

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ В ПЕТРОЗАВОДСКОЙ ГУБЕ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

© 2023 г. Г. Э. Здоровеннова^а, *, Р. Э. Здоровеннов^а, **,
Н. И. Пальшин^а, ***, Т. В. Ефремова^а, ****

^аИнститут водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

*E-mail: zdorovennova@gmail.com

**E-mail: romga74@gmail.com

***E-mail: npalshin@mail.ru

****E-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.04.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

По круглогодичным измерениям температуры воды на автономной станции (заякоренной косе с температурными датчиками) изучены особенности температурного и ледового режимов Петрозаводской губы Онежского озера в современных климатических условиях, уточнены даты и продолжительность основных гидрологических явлений на акватории губы. В аномально теплую зиму 2019–2020 гг. акватория Петрозаводской губы не покрылась льдом полностью впервые за длительный период наблюдений, в районе станции измерений ледовые поля периодически наблюдались с конца января до середины марта. Продолжительность ледостава в две следующие зимы составила 3.5 и 5 мес. Получены данные о сроках начала и продолжительности весенней подледной конвекции, феномена, играющего важную роль в термическом режиме озера в конце зимы. Показано, что 2016, 2021 и 2022 гг. весеннее подледное конвективное перемешивание продолжалось 4–6.5 нед., охватывая к концу ледостава весь столб воды. Перемешивание водной толщи после взлома льда (весенняя гомотермия) продолжалось еще 3–4 нед. Весной 2020 г. подледная конвекция не наблюдалась, перемешивание в условиях открытой воды продолжалось два месяца с середины марта до середины мая. Даты перехода температуры воды через 4°C в сторону повышения в годы измерений (5–19 мая) опережали среднемноголетние на 2–3 нед. (конец мая). Термическая стратификация устанавливалась в годы измерений в период с 12 по 27 мая, раньше среднемноголетних сроков (начало июня), и существовала 3–3.5 мес. Полное перемешивание водной массы губы происходило в конце августа–начале сентября, и далее до установления льда водная толща охлаждалась в состоянии гомотермии с редкими эпизодами установления слабой стратификации. Непосредственно перед установлением льда температура воды понижалась до очень низких значений и не превышала 0.1°C по столбу воды. Период со среднесуточной температурой воды поверхностного слоя Петрозаводской губы выше 10°C продолжался в годы измерений от 121 до 144 сут.

Ключевые слова: озеро, подледная конвекция, стратификация, термический режим, ледовый режим, климатическая изменчивость, температурная коса

DOI: 10.31857/S0869607123030126, **EDN:** RRRKKBK

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата в наибольшей степени проявляются в северных регионах мира [11]. Вследствие этих изменений в водоемах суши увеличивается температура воды, сокращается продолжительность ледостава, в глубоких озерах усиливается летняя температурная стратификация [17, 18].

Изменения термического режима озер и ледовой фенологии отражаются на кислородном режиме [15] и состоянии сообществ озер северных широт, где сезонность — основное явление в годовом цикле планктона. В озерах происходят заметные сдвиги в пищевых цепях между фито- и зоопланктоном из-за различной чувствительности видов к весеннему потеплению [20]. Подобные изменения в трофических цепях со временем могут привести к заметным экосистемным перестройкам, что определяет актуальность изучения термического и ледового режимов водоемов на фоне климатической изменчивости.

Онежское озеро — крупный глубокий водоем с весьма сложным термогидродинамическим режимом. Ежегодно на акватории Онежского озера наблюдается прохождение весеннего и осеннего термического бара, летом формируется термическая стратификация водной толщи, в конце ледостава наблюдается процесс подледного конвективного перемешивания водного столба, развиваются крупномасштабные циркуляции, сгонно-нагонные явления, сейши, внутренние волны, апвеллинги [5, 12]. По данным многолетних измерений установлены сроки и продолжительность основных гидрологических явлений в открытом плесе озера и его заливах, изучены сезонные термические циклы, получены средние многолетние характеристики распределения температуры воды на разных горизонтах в разных районах озера [5, 10].

Региональная изменчивость климата южной Карелии, которая выражается в повышении температуры воздуха во все сезоны года [6, 9], обусловила изменения ледового и термического режимов Онежского озера в течение нескольких последних десятилетий. Наблюдения за температурой воды Онежского озера проводятся на сети гидрологических постов Росгидромета, расположенных на берегах его заливов и губ (пгт Вознесенье, г. Кондопога, дер. Лонгасы, о. Маячный, г. Медвежьегорск, г. Петрозаводск). По данным гидрологического поста в Петрозаводской губе установлено сокращение периода ледостава на 20 сут. за период 1950–2009 гг. [5], обнаружено статистически значимое повышение температуры поверхностного слоя воды в месяцы с июня по октябрь на $0.02\text{--}0.044^\circ\text{C}/\text{год}$ для периода с 1953 по 2013 гг. [5]. Выявленные изменения термического и ледового режимов Петрозаводской губы обосновывают необходимость изучения изменения сроков гидрологических явлений в заливах и губах Онежского озера на фоне изменчивости регионального климата. Особую актуальность эти исследования приобретают в связи с высокой биоресурсной ценностью Онежского озера.

Сезонная изменчивость температуры открытого плеса Онежского озера, а также центральных районов заливов и губ была изучена по данным многолетних декадных наблюдений Карельской гидрометеорологической обсерватории на рейдовых вертикалях и гидрологическом разрезе [5].

В последние 30 лет объем гидрологических измерений как на акватории Онежского озера в целом, так и в Петрозаводской губе резко сократился. Измерения температуры воды открытого плеса, заливов и губ Онежского озера выполняются во время ежегодных научно-исследовательских экспедиций Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, однако проследить изменение сроков гидрологических явлений на фоне изменчивости регионального климата по данным этих измерений невозможно, так как они проводятся лишь несколько раз за сезон открытой воды, даты измерений в разные годы не совпадают. Слабо изученной остается сезонная изменчивость температуры воды заливов и губ озера в период ледостава. Исследование подледной конвекции на акватории Петрозаводской губы в марте 2015–2017 гг. прово-

дилось в рамках международного проекта “Life under ice” [21], однако даты начала этого явления в 2015 и 2017 гг. не были установлены, так как измерения проводились уже при развитой конвекции. Совершенно отсутствуют данные по изменению температуры воды в центральных глубоководных районах губы для периодов установления и взлома льда. Нет точных данных по срокам прохождения весеннего и осеннего термобара по акватории Петрозаводской губы, продолжительности весеннего и осеннего перемешивания, летней стратификации.

Для того, чтобы выявить реакцию термического и ледового режимов Петрозаводской губы Онежского озера на изменчивость регионального климата южной Карелии, силами сотрудников Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН были организованы измерения температуры воды на автономной станции в центральной глубоководной части губы в круглогодичном режиме. В октябре 2019 г. в озере была установлена автономная станция — коса с температурными датчиками. Измерения на этой станции проводятся до настоящего времени. Целью настоящей работы было изучение термического и ледового режимов Петрозаводской губы Онежского озера в современных климатических условиях, уточнение сроков основных гидрологических явлений на акватории губы по круглогодичным измерениям температуры воды на автономной станции в 2019–2022 гг. с привлечением к анализу данных измерений 2015–2017 гг., проведенных в рамках проекта “Life under ice”.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Петрозаводская губа — залив в северо-западной части Онежского озера, вытянутый с северо-запада на юго-восток. Длина губы около 14 км до Ивановских островов, ширина — около 5 км. Глубины увеличиваются от вершины к выходу из губы, достигая 30 м по центральной оси. От залива Большое Онего губа отделена Ивановскими островами и сообщается на юго-востоке с центральной частью Онежского озера проливом шириной 6–7 км и глубиной 23 м. Берега губы высокие, слабо изрезаны. Основной приток осуществляется из озера Логмозера, в которое впадает р. Шуя. Также в губу впадают реки Лососинка, Неглинка, Сельгская Речка, Студенец, Вилда, Большой и Каменный ручьи.

Автономная станция в центральной части Петрозаводской губы представляет собой заякоренную косу, оснащенную датчиками температуры TR-1060 канадской фирмы RBR Ltd. Начиная с 21 октября 2019 г., коса находится в озере непрерывно круглый год; весной и осенью коса извлекается на несколько дней для снятия данных и замены элементов питания в датчиках. Датчики распределены по водному столбу так, чтобы была возможность получить информацию по температуре эпи-, мета- и гипolimниона. В разные периоды измерений количество датчиков температуры на косе изменялось от 5 до 16; в период с 26 мая по 27 ноября 2021 г. работал только один датчик, расположенный в придонном слое. Верхний датчик на косе при всех постановках заглублялся до 3.5–4.5 м в целях сохранности всей косы (табл. 1). В анализе также использовались данные, полученные весной 2016 г. в рамках проекта “Life under ice”, когда проводились измерения температуры на косе с 13 марта по 6 июня 2016 г. в том же районе губы (рис. 1, точка 1). Дискретность измерений во все годы составляла одну минуту. Анализ данных автономной станции позволил уточнить для акватории Петрозаводской губы сроки и продолжительность основных гидрологических явлений: установления и взлома льда, весенней подледной конвекции, весеннего и осеннего перемешивания, летней стратификации. По данным измерений на одной вертикали невозможно проследить прохождение термического бара по акватории губы, но даты перехода температуры воды через 4°C в сторону повышения и понижения, оцененные по данным автономной станции, дают представление о сроках этого явления; для полноценного анализа прохождения термического бара требуются измерения на разрезе

Таблица 1. Периоды и глубины измерений автономной станции в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера в 2016 и 2019–2022 гг.

Table 1. Periods and depths of measurements by an autonomous station in the central part of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega in 2016 and 2019–2022

Период измерений	Глубина станции, м	Количество датчиков, глубины измерений, м
13 марта–6 июня 2016 г.	26.0	8 датчиков: 4.6, 5.5, 9.5, 13.5, 17.5, 21.5, 25.4, 26.0
21 октября 2019 г.–2 июля 2021 г.	19.5	6 датчиков: 3.5, 7.0, 11.0, 15.0, 18.5, 19.5
26 мая–27 ноября 2021 г.	19.5	1 датчик: 18.5
27 ноября 2021 г.–13 мая 2022 г.	19.5	5 датчиков: 3.5, 7.0, 11.0, 15.0, 19.5
14 мая 2022 г.–13 октября 2022 г.	20.0	16 датчиков: от 4.5 до 19.5 м через 1 м
21 октября 2022 г.–июнь 2023 (план)	20.0	16 датчиков: от 4.5 до 19.5 м через 1 м

или на нескольких вертикалях. В качестве критерия установления стратификации на акватории губы рассматривалось достижение разницы температуры в один и два градуса по водному столбу, как предлагается в ряде исследований [13, 14].

Анализ погодных условий района исследований был проведен по данным метеостанции (МС) Петрозаводск за 2015–2022 гг., данные получены на ресурсе открытого доступа “Расписание погоды” [8]. Наличие льда на акватории Петрозаводской губы уточнялось по спутниковым снимкам [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Погодные условия района исследований. В табл. 2 приведены отклонения среднемесячной температуры воздуха в 2015–2022 гг. от климатической нормы 1961–1990 гг. по метеостанции Петрозаводск. Анализ данных показал, что в 2015–2022 гг. преобладали

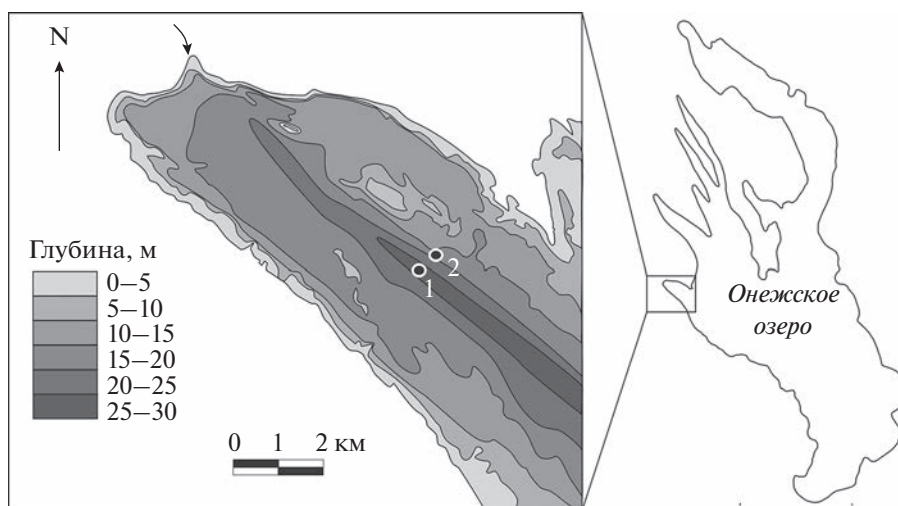


Рис. 1. Положение станции автономных измерений температуры в центральной части Петрозаводской губы Онежского озера в весенние месяцы 2016 г. (1) и в 2019–2022 гг. (2).

Fig. 1. Position of the station for autonomous temperature measurements in the central part of the Petrozavodsk Bay of Lake Onega in the spring months of 2016 (1), and in 2019–2022 (2).

Таблица 2. Отклонения среднемесячной температуры воздуха от климатической нормы 1961–1990 гг. по МС Петрозаводск в 2015–2022 гг. Жирным выделены максимальные значения отклонений в каждом месяце

Table 2. Deviations of the average monthly air temperature from the baseline 1961–1990 according to meteorological station Petrozavodsk in 2015–2022. Bold indicates the maximum values of deviations in each month

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2015	4.3	7.1	5.1	0.7	2.0	0.7	–1.8	1.5	3.0	0.2	2.6	5.9
2016	–3.5	7.5	3.2	2.0	4.3	0.7	2.4	1.3	1.2	–0.5	–1.8	3.2
2017	4.1	2.3	3.4	–1.3	–3.4	–1.8	–0.6	1.9	1.0	–0.1	2.3	5.7
2018	6.0	–1.3	–3.8	1.6	4.1	0.0	2.5	2.9	2.6	1.5	2.8	1.2
2019	2.5	5.9	2.7	2.5	0.7	3.0	–2.6	–0.6	0.8	–0.5	1.3	6.4
2020	9.4	7.1	4.3	0.0	–1.1	2.6	0.1	0.6	2.5	2.6	4.0	3.8
2021	2.3	–4.6	0.8	1.8	1.1	5.7	3.9	1.7	–1.1	2.6	1.9	–2.3
2022	3.5	5.5	2.1	0.2	–1.1	1.8	2.7	4.3	–0.6	0.2	0.6	2.2

положительные отклонения температуры, то есть, сохранялась тенденция потепления регионального климата южной Карелии во все сезоны года. Наибольшие положительные отклонения (до +9.4°C) были характерны для зимних месяцев.

В аномально теплую зиму 2019–2020 гг. среднемесячная температура воздуха в ноябре–марте изменялась в пределах от –2.7 до –0.1°C, в течение 39 сут с декабря по февраль наблюдались оттепели. По температурным условиям апреля–мая выделялся теплый 2016 г. и холодный 2017 г. со средней температурой за эти месяцы 8.1 и 2.6°C соответственно. Близкими к норме или холоднее были эти месяцы в 2020 и 2022 гг. Лето 2020 г. со средней температурой июня–августа 15.6°C было заметно более холодным, чем лето 2021 и 2022 гг., со средней температурой 18.0 и 17.5°C соответственно. Лето 2021 г. было самым теплым за весь период метеонаблюдений на МС Петрозаводск. Наиболее теплой была осень 2020 г. со средней температурой сентября–октября 6.2°C; осенние месяцы в 2021 и 2022 гг. были заметно холоднее с соответствующей температурой 4.3 и 3.9°C.

Погодные условия в годы исследований заметно отличались, что обусловило выраженные межгодовые отличия в ледовой фенологии, а также в датах и продолжительности основных гидрологических явлений на акватории Петрозаводской губы.

Предлеставный период. По данным автономной станции было установлено, что в предлеставный период водная масса Петрозаводской губы охлаждалась в состоянии гомотермии. Переход температуры воды через 4°C в сторону понижения происходил в годы измерений в середине–конце ноября (табл. 3). Весь последующий период до установления льда водная масса губы охлаждалась в состоянии гомотермии под действием ветрового перемешивания. Период охлаждения водной массы губы после перехода 4°C в сторону понижения до установления льда был наиболее длительным в зимний сезон 2019–2020 гг. и составил 83 дня; в зимние сезоны 2020–2021 и 2021–2022 гг. этот период продолжался 20 и 15 сут соответственно. Продолжительность осеннего перемешивания очень важна, поскольку в этот период происходит насыщение кислородом водной толщи и придонных слоев. К моменту установления льда температура воды во все годы наблюдений понижалась до очень низких значений (рис. 2). Непосредственно перед установлением льда температура воды на верхнем и нижнем горизонтах наблюдений составляла 0.02 и 0.05°C 31 января 2020 г., 0.01 и 0.08°C 12 января 2021 г., 0.05 и 0.11°C 7 декабря 2021 г.

Период ледостава. Согласно среднемноголетним данным, лед устанавливается в акватории Петрозаводской губы 18 декабря и существует до 9 мая [5]. Наиболее ранняя

Таблица 3. Даты перехода температуры воды через 4°C в сторону понижения осенью ($T_b < 4^\circ\text{C}$) и повышения весной ($T_b > 4^\circ\text{C}$), установления и взлома льда, установления и разрушения стратификации ($dT > 1^\circ\text{C}$) в центральной глубоководной части Петрозаводской губы Онежского озера по данным автономной станции. н/д — нет данных

Table 3. Dates of water temperature transition through 4°C downwards in autumn ($T_b < 4^\circ\text{C}$) and upwards in spring ($T_b > 4^\circ\text{C}$), ice formation (УЛ) and breakup (БЛ), establishment and destruction of stratification ($dT > 1^\circ\text{C}$) in the central deep-water part of the Petrozavodsk bay of Lake Onega according to the data of the autonomous station. н/д — no data

Зимний сезон	$T_b < 4^\circ\text{C}$	Установление льда	Взлом льда	$T_b > 4^\circ\text{C}$	$dT > 1^\circ\text{C}$
2015–2016	н/д	н/д	25.04.2016	7.05.2016	15.05.2016–н/д
2019–2020	9.11.2019	31.01.2020	22.03.2020	5–7.05.2020	23.05.2020–4.09.2020
2020–2021	27–30.11.2020	12.01.2021	20.04.2021	11.05.2021	12.05.2021–26.08.2021
2021–2022	22.11.2021	7.12.2021	3.05.2022	13–19.05.2022	27.05.2022–31.08.2022

дата установления льда в губе — 18 ноября 1993 г., наиболее поздняя — 23 января 2004 г. Наиболее ранняя дата очищения ото льда 19 апреля 2007 г., наиболее поздняя — 28 мая 1956 г.

В течение аномально теплой зимы 2019–2020 гг. в открытом плесе Онежского озера впервые за длительный период наблюдений сплошной ледовый покров не установился [4]. В январе–марте 2020 г. льдом были покрыты северные районы озера — Повенецкий залив, Великая, Горская и Уницкая губы, частично — Кондопожская губа. Также ледовые поля наблюдались вдоль восточного побережья озера. Акватория Петрозаводской губы была частично покрыта льдом в период с конца января до конца марта 2020 г. Лед установился в вершине Петрозаводской губы и вдоль ее левого берега, в то время как центр губы и акватория вдоль правого берега оставались свободными ото льда всю зиму. В районе автономной станции ледовые поля периодически появлялись с конца января до середины марта 2020 г. (табл. 3). Таким образом, ледостав на акватории Петрозаводской губы продолжался в течение двух месяцев, что заметно меньше среднемноголетних сроков. В связи с тем, что практически всю зиму сохранялся теплообмен водной массы губы с атмосферой, температура воды по столбу была очень низкой на протяжении всей зимы: до 10 февраля изменялась в пределах 0.01–0.20°C, с 10 февраля до 20 марта — 0.1–0.4°C, с 22 марта начала постепенно увеличиваться (рис. 2).

Исследования на небольших озерах Карелии в аномально теплый зимний сезон 2019–2020 гг. не выявили резкого сокращения продолжительности ледостава относительно среднемноголетних значений, но было отмечено уменьшении толщины озерного льда [3].

В зимний сезон 2020–2021 гг. лед на акватории Петрозаводской губы установился 12 января 2021 г., взлом льда произошел 20 апреля 2021 г., то есть период ледостава продолжался 3.5 мес., что заметно меньше среднемноголетних сроков. Позднее установление льда было связано с теплым осенним и раннезимним периодами, а раннее освобождение ото льда — с теплым весенним. В следующий зимний сезон ледостав продолжался близко к среднемноголетним значениям — почти пять месяцев (с 7 декабря 2021 г. по 3 мая 2022 г.), что было обусловлено холодными погодными условиями осени и весны.

Взлом льда весной 2016 г. произошел 25 апреля (табл. 3), что близко к наиболее ранней дате очищения ото льда. Теплая погода марта и апреля 2016 г. способствовала раннему сходу льда (табл. 2).

В 2016, 2021 и 2022 гг. до начала весенней подледной конвекции температура верхнего слоя воды не превышала 0.1°C. Температура придонного слоя в первые 2–3 нед.

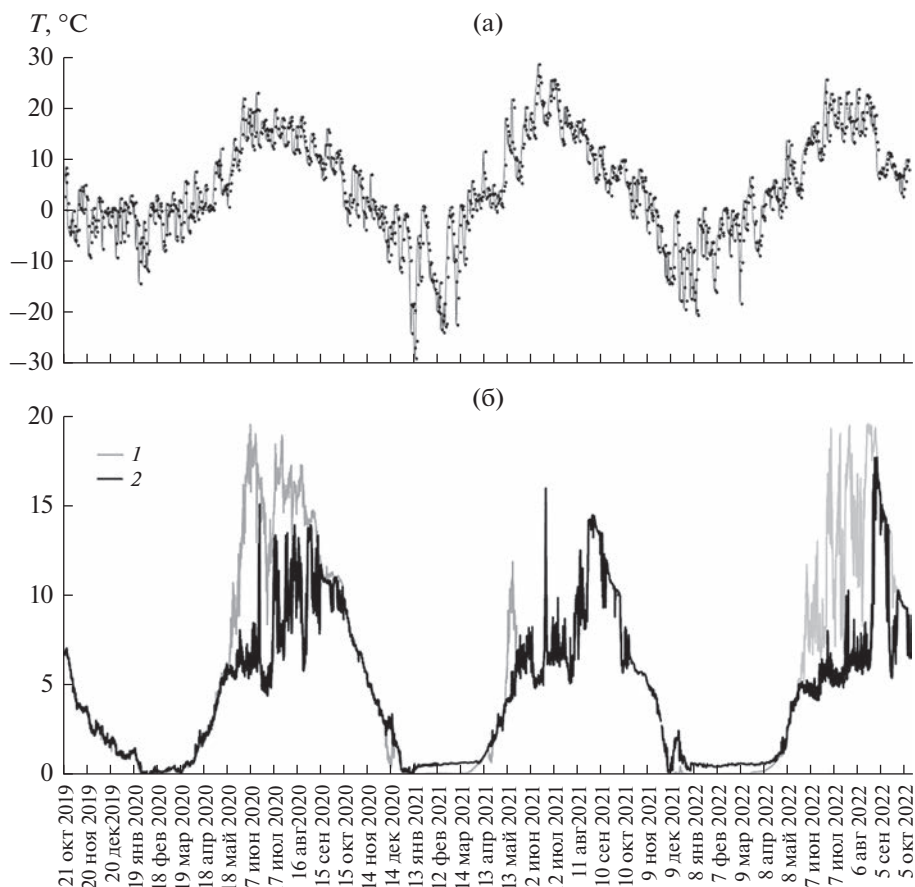


Рис. 2. Температура воздуха по МС Петрозаводск (а) и температура воды в центральной части Петрозаводской губы (б) в период с октября 2019 г. по октябрь 2022 г. 1 – верхний слой воды (глубина датчика 3.5 и 4.5 м), 2 – придонный слой (глубина датчика 18.5 и 19.5 м). Исходные данные температуры воды осреднены по 3 ч.

Fig. 2. Air temperature according to the Petrozavodsk meteorological station (a) and water temperature in the central part of the Petrozavodsk Bay (б) from October 2019 to October 2022. 1 – upper water layer (sensor depth 3.5 and 4.5 m), 2 – bottom layer (sensor depth 18.5 and 19.5 m). The water temperature data are averaged over 3 hours.

после установления льда повышалась до $0.5\text{--}0.6^\circ\text{C}$ вследствие поступления тепла из донных отложений, и затем менялась слабо вплоть до начала весенней подледной конвекции.

Весенняя подледная конвекция. С началом весеннего подледного радиационного нагрева начинается повышение температуры воды подледного слоя и формирование конвективно-перемешанного слоя. Измерения позволили установить, что конвективное перемешивание в 2016 г. началось 15 марта, в 2021 г. – 24 марта, в 2022 г. – 20 марта. Весной 2020 г. это явление не наблюдалось в районе станции измерений, так как ледовые поля периодически появлялись и исчезали, и устойчивого ледового покрова не существовало. Измерения в акватории губы в середине марта в 2015 и 2017 гг. в рамках проекта “Life under ice” проводились при уже хорошо развитой конвекции, что не

позволило установить дату начала этого явления; но можно предположить, что в эти годы конвекция началась уже в конце февраля или в первых числах марта, так как к середине марта конвективное перемешивание достигло 15–20 м [10, 12]. Такому раннему началу подледной конвекции могли способствовать теплые погодные условия января–марта в 2015 и 2017 гг., которые характеризовались превышением нормы по температуре воздуха на 2–7°C (табл. 2).

Весной 2016 г. за месяц (с середины марта до середины апреля) конвективное перемешивание достигло глубины 21.5 м, придонные слои вовлеклись в перемешивание в последние 10 дней ледостава. В 2021 г. конвекция достигла дна за 18 сут (с 24 марта по 10 апреля), и затем до взлома льда столб воды нагревался в полностью перемешанном состоянии еще в течение 10 сут. В 2022 г. конвекция достигла дна за месяц (с 20 марта до 24 апреля) и в перемешанном состоянии столб воды нагревался еще 9 сут. Продолжалась весенняя подледная конвекция в 2016 г. 40 сут, в 2021 г. — 27 сут, в 2022 г. — 43 дня. К моменту взлома льда в 2016, 2021 и 2022 гг. водная толща Петрозаводской губы была полностью перемешана, температура воды достигла 1.3–1.6°C. Радиационное нагревание покрытых льдом водоемов и подледное конвективное перемешивание играют важнейшую роль в термическом режиме озер в конце периода ледостава [10, 12]. Конвективное перемешивание способствует насыщению кислородом придонных слоев, а также может иметь важные экологические следствия для развития фитопланктона в конце периода ледостава, удерживая клетки водорослей в пределах конвективного слоя [7]. Роль вертикальных конвективных токов в переносе клеток водорослей по водному столбу исследовалась в акватории Петрозаводской губы весной 2017 г. [19]. Авторы показали, что, с одной стороны, конвективные токи способствуют удержанию клеток водорослей во взвешенном состоянии, а с другой — могут уносить их из фотической зоны, то есть, могут оказывать как стимулирующее, так и сдерживающее влияние на развитие подледного фитопланктона.

Весеннее перемешивание в условиях открытой воды. После освобождения ото льда водная толща Петрозаводской губы некоторое время остается в полностью перемешанном состоянии. Температура воды верхнего слоя постепенно повышается и, благодаря конвективному перемешиванию в диапазоне температур до 4°C, тепло перераспределяется по водному столбу. Переход температуры воды через 4°C в сторону повышения в центральной части Петрозаводской губы наблюдался в годы измерений в первую-вторую декады мая (табл. 3). Весной 2020 г. температура воды в акватории Петрозаводской губы достигла 4°C 5–7 мая, практически в те же сроки, что и весной 2016 г. и лишь на несколько суток раньше, чем в 2021 и 2022 гг. Период от исчезновения льда на акватории губы до достижения температуры 4°C в 2016, 2021 и 2022 гг. составил 10–20 сут, в 2020 г. заметно больше — 45 сут. В статье [4] указано, что прохождение термобара по акватории Петрозаводской губы весной 2020 г. произошло на 10–15 сут раньше среднемноголетних сроков (конец мая), и в качестве возможной причины этого были указаны аномально теплые погодные условия зимнего сезона 2019–2020 гг. Однако, измерения показали, что весной 2016, 2021 и 2022 гг. температура воды в акватории губы также достигла 4°C заметно раньше среднемноголетних сроков. Можно заключить, что в последние годы на фоне потепления регионального климата характерно более раннее прохождение термобара по акватории губы по сравнению со среднемноголетними сроками.

После достижения температуры воды 4°C при жаркой безветренной погоде практически сразу может установиться стратификация. Такая ситуация наблюдалась весной 2016 и 2021 гг., когда стратификация установилась уже через 1–7 сут после перехода температуры воды через 4°C в сторону повышения. Однако, при сильных ветрах и прохладной погоде водная толща губы может оставаться в перемешанном состоянии при температуре 4–6°C до 14–17 сут, что наблюдалось весной 2020 и 2022 гг. Период от взлома льда до установления летней термической стратификации занимал в 2016, 2021

и 2022 г. 3–4 нед., в то время как весной 2020 г. продолжался более двух месяцев. Увеличение продолжительности периода весенней гомотермии при более раннем сходе льда было показано также для двух небольших озер Финляндии и Карелии [2].

Продолжительность периода весенней гомотермии играет важную экологическую роль, так как этот период характеризуется активной гидродинамикой, насыщением кислородом придонных слоев, перераспределением растворенных и взвешенных веществ, биогенов по водной толще водоемов, что создает благоприятные условия для гидробионтов.

Летняя термическая стратификация. Периоды с разницей температуры по водному столбу более одного и двух градусов довольно близко совпадали для всех лет наблюдений (рис. 3). Даты установления стратификации на акватории Петрозаводской губы в годы исследований приходились на вторую–третью декады мая (табл. 3, рис. 3). В статье [4] указано, что весной 2020 г. стратификация установилась на 15–20 сут раньше среднемноголетних сроков, что авторы связывают с аномально теплыми погодными условиями зимнего сезона 2019–2020 гг. и ранним освобождением акватории губы ото льда. Однако, например, в 2016 и 2021 гг. с теплыми условиями апреля и мая стратификация установилась даже раньше, чем в 2020 и 2022 гг. с прохладными погодными условиями этих весенних месяцев (табл. 3). То есть, даты установления стратификации определяются скорее погодными условиями периода после освобождения ото льда, чем погодными условиями зимнего сезона.

Температура верхнего слоя воды (глубины 3.5–4.5 м) вследствие радиационного нагревания постепенно повышалась в годы измерений в июне–июле до 15–20°C (рис. 2, 3). В июле и августе при установлении холодной ветреной погоды периодически наблюдалось значительное уменьшение температуры верхнего слоя озера до 7–10°C, при этом стратификация становилась слабее, но водная масса не перемешивалась полностью. Температура придонного слоя в течение летних месяцев постепенно повышалась и достигала 6–9°C в конце августа. В летние месяцы всех лет наблюдений в придонных слоях водной толщи губы периодически наблюдались эпизоды резкого увеличения температуры воды с последующим возвратом к предыдущему уровню. Например, в период с 30 июня по 3 июля 2021 г. происходило повышение температуры от 5.5 до 16°C, затем в период до 5 июля температура понизилась до 6.24°C. Прохладным летом 2020 г. такие эпизоды повторялись довольно часто, а в жаркие летние месяцы 2021 и 2022 гг. наблюдались заметно реже. Возможно, что такой характер изменения температуры воды в придонном слое мог быть связан с опусканием теплой воды из поверхностного слоя вследствие конвергенции течений.

Термическая стратификация существовала на акватории губы более 3–3.5 мес. Во все годы измерений в конце августа–начале сентября происходило полное перемешивание водной толщи губы. При этом в течение нескольких дней происходило существенное увеличение температуры придонного слоя на 6–11°C (рис. 3). Например, в период с 23 и 28 августа 2022 г. температура придонного слоя увеличилась от 6.7 до 17.5°C и достигла годового максимума.

Осеннее перемешивание. Разрушение стратификации происходило в годы измерений в конце августа–начале сентября, в придонном слое при этом наблюдался резкий рост температуры воды до годового максимума 14–17°C (рис. 2, 3). На этапе осеннего охлаждения озеро находилось в состоянии гомотермии. Продолжительность периода от разрушения стратификации до установления льда составила 130 сут в осенне-зимние месяцы 2020–2021 гг. и 98 сут в 2021–2022 гг. Интересная особенность изменения температуры была характерна для этапа осеннего охлаждения. На протяжении сентября и октября всех лет наблюдений на фоне охлаждения водной массы, периодически наблюдались эпизоды более быстрого уменьшения температуры придонного слоя, по сравнению с верхним слоем (рис. 3). При этом разница температур по водному столбу

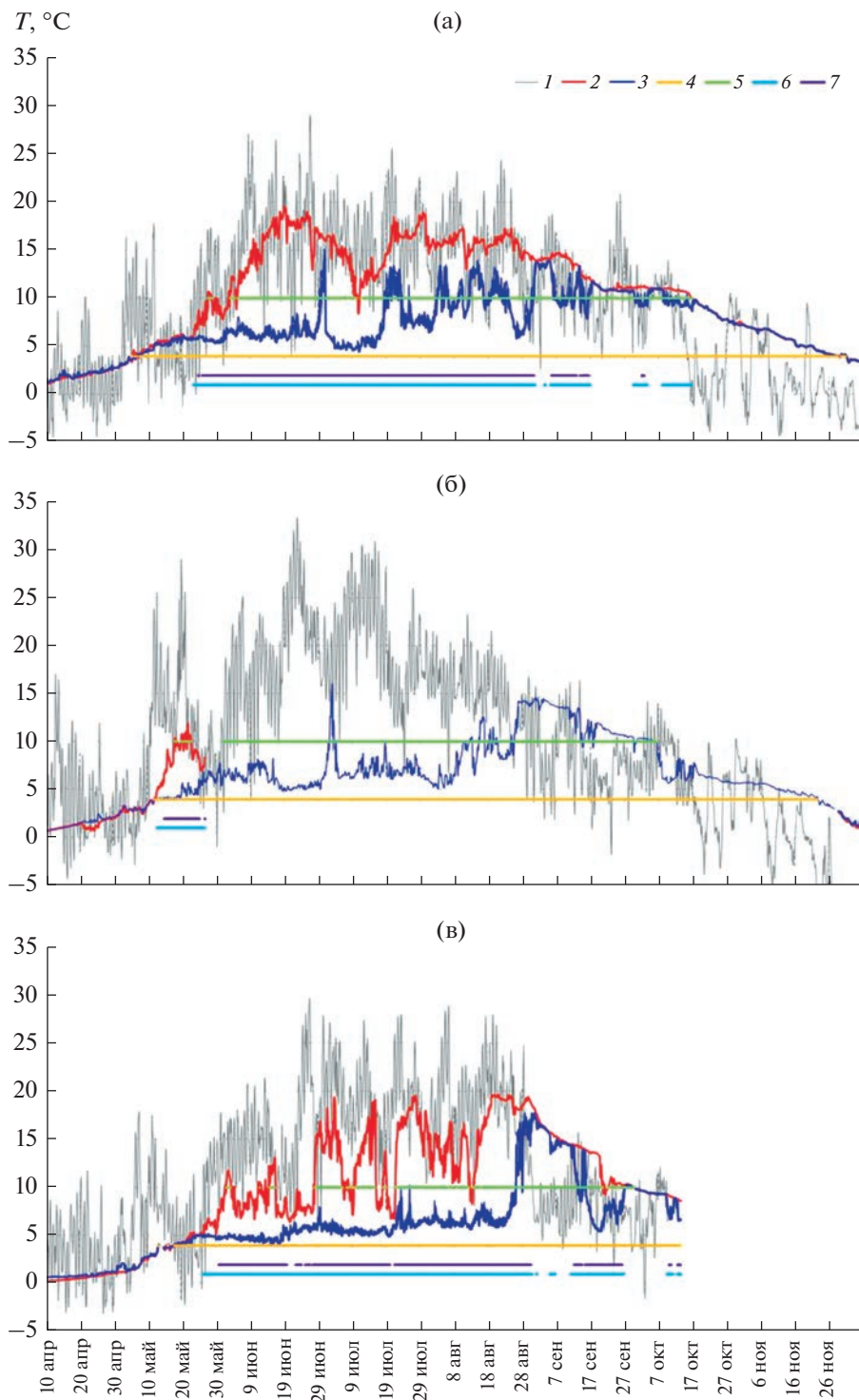


Рис. 3. Температура воздуха на МС Петрозаводск (1), температура воды верхнего (2) и придонного (3) слоев в период с 10 апреля по 5 декабря в 2020 (а), 2021 (б) и 2022 (в) гг. 4 и 5 — линии, соответствующие температуре 4 и 10°C соответственно, 6 и 7 — продолжительность периодов с разницей температуры по водному столбу более 1 и 2°C соответственно. Исходные данные температуры воды осреднены по 3 ч.

Fig. 3. Air temperature at weather station Petrozavodsk (1), water temperature of the upper (2) and bottom (3) layers from April 10 to December 5 in 2020 (a), 2021 (б) and 2022 (в), 4 and 5 — lines corresponding to temperatures of 4 and 10°C, 6 and 7 — periods with a temperature difference in the water column of more than 1 and 2°C, respectively. The water temperature data are averaged over 3 h.

могла увеличиваться до 5–6°C. Возможно, такие эпизоды резкого уменьшения температуры придонного слоя были связаны с притоком более холодных вод с мелководий.

Период с температурой воды выше 10°C. Переход температуры поверхностного слоя воды через 10°C в сторону повышения наблюдался в годы измерений с 17 мая по 1 июня, в сторону понижения — с конца сентября до второй декады октября. Таким образом, период с температурой верхнего слоя воды выше 10°C (так называемое “биологическое лето”) продолжался в 2020 г. более 140 сут и был заметно короче — 121 сут — в 2022 г., что было связано с холодными температурными условиями мая и сентября в этот год. Точно определить продолжительность этого периода для лета 2021 г. не представляется возможным, так как измерения проводились только на придонном датчике. Но если ориентироваться на температуру воздуха и показания придонного датчика температуры, то температура верхнего слоя озера могла превышать 10°C в период с начала июня до начала октября, то есть, более 120 сут. Увеличение продолжительности периода с температурой воды выше 10°C на фоне потепления регионального климата показано для ряда озер Карелии [1]. По измерениям на автономной станции пока нельзя говорить о явных тенденциях изменчивости продолжительности этого периода, можно только говорить о том, что она существенно меняется в разные годы. Стоит отметить, что важную роль в продолжительности “биологического лета” играют не только температурные условия летних месяцев, но также весенних и осенних.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По измерениям на автономной станции в центральной части акватории Петрозаводской губы Онежского озера в 2016 и 2019–2022 гг. установлены даты и продолжительность основных гидрологических явлений.

Обнаружены сдвиги сроков основных гидрологических явлений на акватории губы относительно среднесуточных значений на фоне потепления регионального климата. Зафиксировано резкое сокращение продолжительности ледостава до 2–3.5 мес. (при среднесуточном значении 4.5 мес.) за счет более позднего установления и более раннего схода льда в годы с теплыми осенними, зимними и весенними сезонами. Даты перехода температуры воды через 4°C в сторону повышения весной (1–2 декады мая) также наблюдались раньше среднесуточных значений (конец мая). Период весеннего перемешивания в условиях открытой воды продолжался от 3–4 нед. до двух месяцев (весна 2020 г.). Существенное увеличение продолжительности весеннего перемешивания играет важную роль в функционировании озерной экосистемы и может оказывать влияние на улучшение кислородных условий в период открытой воды и перенос питательных веществ по водному столбу, создавая благоприятные условия для развития гидробионтов. Летняя стратификация в годы исследований устанавливалась в середине–конце мая раньше среднесуточных сроков (начало июня) и продолжалась более 3–3.5 мес. Увеличение продолжительности летней стратификации может негативно влиять на кислородные условия гипolimниона.

Установлено, что на этапе осеннего охлаждения водная масса Петрозаводской губы охлаждается в состоянии гомотермии, даты перехода температуры воды через 4°C в сторону понижения приходятся на середину—конец ноября. До установления льда водная масса губы остается в полностью перемешанном состоянии вследствие ветрового воздействия. Длительный период гомотермии на этапе осеннего охлаждения и в предледоставный период способствует насыщению кислородом придонных слоев, что благоприятно сказывается на кислородном режиме губы в последующий период ледостава.

Установлены некоторые характерные особенности весенней подледной конвекции: в годы с устойчивым ледоставом это явление начинается в конце февраля—середине марта и продолжается 4–6.5 нед. до взлома льда. Вследствие подледного радиационного нагревания температура воды повышается до 1.3–1.6°C к концу ледостава. Конвективное перемешивание охватывает всю водную толщу Петрозаводской губы в последние дни ледостава, что может иметь важные экологические следствия для развития фитопланктона в конце зимы и после взлома льда (насыщение кислородом придонных слоев, перенос биогенов из придонных слоев в фотическую зону, перенос клеток водорослей по водному столбу).

Выявленные изменения сроков гидрологических явлений на акватории Петрозаводской губы Онежского озера могут оказывать влияние на фенофазы в развитии планктона. Для сезонного развития фитопланктона большое значение имеет продолжительность и интенсивность весенней подледной конвекции, весеннего перемешивания в условиях открытой воды, сроки прохождения термобара и летней стратификации. Изменение сезонных циклов развития фитопланктона может привести к изменению кормовой базы глубоководного бентоса Онежского озера, в которой главную роль играет весенний диатомовый фитопланктон.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белашев Б.З. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 228–238.
2. Здорovenнова Г.Э., Гавриленко Г.Г., Здорovenнов Р.Э. и др. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия РГО. 2017. Т. 149. Вып. 6. С. 59–74.
3. Здорovenнова Г.Э., Голосов С.Д., Пальшин Н.И. и др. Зимний термический и ледовый режимы малых озер Карелии на фоне региональной климатической изменчивости // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 1. С. 138–155. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.108>
4. Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Ефремова Т.В. и др. Реакция экосистемы Онежского озера в весеннее-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019–2020 годов // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 6. С. 888–899. <https://doi.org/10.31857/S2587556621060078>
5. Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада Европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск КарНЦ РАН, 2015. 375 с.
6. Назарова Л.Е. Климатические условия на территории Карелии // Современные исследования водоемов Севера. Учебное пособие. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. С. 7–16.
7. Пальшин Н.И., Здорovenнова Г.Э., Здорovenнов Р.Э. и др. Влияние весенней подледной освещенности и конвективного перемешивания на распределение хлорофилла “а” в малом мезотрофном озере // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 3. С. 259–269. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596463259-269>
8. Расписание погоды. Сайт. Rp5.ru URL: <https://rp5.ru/>. Дата обращения 15 февраля 2023 г.
9. Резников А.И., Исаченко Г.А. Изменение климатических характеристик западной части тайги Европейской России в конце XX—начале XXI вв. // Известия РГО. 2021. Т. 153. Вып. 1.

- С. 3–18.
<https://doi.org/10.31857/S0869607121010055>
10. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
 11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб: Научно-технические технологии. 2022. 676 с.
 12. Buffard D., Zdorovenнова G., Bogdanov S. *et al.* Under-ice convection dynamics in a boreal lake // *Inland Waters*. 2019. V. 9. № 2. P. 142–161.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533356>
 13. Desgué-Itier O., Melo Vieira Soares L., Anneville O. *et al.* Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2023. V. 27. P. 837–859.
<https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023>
 14. 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.
<https://doi.org/10.1127/1863-9135/2014/0582>
 15. Jane S.F., Hansen G.J.A., Kraemer B.M. *et al.* Widespread deoxygenation of temperate lakes // *Nature*. 2021. V. 594. P. 66–70.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
 16. Multimaps. Сайт. URL: <https://multimaps.ru>. Date of access 15 February 2023
 17. O'Reilly C.M. *et al.* Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophys. Res. Lett.* 2015. 42. 24. 10773–10781.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
 18. Sharma S., Blagrove K., Magnuson J.J. *et al.* Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nat. Clim. Chang.* 2019. V. 9. № 3. P. 227–231.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0393-5>
 19. Suarez E., Tiffay M.-C., Kalinkina N. *et al.* Diurnal variation in the convection-driven vertical distribution of phytoplankton under ice and after ice-off in large Lake Onego (Russia) // *Inland Waters*. 2019. V. 9. № 2. P. 193–204.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1559582>
 20. Winder M., Schindler D.E. Climate Change Uncouples Trophic Interactions in an Aquatic Ecosystem // *Ecology*. 2004. V. 85. № 8. P. 2100–2106.
<https://doi.org/10.1890/04-0151>
 21. Wüest A., Pasche N., Ibelings B. *et al.* Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study // *Inland Waters*. 2019. V. 9. № 2. P. 125–129.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1634450>

Seasonal and Inter-Annual Variability of Water Temperature in Petrozavodsk Bay of Lake Onega

G. E. Zdorovenнова^{1, *}, R. E. Zdorovenнов^{1, **}, N. I. Palshin^{1, ***}, and T. V. Efremova^{1, ****}

¹*Institute for Water Problems of the North, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

**E-mail: zdorovennova@gmail.com*

***E-mail: romga74@gmail.com*

****E-mail: npalshin@mail.ru*

*****E-mail: efremova@nwpi.krc.karelia.ru*

Abstract—Based on year-round measurements of water temperature at an autonomous station (an anchored chain equipped with temperature sensors), the features of the temperature and ice regimes of the Petrozavodsk Bay of Onega Lake in modern climatic conditions were studied; the dates and duration of the main hydrological phenomena in the water area of the bay were specified. In the abnormally warm winter of 2019–2020, the water area of the Petrozavodsk Bay was not completely covered with ice for the first time in a long period of observations; in the area of the measurement station, ice fields were observed from late January to mid-March. The duration of ice-covered period in the next two winters was 3.5 and 5 months. Data were obtained on the timing of the onset and duration of the spring under-ice convection, a phenomenon that plays an important role in the thermal regime of the lake at the end of winter. It is shown that 2016, 2021 and 2022 spring under-ice convective mixing

lasted 4–6.5 weeks, covering the entire water column by the end of ice period. Mixing of the water column after breaking the ice (spring homothermy) continued for another 3–4 weeks. In the spring of 2020, under-ice convection was not observed; spring overturn continued for two months from mid-March to mid-May. The dates of the upward transition of water temperature through 4°C in the years of measurements (5–19 May) were ahead of the long-term average by 2–3 weeks (end of May). Thermal stratification was established from 12 to 27 May and existed for 3–3.5 months. Complete mixing of the water mass of the bay took place in late August–early September, and then, until ice settling, the water column cooled in a state of homothermy. Immediately before ice formation, the water temperature dropped to very low values and did not exceed 0.1°C in the water column. The period with an average daily water temperature of the surface layer of the Petrozavodsk Bay above 10°C lasted from 121 to 144 days during the years of measurements.

Keywords: lake, under-ice convection, stratification, thermal regime, ice regime, climatic variability, autonomous station, chain with temperature sensors

REFERENCES

1. Efremova T.V., Pal'shin N.I., Belashev B.Z. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011 // *Water Resources*. 2016. T. 43. № 2. P. 402–411.
2. Zdorovenнова G.E., Gavrilenko G.G., Zdorovenнов R.E. et al. E'voluciya temperatury vodnoj tolshhi boreal'nyh ozer na fone izmenenij regional'nogo klimata // *Izvestiya RGO*. 2017. T. 149. Vyp. 6. S. 59–74.
3. Zdorovenнова G.E., Golosov S.D., Pal'shin N.I. et al. Zimnij termicheskiy i ledovyy rezhimy malyyh ozer karelii na fore regional'noj klimaticheskoy izmenchivosti // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo unichersiteta. Nauki o Zemle*. 2022. T. 67. № 1. S. 138–155.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.108>
4. Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Efremova T.V. et al. Reakciya ekosistemy Onezhskogo ozera v vesenne-letnij period na anomal'no vysokuyu temperaturu vozduxa zimy 2019–2020 godov // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2021. T. 85. № 6. S. 888–899.
<https://doi.org/10.31857/S2587556621060078>
5. Krupnejshie ozera-vodoxranilishha Severo-Zapada Evropejskoj territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie ekosistem pri klimaticheskix i antropogennyx vozdeystviyax. Petrozavodsk KarNC RAN, 2015. 375 s.
6. Nazarova L.E. Klimaticheskie usloviya na territorii Karelii // *Sovremennye issledovaniya vo-domov Severa. Uchebnoe posobie*. Petrozavodsk: KarNC RAN, 2021. S. 7–16.
7. Palshin N.I., Zdorovenнова G.E., Zdorovenнов R.E. et al. Effect of under-ice light intensity and convective mixing on chlorophyll a distribution in a small mesotrophic lake // *Water Resources*. 2019. T. 46. № 3. P. 384–394.
8. Raspisanie pogody. Sajt. RP5.ru. URL: <https://rp5.ru/>. Data obrashheniya 15 fevralya 2023 g.
9. Reznikov A.I., Isachenko G.A. Izmeneniya klimaticheskix xarakteristik zapadnoj chasti tajgi Evropejskoj Rossii v konce XX–nachale XX vv. // *Izvestiya RGO*. 2021. T. 153. Vyp. 1. S. 3–18.
<https://doi.org/10.31857/S0869607121010055>
10. Tixomirov A.I. Termika krupnyh ozer. L.: Nauka, 1982. 232 s. Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyax klimata i ix posledstviyax na territorii Rossijskoj Federacii. Rosgidromet. SPb: Naukoemkie tehnologii. 2022. 676 s.
11. Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyax klimata i ix posledstviyax na territorii Rossijskoj Federacii. Rosgidromet. SPb: Naukoemkie tehnologii. 2022. 676 s.
12. Bouffard D., Zdorovenнова G., Bogdanov S. et al. Under-ice convection dynamics in a boreal lake // *Inland Waters*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 142–161.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533356>
13. Desgué-Itier O., Melo Vieira Soares L., Anneville O. et al. Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes // *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2023. Vol. 27. P. 837–859.
<https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023>
14. Engelhardt C., Kirillin G. Criteria for the onset and breakup of summer lake stratification based on routine temperature measurements, *Fundam. Appl. Limnol.* 2014. Vol. 184 (3). P. 183–194.
<https://doi.org/10.1127/1863-9135/2014/0582>

15. Jane S.F., Hansen G.J.A., Kraemer B.M. et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes // *Nature*. 2021. Vol. 594. P. 66–70.
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
16. Multimaps. Сайт. URL: <https://multimaps.ru>. Date of access 15 February 2023.
17. O'Reilly C.M. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe // *Geophys. Res. Lett.* 2015. 42. 24. 10773–10781.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
18. Sharma S., Blagrove K., Magnuson J.J. et al. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nat. Clim. Chang.* 2019. Vol. 9. № 3. P. 227–231.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0393-5>
19. Suarez E., Tiffay M.-C., Kalinkina N. et al. Diurnal variation in the convection-driven vertical distribution of phytoplankton under ice and after ice-off in large Lake Onego (Russia) // *Inland Waters*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 193–204.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1559582>
20. Winder M., Schindler D.E. Climate Change Uncouples Trophic Interactions in an Aquatic Ecosystem // *Ecology*. 2004. Vol. 85. № 8. P. 2100–2106.
<https://doi.org/10.1890/04-0151>
21. Wüest A., Pasche N., Ibelings B. et al. Life under ice in Lake Onego (Russia) – an interdisciplinary winter limnology study // *Inland waters*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 125–129.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1634450>