

## Зимний термический и ледовый режимы малых озер Карелии на фоне региональной климатической изменчивости\*

Г. Э. Здоровеннова<sup>1</sup>, С. Д. Голосов<sup>1</sup>, Н. И. Пальшин<sup>1</sup>, И. С. Зверев<sup>1</sup>,  
Т. В. Ефремова<sup>1</sup>, А. Ю. Тержевик<sup>1</sup>, Р. Э. Здоровеннов<sup>1</sup>,  
С. Р. Богданов<sup>1</sup>, И. В. Федорова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,  
Российская Федерация, 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Для цитирования:** Здоровеннова, Г. Э., Голосов, С. Д., Пальшин, Н. И., Зверев, И. С., Ефремова, Т. В., Тержевик, А. Ю., Здоровеннов, Р. Э., Богданов, С. Р., Федорова, И. В. (2022). Зимний термический и ледовый режимы малых озер Карелии на фоне региональной климатической изменчивости. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 67 (1), 138–155. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.108>

Представлены результаты исследования закономерностей термического и ледового режимов трех малых озер Карелии в текущих климатических условиях. Анализируются данные измерений температуры воды на автономных станциях, измерений толщины льда весной и результаты численных расчетов периодов существования льда, его толщины и температуры придонной воды с использованием одномерной параметризованной модели FLake в аномально теплый зимний сезон 2019–2020 гг. Проводится сравнение полученных данных с многолетними значениями этих же показателей за период с 1994 по 2019 г. Даты установления и разрушения льда в 2019–2020 гг. на озере Вендюрском были близки к среднеголетним, что определялось близкими к климатической норме погодными условиями осени 2019 г. и весны 2020 г. Зимние месяцы 2019–2020 гг. были на 6.4–9.4°C теплее климатической нормы, это нашло отражение в заметно меньшей, относительно предыдущих лет измерений, толщине льда на озерах (40–48 см в конце марта 2020 г. по сравнению со значениями в середине апреля в 1994–2018 гг. 50–85 см). Уменьшение толщины льда способствовало раннему наступлению (в середине марта) и большей продолжительности (более пяти недель) весенней подледной конвекции. Модельный расчет с учетом атмосферного воздействия, по данным ре-анализа ERA-5, воспроизвел основные особенности ледового режима озер, включая промежуточное разрушение льда в начале зимы на двух больших по площади озерах. Получены значимые регрессионные зависимости между датами установления и взлома льда на озере Вендюрском, а также датами начала и продолжительностью весенней подледной конвекции и характеристиками регионального климата южной Карелии (температурой воздуха и количеством дней с оттепелью в осенние, зимние и весенние месяцы) для периода 1994–2020 гг.

**Ключевые слова:** температура воды, ледовый режим, изменчивость климата, малые озера Карелии, подледная конвекция, модель FLake.

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук». Экспедиционные исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-60291 «Адаптация арктических лимносистем к быстрому изменению климата».

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2022

## 1. Введение и постановка проблемы

В последние годы увеличивается интерес к физическим процессам, происходящим в озерах, покрытых льдом, в том числе с точки зрения их влияния на функционирование озерных экосистем (Obertegger et al., 2017; Pernica et al., 2017). Зимой в условиях крайне ограниченного обмена веществом и энергией между водной толщей и атмосферой температура воды является одним из важнейших параметров, определяющих скорости химических реакций, условия обитания планктонного сообщества, гидродинамику водоемов (Kirillin et al., 2015; Yang et al., 2020). Сплошной снежно-ледяной покров препятствует теплообмену между водной массой озер и атмосферой, существенно изменяя условия функционирования озерных экосистем, поэтому важным является знание о продолжительности ледостава, датах установления и взлома льда, их межгодовой изменчивости.

Использование автономных станций для длительных измерений температуры позволяет изучать не только термический, но и ледовый режимы озер, так как по показаниям температурных датчиков можно достоверно определить периоды, когда озеро покрыто сплошным льдом или его поверхность свободна и испытывает тепловое и динамическое воздействие атмосферы (Yang et al., 2020). Анализ данных температурных датчиков позволяет определять периоды существования льда, но не дает представления о толщине льда. Для изучения этого параметра могут использоваться численные модели (Oveisy et al., 2012), которые также позволяют прогнозировать климатические изменения ледовых условий и термического режима озер (Sharma et al., 2019).

Мелководные озера с глубинами до 20–30 м и горизонтальными размерами до нескольких километров составляют значительную часть всех природных водоемов. Горизонтальная однородность поля температуры является их отличительной чертой, что позволяет моделировать их термический и ледовый режимы простыми одномерными моделями, основанными на интегрировании уравнения вертикальной диффузии тепла и различных способах представления вертикального распределения температуры.

Примером модели такого типа является модель FLake, разработанная совместными усилиями сотрудников Института озероведения РАН, Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Института водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии (IGB) и Службы погоды Германии (DWD) (Mironov et al., 2010; Golosov et al., 2012). FLake — это модель пресноводного водоема, способная воспроизводить вертикальную термическую структуру и условия перемешивания в озерах в масштабах времени от нескольких часов до многих лет. Модель основана на параметрическом представлении вертикального температурного профиля в системе «снег — лед — водная масса — донные отложения». Вертикальное распределение температуры во всех указанных средах описывается с использованием концепции автомодельности изменчивости температуры с глубиной так называемого «геометрического подобия». Входной информацией для расчетов являются географические координаты водоема, его средняя глубина, длина разгона ветра, прозрачность воды, данные о толщине теплоактивного слоя донных отложений и температуре на его нижней границе. Атмосферное воздействие на водоем рассчитывается по данным стандартных метеорологических наблюдений за приходящей коротковолновой

солнечной радиацией, температурой и влажностью приводного воздуха, скоростью ветра, облачностью, атмосферным давлением и осадками.

В данной работе анализируются закономерности термического и ледового режимов трех малых озер Карелии по данным измерений температуры воды на автономных термокосах в аномально теплый зимний сезон 2019–2020 гг., а также осуществляется численный расчет дат установления и взлома льда, его толщины и температуры придонной воды с помощью модели FLake. Проводится сравнение с данными 1994–2019 гг. Также анализируются зависимости между датами установления и взлома льда на озере Вендюрском, датами начала и продолжительностью весенней подледной конвекции и характеристиками регионального климата южной Карелии (температурой воздуха и количеством дней с оттепелью в осенние, зимние и весенние месяцы) для периода 1994–2020 гг. Цель исследования — выявление закономерностей формирования термического и ледового режимов малых озер южной Карелии в текущих климатических условиях.

## 2. Методика исследования и фактический материал

### 2.1. Объекты исследования

Изучались термический и ледовый режимы трех малых озер южной Карелии — Вендюрского, Риндозера и Голубой ламбы (62°10′–62°20′ с. ш., 33°10′–33°20′ в. д.) (рис. 1). При соизмеримых значениях средней и максимальной глубин озера заметно отличаются по площади поверхности и объему водной массы (табл. 1).

Таблица 1. Основные морфометрические характеристики озер (Lakes of Karelia, 2013)

Озеро		Вендюрское	Риндозеро	Голубая ламба
Абсолютная высота, м		143	144	144
Площадь зеркала озера, км <sup>2</sup>		10.2	1.8	0.039
Объем озера, 10 <sup>6</sup> м <sup>3</sup>		60.9	8.2	0.166
Глубина, м	Средняя	6.1	4.6	4.2
	Наибольшая	12.1	8.9	8.0
Коэффициент условного водообмена, год <sup>-1</sup>		0.44	1.25	0.6

Озера Вендюрское и Риндозеро являются мезотрофными, небольшая лесная ламба Голубая — олиготрофный водоем. Прозрачность воды в озере Вендюрском составляет 2–3 м, в Риндозере — 1–2 м, в Голубой ламбе — более 7 м (Lakes of Karelia, 2013). Литоральная зона Голубой ламбы занимает все ложе озерной котловины; преобладают илистые грунты, сообщества макрофитов занимают более 90 % площади дна (Research report, 2013). Донные отложения озер Вендюрского и Риндозера представлены песками на прибрежных мелководьях, глубже 2–3 м — илами. Влияние речного стока на объем водной массы озер незначительно. Большая площадь поверхности озера Вендюрского обуславливает активное ветровое перемешивание его водной толщи в период открытой воды; Голубая ламба и Риндозеро

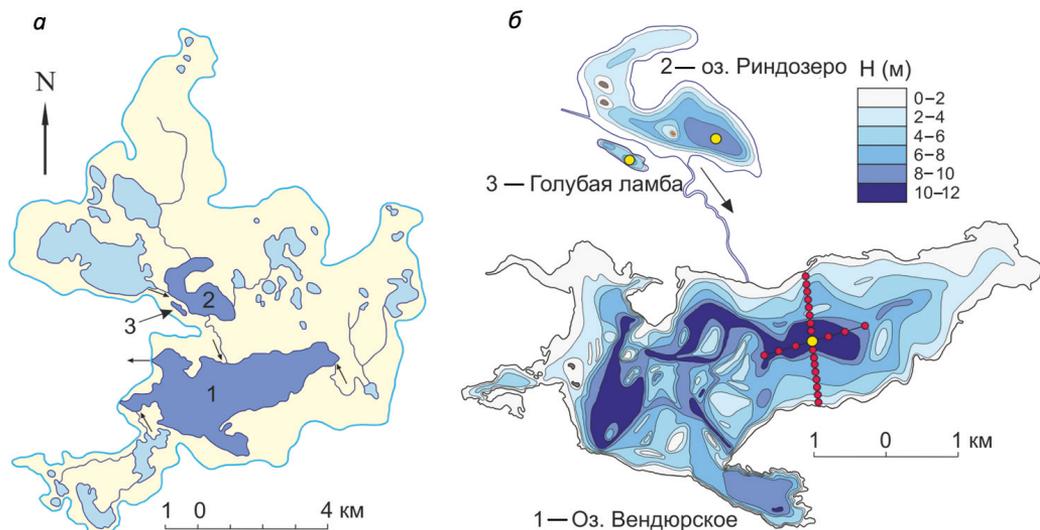


Рис. 1. Водосбор озера Вендюрского (а); изученные озера показаны темно-синим цветом и обозначены цифрами: 1 — озеро Вендюрское, 2 — озеро Риндозеро, 3 — Голубая ламба. Батиметрия и положение станций измерений на озерах (б); желтые кружки — положение термокос, красные кружки — станции измерений толщины льда на оз. Вендюрском

окружены лесом, площадь их поверхности заметно меньше, что делает эти водоемы менее подверженными ветровому воздействию.

## 2.2. Измерения температуры воды и толщины льда

Наиболее изученным среди трех озер является озеро Вендюрское, на котором начиная с 1994 г. ежегодно выполняются измерения температуры на автономных станциях и измерения толщины льда в весенний период. Начиная с лета 2007 г. до настоящего времени измерения проводятся в годовом цикле с дискретностью в 1 мин на центральной глубоководной станции. Полученные данные позволили изучить фенологию ледовых явлений озера (Zdorovenov et al., 2013), выявить межгодовую изменчивость продолжительности основных этапов термического цикла на фоне меняющегося регионального климата (Zdorovenova et al., 2017). На озерах Риндозеро и Голубая ламба измерения ранее проводились в зимние сезоны 1994–1995 и 1995–1996 гг. (Malm et al., 1997).

В центральных глубоководных частях озер Вендюрского, Риндозера и Голубой ламбы в период с октября 2019 по июнь 2020 г. были установлены автономные косы, оснащенные датчиками температуры RBR Ltd., Канада (точность 0.002 °С, дискретность измерений — 1 мин) (табл. 2, рис. 1). В озерах Вендюрское и Риндозеро нижний датчик находился на границе с донными отложениями, в верхнем слое илов, в Голубой ламбе — в придонном слое, в зарослях макрофитов, верхние датчики термокос находились на глубинах 1.3–3.5 м (табл. 2).

По данным термокос были определены даты установления и взлома льда, начало и продолжительность весенней подледной конвекции. При определении периодов существования льда по данным датчиков температуры мы руководствовались

Таблица 2. Измерения температуры в озерах Вендюрское, Голубая ламба и Риндозеро в 2019–2020 гг.

Озеро	Глубина станции, м	Период измерений	Глубина датчика, м
Вендюрское	10.9	07.10.2019–25.06.2020	1.3, 2.3, 3.3, 4.3**, 5.3, 6.3, 7.3, 8.3**, 9.3, 10.3, 10.6, 10.9*
Риндозеро	8.5	03.10.2019–25.06.2020	3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5**, 8.5*
Голубая Ламба	6.5	03.10.2019–25.06.2020	1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5*

\* Датчик в верхнем слое илов или в зарослях макрофитов.

\*\* Датчик проработал не весь период измерений.

Примечание. Информация, приведенная по глубинам датчиков в таблице, актуальна для рис. 3.

следующими соображениями. В предледоставный период в показаниях датчиков температуры практически постоянно присутствуют высокочастотные (минутные) колебания с небольшой амплитудой, обусловленные ветровым воздействием. При установлении льда минимизируется ветровое воздействие на озеро и высокочастотные пульсации пропадают, а также существенно замедляется или вовсе прекращается понижение температуры воды, связанное с потерями тепла в атмосферу. После установления льда тепло, переходящее от донных отложений в воду, не уходит в атмосферу, поэтому температура воды начинает повышаться. Если установившийся лед взламывается ветром или тает на фоне длительного периода теплой погоды, возобновляется активное взаимодействие озера с атмосферой и меняется характер записей температурных датчиков, в которых вновь появляются высокочастотные колебания. Водная толща под действием ветра может вернуться в состояние гомотермии, а температура воды продолжит понижаться до установления льда. Момент разрушения льда весной идентифицировался по появлению высокочастотных пульсаций в показаниях датчиков температуры, а также по выравниванию температуры по водному столбу в течение нескольких часов, что являлось отражением полного перемешивания водной толщи под действием ветра. Начало конвекции определялось по появлению суточных колебаний температуры на верхнем термодатчике кос.

В весенний период 27–29 марта 2020 г. были проведены измерения толщины льда на Риндозере и Голубой ламбе в районе постановки термокос, а на озере Вендюрском — на 22 станциях продольного и поперечного разрезов (см. рис. 1).

Выполнено сравнение дат установления и взлома льда на озерах в зимний сезон 2019–2020 гг., продолжительности ледостава, а также толщины льда весной 2020 г. с данными, полученными в 1994–2019 гг. (Malm et al., 1997; Zdrovennova et al., 2021).

Для анализа климатической изменчивости района исследований в 1994–2020 гг. использовались данные метеостанции (МС) «Петрозаводск» (Reliable Prognosis, 2004). Среднемесячные данные по температуре воздуха за период 1961–1990 гг. (климатическая норма) и с 1994 по 2019 г. были получены на сайте ВНИИГМИ Мировой центр данных (Meteo.ru, 2021).

Проведен анализ межгодовой изменчивости термического и ледового режимов озера Вендюрского в 1994–2020 гг. в зависимости от климатических условий. В качестве характеристики изменчивости регионального климата в холодную полови-

ну года использовался такой показатель, как количество оттепелей в месяце, то есть количество дней с положительной среднесуточной температурой воздуха. Изучены зависимости между температурой воздуха и количеством дней с оттепелью в осенние, зимние и весенние месяцы и датами замерзания и взлома льда, а также датой начала и продолжительностью весенней подледной конвекции. Использовались данные, полученные сотрудниками ИВПС в 1994–2019 гг., частично опубликованные в ряде статей (Malm et al., 1997; Zdorovenov et al., 2013; Zdorovenova et al., 2017; Zdorovenova et al., 2021).

### *2.3. Расчеты на модели FLake*

Модельный расчет дат установления и взлома льда, толщины льда и придонной температуры для трех озер был выполнен с использованием одномерной параметризованной модели FLake (Mironov et al., 2010). Атмосферное воздействие на водоемы задавалось по данным ре-анализа ERA 5 (пятое поколение атмосферного ре-анализа глобального климата) (ECMWF, 2021). Расчет выполнялся с заданием погодных условий 2019 и 2020 гг. В анализе использовались результаты расчетов за период с 1 октября 2019 по 20 мая 2020 г.

Статистический анализ данных проводился с использованием программного пакета STATISTICA. Статистическая значимость трендов оценивалась по t-тесту Стьюдента; считалось, что тренды значимы на уровне  $p < 0.01$ .

## **3. Результаты исследований**

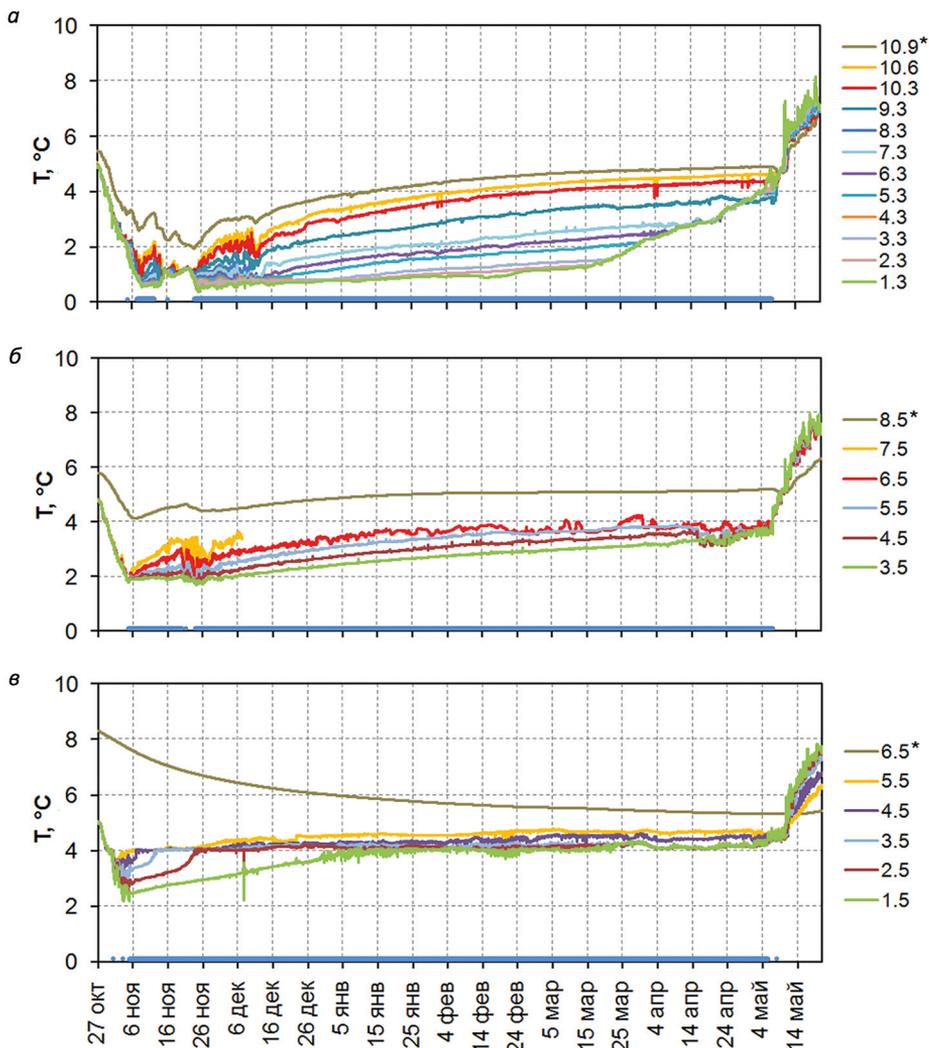
### *3.1. Изменчивость климата южной Карелии в 1994–2020 гг.*

Температура воздуха на МС «Петрозаводск» в период с 1994 по 2020 г. в январе — мае и ноябре — декабре повышалась, однако обнаруженные положительные тренды были статистически незначимы (при принятом уровне значимости  $p < 0.01$ ). Наиболее заметное повышение температуры воздуха обнаружено в феврале ( $p = 0.091$ ), мае ( $p = 0.014$ ), ноябре ( $p = 0.017$ ) и декабре ( $p = 0.012$ ).

Зима 2019–2020 гг. в южной Карелии была рекордно теплой. Среднемесячная температура воздуха, по данным МС «Петрозаводск», в октябре — марте составила: +2.8, -1.2, -1.1, -2.1, -2.7 и -0.1 °C соответственно. Положительные отклонения среднемесячной температуры воздуха относительно климатической нормы в период с ноября по март достигали: 1.3, 6.4, 9.4, 7.1 и 4.3 °C соответственно; октябрь был холоднее нормы на 0.5 °C. Апрель со среднемесячной температурой +1.5 °C соответствовал норме, а май с температурой +7.4 °C был холоднее нормы на 0.1 °C. Зима 2019–2020 гг. отличалась частыми оттепелями, продолжавшимися по несколько суток. В декабре наблюдались 14 суток с оттепелью, в январе — 13, в феврале — 12. В период с февраля по май температура воздуха постепенно повышалась. Скорость ветра с октября по май менялась в пределах 1–5 м/с, наиболее сильные ветры наблюдались с января по апрель — до 8 м/с.

### *3.2. Ледовый и термический режимы озер в зимний сезон 2019–2020 гг.*

*Озеро Вендюрское.* В предледоставный период озеро охлаждалось в состоянии, близком к гомотермии (рис. 2, а). Лед установился 7 ноября при средней темпера-



\* Датчик в верхнем слое илов или в зарослях макрофитов.

Рис. 2. Температура воды в озерах Вендюрском (а), Риндозере (б) и Голубой ламбе (в) в период с 27 октября 2019 по 19 мая 2020 г. по данным натуральных измерений. В легенде приведены глубины термоматчиков

туре воды по столбу в центре озера  $1.1^{\circ}\text{C}$  и просуществовал до 12 ноября, когда на фоне потепления и усиления ветра был взломан. Неустойчивый лед появлялся 13, 15 и 16 ноября. Постоянный лед установился 23 ноября при температуре столба воды  $0.94^{\circ}\text{C}$ , в верхнем слое илов  $1.98^{\circ}\text{C}$ . После установления льда началось повышение температуры водной толщи, обусловленное теплообменом с донными отложениями. К концу ледостава температура придонного слоя воды повысилась до  $4.6^{\circ}\text{C}$ , температура верхнего слоя илов увеличилась до  $4.89^{\circ}\text{C}$ . Подледная конвекция началась в середине марта, и к 3 мая температура конвективно-перемешанного слоя повысилась до  $4^{\circ}\text{C}$ , а глубина его нижней границы достигла 8 м. Продолжа-

лась конвекция более пяти недель. В последние дни ледостава температура воды в поверхностном слое повысилась до 4.8 °С. Взлом льда произошел 8 мая, ледостав продолжался 174 дня.

*Озеро Риндозеро.* Лед образовался 4 ноября при температуре воды 1.8 °С в слое 3.5–7.5 м, на границе с донными отложениями — 4.2 °С (рис. 2, б), разрушился 19 ноября. Неустойчивый лед появлялся 21–22 ноября, а постоянный — установился 24 ноября при температуре воды 1.8 °С на глубине 3.5 м, 4.4 °С — в верхнем слое илов. Температура воды постепенно повышалась и к концу ледостава в слое 3.5–6.5 м достигла 3.7–3.9 °С, на границе с илами — 5.2 °С. С 15 апреля до окончания ледостава колебания температуры в слое 3.5–5.5 м были связаны с развитием конвективного перемешивания. Взлом льда на озере Риндозеро произошел 7 мая, продолжительность ледостава составила 183 дня.

*Голубая ламба.* В предледоставный период водная толща была перемешана. Зафиксировано, что 30 октября температура воды была однородна по водному столбу и составляла 4 °С (рис. 2, в). С 31 октября по 3 ноября на фоне усиления ветра до 6–8 м/с (порывы до 10–12 м/с) и сильных снегопадов наблюдалось резкое понижение температуры воды до 2.1–2.3 °С в поверхностном слое (глубины 1.5–2.5 м). Неустойчивый лед периодически появлялся 1–3 ноября, постоянный лед установился 4 ноября, и промежуточного разрушения льда, как на озерах Риндозеро и Вендюрское, не наблюдалось. После образования сплошного льда температура водной толщи Голубой ламбы быстро повышалась и достигла 4 °С на глубине 5.5 м к 4 ноября, на глубине 1.5 м — к 8 января 2020 г. Средняя температура слоя 1.5–5.5 м к концу ледостава (9 мая) увеличилась до 4.4 °С. Температура на глубине 6.5 м (датчик в зарослях макрофитов) была заметно выше, чем в слое 1.5–5.5 м и понижалась в течение всей зимы, то есть происходило перераспределение тепла из придонного слоя вверх по водному столбу. Влияние весенней подледной конвекции на термический режим Голубой ламбы было выражено слабо. Продолжительность ледостава составила 188 суток.

*Толщина льда на озерах весной 2020 г.* Согласно данным измерений 27–29 марта 2020 г., толщина льда изменялась по площади озера Вендюрского от 35 до 49 см, со средним значением 40 см. Средняя толщина белого льда составляла 13 см (минимум 9 см, максимум 20 см), а кристаллического — 27 см (минимум 21 см, максимум 32 см). Снег на льду практически отсутствовал. В этот же период в Риндозере толщина льда достигала 45 см, снега — 5 см; на Голубой ламбе толщина льда достигала 48 см, при этом слой кристаллического льда составлял 25 см, слой снега не превышал 1–2 см.

### *3.3. Модельный расчет толщины льда и придонной температуры в 2019–2020 гг.*

Согласно модельным расчетам, на озерах Вендюрское и Риндозеро в период с начала ноября до первой декады декабря 2019 г. происходило периодическое установление и разрушение льда (рис. 3, а, б). На озере Вендюрском модельный лед устанавливался 2–3, 5–10, 24–29 ноября и 1–7 декабря (четыре промежуточных взлома льда). На Риндозере лед устанавливался с 30 октября по 20 ноября, 24–29 ноября, 1–7 декабря (три промежуточных взлома льда). Толщина модельного льда в ноябре — первой декаде декабря достигала 1–3 см на Риндозере и не превышала 1 см на озере Вендюрском. Постоянный лед установился на этих озерах 10 декабря при

температуре придонной воды 1.6–1.7 °С. На Голубой ламбе модельный лед установился 30 октября при температуре придонной воды 2.6 °С, промежуточного разрушения льда на этом водоеме не наблюдалось (рис. 3, в). Однако стоит отметить, что с середины ноября до третьей декады декабря толщина модельного льда на Голубой ламбе не превышала 3 см, периодически уменьшаясь до 0.5–1 см. К концу ледостава температура придонных слоев воды повысилась до 3.1 °С в озерах Вендюрское и Риндозеро и до 3.9 °С в Голубой ламбе.

В течение января и в начале февраля толщина модельного льда увеличивалась на всех трех озерах, максимальные значения 35–37 см были достигнуты в первой декаде февраля. Начиная с третьей декады марта наблюдалось уменьшение толщины льда на всех озерах. Разрушение модельного льда происходило на озерах в разные сроки: 24 апреля на Голубой ламбе, 3 мая на озере Вендюрское и 4 мая на Риндозере.

### *3.4. Межгодовая изменчивость термического и ледового режимов озера Вендюрского в 1994–2020 гг. по данным натурных наблюдений*

Был проведен анализ дат установления и взлома льда на озере Вендюрском в 1995–2020 гг. в зависимости от температуры воздуха и количества дней с оттепелью в осенние, зимние и весенние месяцы. Были получены значимые регрессионные зависимости между количеством дней с оттепелью в октябре и ноябре и датой установления льда (рис. 4, а) и между температурой воздуха в апреле и датой взлома льда (рис. 4, б).

Начало и продолжительность весенней подледной конвекции определялись количеством дней с оттепелью в зимние и весенние месяцы: чем больше было дней с оттепелью в январе — апреле, тем раньше начиналась конвекция (рис. 5, а) и тем продолжительнее был этот период (рис. 5, б).

## **4. Обсуждение результатов**

Анализ данных метеостанции Петрозаводска в 1994–2020 гг. показал положительные тренды повышения температуры воздуха в холодную половину года. Статистически значимое увеличение количества дней с оттепелью и дней с жидкими или смешанными осадками в ноябре — апреле 1994–2020 гг. ранее показано в работе (Zdorovennova et al., 2021). Обнаруженные особенности климатической изменчивости региона исследований согласуются с тенденциями текущей климатической изменчивости умеренной зоны Северного полушария в целом, которое проявляется в повышении температуры воздуха, наиболее выраженном в холодную половину года (IPCC, 2019; Reznikov and Isachenko, 2021).

Важным следствием текущей климатической изменчивости является сокращение периода ледостава и уменьшение толщины льда на озерах умеренной и арктической зон (Magnuson et al., 2000; Korhonen, 2006; Vuglinsky and Valatin, 2018; Sharma et al., 2019; SolarSKI and Rzętała, 2020). Тенденция сокращения продолжительности ледостава отмечена и на озерах Карелии (Efremova et al., 2013) и Финляндии (Korhonen, 2006). Для озера Вендюрского показано смещение сроков установления льда на более поздние даты и сроков взлома льда на более ранние в 1994–2020 гг., но эти тенденции статистически не значимы (Zdorovennova et al., 2021). Также для

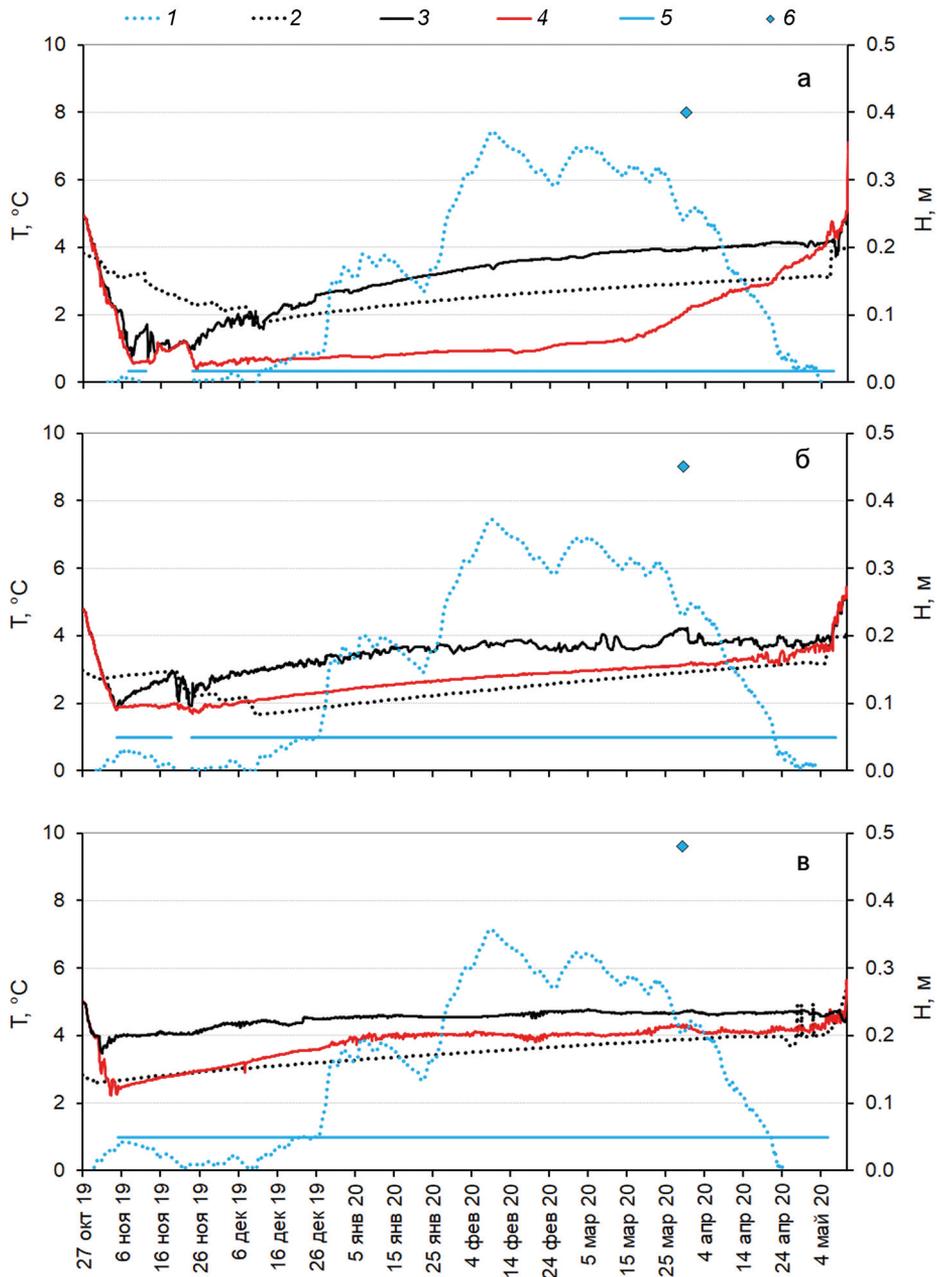


Рис. 3. Толщина льда (1) и температура придонного слоя воды (2) по данным модельного расчета и температура придонного (3) и поверхностного (4) слоев воды, период существования льда (5) и толщина льда 29 марта 2020 г. (6) по данным натуральных измерений на озерах Вендюрском (а), Риндозере (б) и Голубой ламбе (в) в зимний сезон 2019–2020 гг.

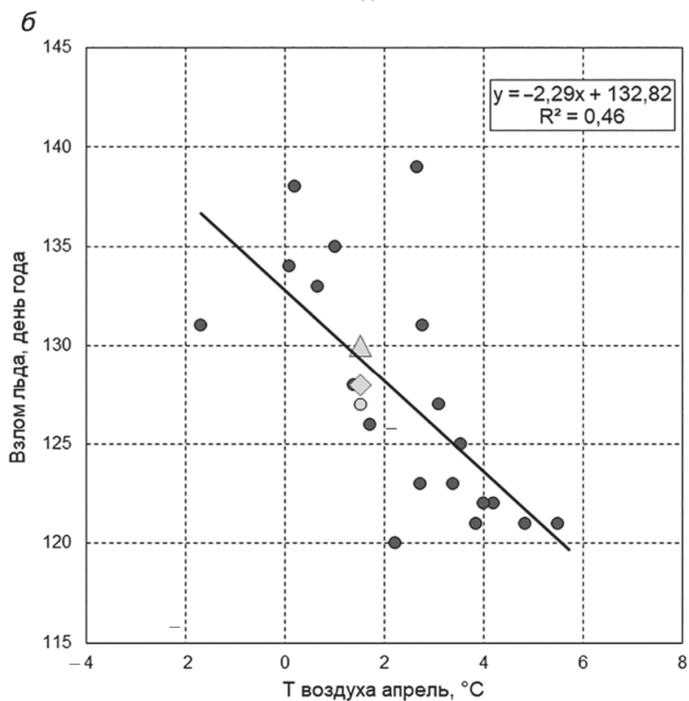
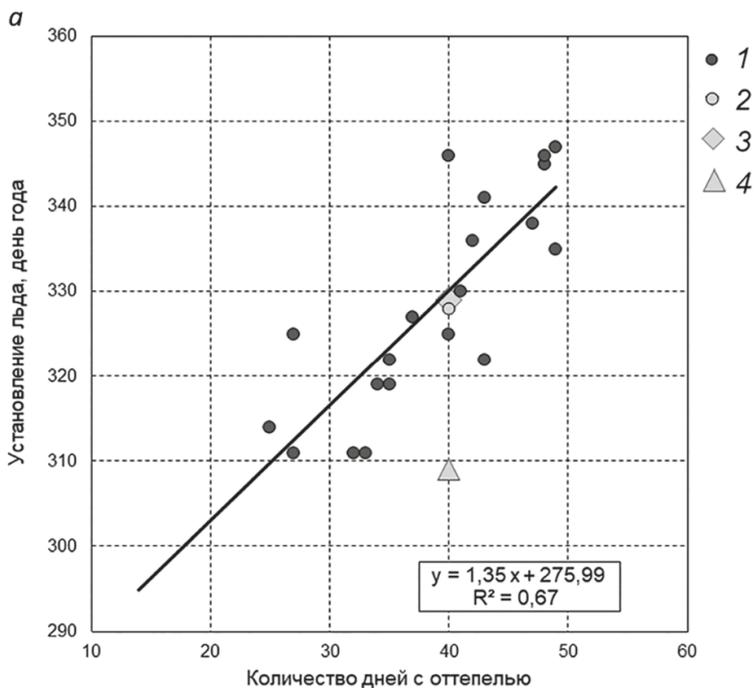


Рис. 4. Зависимости дат установления льда на озере Вендюрском от количества дней с оттепелью в октябре и ноябре (а) и дат взлома льда от температуры воздуха в апреле (б): 1 — озеро Вендюрское в 1994–2019 гг.; 2, 3 и 4 — соответственно озера Вендюрское, Риндозеро и Голубая ламба в 2019–2020 гг.

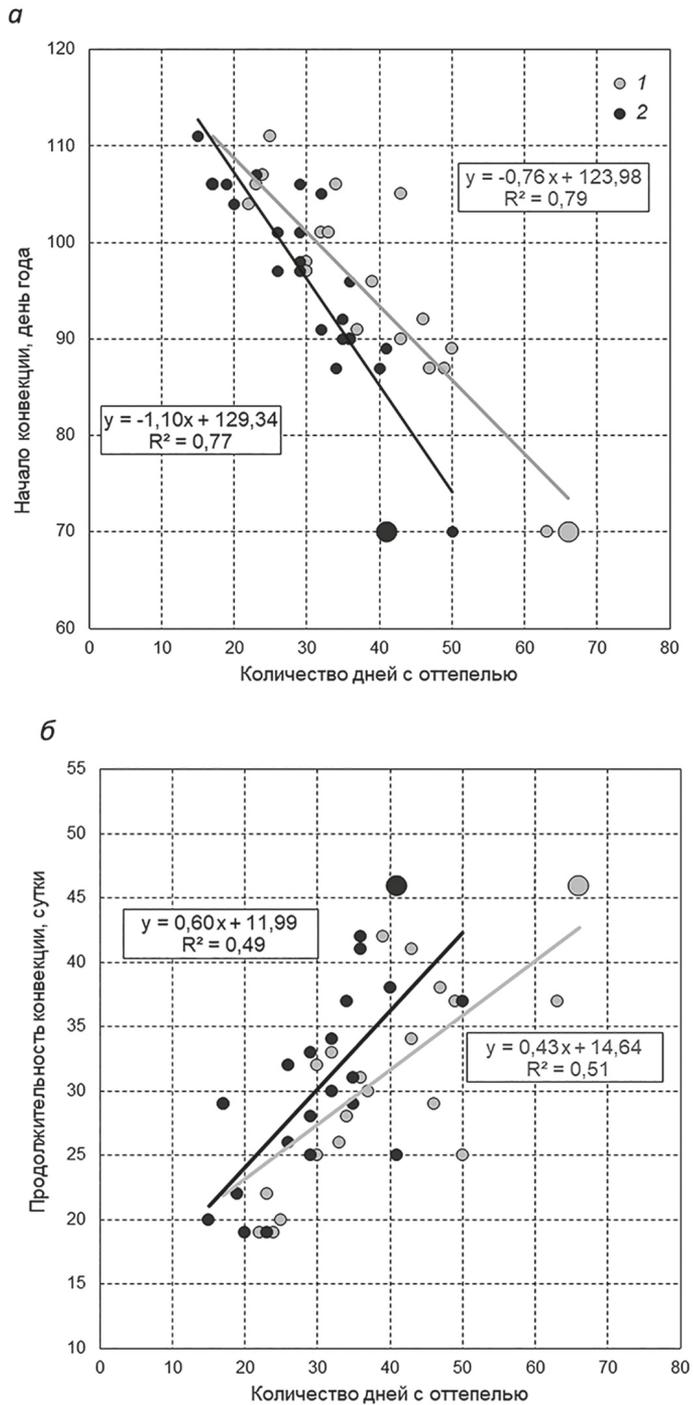


Рис. 5. Зависимость дат начала конвекции (а) и ее продолжительности (б) от количества дней с оттепелью в январе — апреле (1) и марте — апреле (2). По данным измерений на озере Вендюрском в 1994–2020 гг. Крупные значки обозначают 2020 г.

периода 1994–2020 гг. показан статистически значимый отрицательный тренд толщины льда озера Вендюрского в середине апреля (Zdorovennova et al., 2021). Важным экологическим следствием сокращения периода ледостава является уменьшение продолжительности зимней аноксии (Magnuson et al., 1997; Golosov et al., 2012). Учитывая тенденции текущих климатических изменений, а именно повышение температуры воздуха преимущественно в осенние и зимние месяцы (IPCC, 2019), можно ожидать дальнейшего сокращения подледного периода и связанного с этим улучшения кислородных условий в озерах в холодную половину года.

Совместный анализ данных натурных измерений на озере Вендюрском в 1994–2020 гг. и данных метеостанции Петрозаводска показал, что даты установления льда на озере определяются количеством дней с положительной температурой воздуха в октябре и ноябре: чем больше таких дней, тем позже устанавливается лед (см. рис. 4, а). Взлом льда определяется температурой воздуха в апреле (см. рис. 4, б). Даты начала и продолжительность весенней подледной конвекции также связаны с количеством дней с оттепелью в зимние и весенние месяцы: чем больше было дней с оттепелью в январе — апреле, тем раньше начиналась и дольше продолжалась подледная конвекция (см. рис. 5). Учитывая статистически значимую тенденцию увеличения количества дней с оттепелью в ноябре — апреле в 1994–2020 гг. (Zdorovennova et al., 2021), в ближайшем будущем можно ожидать смещения сроков установления льда на озере на более поздние даты и наступления весенней подледной конвекции в более ранние сроки.

Измерения температуры воды на автономных станциях в трех озерах южной Карелии в 2019–2020 гг. позволили установить, что даты установления и разрушения льда на этих озерах за счет холодных погодных условий второй половины октября и начала ноября 2019 г. и второй половины апреля 2020 г. были близки к среднесноголетним показателям — установление льда в период с первой декады ноября до первой декады декабря, взлом льда в первой декаде мая (Malm et al., 1997; Zdorovennov et al., 2013; Zdorovennova et al., 2017) (см. рис. 4).

Важной особенностью термического и ледового режимов озер в текущих климатических условиях является то, что при увеличении количества дней с оттепелью лед в начальный период зимы становится непрочным и легко взламывается при усилении ветра. На фоне теплой ветреной погоды второй половины ноября и начала декабря 2019 г. на озерах Риндозеро и Вендюрское наблюдался промежуточный взлом льда, который также был воспроизведен моделью FLake. При промежуточном взломе льда и более позднем установлении устойчивого льда истощается теплоспас донных отложений и водной толщи озера (Bengtsson and Swensson, 1996); температура воды зимой ниже, что снижает активность бактериального потребления кислорода. Кроме того, при промежуточном взломе льда происходит полное перемешивание водной толщи и насыщение придонных слоев кислородом. Все эти факторы способствуют тому, что в течение следующих зимних месяцев степень истощения кислорода в озере заметно меньше, чем в зимы без промежуточного взлома льда (Zdorovennova et al., 2021).

Аномально теплая погода зимних месяцев 2019–2020 гг. (превышение нормы 1961–1990 гг. по температуре воздуха на 6,4–9,4 °С) отразилась главным образом не на сокращении продолжительности ледостава, а на уменьшении толщины льда озер. Согласно данным предыдущих лет наблюдений на озере Вендюрском (Zdorovennov

et al., 2013; Zdorovenнова et al., 2021), в середине апреля в 1994–2004 гг. толщина льда здесь составляла 60–85 см, в 2005–2018 гг. — 50–65 см, что больше показателей конца марта 2020 г. (40 см) на ~50 и ~25% соответственно. На Риндозере также отмечено заметное уменьшение толщины льда в весенний период 2020 г. (45 см) по сравнению с мартом 1995 г. (67 см) (Malm et al., 1997).

Уменьшение толщины снежно-ледяного покрова на озерах умеренной зоны и высоких широт на фоне происходящих изменений климата (Korhonen, 2006; Vuglinsky and Valatin, 2018; Solariski and Rzętała, 2020) имеет важное экологическое следствие, так как обуславливает увеличение подледной освещенности, более раннее начало весеннего подледного перемешивания и создает, следовательно, благоприятные условия для развития фитопланктона в покрытых льдом водоемах (Pernica et al., 2017). Небольшая толщина льда весной 2020 г. обусловила раннее начало (середина марта) весенней подледной конвекции на озере Вендюрском по сравнению со среднемноголетними сроками (начало — середина апреля); продолжалась конвекция весной 2020 г. более пяти недель, что превосходит среднемноголетние значения (2–4 недели) (Zdorovenнова et al., 2017) (см. рис. 5).

Сроки установления и взлома льда определяются главным образом широтой, высотой над уровнем моря, глубиной и площадью поверхности (Korhonen, 2006; Efremova et al., 2013). Мы исследовали ледовый режим трех малых озер южной Карелии, расположенных на одной широте и практически на одной высоте над уровнем моря. Сроки ледовых явлений на исследованных озерах определялись особенностями батиметрии и открытостью водной поверхности для ветрового воздействия. Согласно данным термокос, сроки первого появления льда на озерах осенью 2019 г. (конец октября — первая неделя ноября) были достаточно близки, при этом температура водной толщи озер при установлении льда заметно отличалась (1.1 °C в озере Вендюрском, 1.8 °C в Риндозере, ~3 °C в Голубой ламбе), что было связано с разной степенью выхолаживания их водной толщи. Закрытая лесом Голубая ламба, имеющая при соизмеримой с двумя другими озерами глубине на два порядка меньшую площадь поверхности, была меньше подвержена ветровому воздействию и медленнее теряла тепло. Самая низкая температура воды в момент установления льда наблюдалась в озере Вендюрском, наибольшем по площади и в большей степени подверженном ветровому перемешиванию. Модельный расчет температуры воды воспроизвел меньшую степень выхолаживания придонных слоев водной толщи Голубой лампы к моменту появления сплошного льда по сравнению с озерами Вендюрским и Риндозеро.

По данным натурных измерений в конце марта 2020 г., толщина льда на озерах изменялась в пределах 40–48 см. Большая толщина льда была отмечена на Голубой ламбе, на которой к моменту проведения измерений лед существовал на три недели дольше, чем на двух других озерах, меньшая — на озере Вендюрском, на котором период существования льда к моменту измерений был самым коротким. Согласно модельным расчетам, толщина льда в январе — феврале была соизмерима на всех трех озерах и изменялась в пределах 1–2 см. Максимальная модельная толщина льда 35–37 см была достигнута в первой декаде февраля, что меньше наблюдаемых в конце марта значений (40–48 см); то есть толщина модельного льда составляла около 80% от измеренных значений.

Погодные условия первой декады мая (теплая солнечная погода, слабый ветер не более 2–3 м/с) определили условия разрушения льда на озерах, которое проис-

ходило главным образом под действием солнечной радиации, а не ветрового воздействия, поэтому сроки окончания ледостава на всех трех озерах были достаточно близки (7–9 мая). Модельные даты окончания ледостава на всех трех озерах были более ранними по сравнению с натурными наблюдениями, причем наибольшее отличие было обнаружено для Голубой ламбы, на которой модельный ледостав закончился на две недели раньше наблюденных сроков. Для озер Вендюрского и Риндозера отличие оставило 3–4 сут.

## 5. Заключение

Полученные результаты позволяют заключить, что на фоне изменчивости регионального климата южной Карелии (повышение температуры воздуха в холодную половину года, увеличение количества дней с оттепелью в осенние, зимние и весенние месяцы) происходят изменения ледового и термического режимов малых озер. Изменения ледового режима проявляются главным образом в уменьшении толщины снежно-ледяного покрова. Получены значимые регрессионные зависимости между датами установления льда на озере Вендюрском и количеством дней с оттепелью в октябре и ноябре. Изменения термического режима заключаются в более раннем начале и увеличении продолжительности весенней подледной конвекции в годы с большим количеством оттепелей в зимние и весенние месяцы. На озерах, заметно отличающихся по площади поверхности, установление льда может происходить в близкие сроки, однако устойчивость льда в этих озерах в первые недели ледостава может отличаться в зависимости от погодных условий. За счет промежуточного разрушения льда на больших по площади водоемах продолжительность ледостава на них уменьшается, как и толщина льда, по сравнению с водоемами, на которых такого разрушения не происходит. На фоне аномально теплых зимних месяцев толщина льда уменьшается относительно многолетних значений.

Расчеты с использованием одномерной модели FLake показали, что сроки установления льда, а также характер изменения температуры воды придонных слоев озер (повышение в течение периода ледостава) хорошо воспроизводятся. Максимальная модельная толщина льда составила ~80% от наблюденной, также заниженной оказалась температура придонных слоев воды в озерах. Модельные сроки окончания ледостава для двух озер оказались близкими к наблюденным, для небольшой лесной ламбы — опережали натурные почти на две недели. Таким образом, можно заключить, что модель FLake хорошо воспроизводит особенности термического и ледового режимов малых озер в зимний период, однако реакция озерного льда на климатические изменения представляется слегка завышенной в отношении толщины льда и сроков окончания ледостава по сравнению с данными наблюдений.

Полученные результаты, основывающиеся на анализе данных натурных измерений и модельных расчетах, показывают, что влияние изменений регионального климата на термический и ледовый режимы озер неоднозначно и требует дальнейших исследований. Понимание того, как климатические изменения могут влиять на термический и ледовый режимы озер, необходимо для улучшения управления водными ресурсами.

## Литература/References

- Bengtsson, L. and Swensson, T. (1996). Thermal Regime of Ice Covered Swedish Lakes. *Nordic Hydrology*, 27, 39–56.
- ECMWF (2021). ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. *The web sites of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. [online] Available at: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> [Accessed March 4, 2021].
- Efremova, T., Palshin, N. and Zdorovenov, R. (2013). Long-term characteristics of ice phenology in Karelian lakes. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 62 (1), 33–41. <https://doi.org/10.3176/earth.2013.04>.
- Golosov, S., Terzhevik, A., Zverev, I., Kirillin, G. and Engelhardt, C. (2012). Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes. *Tellus A*, 64 (1), 17264. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17264>
- IPCC (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [in H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds)]. In press.
- Kirillin, G. B., Forrest, A. L., Graves, K. E., Fischer, A., Engelhardt, C. and Laval, B. E. (2015). Axisymmetric circulation driven by marginal heating in ice-covered lakes. *Geophysical Research Letters*, 42 (8), 2893–2900. <https://doi.org/10.1002/2014GL062180>
- Korhonen, J. (2006). Long-term changes in lake ice cover in Finland. *Nordic Hydrology*, 37, 347–363. <https://doi.org/10.2166/nh.2006.019>
- Lakes of Karelia*. (2013). Directory. Petrozavodsk: KarNTs RAN Publ. 2013. 464. (In Russian)
- Magnuson, J. J., Robertson, D. M., Benson, B. J., Wynne, R. H., Livingstone, D. M., Arai, T., Assel, R. A. and Barry, R. G. (2000). Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. *Science*, 289 (5485), 1743–1746. <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1743>
- Magnuson, J. J., Webster, K. E., Assel, R. A., Bowser, C. J., Dillon, P. J., Eaton, J. G., Evans, H. E., Fee, E. J., Hall, R. I., Mortsch, L. R., Schindler, D. W. and Quinn, F. H. (1997). Potential effects of climate change on aquatic systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield region. *Hydrological Processes*, 11, 825–872.
- Malm, J., Terzhevik, A., Bengtsson, L., Boyarinov, P., Glinsky, A., Palshin, N. and Petrov, M. (1997). Temperature and Salt Content Regimes in Three Shallow Ice-Covered Lakes: 1. Temperature and Salt Content and Density Structure. *Nordic Hydrology*, 28, 99–128.
- Meteo.ru (2021). *Mirovoi tsentr dannykh. Ofitsial'nyi sait Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrometeorologicheskoi informatsii*. [online] Available at: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation>. [Accessed March 4, 2021].
- Mironov, D. V., Heise, E., Kourzeneva, E., Ritter, B., Schneider, N. and Terzhevik, A. (2010). Implementation of the lake parameterization scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Env. Res.*, 15, 218–230.
- Obertegger, U., Obrador, B. and Flaim, G. (2017). Dissolved oxygen dynamics under ice: Three winters of high-frequency data from Lake Tovel, Italy. *Water Resources Research*, 53 (8), 7234–7246. <https://doi.org/10.1002/2017WR020599>
- Oveisy, A., Boegman, L. and Imberger, J. (2012). Three-dimensional simulation of lake and ice dynamics during winter. *Limnol. Oceanogr.*, 57 (1), 43–57.
- Pernica, P., North, R. L. and Baulch, H. M. (2017). In the cold light of day: the potential importance of under-ice convective mixed layers to primary producers. *Inland Waters*, 7 (2), 138–150. <https://doi.org/10.1080/20442041.2017.1296627>
- Reliable Prognosis. (2004). *Raspisaniye Pogodi Ltd*. [online] Available at: [https://rp5.ru/Weather\\_in\\_the\\_world](https://rp5.ru/Weather_in_the_world) [Accessed March 4, 2021].
- Research report “Regularities of measuring lake ecosystems in various landscapes of Eastern Fennoscandia”. State registration No 01201155831. Petrozavodsk, 2013. 358 p. (in Russian)
- Reznikov, A. I. and Isachenko, G. A. (2021). Changes in the climatic characteristics of the western part of the taiga of European Russia in the late XX-early XXI centuries. *Izvestiya RGO*, 153 (1), 3–18. <https://doi.org/10.31857/S0869607121010055> (In Russian)
- Sharma, S., Blaggrave, K., Magnuson, J. J., O'Reilly, C. M., Oliver, S., Batt, R. D., Magee, M. R., Straile, D., Weyhenmeyer, G. A., Winslow, L. and Iestyn Woolwa, R. (2019). Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world. *Nature Climate Change*, 9 (3), 227–231. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0393-5>

- Solarski, M. and Rzętała, M. (2020). Ice Regime of the Kozłowa Góra Reservoir (Southern Poland) as an Indicator of Changes of the Thermal Conditions of Ambient Air. *Water*, 12 (9), 24–35. <https://doi.org/10.3390/w12092435>
- Vuglinsky, V. and Valatin, D. (2018). Changes in Ice Cover Duration and Maximum Ice Thickness for Rivers and Lakes in the Asian Part of Russia. *Natural Resources*, 9, 73–87. <https://doi.org/10.4236/nr.2018.93006>
- Yang, B., Wells, M. G., Li, J. and Young, J. (2020). Mixing, stratification, and plankton under lake-ice during winter in a large lake: Implications for spring dissolved oxygen levels. *Limnology and Oceanography*, 65, 2713–2729. <https://doi.org/10.1002/lno.11543>
- Zdorovennov, R., Palshin, N., Zdorovennova, G., Efremova, T. and Terzhevik, A. (2013). Interannual variability of ice and snow cover of a small shallow lake. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 61 (1), 26–32. <https://doi.org/10.3176/earth.2013.03>
- Zdorovennova, G., Palshin, N., Golosov, S., Efremova, T., Belashev, B., Bogdanov, S., Fedorova, I., Zverev, I., Zdorovennov, R. and Terzhevik, A. (2021). Dissolved Oxygen in a Shallow Ice-Covered Lake in Winter: Effect of Changes in Light, Thermal and Ice Regimes. *Water*, 13, 24–35. <https://doi.org/10.3390/w13172435>
- Zdorovennova, G. E., Gavrilenko, G. G., Zdorovennov, R. E., Mammarella, I., Ojala, A., Heiskanen, J. and Terzhevik, A. Iu. (2017). Evolution of the temperature of the water column of boreal lakes against the background of changes in the regional climate. *Izvestiia RGO*, 149 (6), 59–74. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2021 г.  
Статья рекомендована к печати 6 декабря 2021 г.

#### Контактная информация:

Здорovenнова Галина Эдуардовна — [zdorovennova@gmail.com](mailto:zdorovennova@gmail.com)  
Голосов Сергей Дмитриевич — [sergey\\_golosov@mail.ru](mailto:sergey_golosov@mail.ru)  
Пальшин Николай Иннокентьевич — [npalshin@mail.ru](mailto:npalshin@mail.ru)  
Зверев Илья Сергеевич — [iliazverev@mail.ru](mailto:iliazverev@mail.ru)  
Ефремова Татьяна Владимировна — [efremova@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:efremova@nwpi.krc.karelia.ru)  
Тержевик Аркадий Юрьевич — [ark1948@list.ru](mailto:ark1948@list.ru)  
Здорovenнов Роман Эдуардович — [romga74@gmail.com](mailto:romga74@gmail.com)  
Богданов Сергей Рэмович — [sergey.r.bogdanov@mail.ru](mailto:sergey.r.bogdanov@mail.ru)  
Федорова Ирина Викторовна — [i.fedorova@spbu.ru](mailto:i.fedorova@spbu.ru)

### Winter thermal and ice regimes of small Karelian lakes against the background of regional climatic variability\*

G. E. Zdorovennova<sup>1</sup>, S. D. Golosov<sup>1</sup>, N. I. Palshin<sup>1</sup>, I. S. Zverev<sup>1</sup>,  
T. V. Efremova<sup>1</sup>, A. Yu. Terzhevik<sup>1</sup>, R. E. Zdorovennov<sup>1</sup>,  
S. R. Bogdanov<sup>1</sup>, I. V. Fedorova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre  
of the Russian Academy of Sciences,  
11, ul. Pushkinskaya, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

<sup>2</sup> St Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Zdorovennova, G. E., Golosov, S. D., Palshin, N. I., Zverev, I. S., Efremova, T. V., Terzhevik, A. Yu., Zdorovennov, R. E., Bogdanov, S. R., Fedorova I. V. (2022). Winter thermal and ice regimes of small Karelian lakes against the background of regional climatic variability. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 67 (1), 138–155. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.108> (In Russian)

\* The study was carried out within the framework of the state assignment of the Northern water problems Institute, Federal Research Center "Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences". The expeditionary research was carried out with the financial support of the RFBR grant No. 18-05-60291 "Adaptation of the Arctic limnosystems to rapid climate change".

This article investigates regularities of thermal and ice regimes of three small lakes of Karelia under current climatic conditions. Data of measurements of water temperature at autonomous stations and results of numerical calculations of the dates of ice-on and ice-off and the thickness of ice in these lakes using the one-dimensional parameterized model FLake in the anomalously warm winter season of 2019–2020 are analyzed. Data obtained are compared with long-term values over 1994–2019. The dates of the ice-on and ice-off on the lakes were quite close; however, on two larger lakes, intermediate ice destruction was observed at the beginning of winter, due to which the duration of the ice season differed between lakes by two weeks. The winter months of 2019–2020 were 6.4–9.4 °C warmer than the baseline, which was reflected in a noticeably smaller ice thickness on the lakes compared to previous years of measurements (40–48 cm at the end of March 2020 compared to the values in mid-April in 1994–2004 — 65–85 cm and in 2005–2018 — 50–65 cm). The decrease in ice thickness contributed to an early onset (mid-March) and long duration (more than five weeks) of spring subglacial convection. The model calculation, taking into account the atmospheric impact based on the ERA-5 re-analysis, reproduced the main features of the ice regime of the lakes, including the intermediate destruction of ice at the beginning of winter on two larger lakes. Significant regression relationships have been obtained between the dates of ice-on and ice-off on Lake Vendyurskoe, the dates of the onset and duration of spring under-ice convection, and the characteristics of the regional climate of southern Karelia (air temperature and the number of days with thaw in winter and spring months) for 1994–2020. The relationship between the dates of ice-on and the water temperature in the lake in winter is shown.

*Keywords:* water temperature, ice regime, climate variability, small lakes, under-ice convection, FLake model.

Received: April 29, 2021  
Accepted: December 6, 2021

#### Contact information:

*Galina E. Zdorovennova* — [zdorovennova@gmail.com](mailto:zdorovennova@gmail.com)

*Sergei D. Golosov* — [sergey\\_golosov@mail.ru](mailto:sergey_golosov@mail.ru)

*Nikolai I. Palshin* — [npalshin@mail.ru](mailto:npalshin@mail.ru)

*Ilya S. Zverev* — [iliazverev@mail.ru](mailto:iliazverev@mail.ru)

*Tatiana V. Efremova* — [efremova@nwpi.krc.karelia.ru](mailto:efremova@nwpi.krc.karelia.ru)

*Arkady Yu. Terzhevik* — [ark1948@list.ru](mailto:ark1948@list.ru)

*Roman E. Zdorovennov* — [romga74@gmail.com](mailto:romga74@gmail.com)

*Sergei R. Bogdanov* — [sergey.r.bogdanov@mail.ru](mailto:sergey.r.bogdanov@mail.ru)

*Irina V. Fedorova* — [i.fedorova@spbu.ru](mailto:i.fedorova@spbu.ru)