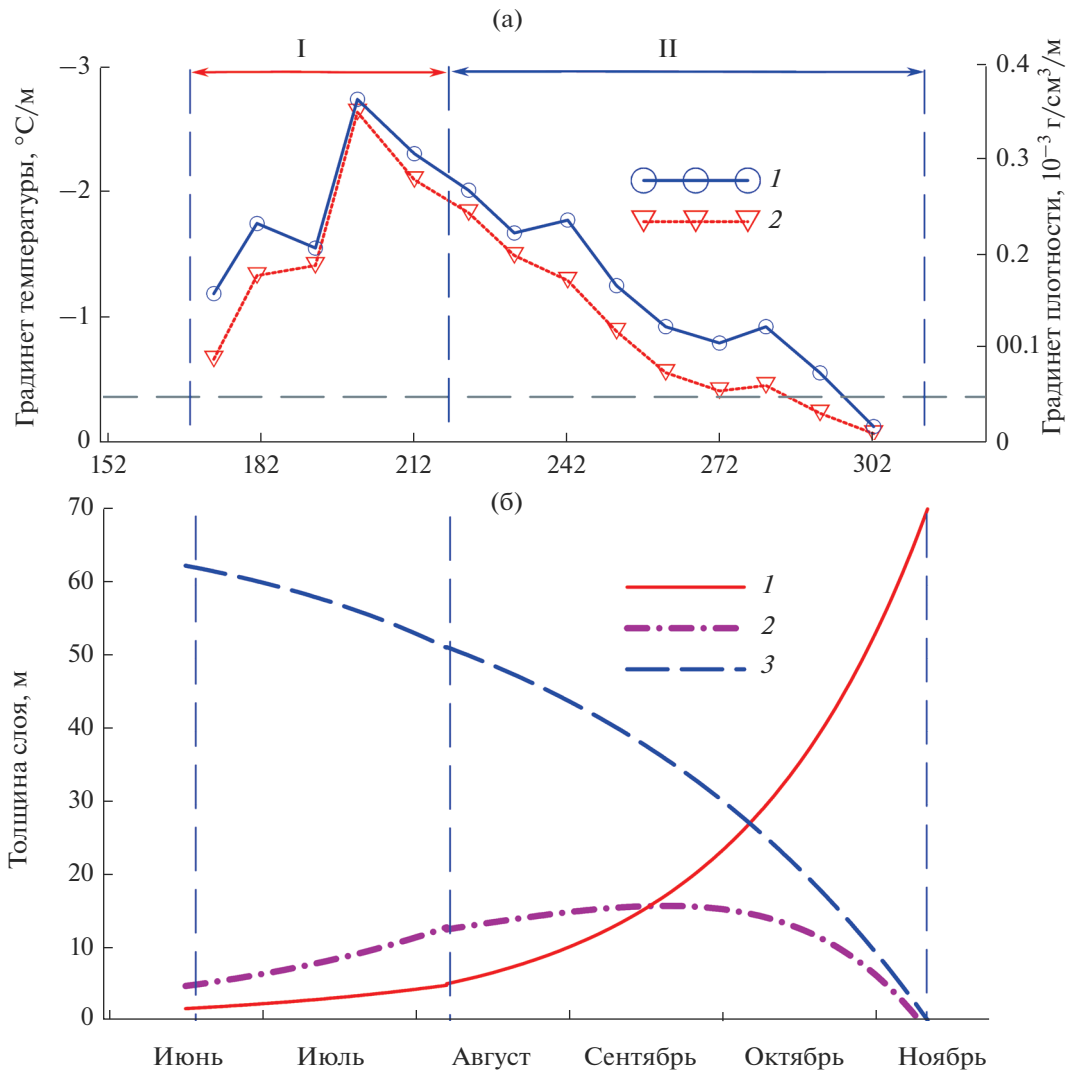


Рис. 4. Сезонный ход: а) максимальных градиентов температуры (1) и плотности воды (2); б) толщины верхнего квази-однородного слоя (ВКС) (1), толщины слоя скачка (2), толщины гипolimниона (3) для периода нагревания (I) и охлаждения (II) поверхности Ладожского озера. Горизонтальная штриховая прямая показывает критерий слоя скачка [18].

тральной вертикальной пунктирной прямой. Эмпирические коэффициенты a_1, d, c, a_2, r , количество точек n , коэффициенты детерминации k_d приведены в табл. 1.

Все коэффициенты детерминации значимы при $\alpha = 0.05$. В нашем случае период нагревания от начала возникновения устойчивой стратификации (17 июня) до макс T_w равен 49 сут тогда, как продолжительность периода охлаждения до полного вертикального перемешивания в первой декаде ноября (9 ноября) составляет 93 сут. Рис. 3 демонстрирует медленное увеличение толщины ВКС с июня по начало августа и затем ее дальнейшее резкое увеличение, что подчеркивает физическую сущность процесса заглубления ВКС (верхней границы термоклина) в осенний период, когда наступает полное вертикальное перемешивание. Ис-

пользуемые регрессионные зависимости, как для температуры воды, так и для глубины ВКС, слоя скачка и нижней границы термоклина пересекаются в одной точке, соответствующей дате полного вертикального перемешивания.

Анализ таблицы свидетельствует, что регрессионные кривые имеют высокие коэффициенты детерминации во время периода охлаждения. Для периода нагревания коэффициенты детерминации гораздо ниже. Физически ясно, что во время периода нагревания главным образом на температуру ВКС и термоклина оказывает влияние нерегулярная ветровая вынужденная конвекция, что и объясняет более низкие коэффициенты детерминации по сравнению с периодом охлаждения, когда свободно конвективное перемешивание преобладает.

Таблица 1. Статистические характеристики и эмпирические коэффициенты регрессии для параметров стратификации центральной части Ладожского озера

Параметры		Период нагревания						Период охлаждения					
		№	n	k_d	a_1	d	c	№	n	k_d	a_1	d	c
Температура, °С (рис. 3а)	T_w	2	425	0.61	77245.49	38.00	-17.45	4	470	0.76	356.35	6.52	-3.73
	T_{Gmax}	6	142	0.67	320.81	19.84	-8.58	8	256	0.80	123.62	6.23	-3.28
Параметры		№	n	k_d	a_2	r	№	n	k_d	a_2	r		
Глубина, м (рис. 3б)	ВКС	2	225	0.33	6.05	-1.25	4	175	0.94	15.04	-1.55		
	h_{Gmax}	6	95	0.36	5.06	-0.74	8	135	0.93	7.29	-0.98		
	h_1	10	138	0.68	6.17	-0.58	12	103	0.98	4.10	-0.11		

Примечание. № – номер кривой на рис. 3а и 3б.

В период стратификации температура воды нижней границы слоя скачка (верхней границы гиполимниона) имеет незначительные колебания между 4°С и максимальной придонной температурой, которая достигается в период полного вертикального перемешивания в первой декаде ноября. Средняя температура гиполимниона в период прямой устойчивой стратификации квазипостоянна и не превышает $t_b = 5.5^\circ\text{C}$.

Ниже верхней границы гиполимниона значения гидрофизических параметров сравнительно устойчивы и непосредственно не подвержены сезонной изменчивости. Гиполимнион практически изолирован от поступления тепла с поверхности в период стратификации и лишь в период полного осеннего перемешивания тепло с поверхности достигает дна. Причем, как показали длительные наблюдения в димиктическом озере Мичиган в осенние сезоны придонная температура повышается не постепенно в период прогрева, а быстро (в течение нескольких дней) в результате интенсивной конвекции [23].

Дифференцирование регрессионных зависимостей (1) и (2) (рис. 3 и табл. 1) позволило определить климатические (средние) скорости изменения температуры поверхности воды и температуры в термоклине. На стадии нагревания максимальные скорости имеют место в конце июня-начале июля и равны 0.32°С/сутки и 0.18°С/сутки соответственно на поверхности и в слое скачка, на стадии охлаждения максимальные скорости имеют место в конце августа-начале сентября 0.14°С/сутки на поверхности и в сентябре-начале октября 0.08°С/сутки в слое скачка. Во время полного осеннего перемешивания скорости изменения, как температуры поверхности, так и температуры термоклина становятся минимальными.

На основе дифференцирования эмпирических функций, описывающих заглубливание параметров слоя скачка, впервые были оценены скорости заглубливания трех поверхностей h_s , h_{Gmax} и h_1 , кото-

рые увеличиваются со временем, достигая максимума в период полного осеннего перемешивания (рис. 3б). Если в период нагревания скорости колеблются в пределах 0.03–0.3 м/сутки, то максимальные скорости заглубливания ВКС в период полного осеннего перемешивания достигают 1.8 м/сутки, а нижней границы термоклина – 0.95 м/сутки. Это согласуется с результатами долговременных измерений придонной температуры воды в димиктическом озере Мичиган [23].

Временной ход среднедекадных максимальных вертикальных градиентов температуры и плотности воды G_{max} представлен на рис. 4а.

Наблюдается четкое соответствие между ними. Наибольшие вертикальные градиенты плотности(температуры) наблюдаются до наступления максимума температуры поверхности воды и составляют $\sim 0.4 \times 10^{-3}$ г/см³/м (при вертикальном градиенте температуры воды около 2.5°С/м) на глубине около 10 м. Толщина ВКС в это время составляет 3–4 м. Пунктирная прямая на рис. 4, а указывает плотностной критерий слоя скачка, приведенный в [18]. В период охлаждения градиенты уменьшаются от своего максимума практически до нулевых значений в период полного осеннего перемешивания. Следует заметить, что вертикальные градиенты как температуры, так и плотности на конкретные даты могут превышать среднедекадные величины в несколько раз.

На основе полученных эмпирических формул (табл. 1) были впервые вычислены толщины эпилимниона (ВКС), металимниона (слоя скачка) и гиполимниона, что позволило построить их временной ход для периода развитой стратификации (рис. 4б). Как указывал К. Роджерс [24], после прохождения термобара на определенной вертикали гиполимнион занимает практически всю водную толщу от поверхности до дна. Толщина ВКС (эпилимниона) в период нагревания не велика и изменяется незначительно. После начала периода охлаждения в результате свободной кон-

векции идет значительное увеличение как толщины ВКС, так и толщины слоя скачка (рис. 4). В период максимального теплосодержания озера во второй половине сентября толщина ВКС и слоя скачка сравниваются и составляют ~16.2 м. при глубине максимального градиента плотности около 25 м. Максимальная толщина слоя скачка в это время достигает 23% от глубины места.

При полном осеннем перемешивании все пространство от поверхности до дна занимает ВКС (эпилимнион) при температуре поверхности воды 5–6°C. Использование дистанционных методов позволяет определить начало полного перемешивания по известной температуре поверхности [25].

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работах [19, 26] на основе одномерной модели турбулентного обмена теплом без учета адвективных факторов были построены изменения глубины слоя скачка со временем с начала стратификации до полного осеннего перемешивания для некоторых американских озер. Как указывается в [27], при трехмерном моделировании термогидродинамических процессов в крупном димиктическом озере слой скачка получается слишком диффузным с меньшими вертикальными градиентами, чем в природе. Мы на основе общих физических представлений о термике димиктического озера и статистическом анализе вертикальных профилей температуры, измеренной за длительный период времени, для центральной части Ладожского озера впервые получили аналогичные изменения, как в [19], и разработали эмпирические количественные соотношения между параметрами стратификации, согласующимися с измерениями.

Проанализировано совместное распределение сезонного хода температуры поверхности (ВКС) центральной части Ладожского озера и заглупления верхней границы слоя скачка, глубины максимального градиента плотности, характеризующие их климатический ход. Оценены скорости изменения температуры и изменения параметров слоя скачка. Для периода нагревания и периода охлаждения найдены полезные аналитические зависимости, которые достаточно хорошо описывают сезонный ход термических параметров Ладожского озера, а формы зависимостей могут быть применены для изучения термики других димиктических озер.

Фактически полученные результаты являются климатическими нормами для центральной части Ладожского озера и отклонения от них могут характеризовать межгодовые изменения стратификации и параметров слоя скачка.

Предложенные методические разработки позволили получить новые надежные количествен-

ные оценки эволюции слоя скачка в центральной части Ладожского озера и представляются весьма перспективными при изучении других димиктических озер или районов озера с другими глубинами, в том числе для построения карт параметров слоя скачка.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве начальных и граничных условий при гидродинамическом моделировании Ладожского озера, а также при верификации модельных расчетов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Проведенные исследования выполнены по госзаданию № 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бояринов П.М., Петров М.П.* Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 178 с.
2. *Тихомиров А.И.* Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
3. *Hutchinson G.E.* A treatise on limnology. V. I. Part 1. Geography and physics of lakes. New York: Wiley-Interscience, 1957. 1015 p.
4. *Калацкий В.И.* Моделирование вертикальной термической структуры деятельного слоя океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 216 с.
5. *Линейкин П.С., Мадерич В.С.* Теория океанического термоклина. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 270 с.
6. *Carpenter S.R., Fisher S.G., Grimm N.B., Kitchell J.F.* Global change and fresh-water ecosystems // *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1992. V. 23. P. 119–139.
7. *King J., Shuter B., Zimmerman A.* The response of the thermal stratification of South Bay (Lake Huron) to climatic variability // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1997. V. 54. P. 1873–1882.
8. *Kraemer B., Anneville O., Chandra S., Dix M., Kuusisto E., Livingstone D. M., Rimmer A., Schladow S.G., Silow E., Sitoki L.M., Tamatamah R., Vadeboncoeur Y., McIntyre P.B.* Morphometry and Average Temperature Affect Lake Stratification Responses to Climate Change // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42(12). P. 4981–4988. <https://doi.org/10.1002/2015GL064097>
9. *Read J., Hamilton D., Jones I., Muraoka K., Winslow L., Kroiss R., Wu C., Gaiser E.* Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // *Environ. Modell. Software.* 2011. V. 26(11). P. 1325–1336. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.006>
10. *Бондаренко Н.Н., Полежаев Е.К.* Изменчивость термической структуры деятельного слоя океана по данным наблюдений на тропическом энергетическом полигоне // Труды ГОИН. 1983. Вып. 170. С. 17–26.

11. *Белкин И.М.* Морфолого–статистический анализ стратификации океана. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 134 с.
12. *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.
13. *Джеймс Р.* Прогноз термической структуры океана. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 160 с.
14. *Chen C., Millero F.* Precise thermodynamic properties for natural waters covering only the limnological range // *Limnol. Oceanogr.* 1986. V. 31. № 3. P. 657–662.
15. *Степанов, М.Е.* Некоторые вопросы, связанные с интерполяционным многочленом Эрмита // Моделирование и анализ данных. 2014. № 1. С. 139–161.
16. *Fiedler P.C.* Comparison of objective descriptions of the thermocline // *Limnol. Oceanogr. Methods.* 2010. V. 8. P. 313–325.
<https://doi.org/10.4319/lom.2010.8.313>
17. *Wilson H.L., Ayala A.I., Jones I.D., Rolston A., Pierson D., de Eyto E., Grossart H.-P., Perga M.-E., Woolway R.I., Jennings E.* Variability in epilimnion depth estimations in lakes // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2020. V. 24. P. 5559–5577.
<https://doi.org/10.5194/hess-24-5559-2020>
18. *Молчанов И.В.* Ладожское озеро. М. -Л.: Гидрометеиздат, 1945. 558 с.
19. *Sundaram T.R., Rehm R.G.* The seasonal thermal structure of deep temperate lakes // *Tellus.* 1973. V. XXV. № 2. P. 157–167.
20. *Lesht B.M., Brandner D.J.* Functional representation of Great Lakes surface temperatures // *J. Great Lakes Res.* 1992. V. 18. P. 98–107.
21. *Naumenko M.A., Karetnikov S.G.* Seasonal evolution of the spatial distribution of water surface temperature in Lake Ladoga related to its morphometry // *Doklady Earth Sciences.* 2002. V. 386. № 7. P. 818–820.
22. *Пальшин Н.И., Ефремова Т.В.* Стохастическая модель годового хода температуры поверхности воды в озерах // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 85–94.
23. *Anderson, E.J., Stow, C.A., Gronewold, A.D., Mason L.A., McCormick M.J., Qian S.S., Ruberg S.A., Beadle K., Constant S.A., Hawley N.* Seasonal overturn and stratification changes drive deep-water warming in one of Earth's largest lakes // *Nat Commun.* 2021. V. 12. 1688.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-21971-1>
24. *Rodgers G.K.* A note on thermocline development and the thermal bar in Lake Ontario // *Proc. the IASH symposium on Garda.* 1965. № 70. P. 401–405.
25. *Fichot C., Matsumoto K., Holt B., Gierach M., Tokos K.* Assessing change in the overturning behavior of the Laurentian Great Lakes using remotely sensed lake surface water temperatures // *Remote Sensing of Environment.* 2019. V. 235.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111427>
26. *Zhong, Y.F., Notaro M., Vavrus S.J., Foster M.J.* Recent accelerated warming of the Laurentian Great Lakes: Physical drivers // *Limnol. Oceanogr.* 2016. V. 61. P. 1762–1786.
<https://doi.org/10.1002/lno.10331>
27. *Beletsky D., Schwab D.* Modeling circulation and thermal structure in Lake Michigan: Annual cycle and interannual variability // *J. Geoph. Res.* 2001. V. 106. № C9. P. 19745–19771.

Methodological Approaches and Results of the Analysis of Climatic Seasonal Course of Stable Stratification Parameters of a Dimictic Lake (the Central Part of Lake Ladoga Case Study)

M. A. Naumenko^{1, *}, and V. V. Guzivaty^{1, **}

¹ 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

*e-mail: m.a.naumenko@mail.ru

**e-mail: guzivaty@gmail.com

On the basis of general physical concepts of the thermic of a dimictic lake and the proposed methodological developments, the average climatic course of the parameters of the thermocline during the period of stable stratification for the central part of Lake Ladoga is reproduced. We consider the joint distribution of the seasonal variation of the water surface temperature, the temperature of the upper quasi-uniform layer (UQL), which differs by no more than 0.5°C, and the deepening of the upper boundary of the thermocline, the depth of the maximum density gradient, and the depth of the lower boundary of the thermocline, which characterize their climatic course. Statistical analysis of vertical temperature profiles measured over a long period of time from 1897 to 2017 made it possible for the first time to develop empirical quantitative relationships between stratification parameters with high determination coefficients. Based on the difference in the physical characteristics of the processes of heating and cooling of the lake surface, useful regression relationships were found for each of the periods, which describe the seasonal variation of the thermal parameters of Lake Ladoga. The rates of change in water temperature and change in the parameters of the thermocline are estimated. The forms of the proposed approximation dependences can be used to study the thermic of other dimictic lakes.

Keywords: water surface temperature, parameters of the thermocline, climatic relationships, dimictic lake