

УДК 556.551:556.114.6:546.21

Здоровеннова Г. Э.  
Гавриленко Г. Г.  
Пальшин Н. И.  
Ефремова Т. В.  
Волков С. Ю.  
Богданов С. Р.  
Тержевик А. Ю.  
Голосов С. Д.  
Зверев И. С.  
Здоровеннов Р. Э.

## ***Динамика вод небольшого озера в период открытой воды (по данным измерений течений и температуры).***

Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение ФГБУ науки ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», г. Петрозаводск  
e-mail: zdorovennova@gmail.com

**Аннотация.** Особенности динамики вод небольшого полимиктического озера Вендюрского в период открытой воды рассмотрены на основании анализа данных измерений течений и температуры в мае–октябре 2017. Показано, что на этапе летнего нагревания водная толща озера находилась в состоянии слабо выраженной стратификации, прерывавшейся несколько раз на фоне похолоданий и усиления ветра. Установлено, что в придонных слоях озера как на склоновых станциях, так и в центральной котловине, скорости течений составляли 2–3 см/с, периодически увеличиваясь до 8–15 см/с на фоне усиления ветра. Прогрессивно-векторные диаграммы (ПВД), построенные по двум горизонтальным компонентам скорости, позволили оценить возможный перенос, составивший несколько км за шесть суток измерений. Резкие скачки, изломы, петли на кривых ПВД, соответствующие моментам резкой смены направления течения, свидетельствуют о наличии в озере инерционных движений, мезомасштабных вихрей, внутренних волн, развивающихся в результате усиления ветровой активности.

**Ключевые слова:** мелководное озеро, температура, течения, внутренние волны.

### **Введение**

Динамический режим озер играет важнейшую роль в функционировании их экосистем. Большинство мелководных бореальных озер можно условно разделить на две группы по преобладающему режиму перемешивания: димиктические и полимиктические [17; 18]. Водная толща димиктических водоемов перемешивается полностью лишь дважды в год – весной после схода льда и осенью в период осеннего охлаждения. Период летней стратификации на таких озерах продолжается несколько месяцев, что создает предпосылки для развития придонной аноксии, накопления парниковых газов и заметно ухудшает условия жизни гидробионтов [8; 11]. В полимиктических водоемах стратификация выражена заметно слабее, водная толща в период летнего нагревания может неоднократно полностью перемешиваться. Придонные слои при этом азерируются [25], что снижает риск ухудшения кислородных условий и других негативных последствий для экосистемы водоема.

Тип перемешивания водоема определяется, главным образом, прозрачностью водной толщи, особенностями строения котловины и преобладающей ветровой

нагрузкой [12; 13; 17]. Продолжительность летней стратификации, периодов весеннего и осеннего полного перемешивания водной толщи водоема, как и интенсивность динамических процессов, определяют жизненные циклы гидробионтов, создают «благоприятные» или «неблагоприятные» условия для видов с разными предпочтениями по температурному и динамическому режимам [14]. В свою очередь, сезонная динамика фитопланктона может определять прозрачность водной толщи и оказывать существенное влияние на продолжительность стратификации и режим перемешивания [21].

Методы натуральных измерений не позволяют получить полную картину пространственно-временной изменчивости процессов переноса и перемешивания в водоемах в силу высокой стоимости оборудования и сложности постановки экспериментов. Для решения таких задач все шире применяются методы численного моделирования. При моделировании термического режима мелководных озер традиционно применяется одномерный подход, основанный на предположении о горизонтальной однородности температуры. Одномерные модели, например, Flake [20] позволяют воспроизводить основные закономерности изменения вертикального температурного профиля, устанавливать продолжительность летней стратификации, периодов весенней и осенней гомотермии.

Однако применение таких моделей не позволяет учесть динамических явлений и процессов, таких как внутренние волны, сейши, нагоны, циркуляция Ленгмюра [23], оказывающих влияние на скорости тепломассообмена в водной толще и придонных слоях мелководных озер.

Заметно повысить качество расчетных реализаций позволяет использование трехмерных математических моделей, все шире применяемых в лимнологических исследованиях [15; 22]. Уравнения таких моделей реалистично описывают те процессы, которые важны в сезонной динамике озерных экосистем, и, в первую очередь, – это перенос и перемешивание. Использование таких моделей позволяет решать ряд задач, связанных, например, с перераспределением веществ, в частности загрязнителей, по водной толще озер, что повышает ценность модельных расчетов с экологической точки зрения.

В рамках выполнения темы «Роль гидрофизических процессов в экосистемах мелководных озер. Процессы переноса и перемешивания в годовом цикле» (№ 0223-2018-0013) сотрудниками лаборатории гидрофизики Института водных проблем Севера впервые применительно к небольшому бореальному озеру будет проведена оценка годового термического цикла, процессов перемешивания и переноса примеси при различных гидрометеорологических условиях с использованием трехмерной математической модели гидротермодинамики внутреннего моря (МГВМ). Эта модель разработана в Институте вычислительной математики РАН (ИВМ РАН) и в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) [7]. Модель была успешно адаптирована для пресноводного озера в Институте Озероведения РАН (ИНОЗ РАН) [3].

Объектом модельных расчетов выбрано озеро Вендюрское, на котором проводятся ежегодные комплексные гидрофизические исследования с 1994 г. до настоящего времени. За годы исследований накоплен огромный массив данных по температуре воды и содержанию растворенного кислорода в водной толще, потокам солнечной радиации на поверхности озера и в его водной толще, течениям в период открытой воды и ледостава, который будет использоваться для

калибрации и верификации модели в годовом цикле. Комплексный анализ результатов математического моделирования и данных натуральных измерений позволит получить схему течений в озере, а также оценить процессы перемешивания и переноса примеси в годовом цикле при различных гидрометеорологических условиях.

В данной работе мы приводим результаты анализа измерений температуры и скоростей течений в озере Вендюрском (юг Карелии) в период открытой воды в 2017 г. Цель исследования – изучение динамического режима полимиктического озера в период открытой воды, уточнение и обобщение вертикального профиля скоростей течений в зависимости от топографии дна в период открытой воды. Полученные результаты будут использованы для верификации модельных расчетов гидродинамики озера в период открытой воды.

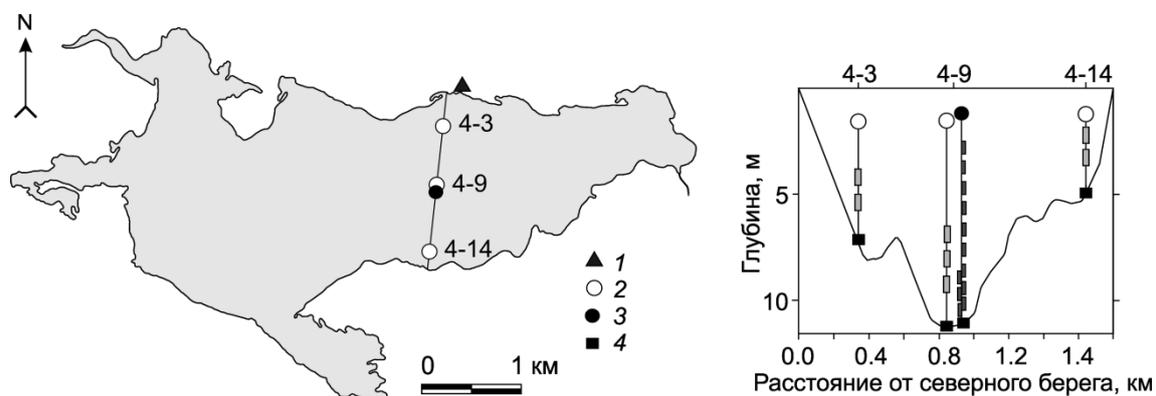
### **Материалы и методы**

Объект исследования – небольшое мезотрофное озеро Вендюрское, расположенное в южной части Карелии ( $62^{\circ}10'-62^{\circ}20'N$ ,  $33^{\circ}10'-33^{\circ}20'E$ ). Средняя ширина водоема составляет 1,5 км, длина – 7 км, площадь зеркала –  $10,4 \text{ км}^2$ , объем вод  $\sim 5,5 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ , средняя глубина – 5,3 м, максимальная – 13,4 м, площадь водосборного бассейна –  $82,8 \text{ км}^2$ . Подробная батиметрическая карта озера приведена в работе [1]. По данным многолетних наблюдений установлено, что в период открытой воды озеро неоднократно перемешивается [5], поэтому по классификации Льюиса [18] может быть отнесено к классу полимиктических озер. Окончание периода ледостава и очищение акватории ото льда обычно наблюдается в первой-второй декадах мая, после чего на протяжении нескольких суток происходит активное перемешивание водной толщи озера, при этом температура и содержание растворенных и взвешенных веществ по водному столбу выравниваются. В разные годы в зависимости от погодных условий весенняя гомотермия продолжается от нескольких дней до трех недель [5; 6]. Весной 2016 г., впервые за период инструментальных измерений на озере (проводившихся ежегодно с 1994 г.), наблюдалось явление выхода водной толщи озера из-под льда в стратифицированном состоянии, период весенней гомотермии на озере в этот год не наблюдался. Стратификация была разрушена лишь в первой декаде июня, когда озеро было полностью перемешано на фоне продолжительного похолодания и усиления ветра [9].

Стратификация обычно устанавливается в середине–конце мая. В зависимости от погодных условий летних месяцев водная толща озера может полностью перемешиваться до пяти раз за период летнего нагревания [1; 2; 5]. Осеннее охлаждение начинается обычно в первой-второй декадах августа, а гомотермия на озере наблюдается с середины – конца августа до ледостава [5]. Установление сплошного льда на озере в разные годы происходит в период с первой декады ноября до второй декады декабря [5; 24]. Таким образом, период открытой воды продолжается 6–7 месяцев.

Для характеристики динамических особенностей водной толщи озера Вендюрского в период открытой воды использовались данные измерений температуры и течений, которые проводились на трех станциях поперечного разреза в период с мая по октябрь 2017 г. (рис. 1). Глубины станций 4-3, 4-9 и 4-14 в момент постановки приборов в озеро составляли 7,2, 11,1 и 4,8 м, соответственно.

Косы с измерителями температуры и течений были растянуты между грузом и плавающим в 1,5–2,5 м от поверхности буем (рис. 1), интервал измерений составлял одну минуту. Измерения температуры (ст. 4-9) проводились в период с 1 мая по 4 октября 2017 г. с использованием температурных датчиков RBR Ltd. (Канада, точность 0,002°C, разрешение < 0,00005°C), закрепленных на косе через 0,5–1 м в водной толще и 2–25 см в придонном слое. По данным температурных датчиков была оценена продолжительность стратификации (период, когда разница поверхностных и придонных температур в центральной глубоководной части озера была более одного градуса), периодов весенней и осенней гомотермии. Также были установлены максимальные годовые значения температуры воды в придонных и поверхностных слоях озера.



**Рис. 1.** Положение станций измерений метеопараметров (1), течений (2) и температуры (3) в озере Вендюрском в период открытой воды в 2017 г. 4 – груз.  
*Составлено авторами*

Измерения течений проводились в период с 22 по 27 июня 2017 г. на трех станциях центрального поперечного разреза с использованием измерителей течений Alec Electronics (Япония, точность  $\pm 1$  см/с и  $\pm 2^\circ$ , разрешающая способность 0,02 см/с и 0,01°). На станциях 4-3 и 4-14 на косах было закреплено по два измерителя течений на расстоянии 1,5 и 2,5 м от дна. На станции 4-9 было закреплено три измерителя течений на расстоянии 1,5, 2,5 и 3,5 м от дна (рис. 1). По данным этих приборов была оценена суточная и синоптическая изменчивость скоростей и направлений течений, установлен вертикальный профиль скоростей, а также построены прогрессивно-векторные диаграммы (ПВД).

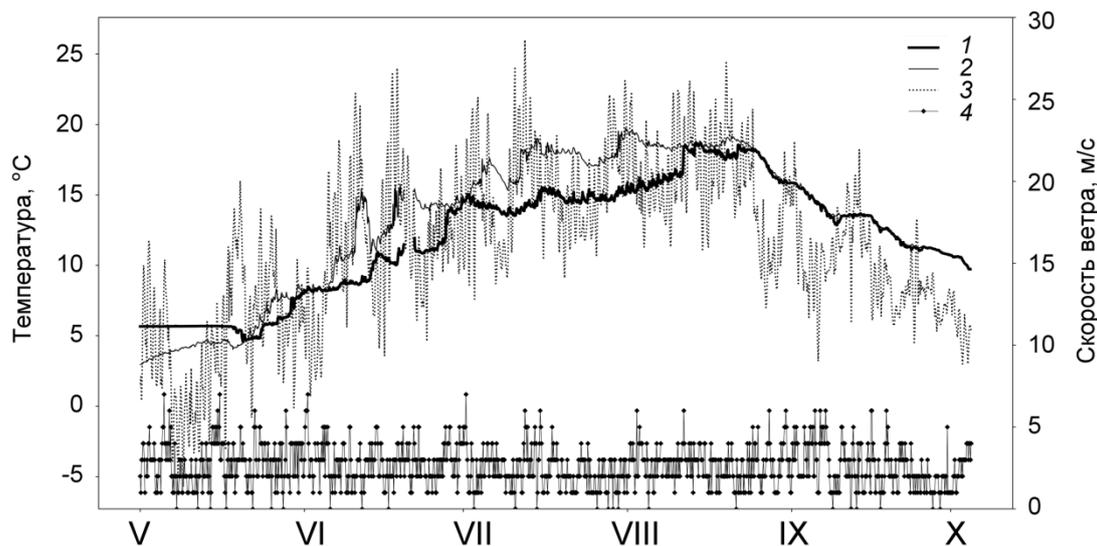
Метеорологические условия района исследований анализировались по данным метеостанции «Петрозаводск» (температура воздуха и скорость ветра, дискретность измерений 3 ч), полученным из архива открытого доступа на сайте «Расписание погоды» по адресу [gr5.ru](http://gr5.ru). В период с 19 по 22 июня на северном берегу озера была размещена метеостанция Campbell scientific (США), фиксирующая температуру воздуха, скорость и направление ветра с дискретностью 5 минут.

## Результаты и обсуждение

### *Особенности регионального климата в летние месяцы 2017 г.*

Конец весны и два первых месяца лета в 2017 г. в южных районах Карелии были холоднее климатической нормы (за период 1961–1990 гг.): май на 3,4°C при

среднемесячном значении температуры воздуха по станции Петрозаводск  $+5,0^{\circ}\text{C}$ , июнь – на  $1,8^{\circ}\text{C}$  при среднемесячном значении  $11,7^{\circ}\text{C}$ , июль – на  $0,6^{\circ}\text{C}$  при среднемесячном значении  $15,5^{\circ}\text{C}$ . Заморозки отмечались до 30 мая. В течение мая–июля 2017 г. наблюдалось несколько продолжительных периодов холодной ветреной погоды (рис. 2), обусловленных прохождением циклонов, когда среднесуточная температура воздуха понижалась на  $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$  за 1–3 дня, а среднесуточная скорость ветра возрастала до  $5\text{--}7$  м/с (с порывами до  $10\text{--}15$  м/с).



**Рис. 2.** Температура придонного (1) и поверхностного (2) слоев озера Вендюрского в период открытой воды в 2017 г., 3 и 4 – температура воздуха и скорость ветра по ст. Петрозаводск соответственно, дискретность данных 3 ч.  
*Составлено авторами*

Максимальное годовое значение температуры воздуха  $+26^{\circ}\text{C}$  было отмечено 12 июля. Август и сентябрь были теплее нормы на  $1,9$  и  $1,0^{\circ}\text{C}$  при среднемесячном значении температуры в эти месяцы  $15,9$  и  $9,8^{\circ}\text{C}$  соответственно. Постепенное понижение температуры воздуха началось с 19 августа, к началу октября ее среднесуточные значения понизились до  $5^{\circ}\text{C}$ . Атмосферное давление в период с мая по октябрь 2017 г. изменялось в пределах  $733\text{--}773$  мм. рт. ст. Среднемесячная скорость ветра достигала  $2,8$  м/с в мае и июне, в июле снизилась до  $2,3$  м/с, в августе и сентябре увеличилась до  $2,7$  и  $2,5$  м/с соответственно. Скорость ветра более  $5$  м/с в период с мая по октябрь наблюдалась достаточно редко (рис. 2). Заметные усиления ветра с порывами до  $10\text{--}17$  м/с были зафиксированы 5 и 16 мая, 1 июня, в течение семи суток в период с 14 июня по 1 июля, 12–15 июля, 3, 11 и 30 августа, 2, 7, 16 и 19 сентября.

***Стратификация и эпизоды полного перемешивания водной толщи озера Вендюрского в период открытой воды в 2017 г.***

По данным термокосы было установлено, что взлом льда произошел 18 мая 2017 г., при этом в придонном слое глубоководной котловины озера температура составляла  $5,9^{\circ}\text{C}$ , а в поверхностном  $3,7^{\circ}\text{C}$  (линии 1 и 2 на рис. 2). В течение 19–20 мая происходило активное перемешивание водной толщи озера. К вечеру 20 мая температура по водному столбу в центральной части озера стала однородной и

достигла 4,7°C. Затем под действием радиационного прогрева началось повышение температуры поверхностного слоя озера, и в период с 21 по 29 мая водная толща озера была слабо стратифицирована (разница температуры по водному столбу не превышала 2°C). Однако на фоне продолжительного похолодания, начавшегося 27 мая и продолжавшегося до 5 июня, стратификация разрушилась. Водная толща озера находилась в состоянии гомотермии с 29 мая по 5 июня, температура ее в этот период составляла 8,1–8,2°C. Затем водная толща озера была стратифицирована с 6 по 13 и с 15 по 27 июня, со 2 июля по 10 августа, с 18 по 22 августа. Разница температур между поверхностным и придонным слоями в периоды стратификации достигала 4°C. Максимальные значения температуры поверхностного слоя достигали 20°C в конце июля. При полном перемешивании водной толщи происходило скачкообразное повышение температуры придонных слоев центральной котловины. Например 14 июня придонная температура повысилась до 10,5–11°C, в период с 27 июня по 2 июля – до 14–15°C, 11–14 августа – до 18,7°C. С 22 августа до начала октября (конец периода измерений) водная толща охлаждалась в состоянии, близком к гомотермии.

Эпизоды полного перемешивания водной толщи озера в весенне-летние месяцы происходили на фоне прохождения циклонов. Как показано в работе [9], предельные значения скоростей ветра и величины кинематического потока тепла на поверхность, необходимые для полного перемешивания водной толщи озера Вендюрского, составляют более 6 м/с и менее  $5 \cdot 10^5$  К·м/с соответственно. Действительно, при усилении ветра более 5–6 м/с и уменьшении кинематического потока тепла на поверхности происходило полное перемешивание водной толщи с перераспределением тепла по водному столбу, приводящее к повышению температуры гипolimниона. Например при резком похолодании и понижении среднесуточной температуры воздуха в районе исследований в период с 11 по 14 июня с 16,8 до 8,7°C температура поверхностных слоев озера понизилась с 15,6 до 11°C, а температура придонных слоев центральной котловины повысилась с 8,7 до 10,8°C.

Анализ данных позволил установить, что температура придонных слоев центральной глубоководной котловине в течение периодов стратификации постепенно понижалась или повышалась (рис. 3). Например в период со 2 по 11 июля температура придонного слоя (горизонт измерений 10,97 м) понизилась на 1,3°C, в период с 12 до 16 июля – повысилась почти на 2°C, затем с 16 до 23 июля понизилась на 1,5°C. При этом как в периоды роста, так и в периоды уменьшения температуры отмечались ее высокочастотные колебания с амплитудой около 0,5–0,8°C и периодами от нескольких десятков минут до нескольких часов. Интересно, что такие периоды выраженного роста и уменьшения температуры наблюдались только в тонком придонном слое толщиной около 0,5 м: как видно из рис. 3 на горизонте измерений 9,6 м высокочастотные колебания температуры были хорошо выражены, а низкочастотные были сглажены.

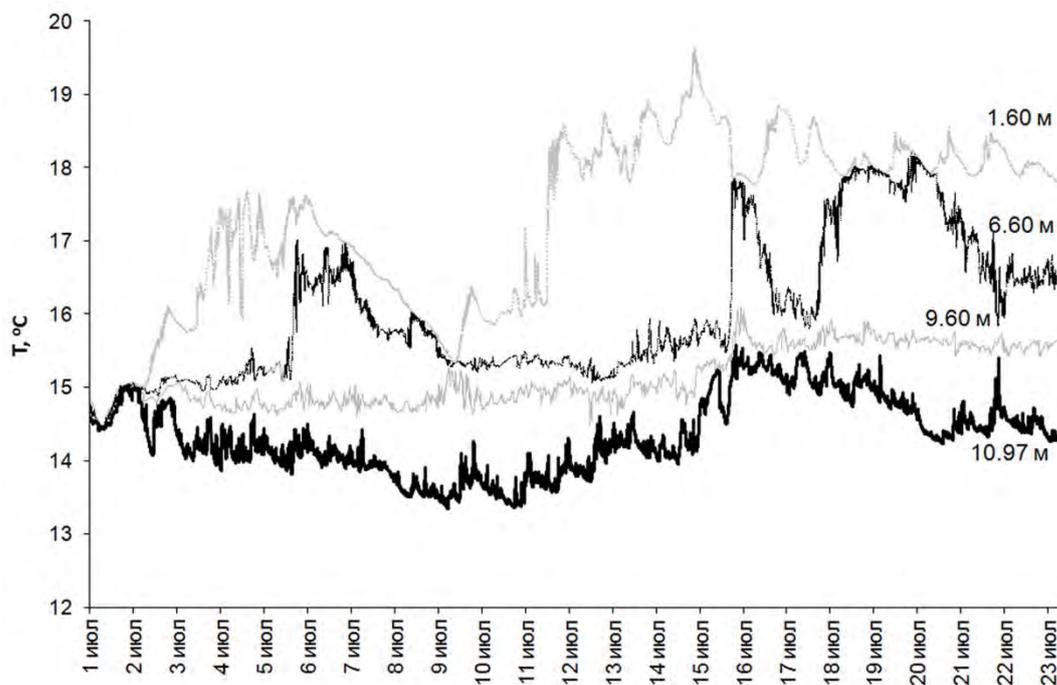


Рис. 3. Температура на разных горизонтах водной толщи в центральной глубоководной котловине оз. Вендюрского в период с 1 по 23 июля 2017 г.

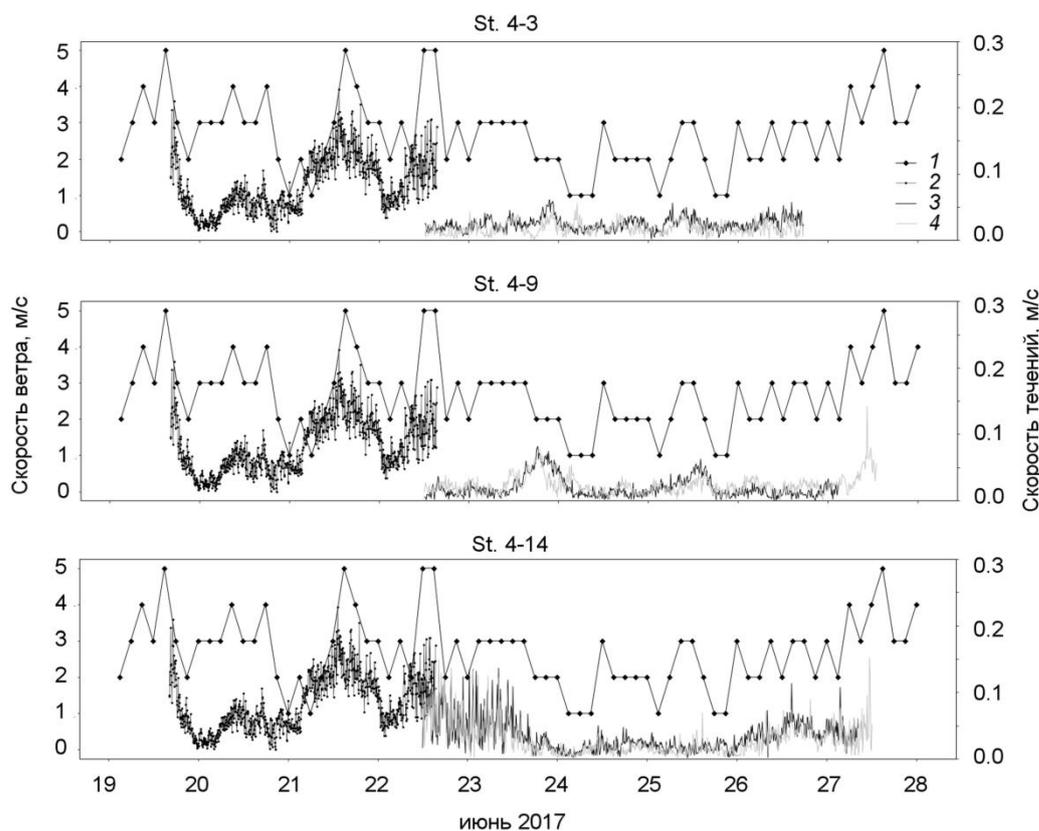
*Составлено авторами*

Активная динамика температуры придонных слоев в периоды стратификации водной толщи косвенно свидетельствует о заметном вкладе динамических процессов в усиление теплообмена в гипolimнионе.

Известно, что при ветровом воздействии на поверхность стратифицированного водоема может происходить раскачивание термоклина. При этом как на термоклизе, так и в гипolimнионе могут появляться внутренние волны, обрушение которых приводит к интенсификации тепломассообменных процессов. Как показано в ряде недавно опубликованных работ [4; 10], внутренние сейши и конвекция в верхнем слое донных отложений могут вызывать локальные усиления потоков тепла и кислорода в придонных слоях водоемов, превышающие фоновые значения в несколько раз.

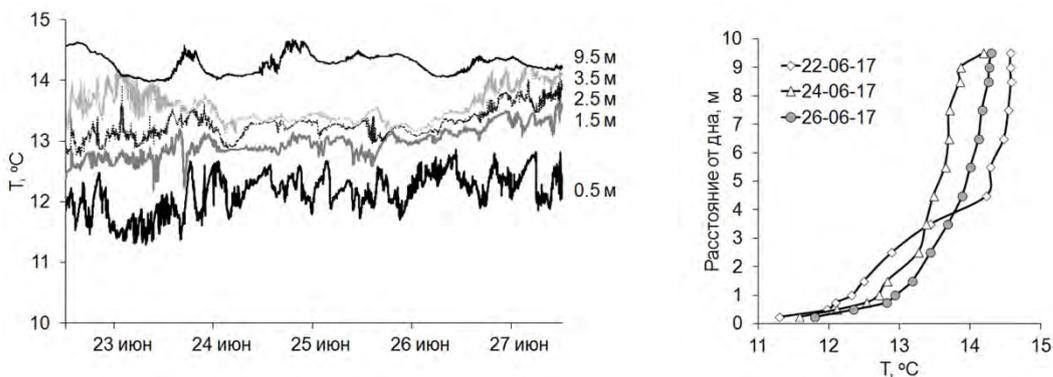
#### ***Скорости течений в придонных слоях озера в период открытой воды в 2017 г.***

Анализ данных измерителей течений показал, что скорости течений на всех станциях достигали 2–4 см/с, периодически повышаясь до 8–10 см/с (рис. 4). Усиления течений на глубоководных станциях 4-3 и 4-9 практически совпадали по времени, в то время как на мелководной станции 4-14 изменчивость течений носила несколько иной характер. В частности, обращает на себя внимание выраженная высокочастотная изменчивость течений и их высокие скорости (до 15 см/с) на этой станции в период с 12 ч 22 июня до 12 ч 23 июня. Усиление скоростей течений до 5–6 см/с на ст. 4-3 и до 8–9 см/с на ст. 4-9 произошло с некоторым запаздыванием относительно максимума на ст. 4-14 и соответствовало по времени периоду ослабления скорости ветра.



**Рис. 4.** Скорость ветра по данным метеостанции Петрозаводск (1) и метеостанции, установленной на северном берегу озера Вендюрского (2), а также скорости течений на трех станциях поперечного разреза на расстоянии от дна 1,5 м (3) и 2,5 м (4). Составлено авторами

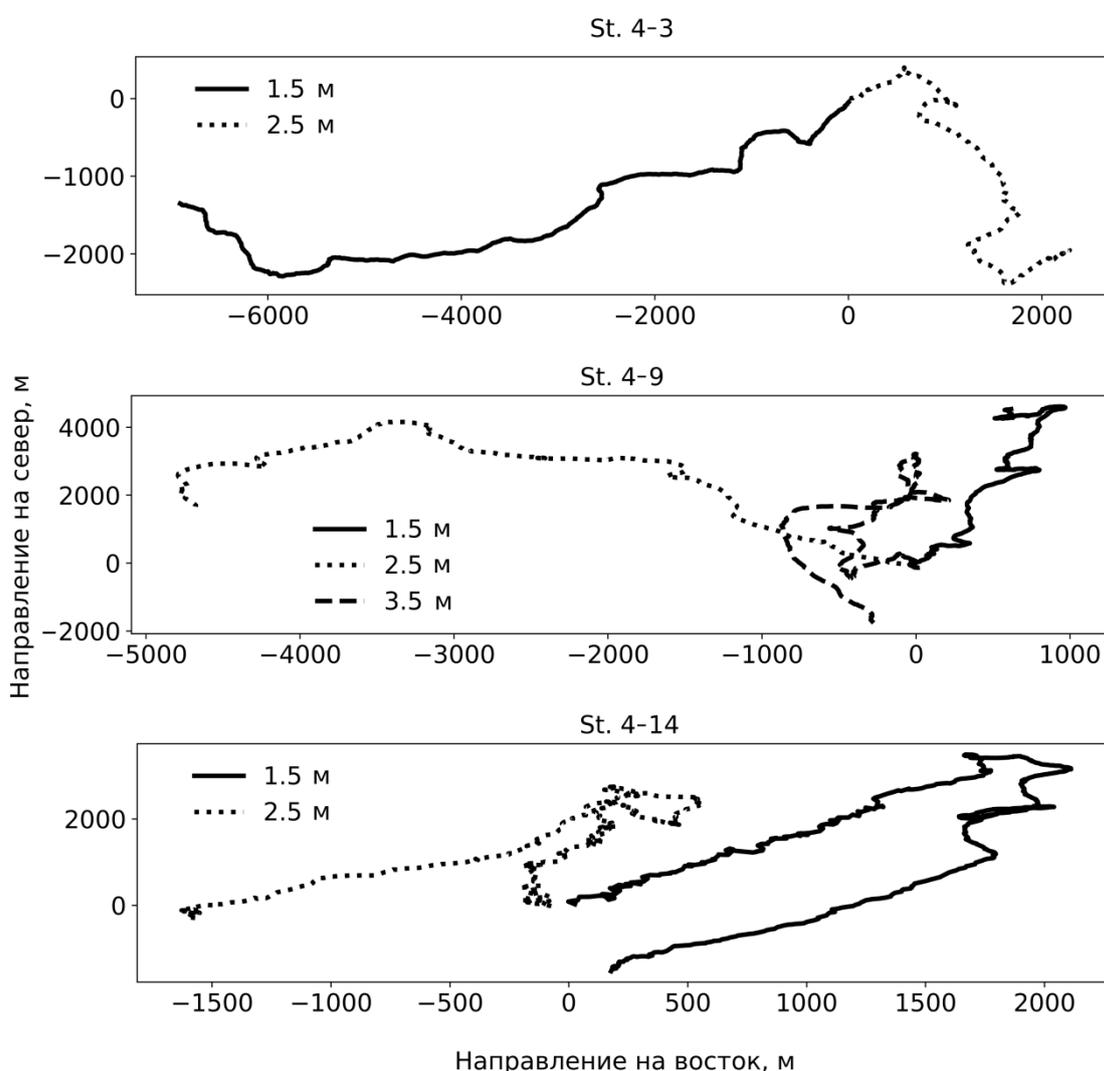
В период измерений течений водная толща озера находилась в состоянии слабо выраженной стратификации, разница температур поверхностных и придонных слоев в центральной части озера составляла 2,5–3°C (рис. 5).



**Рис. 5.** Температура водной толщи 22–27 июня 2017 г. на станции 4-9. Цифрами показано расстояние горизонта измерений от дна. Вертикальные профили температуры на ст. 4-9 22, 24 и 26 июня 2017 г. в 15 ч. Составлено авторами

Водную толщу условно можно было разбить на два слоя – поверхностный квазиперемешанный с градиентом температуры не более  $0,2^{\circ}\text{C}/\text{м}$ , нижняя граница которого располагалась на расстоянии около 5 м от дна в центральной глубоководной части озера, и нижележащий стратифицированный с градиентом температуры  $0,4\text{--}0,7^{\circ}\text{C}/\text{м}$ . Таким образом, измерители течений на ст. 4-3 и 4-9 находились в стратифицированном слое, а на ст. 4-14 – в верхнем квазиперемешанном, что объясняет более быстрое реагирование скоростей течений на мелководной станции на усиления ветра и некоторое запаздывание – на глубоководных станциях.

ПВД течений, построенные по двум горизонтальным компонентам скорости (рис. 6), позволяют получить представление о преобладающем переносе на разных глубинах в разных районах озера в период измерений 22–26 июня 2017 г.



**Рис. 6.** ПВД течений на разных горизонтах наблюдений на трех станциях, построенные за период 22–26 июня 2017 г. по двум горизонтальным компонентам скорости. Составлено авторами

За шесть суток измерений перенос составил несколько км на всех станциях, что говорит о возможности быстрого распространения примеси по водной толще

озера. Направление переноса на станциях, расположенных у северного (ст. 4-3) и южного (ст. 4-14) берегов озера, было противоположным 22–24 июня, однако, поскольку даже на одной станции на разных глубинах направление переноса как 22–24 июня, так и за весь период измерений не совпадало, нельзя говорить о существовании устойчивой общеозерной циркуляции.

Характерной особенностью кривых на ПВД можно считать наличие резких скачков, петель, изломов, соответствующих моментам резкой смены направления течения. Подобный характер кривых переноса отмечался на ПВД, построенных по данным измерений течений на озере Вендюрском в период весенней подледной конвекции [19]. В покрытом льдом озере такие скачки могут быть обусловлены ячеистой структурой конвективного слоя, а в случае открытой воды – наличием инерционных движений, мезомасштабных вихрей, внутренних волн, появляющихся в результате усиления ветровой активности. Как отмечено в работе [16], в слабо стратифицированном покрытом льдом озере зимой возникают инерционно-гравитационные волны типа Кельвина и Пуанкаре в результате ветровой активности предледоставного периода. Эффекты инерции вызывают концентрацию волновых движений на боковой границе и обеспечивают длительное время рассеивания волн. В результате волны могут сохраняться в озерах в течение нескольких недель после образования льда. В случае открытой воды время жизни таких волн может быть меньше в связи с заметно более выраженной гидродинамикой водоема, формирующейся в результате активного взаимодействия водной толщи с атмосферой.

### **Выводы**

Длительные измерения температуры воды и скоростей течений в небольшом полимиктическом озере позволили выявить особенности динамики его водной толщи в период открытой воды при изменяющемся атмосферном воздействии. Показано, что при усилениях ветра и понижении температуры воздуха водная толща озера периодически переходит из состояния слабовыраженной стратификации в состояние гомотермии. Скорости течений в придонных слоях озера достигают 2–4 см/с, увеличиваясь до 10–15 см/с при усилениях ветра. Показано, что усиление скоростей в гипolimнионе на фоне возрастающей ветровой нагрузки происходит с некоторой задержкой по сравнению с мелководными прибрежными районами. Характер изменчивости кривых ПВД (резкие скачки, петли, изломы, соответствующие моментам резкой смены направления течения) позволяет предполагать – при усилении ветровой нагрузки – развитие в озере инерционных движений, мезомасштабных вихрей, внутренних волн.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера – обособленного подразделения ФГБУ науки ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук».*

### **Литература**

1. Гавриленко Г. Г., Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э. и др. Термический и кислородный режимы мелководного озера на этапе летнего нагревания // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 10 (1). С. 414–421.

2. 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.
3. Зверев И. С. и др. Оценка влияния основных притоков Ладожского озера на формирование водной массы бухты Петрокрепость (исток р. Невы) по результатам математического моделирования // Материалы I Международной конференции «Озера Евразии: проблемы и пути решения» Петрозаводск, 11–15 сентября 2017 г. С. 228–233.
4. Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И. и др. Тепловой режим мелководного озера зимой // Труды Карельского научного центра РАН. Лимнология. 2016. № 5, С. 3–12. DOI: 10.17076/lim314
5. Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э. и др. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия РГО. 2017. Т. 149. № 6. С. 59–74.
6. Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Тержевик А. Ю. Динамика температуры и растворенного кислорода в мелководном озере на фоне погодной изменчивости // Ученые записки ПетрГУ. 2017. 8(169), С. 106–114.
7. Ибраев Р. А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. // М.: Геос, 2008. 127 с.
8. Кляшторин Л. Б. Водное дыхание и кислородные потребности рыб. М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1982. 168 с.
9. Тержевик А. Ю., Голосов С. Д., Гавриленко Г. Г., и др. Возможное влияние «необычной» весны на режим растворенного кислорода в мелководном озере в летний период // Труды КарНЦ РАН. Серия Лимнология. 2017. №10. С. 17–27. DOI: 10.17076/lim712
10. Bernhardt J., Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations // Limnol. Oceanogr. Fluids & Environments. 2014. 4(1). P. 17–33. DOI 10.1215/21573689-2683238.
11. Bouffard D., Ackerman J. D., Boegman L. Factors affecting the development and dynamics of hypoxia in a large shallow stratified lake: Hourly to seasonal patterns, Water Resour. Res., 2013, 49, 2380–2394. DOI:10.1002/wrcr.20241.
12. Brothers S., Köhler J., Attermeyer K., Grossart H.P., Mehner T., Meyer N., Scharnweber K., Hilt S. A feedback loop links brownification and anoxia in a temperate, shallow lake. // Limnol. Oceanogr. 2014. 59 (4), 1388–1398.
13. Fee E. J., Hecky R. E., Kasian S. E. M., Cruikshank D. R. Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian shield lakes. Limnol. Oceanogr. 1996. 41 (5), 912–920.
14. Gerten D., Adrian R. Climate driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation // Limnol. Oceanogr. 2000. V. 45, N 5. P. 1058–1066.
15. Jin K.-R., Hamrick J. H., Tisdale T. Application of three-dimensional hydrodynamic model for Lake Okeechobee // J. Hydraul. Eng. 2000, 126, 758–771.
16. Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // Aquat. Ecol. 2009. 43(3): 641–651.

17. Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // *Earth-Science Reviews*. 2016. 161: 179–190.
18. Lewis W. M. A revised classification of lakes based on mixing // *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 1983. V. 40 P. 1779–1787. DOI:10.1139/f83-207
19. Malm J, Terzhevik A, Bengtsson L, Boyarinov P, Glinsky A, Palshin N, Petrov M. 1998. A field study on currents in a shallow ice-covered lake. *Limnol Oceanogr.* 43:1669–1679.
20. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Env. Res.* 2010. V. 15. P. 218–230.
21. Shatwell T., Adrian R., Kirillin G. Planktonic events may cause polymictic-dimictic regime shifts in temperate lakes // *Sci. Report.* 2016. 6, 24361. doi:10.1038/srep24361 (2016).
22. Wood T. M., Cheng R. T., Gartner J. W., et al. Modeling hydrodynamics and heat transport in Upper Klamath Lake, Oregon, and implications for water quality // U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2008-5076. U.S. Geological Survey, Reston. 2008. 48p.
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., Zdorovenнова 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. Zdorovenнова G., N. Palshin, R. Zdorovennov, et al. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability.* 2016. № 2. С. 47–57.

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

***Water dynamics of a small lake in open water period (according to measurements of currents and temperature).***

---

Northern Water Problems Institute Karelian Research Centre  
Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk  
*e-mail: zdorovennova@gmail.com*

**Abstract.** Features of the water dynamics in a small polymictic lake Vendyurskoe in the period of open water 2017 are considered on the basis of analysis of current and water temperature observational data. It is shown that at the stage of summer heating the water column of the lake was in the state of weak stratification, interrupted several times against the background of cooling and wind intensification. It was established that in the near-bottom layers of the lake, both at slope stations and in the central basin, the current velocities were 2-3 cm / s, periodically increasing to 8-15 cm / s against the background of wind intensification. Progressive-vector diagrams (PVD), constructed from two horizontal components of the velocity, allowed to estimate the possible transfer, which amounted to several km for six days of measurements. Sharp jumps, kinks, and loops on the PVD curves, and corresponding to the moments of a sharp

*change in the direction of flow, indicate the presence in the lake of inertial motions, meso-scale vortices, internal waves developed as a result of increased wind activity.*

**Keywords:** *shallow lake, temperature, currents, internal waves.*

### **References**

1. Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E. i dr. Termicheskiy i kislorodnyy rezhimy melkovodnogo ozera na ehtape letnego nagrevaniya // Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2014. № 10 (1). S. 414-421. (in Russian).
2. Gavrilenko G. G., Zdorovennova G. E., Volkov S. Yu., Bogdanov S. R., Zdorovennov S. R. Ustojchivost' vodnoj massy` i ee vliyanie na kislorodny`j rezhim polimikticheskogo ozera. // Geopolitika i e`kogeodinamika regionov, 2018, T 4(14), № 1, S. 57-71. (in Russian).
3. Zverev I. S. i dr. Ocenka vliyaniya osnovny`x pritokov Ladozhskogo ozera na formirovanie vodnoj massy` buxty` Petrokrepost` (istok r. Nevy`) po rezul'tatam matematicheskogo modelirovaniya. // Materialy` I Mezhdunarodnoj konferencii «Ozera Evrazii: problemy` i puti resheniya» Petrozavodsk, 11-15 sentyabrya 2017 g. S. 228-233. (in Russian).
4. Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Pal'shin N.I. i dr. Teplovoj rezhim melkovodnogo ozera zimoy // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. Limnologiya. 2016. №5, S. 3-12. DOI: 10.17076/lim314. (in Russian).
5. Zdorovennova G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E. i dr. Evolyutsiya temperatury vodnoy tolshchi borealnykh ozer na fone izmeneniy regionalnogo klimata //Izvestiya RGO. 2017. T. 149. № 6. S. 59–74. (in Russian).
6. Zdorovennova G. E., Zdorovennov R. E., Pal`shin N. I., Terzhevik A. Yu. Dinamika temperatury` i rastvorennogo kisloroda v melkovodnom ozere na fone pogodnoj izmenchivosti // Ucheny`e zapiski PetrGU, 2017a. 8(169), S. 106-114. (in Russian).
7. Ibraev R. A. Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskix processov v Kaspijskom more. // M.: Geos, 2008. 127 s. (in Russian).
8. Klyashtorin L. B. Vodnoe dy`xanie i kislorodny`e potrebnosti ry`b. M.: Leg. i pishh. prom-st`, 1982. 168 s. (in Russian).
9. Terzhevik A. Yu., Golosov S. D., Gavrilenko G. G. i dr. Vozmozhnoye vliyaniye “neobychnoy” vesny na rezhim rastvorennogo kisloroda v melkovodnom ozere v letniy period // Trudy KarNTs RAN. Seriya Limnologiya. 2017. №10. S. 17-27. DOI: 10.17076/lim712. (in Russian).
10. Bernhardt J., Kirillin G., Hupfer M. Periodic convection within littoral lake sediments on the background of seiche-driven oxygen fluctuations // Limnol. Oceanogr. Fluids & Environments. 2014. 4(1). P. 17-33. DOI 10.1215/21573689-2683238. (in English).
11. Bouffard D., Ackerman J. D., Boegman L. Factors affecting the development and dynamics of hypoxia in alarge shallow stratified lake: Hourly to seasonal patterns, Water Resour. Res. 2013. 49, 2380–2394. doi:10.1002/wrcr.20241. (in English).
12. Brothers S., Köhler J., Attermeyer K., Grossart H. P., Mehner T., Meyer N., Scharnweber K., Hilt S. A feedback loop links brownification and anoxia in a temperate, shallow lake. // Limnol. Oceanogr. 2014. 59 (4), 1388–1398. (in English).
13. Fee E. J., Hecky R. E., Kasian S. E. M., Cruikshank D. R. Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian shield lakes. Limnol. Oceanogr. 1996. 41 (5), 912-920. (in English).

14. Gerten D., Adrian R. Climate driven changes in spring plankton dynamics and the sensitivity of shallow polymictic lakes to the North Atlantic Oscillation // *Limnol. Oceanogr.* 2000. V. 45, N 5. P. 1058-1066. (in English).
15. Jin K.-R., Hamrick J. H., Tisdale T. Application of three-dimensional hydrodynamic model for Lake Okeechobee // *J. Hydraul. Eng.* 2000, 126, 758-771. (in English).
16. Kirillin G., Engelhardt C., Golosov S., Hintze T. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, Germany // *Aquat. Ecol.* 2009. 43(3): 641-651. (in English).
17. Kirillin G., Shatwell T. Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes // *Earth-Science Reviews.* 2016.161: 179-190. (in English).
18. Lewis W. M. A revised classification of lakes based on mixing // *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 1983. V. 40 P. 1779–1787. DOI:10.1139/f83-207. (in English).
19. Malm J, Terzhevik A, Bengtsson L, Boyarinov P, Glinsky A, Palshin N, Petrov M. 1998. A field study on currents in a shallow ice-covered lake. *Limnol Oceanogr.* 43:1669-1679. (in English).
20. Mironov D., Heise E., Kourzeneva E. et al. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO // *Boreal Env. Res.* 2010. V. 15. P. 218-230. (in English).
21. Shatwell T., Adrian R., Kirillin G. Planktonic events may cause polymictic-dimictic regime shifts in temperate lakes // *Sci. Report.* 2016. 6, 24361. doi:10.1038/srep24361 (2016). (in English).
22. Wood T. M., Cheng R. T., Gartner J. W., et al. Modeling hydrodynamics and heat transport in Upper Klamath Lake, Oregon, and implications for water quality // *U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2008-5076.* U.S. Geological Survey, Reston. 2008. 48pp. (in English).
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. (in English).
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. (in English).
25. Zdorovenova G., N. Palshin, R. Zdorovenov, et al. The oxygen regime of a shallow lake // *Geography, Environment, Sustainability.* 2016. №2, С. 47-57. (in English).

*Поступила в редакцию 20.06.2018 г.*