

УДК 556.556.2

Г.Э. Здоровеннова¹

Г.Г. Гавриленко

Н.И. Пальшин

Т.В. Ефремова

С.Ю. Волков

С.Р. Богданов

А.Ю. Тержевик

С.Д. Голосов

И.С. Зверев

Р.Э. Здоровеннов

Течения в небольшом озере в период открытой воды

Институт водных проблем Севера — обособленное
подразделение ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр
Российской академии наук», г. Петрозаводск, Российская
Федерация

¹ e-mail: zdorovennova@gmail.com

Аннотация. Особенности термо- и гидродинамики водной толщи небольшого полимиктического озера Вендюрского (юг Карелии) проанализированы по данным измерений температуры и течений в период открытой воды 2018 г. Показано, что на фоне теплой погоды мая, июля и августа в озере существовала хорошо выраженная стратификация. Периоды гомотермии характеризовались активной гидродинамикой как поверхностных, так и придонных слоев водной толщи. Установлено, что скорости течений превышали 10 см/с в придонных слоях центральной глубоководной котловины озера при полном перемешивании водной толщи на фоне активизации атмосферного воздействия — усиления ветра и резких перепадов атмосферного давления. Обособленные углубления дна характеризовались меньшими скоростями течений.

Ключевые слова: мелководное озеро, температура, течения, гомотермия, стратификация.

Введение

Многочисленные малые водоемы субарктического и умеренного пояса вносят значительный вклад, как в региональный, так и в глобальный пресноводный бюджет, что определяет необходимость изучения их термического и динамического режимов в годовом цикле на фоне наблюдаемых изменений климата. Температура, течения и циркуляции играют важную роль в функционировании озерных экосистем, поскольку определяют устойчивость водной толщи, газовый режим водоемов, перенос биогенных элементов, клеток водорослей, оказывают влияние на скорости химических реакций, тепло- и массообмен с донными отложениями [15, 18, 20]. В контексте предполагаемых изменений климата эти исследования приобретают особое значение, поскольку сдвиги в сроках термических этапов и режиме перемешивания [19] могут привести к необратимым перестройкам в озерных экосистемах [22].

При изучении влияния изменчивости климата на термический и динамический режимы водоемов необходимы длительные непрерывные измерения температуры водной толщи и течений. Даже регулярные декадные или еженедельные измерения температуры воды не позволяют получать достоверных оценок сроков наступления и продолжительности основных этапов термического цикла озер, в частности, летней стратификации [16] и анализировать отклик термического режима озер на изменения климата. Для получения полной схемы

течений в озерах и водохранилищах необходим большой объем натуральных измерений при различных метеорологических ситуациях, что труднодостижимо на практике. Измерения течений на озерах и водохранилищах обычно проводятся в режиме нерегулярных сезонных съемок, зачастую только в поверхностном и/или придонном слоях [8-10, 17], иногда с использованием косвенных методов — красителей, поплавков [2]. Поэтому натурные наблюдения обычно используют для верификации расчетных схем течений [1, 4, 11, 14].

Изучение закономерностей формирования термического и динамического режимов небольшого мелководного озера Вендюрского (юг Карелии) при различных гидрометеорологических условиях проводится по данным натуральных измерений, а также с использованием методов математического моделирования. На этом озере проводятся ежегодные длительные (с использованием автономных станций) измерения температуры более 25 лет (период ледостава — начиная с 1994 г., годовой ход — с июля 2007 г.). Особенности режима перемешивания озера Вендюрского на этапе открытой воды в разные по погодным условиям годы рассмотрены по данным натуральных измерений температуры [3]. Схемы течений в период ледостава для водоема [5] получены с помощью расчета на трехмерной математической модели гидротермодинамики внутреннего моря (МГВМ) [7].

В данной работе мы приводим результаты анализа длительных измерений температуры и течений в озере Вендюрском в период с мая по октябрь 2018 г. Цель исследования — изучение динамического режима полимиктического озера в период открытой воды, влияние погодных условий и стратификации на течения. Полученные результаты будут использованы для верификации модельных расчетов гидродинамики озера в период открытой воды.

Материалы и методы

Озеро Вендюрское ($62^{\circ}10'-62^{\circ}20'N$, $33^{\circ}10'-33^{\circ}20'E$) — небольшой полимиктический водоем. Средняя ширина котловины — 1,5 км, длина — 7 км, площадь поверхности — $10,4 \text{ км}^2$, объем водной массы $\sim 5,5 \cdot 10^7 \text{ м}^3$, средняя глубина — 5,3 м, максимальная — 13,4 м, площадь водосборного бассейна — $82,8 \text{ км}^2$. Подробная батиметрическая карта озера, а также основные сведения о его термическом и ледовом режиме приведены в работе [24]. По данным длительных измерений температуры в 2007-2017 гг. известно, что на этапе открытой воды озеро находится в состоянии слабо выраженной стратификации, периодически сменяющейся гомотермией [3]. Максимальные за период открытой воды значения устойчивости Шмидта — параметра, характеризующего устойчивость водного столба к механическому перемешиванию — изменяются в разные годы от 25 Дж/м^2 в холодные летние месяцы до 128 Дж/м^2 в жаркие [3]. Измерения течений в июне 2017 г. в течение пяти суток позволили установить, что при слабо выраженной стратификации скорости течений составляли 2–3 см/с, периодически увеличиваясь до 8–15 см/с на фоне усиления ветра [6].

Длительные измерения течений в период открытой воды в 2018 г. проводились с 23 июня по 16 октября на пяти станциях (Рис. 1) с использованием 11 приборов Alec Electronics (Япония, точность $\pm 1 \text{ см/с}$ и $\pm 2^{\circ}$, разрешающая способность $0,02 \text{ см/с}$ и $0,01^{\circ}$). На каждой станции измерители течений были закреплены на заякоренном тросе. На станциях 4–3, 4–14, 3–5 и 5–5 на тросах было закреплено по два измерителя течений на расстоянии 1,5 и 2,5 м от дна; на станции 4–9 в центральной

глубоководной части озера было закреплено три измерителя течений на расстоянии 1,5; 2,5 и 3,5 м от дна. Приборы проводили измерение двух горизонтальных компонент скорости на заданном горизонте с дискретностью 5 минут.

В период с 1 мая по 17 октября 2018 г. в центральной глубоководной части озера на ст. 4–9 проводились измерения температуры с использованием косы, оснащенной 17 температурными датчиками RBR Ltd. (Канада, точность $0,002^{\circ}\text{C}$, разрешение $<0,00005^{\circ}\text{C}$), закрепленными через 0,5-1 м в водной толще и 25–30 см в придонном слое. По данным термокосы были проанализированы особенности изменения температуры водной толщи озера в период открытой воды, а также рассчитана устойчивость Шмидта с использованием программы LakeAnalyzer 2,0 [21].

По данным измерений течений была оценена их изменчивость в периоды стратификации и гомотермии; были рассчитаны средние значения и дисперсии скоростей для двух периодов гомотермии и периода стратификации.

Анализ погодных условий района исследований проводился по данным метеостанции Петрозаводск. Срочные данные (дискретность измерений три часа) получены на сайте «Расписание Погоды», <http://rp5.ru>, среднемесячные климатические значения приземной температуры воздуха за базовый период 1961–1990 гг. получены на сайте Северо-Евразийского климатического центра (<http://seakc.meteoinfo.ru/actuals>). Также использовались данные метеостанции Campbell scientific (США), которая была размещена на северном берегу озера и работала в период с 18 апреля по 10 октября 2018 г. Измеряемыми параметрами были температура воздуха, скорость и направление ветра, относительная влажность, осадки (дискретность измерений пять минут).

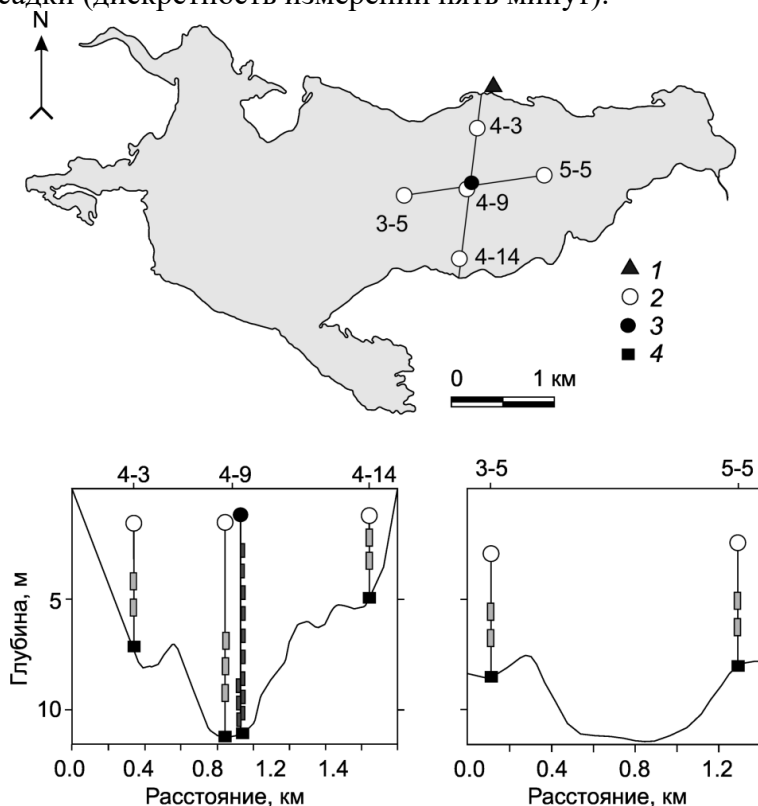


Рис. 1. Положение станций измерений метеопараметров (1), течений (2) и температуры (3) в озере Вендюрском в период открытой воды в 2018 г. 4 — груз.

Результаты и обсуждение

Погодные условия в районе исследований в мае-октябре 2018 г.

Май 2018 г. был очень теплым — среднемесячная температура воздуха составила $+12.5^{\circ}\text{C}$, что на $4,1^{\circ}\text{C}$ выше климатической нормы 1961–1990 гг. Дневные температуры в этом месяце поднимались до $+16\text{--}25^{\circ}\text{C}$. В начале июня на фоне прохождения циклона с грозами и ливневыми осадками произошло понижение температуры воздуха до $+6\text{--}8^{\circ}\text{C}$, в ночные часы 1 июня был зафиксирован заморозок. Вторая половина июня была заметно теплее первой: в дневные часы воздух прогревался до $+20\text{--}25^{\circ}\text{C}$. Среднемесячная температура июня составила $+13.5^{\circ}\text{C}$, что совпало с климатической нормой. В мае-июне преобладал ветер западных румбов со средней скоростью 2,9 м/с.

Все месяцы с июля по октябрь 2018 г. были теплее климатической нормы на 2,5; 2,9; 2,6 и $1,5^{\circ}\text{C}$, соответственно. Первая декада июля была достаточно холодной — среднесуточная температура воздуха составляла $+10\text{--}13^{\circ}\text{C}$. С 11 июля по 3 августа наблюдался продолжительный период теплой, солнечной погоды, ливневые дожди прошли 21–23 июля. В августе чередовались периоды теплой солнечной погоды и непродолжительных похолоданий с дождями. Годовой максимум температуры воздуха $+30,5^{\circ}\text{C}$ был зафиксирован 2 августа. В июле преобладал юго-восточный ветер, в августе — юго-западный со скоростями 2,6 и 2,7 м/с, соответственно.

Две первые декады сентября были аномально теплыми, среднесуточная температура в этот период составляла $+9\text{--}17^{\circ}\text{C}$, в дневные часы были зафиксированы повышения температура воздуха до $+22^{\circ}\text{C}$. Начиная с третьей декады сентября, температура воздуха постепенно снижалась, первые заморозки были отмечены в начале октября. В сентябре преобладал ветер западных румбов со средней скоростью 2,9 м/с.

Особенности термического режима и устойчивости водной толщи озера Вендюрского в период открытой воды в 2018 г.

После взлома льда 7–8 мая 2018 г. водная толща озера Вендюрского была перемешана полностью, при этом ее температура составляла $3,2^{\circ}\text{C}$. На фоне теплой солнечной погоды второй декады мая температура поверхностного слоя озера быстро увеличивалась, достигнув 16°C к 18 мая. При этом глубже 5,5 м температура воды не превышала 6°C , а в придонных слоях едва достигла $4,5^{\circ}\text{C}$ (Рис. 2, а). Температурный градиент в подповерхностном слое скачка (на глубинах порядка 1,3–1,8 м) превышал $10^{\circ}\text{C}/\text{м}$ 13–15 мая и периодически увеличивался до $15\text{--}16^{\circ}\text{C}/\text{м}$ 17–19 мая. Величина устойчивости Шмидта 22–29 мая 2018 г. достигала $30\text{--}40 \text{ Дж}/\text{м}^2$ (Рис. 2, б). Стратификация водной толщи озера Вендюрского существовала до начала июня, затем на фоне похолодания и усиления ветра началось заглубление слоя скачка, и в период 5–10 июня водная толща озера была полностью перемешана, при этом ее температура понизилась с $13,8$ до $12,5^{\circ}\text{C}$ на фоне понижения температуры воздуха.

На протяжении второй-третьей декад июня и первой декады июля периоды слабой стратификации чередовались с эпизодами полного перемешивания водной толщи. С 10 июля по 18 августа, то есть на протяжении почти шести недель, в озере существовала хорошо выраженная стратификация, при этом температура поверхностного 2–3 м слоя водной толщи озера периодически повышалась до $20\text{--}24^{\circ}\text{C}$, температура придонного в центральной глубоководной котловине — изменялась в пределах $15\text{--}16^{\circ}\text{C}$ (Рис. 2, а). Устойчивость Шмидта на фоне усиления стратификации увеличивалась до $60\text{--}80 \text{ Дж}/\text{м}^2$ (Рис. 2, б).

Глубина залегания слоя скачка в период с 22 июля по 5 августа составляла 3–5 м, градиент температуры в нем достигал 2–4°C/м, периодически увеличиваясь до 6–8°C/м. Годовой максимум температуры поверхностного 2–3 м слоя +24,9°С был достигнут 2 августа, после чего температура постепенно понижалась, то есть начался этап осеннего охлаждения. Заглубление слоя скачка происходило до 18 августа. Полное перемешивание водной толщи произошло 19 августа, ее температура при этом составляла 19,1°С. До 22 августа водная толща охлаждалась в состоянии гомотермии. В период с 23 августа по 11 сентября на фоне теплой погоды (температура воздуха днем поднималась до +20–25°С) охлаждение водной толщи замедлилось, сформировалась слабая стратификация (разница температур между поверхностным и придонным слоями достигала 2°С). Начиная с 12 сентября, водная толща озера охлаждалась в состоянии гомотермии и к концу периода наблюдений (17 октября) достигла температуры 8°С.

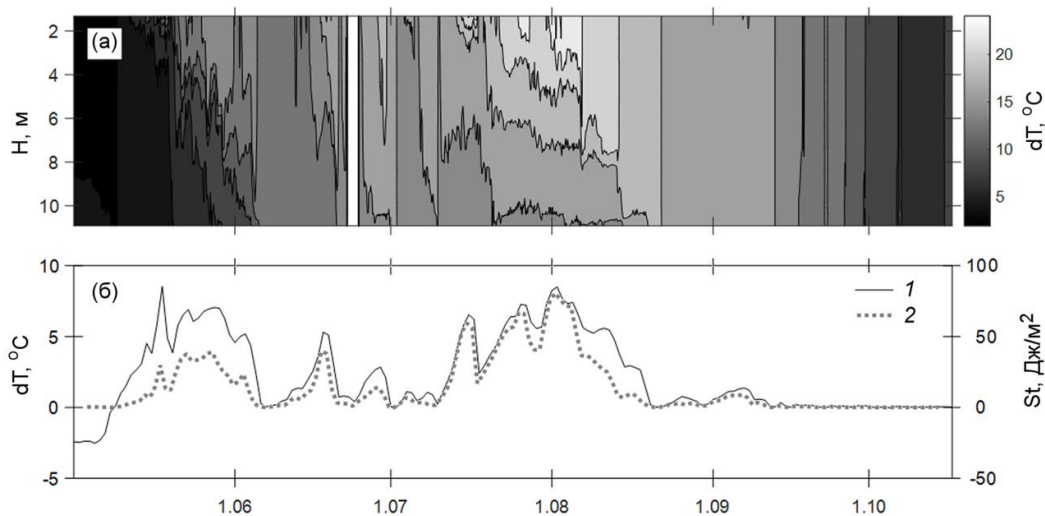


Рис. 2. Температура водной толщи озера Вендюрского в центральной глубоководной котловине в период открытой воды 2018 г. (а) и характеристики устойчивости водной толщи (б): 1 — разница температур подповерхностного и придонного горизонтов измерений, 2 — устойчивость Шмидта (St). Вертикальная белая полоса на панели (а) — нет измерений.

Таким образом, изменение температуры водной толщи оз. Вендюрского на этапе открытой воды в 2018 г. имело две особенности: во-первых, уже в мае в озере сформировалась хорошо выраженная стратификация, что за период непрерывных наблюдений 2007–2017 гг. наблюдалось лишь дважды — в 2010 г. и 2013 г. [3]; во-вторых, летняя стратификация продолжалась достаточно долго (около шести недель), сравнительно с другими годами периода 2007–2017 гг. Обычно продолжительность непрерывных эпизодов летней стратификации редко превышает 2–3 недели [3]. Период летней стратификации продолжался в течение шести недель лишь в аномально жарком 2010 г. Столь продолжительная летняя стратификация может приводить к выраженному дефициту кислорода в придонных слоях озера [25], что оказывает отрицательное воздействие на экосистему водоема.

Течения в озере Вендюрском в период открытой воды в 2018 г.

Длительные измерения течений с 24 июня по 17 октября 2018 г. на пяти станциях, разнесенных на расстояние от 750 м до 1,5 км (Рис. 1), позволили в

общих чертах охарактеризовать гидродинамический режим озера на этапе открытой воды.

Анализ данных показал, что в период наблюдений максимальные скорости течений на всех станциях и на всех горизонтах не превышали 20 см/с. В среднем скорости течений составляли 2–4 см/с, периодически увеличиваясь до 10–15 см/с (Рис. 3., в) на фоне резких перепадов атмосферного давления (Рис. 3, а) и усилений ветра (Рис. 3, б).

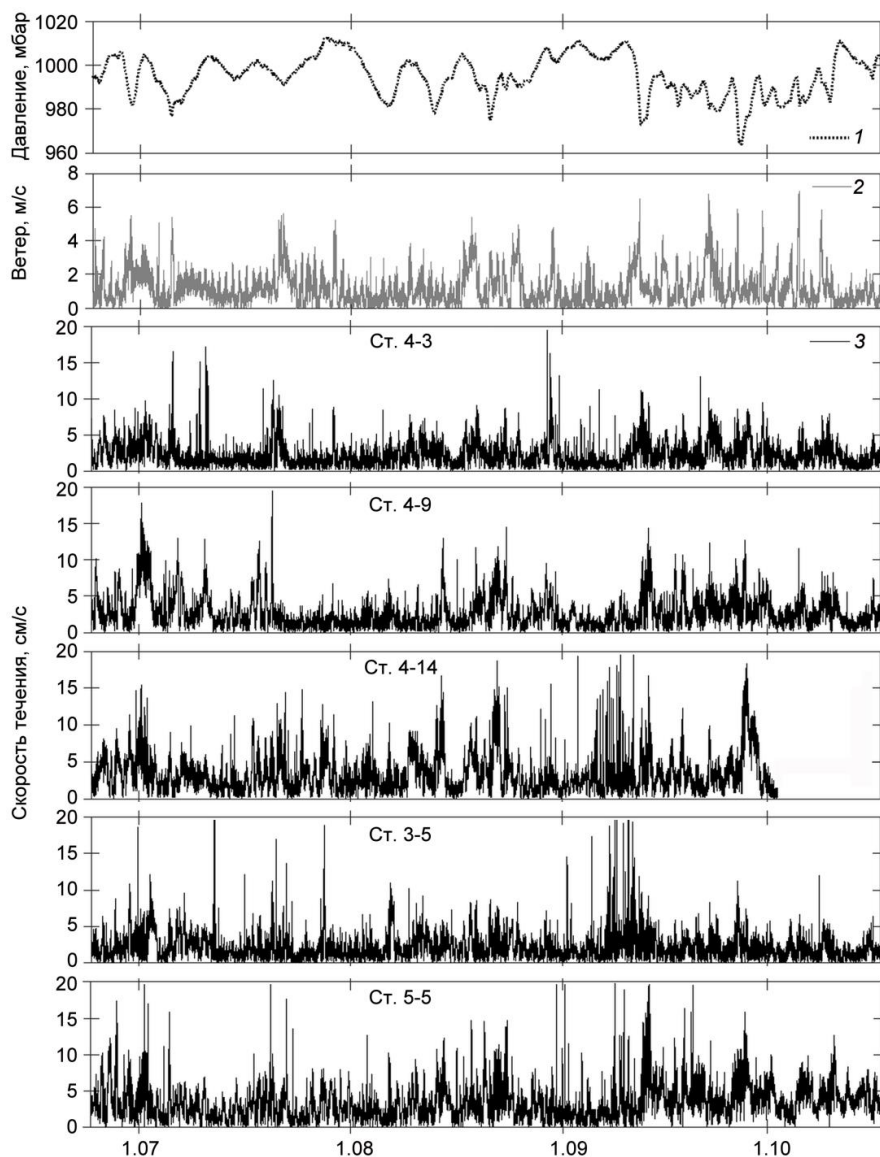


Рис. 3. Атмосферное давление (1) и скорость ветра (2) по данным метеостанции, расположенной вблизи оз. Вендюрского, а также скорости течений (3) на горизонте 1.5 м над дном на пяти станциях измерений в период с 24 июня по 16 октября 2018 г.

На рис. 4. приведены значения средних скоростей течений и дисперсий по пяти станциям для трех периодов: 1 — с 24 июня по 20 июля — слабо выраженная стратификация, периодически сменяющаяся гомотермией, среднее значение устойчивости Шмидта этого периода 14 Дж/м², максимальное 58 Дж/м², 2 — с 21 июля по 13 августа — хорошо выраженная стратификация, среднее

значение устойчивости Шмидта 49 Дж/м^2 , максимальное 80 Дж/м^2 , 3 — с 15 августа по 30 сентября — период осеннего охлаждения, гомотермия, эпизодически сменяющаяся слабой стратификацией, среднее значение устойчивости Шмидта $2,5 \text{ Дж/м}^2$, максимальное $9,5 \text{ Дж/м}^2$.

Наименьшие средние скорости ($2\text{--}2,5 \text{ см/с}$) и дисперсия ($2\text{--}4 \text{ см}^2/\text{с}^2$) отмечались на станциях 4–3 и 3–5, расположенных в обособленных углублениях дна, как в периоды гомотермии, так и при установлении стратификации.

В периоды гомотермии средние скорости течений на глубоководных станциях 4–9 и 5–5, расположенных в центральной котловине озера и на мелководной 4–14, были соизмеримы и составляли $3\text{--}3,5 \text{ см/с}$, при этом наибольшая дисперсия выборок отмечалась на ст. 4–9 в первый период гомотермии ($7\text{--}8 \text{ см}^2/\text{с}^2$), а на ст. 4–14 — во второй ($6,5\text{--}7 \text{ см}^2/\text{с}^2$). Наиболее выраженное уменьшение, как средних скоростей течений, так и дисперсии выборки отмечено на глубоководной станции 4–9 в период стратификации по сравнению с предшествующим и последующим периодами гомотермии.

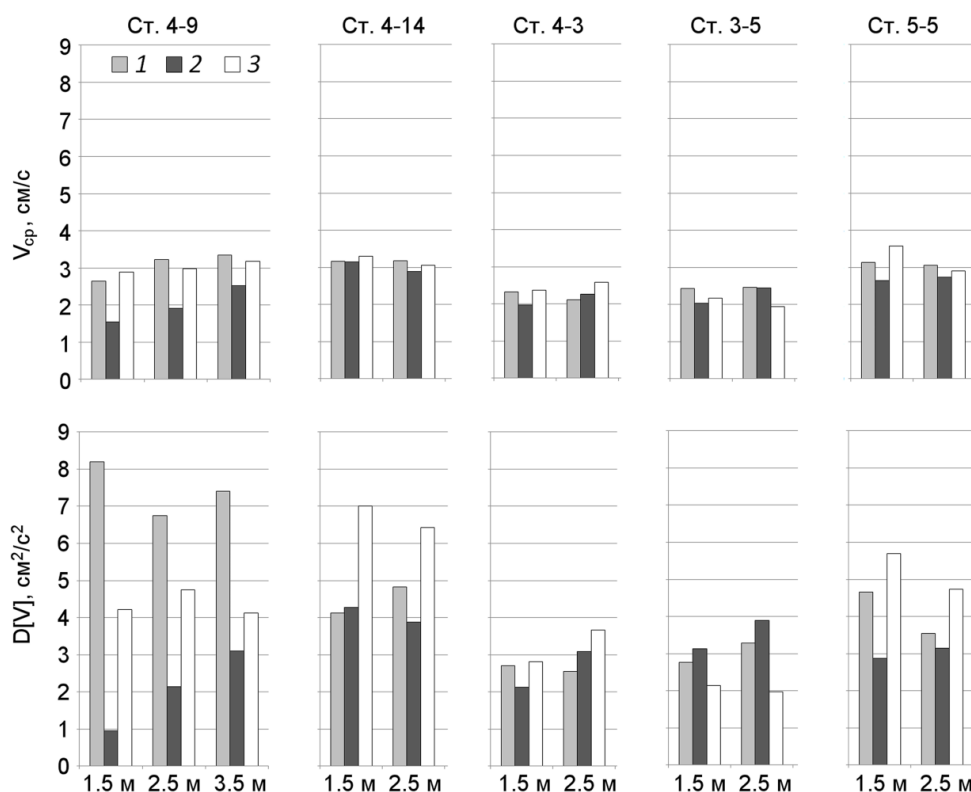


Рис. 4. Средняя скорость течений ($V_{ср}$) и дисперсия скорости ($D[V]$) на разных станциях измерений в периоды гомотермии (1 и 3) и стратификации (2). 1 — 24 июня–20 июля, 2 — 21 июля–13 августа, 3 — 15 августа–30 сентября 2018 г. 1,5 м, 2,5 м, 3,5 м — расстояние приборов от дна.

Спектральный анализ рядов течений за весь период измерений показал наличие нескольких энергонесущих максимумов, соответствующих периодам 3–11 суток, 19–28 ч, 8–14 ч, 2–5 ч. Наиболее выраженными были колебания с синоптическим и близким к суточному периодом. По данным измерений на озерах и водохранилищах умеренной зоны установлено, что на спектрах течений в период открытой воды обычно присутствуют колебания с синоптическим периодом, обусловленные изменчивостью местных погодных условий.

Изменчивость течений с суточным периодом обычно связывается с суточным циклом ветровой активности; близкая к полусуточной изменчивость течений на крупных озерах может быть проявлением инерционных колебаний [10, 12, 13]. Изменчивость течений с периодом в несколько часов может быть проявлением сейш и внутренних волн [23].

Выводы

Анализ длительных измерений течений и температуры в небольшом озере Вендюрском в период открытой воды позволил установить, что в периоды гомотермии при полном перемешивании водной толщи озера на фоне усиления ветра и перепадов атмосферного давления скорости течений могут превышать 10 см/с даже в придонных слоях центральной котловины. При установлении стратификации скорости течений заметно снижаются, что особенно выражено ниже слоя скачка температуры. Обособленные углубления характеризуются меньшими скоростями течений по сравнению с центральной котловиной. Спектральный анализ выявил наличие колебаний скоростей течений с синоптическим и суточным периодами, а также более высокочастотные колебания с периодами 2–14 ч, которые могут быть проявлением внутренних волн. Полученные результаты анализа натуральных измерений течений будут использованы для верификации расчетов термогидродинамических процессов на трехмерной модели водоема для периода открытой воды.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

Литература

1. Буторин Н.В., Литвинов А.С., Фомичев И.Ф., Поддубный С.А. Горизонтальная циркуляция вод в Рыбинском водохранилище и возможные ее изменения при перераспределении стока. // В кн.: Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. Л.: Наука, 1982. С. 150–167.
2. Воронцов Ф.Ф. Динамика вод оз. Красного // В кн.: Озера Карельского перешейка. Л.: Наука, 1971. С. 50–68.
3. Гавриленко Г.Г., Здоровеннова Г.Э., Волков С.Ю., Богданов С.Р., Здоровеннов С.Р. Устойчивость водной массы и ее влияние на кислородный режим полимиктического озера. // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2018. Т 4 (14), №1. С. 57–71.
4. Зверев И.С., Ушаков К.В., Шипунова Е.А., Голосов С.Д., Ибраев Р.А. Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования // Мат. 1-й межд. конф. Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 228–233.
5. Зверев И.С., Здоровеннова Г.Э., Богданов С.Р., Волков С.Ю., Гавриленко Г.Г., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Здоровеннов Р. Э., Голосов С.Д., Тержевик А.Ю. Моделирование течений в озере, покрытом льдом // Успехи современного естествознания. 2018. №11 (часть 2). С. 323–327.
6. Здоровеннова Г.Э., Гавриленко Г.Г., Пальшин Н.И. и др. Динамика вод небольшого озера в период открытой воды (по данным измерений течений и

- температуры) // Геополитика и экогеодинамика регионов, 2018, Том 4 (14), Выпуск 3, С. 54–68.
7. Ибраев Р.А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: Геос, 2008. 127 с.
 8. Литвинов А.С., Охлопкова А.Н., Тержевик А.Ю. Течения и внутренний водообмен // В кн.: Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1981. С. 68–83.
 9. Михайлов Ю.Д. Течения озера по данным инструментальных измерений // В кн.: Пульсирующее озеро Чаны. Л.: Наука, 1982. С. 139–150.
 10. Охлопкова А.Н. Течения и внутренний водообмен // В кн.: Озеро Кубенское. Л.: Наука, 1977. С. 130–154.
 11. Охлопкова А.Н., Тержевик А. Ю. Течения и внутренний водообмен. // В кн.: Гидрология озер Воже и Лача. Л.: Наука, 1979. С. 71–85.
 12. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Т. 1. Гидрофизика. М.: Физический факультет МГУ, 2002. 276 с.
 13. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. СПб: Наука, 1991. 191 с.
 14. Тонких А.Н. Течения и волновые процессы // В кн.: Экосистема озера Плещеево. Л.: Наука, 1989. С. 32–35.
 15. Bernhardt J., Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations // *Limnol. Oecogr. Fluids & Environments*. 2014. 4 (1). P. 17–33. DOI 10.1215/21573689-2683238.
 16. Engelhardt C., Kirillin G. Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements // *Fundam. Appl. Limnol.* 2014. V.184 (3). P. 183–194. DOI: 10.1127/1863-9135/2014/0582.
 17. Järvet A. Hydrology of Lake Võrtsjärv // *Lake Võrtsjärv. Estonian Encyclopedia Publishers: Tallinn*, 2004. P. 105-139.
 18. Kelley D.E. Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension // *J. Plankton Res.* 1997. V. 19. P. 1859–1880.
 19. Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Bor. Environ. Res.* 2010. V. 15. P. 279–293.
 20. Kirillin G., Wen L., Shatwell T. Seasonal thermal regime and climatic trends in lakes of the Tibetan Highlands // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. Vol. 21, 1895–1909.
 21. Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // *Environmental Modelling & Software*. 2011. V. 26. I. 11. P. 1325-1336. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006
 22. Wagner C., Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale // *Freshwater Biology*. 2011. V.56. I. 10. P. 1949-1961. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02623.x
 23. Wüest A., Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2003. Vol. 35. P. 373–412. doi: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220.
 24. Zdrovennov R., Palshin N., Zdrovennova G., et al. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Est. J. Earth Sci.* 2013, 62, P. 26–32, 10.3176/earth.2013.03.
 25. Zdrovennova G., Palshin N., Zdrovennov R., Golosov S., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. №2, P. 47–57.

G.E. Zdorovennova¹,
G.G. Gavrilenko,
N.I. Palshin,
T.V. Efremova,
S.Y. Volkov,
S.R. Bogdanov,
A.Yu. Terzhevnik,
S.D. Golosov,
I.S. Zverev,
R.E. Zdorovennov

Currents in a small lake during the open water period

Northern water problems Institute of Karelian Research
Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk,
Russian Federation
e-mail: zdorovennova@gmail.com

Abstract. *The features of thermo- and hydrodynamics of the water column of a small polymictic Lake Vendyurskoe (south of Karelia) are analyzed according to measurements of temperature and currents during the open water of 2018. It is shown that there was a well-pronounced stratification against the background of the warm weather of May, July and August. The periods of homothermy were characterized by active hydrodynamics of both the surface and bottom layers of the water column. It was established that the current velocities exceeded 10 cm/s in the bottom layers of the central deep-water basin of the lake with complete mixing of the water column against the background of the intensification of atmospheric exposure — wind intensifications and abrupt changes in atmospheric pressure. Separate bottom dimples were characterized by lower current velocities.*

Keywords: *shallow lake, temperature, currents, homothermy, stratification.*

References

1. Butorin N.V., Litvinov A.S., Fomichev I.F., Poddubnyj S.A. Gorizontalnaja cirkuljacija vod v Rybinskom vodohranilishhe i vozmozhnye ee izmenenija pri pereraspredelenii stoka. // V kn.: Jekologicheskie issledovanija vodoemov Volgo-Baltijskoj i Severo-Dvinskoj vodnyh sistem. L.: Nauka, 1982. S. 150–167. (in Russian)
2. Voroncov F.F. Dinamika vod oz. Krasnogo // V kn.: Ozera Karel'skogo pereshejka. L.: Nauka, 1971. S. 50–68. (in Russian)
3. Gavrilenko G.G., Zdorovennova G.E., Volkov S.Ju., Bogdanov S.R., Zdorovennov R. Ustojchivost' vodnoj massy i ee vlijanie na kislorodnyj rezhim polimikticheskogo ozera // Geopolitika i jekogeodinamika regionov. 2018. T 4 (14), №1. S. 57–71. (in Russian)
4. Zverev I.S., Ushakov K.V., Shipunova E.A., Golosov S.D., Ibraev R.A. Ocenka vlijanija osnovnyh pritokov Ladozhskogo ozera na formirovanie vodnoj massy buhty Petrokrepost' (istok r. Nevy) po rezul'tatam matematicheskogo modelirovanija // Mat. 1-j mezhd. konf. Ozera Evrazii: problemy i puti ih reshenija. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2017. S. 228–233. (in Russian)
5. Zverev I.S., Zdorovennova G.Je., Bogdanov S.R., Volkov S.Ju., Gavrilenko G. G., Efremova T. V., Pal'shin N.I., Zdorovennov R.Je., Golosov S.D., Terzhevnik A.Ju. Modelirovanie techenij v ozere, pokrytom l'dom // Uspehi sovremennogo estestvoznanija. 2018. №11. (Chast' 2). S. 323–327. (in Russian)
6. Zdorovennova G.Je., Gavrilenko G.G., Pal'shin N.I. i dr. Dinamika vod nebol'shogo ozera v period otkrytoj vody (po dannym izmerenij techenij i temperatury) //

- Geopolitika i jekogeodinamika regionov, 2018, Tom 4 (14), Vypusk 3, S. 54–68. (in Russian)
7. Ibraev R.A. Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskikh processov v Kaspijskom more. M.: Geos, 2008. 127 s. (in Russian)
 8. Litvinov A.S., Ohlopkova A.N., Terzhevik A.Ju. Techenija i vnutrennij vodoobmen // V kn.: Antropogennoe vlijanie na krupnye ozera Severo-Zapada SSSR. L.: Nauka, 1981. S.68–83. (in Russian)
 9. Mihajlov Ju.D. Techenija ozera po dannym instrumental'nyh izmerenij // V kn.: Pul'sirujushhee ozero Chany. L.: Nauka, 1982. S. 139–150. (in Russian)
 10. Ohlopkova A.N. Techenija i vnutrennij vodoobmen // V kn.: Ozero Kubenskoe. L.: Nauka, 1977. S. 130–154. (in Russian)
 11. Ohlopkova A.N., Terzhevik A.Ju. Techenija i vnutrennij vodoobmen. // V kn.: Gidrologija ozer Vozhe i Lacha. L.: Nauka, 1979. S. 71–85. (in Russian)
 12. Pokazeev K.V., Filatov N.N. Gidrofizika i jekologija ozer. T. 1. Gidrofizika. M.: Fizicheskij fakul'tet MGU, 2002. 276 s. (in Russian)
 13. Filatov N.N. Gidrodinamika ozer SPb: Nauka, 1991. 191 s. (in Russian)
 14. Tonkih A.N. Techenija i volnovye processy // V kn.: Jekosistema ozera Pleshhevo. L.: Nauka, 1989. S. 32–35. (in Russian)
 15. Bernhardt J., Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations // *Limnol. Ocenogr. Fluids & Environments*. 2014. 4 (1). P. 17–33. DOI 10.1215/21573689-2683238.
 16. Engelhardt C., Kirillin G. Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements // *Fundam. Appl. Limnol.* 2014. V.184 (3). P. 183–194. DOI: 10.1127/1863-9135/2014/0582.
 17. Järvet A. Hydrology of Lake Võrtsjärv // *Lake Võrtsjärv. Estonian Encyclopedia Publishers: Tallinn*, 2004. P. 105-139.
 18. Kelley D.E. Convection in ice-covered lakes: effects on algal suspension // *J.Plankton Res.* 1997. V. 19. P. 1859–1880.
 19. Kirillin G. Modelling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes // *Bor. Environ. Res.* 2010. V. 15. P. 279-293.
 20. Kirillin G., Wen L., Shatwell T. Seasonal thermal regime and climatic trends in lakes of the Tibetan Highlands // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017. 21, 1895–1909.
 21. Read J. S., Hamilton D. P., Jones I. D., et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data // *Environmental Modelling & Software*. 2011. V. 26. I. 11.P. 1325-1336. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.05.006
 22. Wagner C., Adrian R. Consequences of changes in thermal regime for plankton diversity and trait composition in a polymictic lake: a matter of temporal scale // *Freshwater Biology*. 2011. V.56. I. 10. P. 1949–1961. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2011.02623.x
 23. Wüest A., Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2003. Vol. 35. P. 373–412. doi: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220.
 24. Zdorovenov R., Palshin N., Zdorovenova G., et al. Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Est. J. Earth Sci.* 2013, 62, 26–32, 10.3176/earth.2013.03.
 25. Zdorovenova G., Palshin N., Zdorovenov R., Golosov S., Efremova T., Gavrilenko G., Terzhevik A. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. № 2, 47–57.

Поступила в редакцию 21.11.2019 г.