

УДК574.583 + 574.52(282.247.211)

РАЗВИТИЕ ЗИМНЕГО ФИТОПЛАНКТОНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СРЕДЫ

© 2024 г. Н. М. Калинкина^{а, *}, В. С. Смирнова^{а, **},
Ю. Л. Сластина^{а, ***}, Р. Э. Здоровеннов^{а, ****},
Г. Э. Здоровеннова^{а, *****}, М. Б. Зобков^{а, *****}
Е. В. Теканова^{а, *****}, Л. Е. Назарова^{а, *****}

^аФедеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”
Институт водных проблем Севера, Петрозаводск, Россия

*E-mail: cerioda@mail.ru

**E-mail: smirnovvalera24@yandex.ru

***E-mail: jls@inbox.ru

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

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

*****E-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

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

*****E-mail: larisanaazarov@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.05.2024 г.

После доработки 23.11.2024 г.

Принята к публикации 03.12.2024 г.

Статья посвящена изучению развития зимнего фитопланктона Онежского озера в зависимости от температурных и световых условий, цветности воды, содержания органических и биогенных веществ. В апреле 2022 и 2023 гг., незадолго до вскрытия льда, в Онежском озере выявлены чрезвычайно низкие показатели развития микроводорослей. Основным представителем являлся холодолюбивый вид *Aulacoseira islandica*, относящийся к отделу диатомовых водорослей. Общие численность, биомасса фитопланктона и концентрация хлорофилла *a* варьировали в пределах 0.13–0.71 млн кл/л, 0.06–0.44 мг/л и 0.3–0.8 мкг/л соответственно и характеризовали Петрозаводскую губу и центральную глубоководную часть Онежского озера в зимний период как низкопродуктивные. Причиной небольших показателей развития микроводорослей в зимний период в Петрозаводской губе является высокая цветность воды, определившая малую глубину фотической зоны, и глубокое конвективное перемешивание водной толщи. В центральной части Онежского озера к лимитирующим факторам развития зимнего фитопланктона относятся неблагоприятные световые условия в связи с большой глубиной конвективного перемешанного слоя.

Ключевые слова: Онежское озеро, зимний период, метеорологические условия, температура воды, конвекция, фотическая зона, органическое вещество, биогенные элементы, фитопланктон, хлорофилл *a*

DOI: 10.31857/S0869607124040084, **EDN:** MOBIRV

ВВЕДЕНИЕ

Состояние планктона в глубоких озерах умеренного пояса в подледный период остается недостаточно изученным, поскольку основные усилия исследователей были сосредоточены на оценке состояния озер в более продуктивный период откры-

той воды [14]. Особенные трудности связаны с исследованиями во время заключительной фазы таяния льда, когда ледовый покров теряет прочность [16].

В условиях потепления климата уменьшается продолжительность ледостава на озерах Северного полушария [2, 19]. Потепление климата вызывает изменение структуры льда. На озерах северных регионов мира часто отмечается белый лед, который уменьшает проникновение солнечной радиации [22]. В последние годы в зимний период усиливается влияние водосборной территории на экосистему Онежского озера. Увеличиваются зимний сток и цветность воды в реке Шуя, втором по величине притоке Онежского озера, отмечаются признаки возрастания цветности воды в Петрозаводской губе Онежского озера [8, 13, 15]. В связи с возможным ухудшением подледной освещенности в Онежском озере, актуальными становятся исследования зимнего состояния фитопланктона.

Изучение фитопланктона Онежского озера подо льдом впервые было выполнено в 1960-е годы [9]. В марте 2015–2017 гг. подледные исследования в Петрозаводской губе Онежского озера доказали важную роль суточной динамики вертикального распределения фитопланктона в условиях лимитирования светом [12, 20]. В целом зимние исследования планктона в Онежском озере недостаточны для понимания его роли в годовом цикле формирования продуктивности экосистемы, что необходимо для уточнения биогеохимической модели этого водоема [17].

Целью настоящей работы стало изучение в апреле 2022 и 2023 гг. в Петрозаводской губе и центральном глубоководном плесе Онежского озера структурно-функциональных показателей зимнего фитопланктона в зависимости от физико-химических условий среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Онежское озеро является вторым по величине озером Европы. Площадь водосборного бассейна озера составляет 53100 кв. км, площадь озера — 9720 кв. км. Объем водной массы озера — 295 куб. км, средняя и максимальная глубина — 30 м и 120 м соответственно. В северо-западной части озера расположены крупные заливы, одним из которых является Петрозаводская губа. В вершинную часть Петрозаводской губы впадает река Шуя, второй по величине приток Онежского озера (рис. 1).

На Петрозаводской губе Онежского озера подледные исследования были выполнены 14 апреля 2022 и 20 апреля 2023 г. на станции Р_2 (глубина 25–25.7 м). В центральном плесе Онежского озера отбор проб проводился на станции С_3 20 апреля 2023 г. (глубина 43 м) (см. рис. 1).

Характеристика метеорологических условий в зимний период была выполнена на основе анализа данных по метеорологической станции г. Петрозаводска [10].

На станциях Р_2 и С_3 с помощью мультипараметрического зонда STD-90m подо льдом измеряли температуру воды. Оценка потоков фотосинтетически активной радиации (ФАР) в 2022 г. была выполнена с использованием датчиков автономной станции. В 2023 г. ФАР измеряли с помощью зонда RBR-Concerto. По методике, разработанной для озер, покрытых льдом [12], с учетом экспоненциального снижения ФАР в толще воды в зависимости от глубины, были рассчитаны коэффициенты ослабления света (K_w) и глубина фотической зоны, где достигается 1% освещения от величины поверхностной ФАР (сразу под нижней кромкой льда). Измерения толщины и послойной структуры кернов льда были выполнены с использованием гидрологической линейки.

Отбор проб воды на химический анализ осуществлялся при помощи батометра Рутнера на станции P_2 — на глубинах 1, 15, 24 м (апрель 2022 г.) и на 1, 13, 26 м (апрель 2023 г.). На станции C_3 пробы были отобраны на горизонтах 1, 10, 20, 30, 43 м. В апреле 2022 и 2023 гг. был исследован химический состав воды р. Шуя. Пробы воды на химический анализ отбирали в полиэтиленовые сосуды. Образцы воды на содержание общего фосфора ($P_{\text{общ}}$) дополнительно фиксировали подкислением серной кислотой (4N, Panreac Química S. L. U.). Определение общего фосфора проводили фотометрически с $K_2S_2O_8$ в кислой среде и последующим определением фосфатов согласно РД 52.24.387-2006. Определение минерального фосфора ($P_{\text{мин}}$) выполняли фотометрически с молибдатом аммония и аскорбиновой кислотой при



Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб в Петрозаводской губе (станция P_2) и центральном районе Онежского озера (станция C_3) в апреле 2022 и 2023 гг.; стрелкой указано устье р. Шуя.

Fig. 1. Map of sampling stations location in Petrozavodsk Bay (station P_2) and in the central part of Lake Onego (station C_3) in April 2022 and 2023; the arrow indicates the mouth of the River Shuya.

882 нм (РД 52.24.382-2019). Содержание общего органического углерода проводили высокотемпературным окислением до CO_2 на анализаторе Shimadzu TOC- L_{CSN} согласно ГОСТ Р 52991-2008. Цветность воды определяли фотометрически при 410 нм согласно ПНД Ф 14.1:2.4.207-04.

Пробы фитопланктона в апреле 2022 г. отбирали на станции Р_2 на горизонтах 1, 7.5, 15, 20, 24 м. В апреле 2023 г. пробы отбирали из поверхностного слоя воды на станциях Р_2 и С_3. Пробы воды для анализа фитопланктона фиксировали 40% раствором формалина и обрабатывали общепринятыми методами [11]. Таксономическая идентификация проводилась по определителю [21]. К доминирующим видам относили виды с численностью и биомассой более 10%, к видам-субдоминантам — более 5%. Для определения концентрации хлорофилла *a* пробы воды отбирали на станции Р_2 в апреле 2022 г. на горизонтах 1, 7.5, 15, 20, 24 м; в апреле 2023 г. — на горизонтах 1, 13 и 26 м; на станции С_3 в апреле 2023 г. — на горизонтах 1, 10, 20, 30, 43 м. Концентрацию хлорофилла *a* определяли спектрофотометрическим методом [18]. В апреле 2023 г. из поверхностного горизонта на станциях Р_2 и С_3 были отобраны образцы воды для оценки фотосинтеза, который измерялся скляночным кислородным методом [6] с точностью определения ± 6 мкг С/л в сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика метеорологических условий в зимний период 2021–2022 и 2022–2023 гг.

Зимой 2021–2022 гг. наиболее морозным был декабрь 2021 г. Средняя месячная температура воздуха в декабре 2021 г. была ниже климатической нормы периода 1991–2020 гг. на 4.2°C и составляла -9.9°C . Средняя месячная температура воздуха в январе–марте 2022 г. изменялась в диапазоне от -8.1 до -2.3°C , была близка к климатической норме и отклонялась от нее на 0.3 – 1.2°C . Сумма атмосферных осадков (с декабря 2021 г. по апрель 2022 г.) была равна 165 мм и составила 95% от климатической нормы (174 мм) базового периода 1991–2020 гг.

Зимой 2022–2023 гг. за пять месяцев наблюдений (декабрь 2022 г. — апрель 2023 г.) все отклонения средней месячной температуры воздуха от климатической нормы 1991–2020 гг. были положительными. Наиболее теплыми оказались январь и февраль 2023 г., когда среднемесячная температура воздуха оказалась выше нормы на 3.4°C и 2.3°C , соответственно. В остальные месяцы зимы 2022–2023 гг. средняя месячная температура воздуха превышала среднемноголетние показатели на 0.3 – 0.8°C . Количество атмосферных осадков за пять месяцев зимы 2022–2023 гг. было равно 161 мм (92% от климатической нормы).

Характеристика структуры льда

В Петрозаводской губе на станции Р_2 14 апреля 2022 г. структура льда была неоднородна. Общая толщина ледяного покрова составила 49 см. Нижняя часть ледяного керна состояла из кристаллического льда толщиной 21 см, выше располагался белый лед толщиной 25 см, который был разделен прослойкой влажного снега толщиной около 3 см.

20 апреля 2023 г., на станции Р_2 в Петрозаводской губе общая толщина льда составила 31 см (в нижней части керна кристаллический лед — 29 см, в верхней части керна белый лед — 2 см). На станции С_3 общая толщина льда была равна 49 см (кристаллический лед — 48 см; белый лед — 1 см). Во время исследований в апреле 2022 и 2023 гг. снег на льду отсутствовал.

Температурные профили

Наблюдаемые в апреле 2022 и 2023 гг. температурные условия подо льдом отражали протекающие в конце зимнего периода процессы конвективного перемешивания воды. Солнечный свет проникал сквозь слой льда и нагревал верхний подледный слой воды, что вызывало конвекцию. При этом неоднородность температуры в конвективном перемешанном слое не превышала сотых долей градуса.

14 апреля 2022 г. на станции Р_2 вертикальный профиль температуры характеризовался двумя зонами (рис. 2). На глубинах от нижней поверхности льда до 15 м сформировался конвективный перемешанный слой, в пределах которого температура варьировала в диапазоне $0.37\text{--}0.39^\circ\text{C}$. В нижнем стратифицированном слое температура воды возрастала от 0.39°C , достигая у дна, на глубине 25 м, 1.81°C , что отражает влияние тепла, аккумулированного в донных отложениях.

20 апреля 2023 г. вертикальная термическая структура на станции Р_2 включала три хорошо выраженных слоя. Первый тонкий подледный градиентный слой находился на глубинах от нижней поверхности льда до 1 м, где температура изменялась в пределах $1.11\text{--}1.24^\circ\text{C}$. Затем следовал конвективный перемешанный слой от 1 м до 20 м с температурой воды $1.23\text{--}1.27^\circ\text{C}$. Нижний стратифицированный слой располагался на глубинах от 20 м до дна (25.7 м), где температура увеличивалась до 1.62°C (см. рис. 2).

На станции С_3 20 апреля 2023 г. хорошо были выражены два слоя: тонкий подледный слой на глубинах $0\text{--}1.2$ м (температура воды $0.37\text{--}0.51^\circ\text{C}$) и конвективный перемешанный слой, который располагался на глубинах от 1.2 м до 40 м с температурой воды $0.50\text{--}0.53^\circ\text{C}$. Узкий подледный холодный слой на станциях Р_2 и С_3, который располагался поверх более плотного, чуть более прогретого конвективного слоя (см. рис. 2), отражал суточную динамику гидродинамических процессов и был связан с ночным снижением температуры воздуха, которая приводила к рестратификации конвективного перемешанного слоя [12].

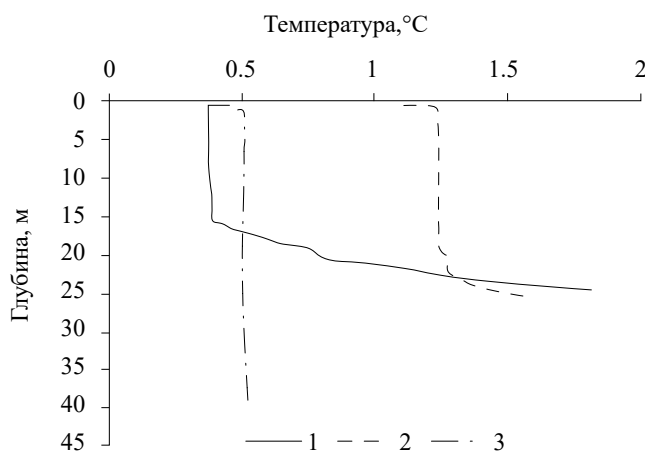


Рис. 2. Вертикальные профили температуры воды на станциях Р_2 и С_3; 1 — станция Р_2 (апрель 2022 г.); 2 — станция Р_2 (апрель 2023 г.); 3 — станция С_3 (апрель 2023 г.).

Fig. 2. Vertical profiles of water temperature at stations P_2 and C_3; 1 — station P_2 (April 2022); 2 — station P_2 (April 2023); 3 — station C_3 (April 2023).

Характеристика световых условий

По данным измерения фотосинтетически активной радиации, в Петрозаводской губе на станции Р-2, 14 апреля 2022 г. коэффициент ослабления света (K_w) составил 3.24 м^{-1} , глубина фотической зоны — 1.8 м. 20 апреля 2023 г. величина коэффициента ослабления света на станции Р_2 была равна 2.28 м^{-1} , глубина фотической зоны — 2.8 м.

По сравнению с Петрозаводской губой в центральном глубоководном районе Онежского озера сформировались иные световые условия подо льдом. 20 апреля 2023 г. на станции С_3 был выявлен значительно меньший, чем в Петрозаводской губе, коэффициент ослабления света (1.07 м^{-1}) и, как следствие, бо́льшая глубина фотической зоны (5.47 м).

Химический состав воды в районах исследований

В апреле 2022 и 2023 гг. в Петрозаводской губе на станции Р_2 во всем столбе воды отмечались повышенные уровни цветности (53–76 град Рт-Со шкалы), содержания общего органического углерода (8.13–10.0 мгС/л), общего (13–22 мкг/л) и минерального фосфора (5–7 мкг/л) (табл. 1). Бо́льшая часть фосфора в высокоцветных водах находится в комплексе с гумусовыми веществами в железосвязанной форме. Согласно классификации [7], район расположения станции Р_2 по содержанию общего фосфора характеризовался мезотрофным (среднепродуктивным) статусом.

Максимальные значения всех изученных показателей химического состава воды были зафиксированы в воде р. Шуя (см. табл. 1). Таким образом, химический состав воды залива формируется в результате смешивания низкоцветных озерных вод с высокоцветными водами р. Шуя.

Таблица 1. Показатели химического состава воды на разных глубинах на станциях Р_2 и С_3 в апреле 2022 и 2023 гг.

Table 1. Chemical composition of water at different depths at stations Р_2 and С_3 in April 2022 and 2023

Дата отбора	№ станции	Горизонт, м	Цветность, град Рт-Со шкалы	$C_{\text{орг}}$, мг/л	$P_{\text{мин}}$, мкг/л	$P_{\text{общ}}$, мкг/л
14.04.2022	Р2	1	76	9.6	6	18
14.04.2022	Р2	15	77	9.6	5	17
14.04.2022	Р2	24	53	8.1	5	13
14.04.2022	р. Шуя	0.5	147	16.8	21	52
20.04.2023	Р2	1	68	9.5	7	22
20.04.2023	Р2	13	67	9.7	6	13
20.04.2023	Р2	26	60	10.0	7	18
24.04.2023	р. Шуя	0.5	191	19.4	16	56
20.04.2023	С3	1	28	7.6	2	11
20.04.2023	С3	10	—	—	2	10
20.04.2023	С3	20	28	6.5	2	7
20.04.2023	С3	30	—	—	2	9
20.04.2023	С3	43	28	7.4	2	8

Примечание: $C_{\text{орг}}$ — общий органический углерод; $P_{\text{мин}}$ — минеральный фосфор; $P_{\text{общ}}$ — общий фосфор; прочерк — отсутствие данных.

В апреле 2023 г. в центральной части Онежского озера, на станции С_3, цветность воды, содержание органических и биогенных веществ оказались в 2–6 раз ниже, чем в Петрозаводской губе (см. табл. 1). Показатель цветности (28 град) характеризовал воды в районе станции С_3 как олигогумусные, содержание общего фосфора (8–11 мкг/л) — как олиготрофные. Низкие показатели цветности воды и содержания биогенных элементов характерны для водной толщи центрального района Онежского озера [13, 23].

Продукционные характеристики фитопланктона

Показатели хлорофилла служат для экспрессной оценки уровня развития фитопланктона и трофического статуса водоема. Содержание хлорофилла *a* на станции Р_2 в апреле 2022 и 2023 гг. было чрезвычайно низким (0.28–0.82 мкг/л) (рис. 3).

На станции С_3, в глубоководном плесе Онежского озера, 20 апреля 2023 г. концентрация хлорофилла *a* также, как и в Петрозаводской губе, была весьма низкой и изменялась в пределах 0.43–0.53 мкг/л. Согласно статистическому анализу с применением критерия Манна-Уитни, в апреле 2023 г. на станции Р_2 содержание хлорофилла было значимо ($p < 0.05$) выше, чем на станции С_3. Тем не менее, по классификации [5], все наблюдаемые величины хлорофилла *a* характеризуют районы исследований в зимний период как низкопродуктивные.

В апреле 2023 г. в Петрозаводской губе и в центре Онежского озера значения фотосинтеза фитопланктона оказались ниже пределов определения этого показателя скляночным кислородным методом, что свидетельствует о низком продукционном потенциале зимнего фитопланктона в Онежском озере.

Характеристика таксономического состава, численности и биомассы фитопланктона

В апреле 2022 и 2023 гг. фитопланктон Петрозаводской губы и центрального района Онежского озера характеризовался низким видовым богатством. Всего выявлено 44 таксона водорослей рангом ниже рода, принадлежащих к семи систематическим отделам: диатомовые (*Bacillariophyta*) — 15 таксонов; зеленые (*Chlorophyta*) — 10;

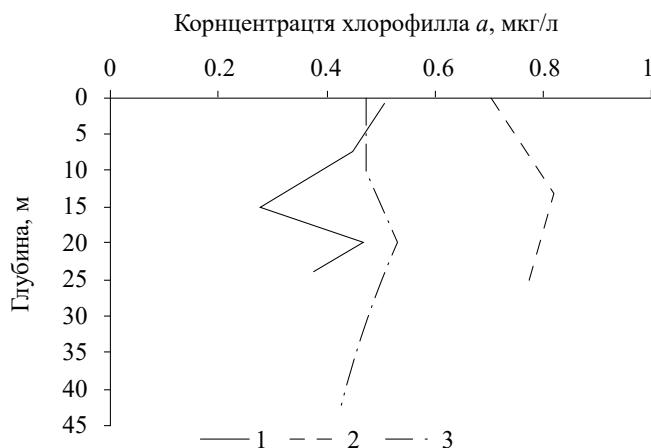


Рис. 3. Вертикальные профили хлорофилла *a* на станциях Р_2 и С_3; 1 — станция Р_2 (апрель 2022 г.); 2 — станция Р_2 (апрель 2023 г.); 3 — станция С_3 (апрель 2023 г.).

Fig. 3. Vertical profiles of chlorophyll *a* at stations Р_2 and С_3; 1 — station Р_2 (April 2022); 2 — station Р_2 (April 2023); 3 — station С_3 (April 2023).

цианобактерии (*Cyanobacteria*) — 6; золотистые (*Chrysophyta*) — 4; динофитовые (*Dinophyta*) — 3; криптофитовые (*Cryptophyta*) — 3; эвгленовые (*Euglenophyta*) — 3 таксона. Представители диатомовых, зеленых, цианобактерий и золотистых водорослей составили основу флористического состава (80% от общего списка всех видов).

На станции Р_2 зимой численность и биомасса фитопланктона были весьма низкими и варьировали на разных горизонтах в пределах 0.13–0.71 млн кл/л и 0.06–0.38 мг/л соответственно (табл. 2, 3). Диатомовые водоросли доминировали во всей толще воды (63–98% общей биомассы). При этом доля вида *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen в общей биомассе составила 38–95% (см. табл. 2, 3). Субдоминантами по вкладу в общую биомассу из диатомовых водорослей были виды *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg) Simonsen и *Surirella ovata* Kützing, определившими на отдельных горизонтах до 15–16% общей биомассы фитопланктона.

Кроме диатомовых водорослей, заметный вклад в общую численность фитопланктона в Петрозаводской губе вносили цианобактерии и зеленые водоросли (см. табл. 2). В апреле 2022 г. в поверхностном слое воды и на нижних горизонтах доля цианобактерий в общей численности варьировала в пределах 86–93% (см. табл. 2). Основными представителями цианобактерий были виды *Woronichinia naegeliana* (Unger) Elenkin и *Microcystis reinboldii* (Richter) Forti. Однако показатели биомассы этих видов были чрезвычайно малы: 0.002–0.006 мг/л. Среди зеленых водорослей заметный вклад (около 20%) в показатели общей численности и биомассы внесли виды *Dictyosphaerium pulchellum* Wood и *Pandorina morum* (O. Müller) Bory.

В глубоководном районе Онежского озера, на станции С_3, в апреле 2023 г. общая численность (0.18 млн кл/л) и биомасса фитопланктона (0.44 мг/л) оказались весьма низкими (см. табл. 1, 2). Вид *Aulacoseira islandica* обеспечил 40–60% общих показателей развития альгоценоза. Субдоминантными видами являлись представители диатомовых водорослей *Aulacoseira subarctica* (O. Müller) Haworth emend. Genkal и *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing. Вклад представителей остальных отделов (*Chrysophyta*, *Dinophyta*, *Cryptophyta*, *Euglenophyta*) в численность и биомассу фитопланктона был невелик. По классификации [5], значения биомассы зимнего фитопланктона позволяют характеризовать два района исследований Онежского озера в зимний период как низкопродуктивные.

ОБСУЖДЕНИЕ

В апреле 2022 и 2023 гг. численность и биомасса фитопланктона были очень низкими (см. табл. 2, 3). В Петрозаводской губе эти показатели, по сравнению с периодом открытой воды [1], были меньше в 4–10 раз, в центральной части Онежского озера — в 2–4 раза. Одной из причин низких количественных показателей фитопланктона и его малой активности в Петрозаводской губе в зимний период являются неблагоприятные световые условия. Узкая фотическая зона в заливе (всего 2–3 м) была связана с быстрым ослаблением света в толще воды из-за высокой цветности (табл. 4). В центральном районе Онежского озера (цветность 28 град) были выявлены меньший коэффициент ослабления света и большая глубина фотической зоны (см. табл. 4).

Важным фактором, влияющим на распространение света под льдом, является характер снежно-ледяного покрова. Существенно большая мощность белого льда и наибольший коэффициент ослабления света подо льдом были обнаружены в Петрозаводской губе в апреле 2022 г., в более холодную и снежную зиму 2021–2022 гг.

Таблица 2. Показатели общей численности фитопланктона в апреле 2022 и 2023 гг. в разных районах Онежского озера

Table 2. Parameters of the total number of phytoplankton in April 2022 and 2023 in different areas of Lake Onego

Дата	Номер станции	Горизонт, м	N, млн кл/л	Доля в общей численности, %							
				1	2	3	4	5	6	7	8
14.04.2022	P_2	1	0.71	10.4	85.6	3.4	0.2	0.3	0	0.3	6.2
		7.5	0.13	80.3	0	18.2	0	1.5	0	0	78.8
		15	0.15	76.6	0	23.4	0	0	0	0	53.2
		20	0.41	4.4	91.0	3.4	0	0	0.5	0.8	2.4
		24	0.27	5.2	92.7	0.7	0.7	0	0	0.6	4.4
20.04.2023	P_2	0.5	0.15	75.5	6.1	12.2	2.0	0	4.1	0	55.1
20.04.2023	C_3	0.5	0.18	86.0	3.5	3.5	3.5	1.8	1.8	0	40.4

Примечания: N — общая численность фитопланктона. Доли в общей численности различных представителей: 1 — Bacillariophyta; 2 — Cyanophyta; 3 — Chlorophyta; 4 — Chrysophyta; 5 — Dinophyta; 6 — Cryptophyta; 7 — Euglenophyta; 8 — вид *Aulacoseira islandica*.

Таблица 3. Показатели общей биомассы фитопланктона в апреле 2022 и 2023 гг. в разных районах Онежского озера

Table 3. Parameters of the total biomass of phytoplankton in April 2022 and 2023 in different areas of Lake Onego

Дата	Номер станции	Горизонт, м	B, мг/л	Доля в общей биомассе							
				1	2	3	4	5	6	7	8
14.04.2022	P2	1	0.26	82.3	4.7	3.8	0.2	8.8	0	0.4	58.8
		7.5	0.36	95.4	0	0.2	0	4.4	0	0	95.3
		15	0.38	90.7	0	9.3	0	0	0	0	82.8
		20	0.08	63.3	1.8	22.8	0	0	5.9	6.2	37.7
		24	0.06	85.1	9.4	3.0	0.6	0	0	2.0	84.3
20.04.2023	P_2	0.5	0.38	97.9	0.4	1.2	0.2	0	0.3	0	86.6
20.04.2023	C_3	0.5	0.44	91.5	0.3	0.1	0.1	7.7	0.2	0	58.5

Примечания: B — общая биомасса фитопланктона. Доли в общей биомассе различных представителей: 1 — Bacillariophyta; 2 — Cyanophyta; 3 — Chlorophyta; 4 — Chrysophyta; 5 — Dinophyta; 6 — Cryptophyta; 7 — Euglenophyta; 8 — вид *Aulacoseira islandica*.

Разные глубины фотической зоны в Петрозаводской губе в апреле 2022 и 2023 гг. отмечались на фоне практически одинаковой цветности воды (53–76 и 60–68 град; см. табл. 4), которая отражает концентрацию светопоглощающих гумусовых веществ. Следовательно, различие в глубине фотической зоны было связано с разной толщиной белого льда, ослабляющего проникновение света под лед.

Лимитирующая роль световых условий для развития фитопланктона в Петрозаводской губе зимой становится особенно очевидной в связи с повышенным содержанием биогенных веществ (средняя в столбе воды концентрация общего фосфора — 16.3–17.7 мкг/л, минерального фосфора — 5.3–6.7 мкг/л), соответствующих мезотрофному уровню продуктивности вод (см. табл. 4). Таким образом, в зимний период происходит смена лимитирующих факторов: развитие фитопланктона зависит от доступности света, а не от концентрации биогенных веществ.

На световые условия, важные для развития фитопланктона подо льдом, влияют процессы конвективного перемешивания, характерные для этапа подледного прогрева воды. Подледная конвекция имеет большое значение для функционирования диатомовых водорослей, оболочка клеток которых инкрустирована кремнием, вследствие чего они характеризуются отрицательной плавучестью. Восходящие потоки конвекции перемещают клетки диатомового фитопланктона из придонных слоев к поверхности воды, в узкую зону оптимальных световых условий, тем самым способствуя протеканию фотосинтетических процессов. Нисходящие потоки конвекции увлекают диатомовые водоросли в глубокие слои, куда свет не проникает, в результате чего процессы фотосинтеза затухают. Соотношение глубин фотической зоны и конвективного перемешанного слоя (ФЗ/КПС) отражает возможность

Таблица 4. Физико-химические условия и концентрация хлорофилла *a* в подледный период в разных районах Онежского озера в 2017–2023 гг. (* — данные приведены из статьи [20])

Table 4. Physical and chemical conditions and concentration of chlorophyll *a* during the under-ice period in different areas of Lake Onego in 2017–2023 (* — data according to [20])

Дата	Станция	K_w , м ⁻¹	Глубина КПС, м	Глубина ФЗ, м	ФЗ/КПС	Цветность, град Рт-Со шкалы	$P_{мин}$, мкг/л	$P_{общ}$, мкг/л	Chl, мкг/л
15–17.03.2017 (утренние измерения)	P_2*	2.74	13.39	1.69	0.13	70	6.1	16.3	0.43
15–17.03.2017 (дневные измерения)	P_2*	2.69	13.42	1.71	0.13	70	6.6	15.7	0.25
14.04.2022	P_2	3.24	15.0	1.8	0.11	69	5.3	16	0.41
20.04.2023	P_2	2.28	20	2.86	0.14	65	6.7	17.7	0.76
20.04.2023	C_3	1.07	40	5.47	0.14	28	2	9	0.47

Примечание: K_w — коэффициент ослабления света; КПС — конвективный перемешанный слой; ФЗ — фотическая зона; $P_{мин}$ — минеральный фосфор; $P_{общ}$ — общий фосфор; Chl — хлорофилл; показатели цветности воды, содержание фосфора и концентрация хлорофилла *a* усреднены для столба воды.

нахождения фитопланктона в благоприятных световых условиях [20]. Если фотическая зона окажется существенно меньше мощности перемешанного слоя, недостаток света для фитопланктона будет связан с малым временем его пребывания в верхних освещенных слоях воды.

В зимний период 2022 и 2023 гг. величина ФЗ/КПС в двух районах Онежского озера варьировала в пределах 0.11–0.14, т.е. мощность фотической зоны составляла всего 11–14% от глубины перемешанного слоя (см. табл. 4). При таких неблагоприятных световых условиях показатели развития фитопланктона и продукционный потенциал были очень низкими.

Петрозаводская губа Онежского озера испытывает влияние высокоцветных вод р. Шуи. Для анализа возможного ухудшения световых условий для развития фитопланктона в Петрозаводской губе было выполнено сравнение данных по цветности воды, содержанию общего и минерального фосфора, концентрациям хлорофилла *a*, полученным в марте 2017 г. [20], и в апреле 2022 и 2023 гг. (см. табл. 4). Применение непараметрического критерия Крускала–Уоллиса показало отсутствие значимых различий ($p > 0.05$) между сравниваемыми массивами данных.

Выполненные в апреле 2022 и 2023 гг. зимние исследования выявили ряд трудностей, связанных, главным образом, с малой доступностью центральных глубоководных участков Онежского озера в конце ледостава. Для проведения подледных исследований было использовано судно на воздушной подушке, а безопасность при проведении работ обеспечивалась сотрудниками Карельской республиканской поисково-спасательной службой (ГКУ Республики Карелия КРПСС). В последние годы чаще отмечаются случаи неполного замерзания Онежского озера. Так, в условиях аномально теплой зимы 2019–2020 гг. впервые за 65-летнюю историю наблюдений на большей части открытого плеса Онежского озера отсутствовал ледовый покров. В связи с этим в весенний период 2020 г. в открытом плесе и в заливах озера наблюдалось смещение гидрологических и фенологических фаз развития фитопланктона на более ранние сроки [3, 4]. Поскольку зимние условия влияют на физические, химические и биологические процессы в водоемах в весенний и летний сезоны, для учета последствий климатических изменений важной задачей является проведение междисциплинарных исследований зимнего состояния больших озер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным представителем фитопланктона в Онежском озере в зимний период был абсолютный доминант по численности и биомассе — вид *Aulacoseira islandica* из группы диатомовых водорослей. Анализ динамики физико-химических условий обитания фитопланктона подо льдом в Петрозаводской губе за период 2017–2023 гг. показал высокие уровни цветности воды, содержания органических и биогенных веществ, что сопровождалось весьма низким уровнем развития фитопланктона. Показатели зимнего фитопланктона Онежского озера были многократно меньше уровней его развития в другие сезоны года. Причиной весьма низкой продуктивности зимнего фитопланктона в Петрозаводской губе являются неблагоприятные световые условия, связанные с высокой цветностью воды из-за повышенной концентрации аллохтонных окрашенных органических веществ. В глубоководном центральном районе Онежского озера низкую потенциальную возможность развития фитопланктона определяют неблагоприятные световые условия, связанные с большими глубинами конвективного перемешанного слоя.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных проблем Севера Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр РАН”.

Химический анализ проб воды, отобранных в 2023 г., проведен за счет средств гранта РНФ 22-17-00193. Исследование выполнено с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вислянская И. Г.* Структура и динамика биомассы фитопланктона / Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. С. 146–158.
2. *Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России* / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2020. 260 с.
3. *Здоровеннова Г. Э., Здоровеннов Р. Э., Пальшин Н. И., Ефремова Т. В.* Сезонная и межгодовая изменчивость температуры воды в Петрозаводской губе Онежского озера. Известия Русского географического общества. 2023. Т. 155, вып. 3–4. С. 47–61.
<https://doi.org/10.31857/S0869607123030126>
4. *Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С.* Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-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. *Китаев С. П.* Основы гидробиологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.
6. *Кузнецов С. И., Дубинина Г. А.* Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.
7. *Лозовик П. А.* Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 583–592.
<https://doi.org/10.7868/S0321059613060072>
8. *Назарова Л. Е., Исакова К. В., Калинкина Н. М., Балаганский А. Ф.* Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Известия Русского географического общества. 2022. Т. 154, вып. 1. С. 28–36.
<https://doi.org/10.31857/S0869607122010086>
9. *Петрова Н. А.* Фитопланктон Онежского озера / Растительный мир Онежского озера. Под ред. И. М. Распопова. Л.: Наука, 1971. С. 88–130.
10. Федеральная служба РФ по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Сайт. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — мировой центр данных. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 15.05.2024)
11. *Федоров В. Д.* О методах изучения фитопланктона и его активности. М.: Изд-во МГУ, 1979. 167 с.
12. *Bouffard D., Zdorovenkov R. E., Zdorovenkova G. E., Pasche N., Wüest A., Terzhevik A. Y.* Ice-covered Lake Onega: effects of radiation on convection and internal waves // Hydrobiologia. 2016. Vol. 780. P. 21–36. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2915-3>
13. *Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M.* Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations //

Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2022. Vol. 17.

<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619>

14. Hampton S. E., Galloway A. W. E., Powers S. M., Ozersky T., Woo K. H., Batt R. D. et al. Ecology under lake ice // Ecology Letters. 2017. Vol. 20. № 1. P. 98–111. <https://doi.org/10.1111/ele.12699>

15. Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // Journal of Great Lakes Research. 2020. Vol. 46. P. 850–861. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>

16. Ozersky T., Bramburger A. J., Elgin A. K., Vanderploeg H. A., Wang J., Austin J. A. et al. The changing face of winter: Lessons and questions from the Laurentian Great Lakes // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. Vol. 126. № 6. <https://doi.org/10.1029/2021JG006247>

17. Savchuk O. P., Isaev A. V., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part II. Seasonal dynamics and spatial features; integral fluxes // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022. Vol. 15. № 2. P. 98–109. <https://doi.org/10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8>

18. Determination of photosynthetic pigments in sea waters. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. Paris, France, UNESCO. 1966. 69 p. <https://doi.org/10.25607/OBP-1940>

19. Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., O'Reilly C. M., Oliver S., Batt R. D. et al. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // Nature Climate Change. 2019. Vol. 9. P. 227–231. www.nature.com/natureclimatechange

20. Suarez E. L., Tiffay M.-C., Kalinkina N., Tchekryzheva T., Sharov A., Tekanova E. 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>

21. Tikkanen T. Kasviplanktonopas. 1986. Helsinki: Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy.

22. Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdrovennova G. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming // Nature communications. 2022. Vol. 13. № 4974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>

23. Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T., Efremenko N., Kulik N. Data on the chemical composition of Lake Onego water in 2019–2021 // Data in Brief. 2022. Vol. 42. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108079>

Development of Winter Phytoplankton of Lake Onego in Connection with Physical and Chemical Conditions of the Environment

N. M. Kalinkina^{1,*}, V. S. Smirnova^{1,**},
Yu. L. Slastina^{1,***}, R. E. Zdrovennov^{1,****},
G. E. Zdrovennova^{1,*****}, M. B. Zobkov^{1,*****},
E. V. Tekanova^{1,*****}, L. E. Nazarova^{1,*****}

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre RAS, Petrozavodsk, Russia

*E-mail: cerioda@mail.ru

**E-mail: smirnovvalera24@yandex.ru

***E-mail: jls@inbox.ru

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

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

*****E-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

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

*****E-mail: larisanazarov@yandex.ru

Abstract – The article represents development of winter phytoplankton in different areas of Lake Onego in relation to temperature, light conditions, water color, organics and nutrients concentrations. In April 2022 and 2023, right before the ice break-up, low phytoplankton development was observed. The coldwater species of diatoms *Aulacoseira islandica* was the main representative of winter phytoplankton. The total abundance, phytoplankton biomass and chlorophyll *a* concentration varied within the range of 0.13–0.71 million cells/l, 0.06–0.44 mg/l and 0.3–0.8 µg/l, respectively. As a result, Petrozavodsk Bay and the central deep-water part of Lake Onego in winter were characterized as low productivity. The low winter phytoplankton abundance in Petrozavodsk Bay is due to a high water color, which determines the shallow depth of the photic zone and, in addition, deep convective mixing of the water column. In the central part of Lake Onego, the limiting factors for the development of winter phytoplankton were unfavorable light conditions due to the large depth of the convectively mixed layer.

Keywords: Lake Onego, winter, meteorological conditions, water temperature, convection, euphotic zone, organic matter, nutrients, phytoplankton, chlorophyll *a*

REFERENCES

1. Vislyanskaya I. G. Struktura i dinamika biomassy fitoplanktona / Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 1999. S. 146–158.
2. Diagnostika i prognoz termogidrodinamiki i ekosistem velikih ozer Rossii / Pod red. N. N. Filatova. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN. 2020. 260 s.
3. Zdorovenнова G. E., Zdorovenнов R. E., Pal'shin N. I., Efremova T. V. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' temperatury vody v Petrozavodskoj gube Onezhskogo ozera. Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. 2023. T. 155, vyp. 3–4. S. 47–61.
<https://doi.org/10.31857/S0869607123030126>
4. Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Pal'shin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Zdorovenнов R. E., Smirnova V. S. Reakciya ekosistemy Onezhskogo ozera v vesenne-letnij period na anomal'no vysokuyu temperaturu vozduha zimy 2019/2020 godov // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2021. T. 85. № 6. S. 888–899. <https://doi.org/10.31857/S2587556621060078>
5. Kitaev S. P. Osnovy gidrobiologii dlya gidrobiologov i ihtologov. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2007. 395 s.
6. Kuznecov S. I., Dubinina G. A. Metody izucheniya vodnyh mikroorganizmov. M.: Nauka, 1989. 288 s.
7. Lozovik P. A. Geohimicheskaya klassifikaciya poverhnostnyh vod gumidnoj zony na osnove ih kislotno-osnovnogo ravnovesiya // Vodnye resursy. 2013. T. 40. № 6. S. 583–592.
<https://doi.org/10.7868/S0321059613060072>
8. Nazarova L. E., Isakova K. V., Kalinkina N. M., Balaganskij A. F. Vliyanie potepleniya klimata na zimnij stok reki SHuya i posledstviya dlya zoobentosa Onezhskogo ozera // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva. 2022. T. 154, vyp. 1. S. 28–36.
<https://doi.org/10.31857/S0869607122010086>
9. Petrova N. A. Fitoplankton Onezhskogo ozera / Rastitel'nyj mir Onezhskogo ozera. Pod red. I. M. Raspopova. L.: Nauka, 1971. S. 88–130.
10. Federal'naya sluzhba RF po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy. Sajt. Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut gidrometeorologicheskoy informacii — mirovoj centr dannyh. URL: <http://meteo.ru/data> (data obrashcheniya: 15.05.2024)
11. Fedorov V. D. O metodah izucheniya fitoplanktona i ego aktivnosti. M.: Izd-vo MGU, 1979. 167 s.

12. Bouffard D., Zdorovenov R. E., Zdorovenova G. E., Pasche N., Wüest A., Terzhevik A. Y. Ice-covered Lake Onega: effects of radiation on convection and internal waves // *Hydrobiologia*. 2016. Vol. 780. P. 21–36. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2915-3>
13. Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2022. Vol. 17. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619>
14. Hampton S. E., Galloway A. W. E., Powers S. M., Ozersky T., Woo K. H., Batt R. D. et al. Ecology under lake ice // *Ecology Letters*. 2017. Vol. 20. № 1. P. 98–111. <https://doi.org/10.1111/ele.12699>
15. Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // *Journal of Great Lakes Research*. 2020. Vol. 46. P. 850–861. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.02.008>
16. Ozersky T., Bramburger A. J., Elgin A. K., Vanderploeg H. A., Wang J., Austin J. A. et al. The changing face of winter: Lessons and questions from the Laurentian Great Lakes // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. Vol. 126. № 6. <https://doi.org/10.1029/2021JG006247>
17. Savchuk O. P., Isaev A. V., Filatov N. N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part II. Seasonal dynamics and spatial features; integral fluxes // *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022. Vol. 15. № 2. P. 98–109. <https://doi.org/10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8>
18. Determination of photosynthetic pigments in sea waters. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. Paris, France, UNESCO. 1966. 69 p. <https://doi.org/10.25607/OBP-1940>
19. Sharma S., Blagrove K., Magnuson J. J., O'Reilly C. M., Oliver S., Batt R. D. et al. Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world // *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 227–231. www.nature.com/natureclimatechange
20. Suarez E. L., Tiffay M.— C., Kalinkina N., Tchekryzheva T., Sharov A., Tekanova E. 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>
21. Tikkanen T. Kasviplanktonopas. 1986. Helsinki: Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy.
22. Weyhenmeyer G. A., Obertegger U., Rudebeck H., Jakobsson E., Jansen J., Zdorovenova G. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming // *Nature communications*. 2022. Vol. 13. № . 4974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>
23. [23] Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N., Efremova T., Efremenko N., Kulik N. Data on the chemical composition of Lake Onego water in 2019–2021 // *Data in Brief*. 2022. Vol. 42. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108079>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Калинкина Наталия Михайловна — автор для переписки

Руководитель лаборатории гидробиологии, ведущий научный сотрудник, Доктор биологических наук, Институт водных проблем Севера, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”, 185030, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50, ИВПС КарНЦ РАН. Карельское отделение РГО, состоит членом Общества с 01.01.2010 г., номер членского билета 9161–10.

e-mail: cerioda@mail.ru

тел.: 8 921 455-55-47

Kalinkina Nataliia Mikhailovna

Corresponding author, Dr.Sc., Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Hydrobiology, Leading Researcher, 185030, Petrozavodsk, A. Nevsky prospect, 50, NWPI KarRC RAS. Member of the Society since 01.01.2010. Karelian branch of the Russian Geographical Society. membership card number 9161-10.

e-mail: cerioda@mail.ru

тел.: 8 921 455-55-47

Смирнова Валерия Сергеевна

Младший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”.

e-mail: smirnovvalera24@yandex.ru

Smirnova Valeria Sergeevna

Junior researcher, Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences.

e-mail: smirnovvalera24@yandex.ru

Сластина Юлия Леонидовна

Младший научный сотрудник, Институт водных проблем Севера, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”.

e-mail: jls@inbox.ru

Slastina Yulia Leonidovna

Junior Researcher, Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences.

e-mail: jls@inbox.ru

Здоровеннов Роман Эдуардович

Старший научный сотрудник, кандидат географических наук, Институт водных проблем Севера, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”.

e-mail: romga74@gmail.com

Zdorovennov Roman Eduardovich

PhD, Senior Researcher, Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences.

e-mail: romga74@gmail.com

Здоровеннова Галина Эдуардовна

Руководитель лаборатории гидрофизики, старший научный сотрудник, кандидат географических наук, Институт водных проблем Севера, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”.

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Zdorovennova Galina Eduardovna

PhD, Head of the Laboratory of Hydrophysics, Senior Researcher, Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences.

e-mail: zdorovennova@gmail.com

Зобков Михаил Борисович

Руководитель лаборатории гидрохимии и гидрогеологии, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт водных проблем Севера, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”.

e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Zobkov Mikhail Borisovich

PhD, Head of the Laboratory of Hydrochemistry and Hydrogeology, Senior Researcher, Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences.

e-mail: ya-mikhailz@yandex.ru

Теканова Елена Валентиновна

Старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, Институт водных проблем Севера, Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН”.

e-mail: etekanova@mail.ru

Tekanova Elena Valentinovna

PhD, Senior Researcher, Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences.

e-mail: etekanova@mail.ru

Назарова Лариса Евгеньевна

Кандидат географических наук, Карельское отделение РГО, член Общества с 08.05.2008 г., номер членского билета 9158-10, на пенсии.

e-mail: larisazarov@yandex.ru

Nazarova Larisa Evgenievna,

PhD, Karelian branch of the Russian Geographical Society, a member of the Society since 05.08.2008, membership card number: 9158-10, retired.

e-mail: larisazarov@yandex.ru