

Оригинальная статья

УДК 574.583+574.21+574.34+574.633

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-4-404-419>

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И КАЧЕСТВА ВОДЫ ЧУДСКО-ПСКОВСКОГО ОЗЕРА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Т. В. Дрозденко ^{1✉}, М. В. Медянкина ², Т. К. Антал ¹

¹ Псковский государственный университет

Россия, 180000, г. Псков, пл. Ленина, д. 2

² Московский государственный университет технологий и управления

им. К. Г. Разумовского

Россия, 109004, г. Москва, ул. Земляной вал, д. 73

Поступила в редакцию 07.09.2023 г., после доработки 11.10.2023 г., принята 12.10.2023 г., опубликована 12.12.2023 г.

Аннотация. В настоящее время остро стоит проблема загрязнения гидросферы, следствием которого является падение устойчивости экосистем, разрушение сигнальных связей биоценозов, нарушение пищевых пирамид. В данной работе представлены результаты мониторинга современного состояния фитопланктонных сообществ и качества воды Чудско-Псковского озера – крупного трансграничного водоема, расположенного на северо-западе Псковской области. За вегетационный период 2022 г. в озере выявлен 221 таксон фитопланктона рангом ниже рода из 8 отделов. Средняя численность фитопланктона за все время исследования составляла 11.6 млн кл./л, средняя биомасса – 1.6 г/м³. Проведен эколого-географический анализ, согласно которому в озере преобладали широко распространенные пресноводные планктонные формы микроводорослей, предпочитающие стояче-текущие слабощелочные воды. Согласно индексу Сьеренсена – Чекановского степень общности видового состава планктонных альгоцианофлор Псковского и Чудского озер составляла 73.2%. Сапробиологический анализ показал, что воды исследуемой акватории в 2022 г. отнеслись к слабо загрязненным, II классу качества чистоты вод.

Ключевые слова: экологический мониторинг, биоиндикация, фитопланктон, численность, биомасса, сапробиальность, Чудско-Псковское озеро

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-24-00353) и частичной финансовой поддержке Псковского государственного университета (проект «Экологический мониторинг дельты реки Великой по структуре и физиологической активности фитопланктона и показателям качества воды»).

Соблюдение этических норм. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Для корреспонденции. Лаборатория комплексных экологических исследований Псковского государственного университета.

ORCID и e-mail адреса: Дрозденко Татьяна Викторовна: <https://orcid.org/0000-0002-5553-2296>, tboichuk@mail.ru; Медянкина Мария Владимировна: <https://orcid.org/0000-0002-9195-0399>, 79263841762@yandex.ru; Антал Тарас Корнелиевич: <https://orcid.org/0000-0002-9690-8034>, taras_an@mail.ru.

Для цитирования. Дрозденко Т. В., Медянкина М. В., Антал Т. К. Оценка показателей развития фитопланктона и качества воды Чудско-Псковского озера в современных условиях // Поволжский экологический журнал. 2023. № 4. С. 404 – 419. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-4-404-419>

ВВЕДЕНИЕ

Чудско-Псковское озеро расположено на границе между Эстонией и Псковской и Ленинградской областями России, является четвертым по площади после Ладожского, Онежского и озера Венерн (Швеция) и пятым по объему в Европе. Водоем состоит из различающихся по гидрологическим и гидрохимическим характеристикам, а также по трофическому уровню и составу гидробионтов частей: Чудского озера (площадь 2613 км²), Псковского озера (709 км²) и соединяющего их Теплого озера (236 км²) (Псковско-Чудское озеро, 2022). Площадь водного зеркала озера при среднем уровне воды составляет 3555 км², объем – 25 км³, средняя глубина – 7.1 м, наибольшая – 15.3 м. Чудско-Псковское озеро является нестратифицированным эвтрофным озером. Вода, особенно в южной части озера, очень богата биогенными веществами. Водоем отличается уникально высокой для озер умеренной зоны промысловой рыбопродуктивностью (30 – 40 кг/га). В озере водятся более 30 видов рыб. Макрофиты занимают 5 – 8% всей акватории (Псковско-Чудское озеро, 2012).

В настоящее время Чудско-Псковское озеро испытывает значительную антропогенную нагрузку, связанную со сбросом сточных вод на водосборе, а также за счет сельскохозяйственных объектов (Фрумин, Малышева, 2020). В результате развития промышленности на водосборе озеро подвергается значительному загрязнению тяжелыми металлами и детергентами (Румянцев и др., 2015).

В последние годы увеличились темпы эвтрофикации в Псковско-Чудском водоеме (Ястремский, 2016). Причиной этому является повышение содержания фосфора в акватории, а также изменение соотношения фосфора и азота, что влечет за собой «цветение», зарастание высшей водной растительностью, кислородное голодание и заморы рыбы (Псковско-Чудское озеро, 2022).

Среди организмов, населяющих водную среду, фитопланктону отводится особое значение как компоненту водных экосистем, активно участвующему в формировании качества воды. Планктонные водоросли являются первичным звеном в трофических цепях и быстро реагируют на любые изменения водной среды, изменяя свои структурные показатели. Индикаторные свойства фитопланктона определяются не только фактом нахождения или отсутствия определенных видов, но и степенью их количественного развития. Поэтому изучение таких структурных показателей, как видовой состав, численность и биомасса водорослей в водоеме имеют большое практическое значение (Дрозденко, Антал, 2021; Дрозденко, Волгушева, 2021; Дрозденко и др., 2022; Jakhar, 2013; Machado et al., 2023).

Сезонная динамика фитопланктона связана со сменой абиотических условий в годовом цикле, а также колебаниями гидрохимических показателей (Трифоновна, 1990). Изучая качественный и количественный состав фитопланктона водоема, можно установить основные изменения, происходящие в нем в течение биологи-

ческих сезонов года, а также проследить многолетнюю динамику водной экосистемы, обусловленную климатическими изменениями и антропогенной нагрузкой.

Целью статьи стало исследование параметров развития фитопланктона и оценка качества воды Чудско-Псковского озера в 2022 году.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования в Чудско-Псковском озере проводили в вегетационный период 2022 г. Гидробиологические пробы отбирали общепринятым способом 2-литровым батометром Паталаса на всем водном столбе 11 постоянных станций (Садчиков, 2003; ГОСТ 31861-2012, 2014) (рис. 1). Параллельно измерялись температура и pH воды в поверхностном (0.5 м) и придонном горизонтах.

Камеральная обработка проб фитопланктона осуществлялась общепринятым способом (Садчиков, 2003). Полученные пробы объемом 450 – 500 мл концентрировались осадочным методом до 10 мл с помощью сифона, затянутого несколькими слоями мельничного газа № 76.

Идентификация микроводорослей производилась в камере Нажотта (0.05 мл) с помощью микроскопа Carl Zeiss Axio Lab. A1 (Carl Zeiss, Германия), используя определители, указанные ранее (Дрозденко, Антал, 2021).

При выделении видовых таксонов водорослей придерживались системы международного сайта AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2022).

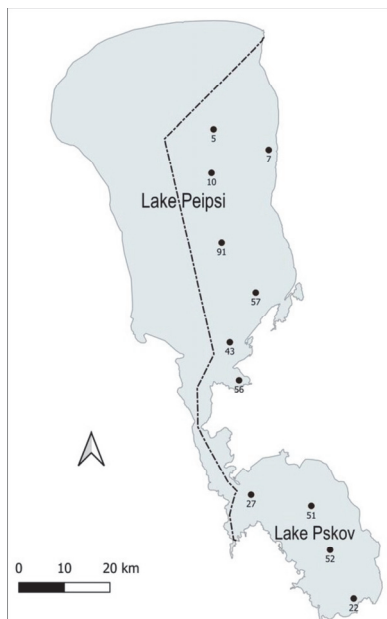


Рис. 1. Постоянные станции мониторинга в Чудско-Псковском озере

Fig. 1. Permanent monitoring stations in the Peipus-Pskov Lake

Для количественного анализа фитопланктона использовалась камера Нажотта объемом 0.05 см³. Пересчет клеток на литр производился по формуле (Садчиков, 2003):

$$N = K \times n \times \left(\frac{A}{a} \right) \times \left(\frac{1000}{V} \right),$$

где N – количество организмов в 1 л воды исследуемого водоема; K – коэффициент, показывающий во сколько раз объем счетной камеры меньше 1 см³; n – количество организмов, обнаруженных на просмотренных полосах счетной камеры; A – количество полос; a – количество полос, на которых производился подсчет водорослей; V – первоначальный объем отобранной пробы, см³; v – объем сгущенной пробы, см³.

Доминирующими видами считались микроводоросли, численность которых была больше 10% от общего количества фитопланктона.

Биомасса фитопланктона определялась методом подобия геометрических фигур (Радченко и др., 2010).

Анализ сходства таксономического состава фитопланктонных сообществ проводился с

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И КАЧЕСТВА ВОДЫ

использованием индекса Сьеренсена – Чекановского, который рассчитывался по формуле:

$$K_{ч-с} = \frac{2c}{a+b},$$

где a – число видов в одной альгоцианофлоре; b – число видов в другой альгоцианофлоре; c – число видов, общих для двух альгоцианофлор (Шмидт, 1980).

Для сапробиологического анализа использовался метод Пантле – Букк в модификации Сладечека (Sládeček, 1973):

$$S = \frac{\Sigma(s \times h)}{\Sigma h},$$

где S – индекс сапробности обследуемой станции; s – индикаторная значимость каждого вида, определяемая по специальным спискам сапробности; h – относительное значение обилия видов.

Для выделения экологических групп и уточнения эколого-географических характеристик водорослей использовались определители и данные из монографий (Барина и др., 2006; Судницына, 2012). При установлении класса качества воды озера использовалось руководство РД 52.24.309-2011 (2011).

Подготовительную обработку и анализ данных проводили в приложении Microsoft Office Excel 2010 (Microsoft Corp.), статистические расчеты выполнены с использованием программы STATISTICA 6.0 (Statsoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За вегетационный период 2022 г. температура воды в Псковском озере в поверхностном и придонном горизонтах была выше, чем в Чудском (табл. 1). Кислотность воды во все сезоны была слабощелочной с наиболее высокими значениями в летний период.

Таблица 1. Средние значения температуры и pH воды Чудско-Псковского озера, 2022 г.
Table 1. Average values of temperature and pH of the water in the Peipus-Pskov Lake, 2022

Показатель / Parameter	Псковское озеро / Pskov Lake		Чудское озеро / Peipsi Lake	
	Поверхность / Surface	Дно / Bottom	Поверхность / Surface	Дно / Bottom
Май / May				
$t, ^\circ\text{C}$	13.25±0.31	13.00±0.14	12.90±1.44	11.60±0.42
pH	8.47±0.22	8.49±0.20	8.49±0.07	8.32±0.10
Август / August				
$t, ^\circ\text{C}$	24.00±1.20	23.25±0.47	23.17±0.76	21.68±0.41
pH	9.29±0.37	9.12±0.27	8.82±0.22	8.43±0.12
Октябрь / October				
$t, ^\circ\text{C}$	10.23±0.29	10.00±0.24	7.60±0.51	7.52±0.53
pH	8.15±0.09	8.11±0.08	8.41±0.09	8.39±0.12

Качественный состав фитопланктона. За весь период исследований в акватории Чудско-Псковского озера был идентифицирован 221 видовой и внутривидовой таксон фитопланктона из 8 отделов: Bacillariophyta, Chlorophyta, Cyano-bacteria, Ochrophyta, Charophyta, Miozoa, Cryptophyta, Euglenozoa (рис. 2).

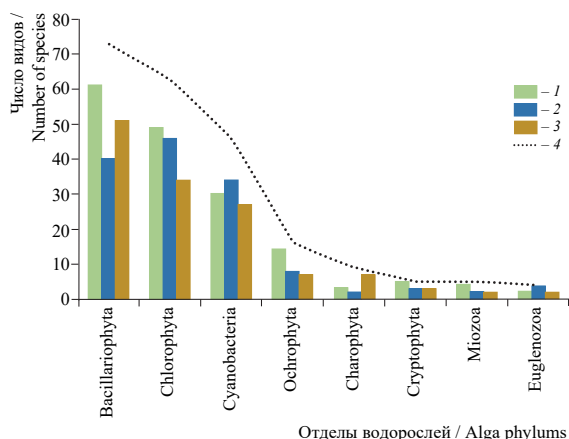


Рис. 2. Соотношение отделов микроводорослей в альгоцианофлоре Чудско-Псковского озера за вегетационный период 2022 г.: 1 – май, 2 – август, 3 – октябрь, 4 – всего видов

Fig. 2. Ratio of microalgae divisions in the algal flora of the Peipus-Pskov Lake for the 2022 growing season: 1 – May, 2 – August, 3 – October, 4 – total of the species

дился отдел Cyanobacteria, содержащий 20.8% видов (см. рис. 2). Больше всего видов было у родов *Aphanocapsa* Nägeli и *Microcystis* Kuetzing ex Lemmermann (по 5).

В Псковском озере за весь период исследования выявлено 168 видовых таксонов фитопланктона, в Чудском – 183. Планктонная альгоцианофлора в обеих акваториях характеризовалась как диатомово-хлорофитово-цианобактериальная. Согласно индексу Сьеренсена – Чекановского степень общности видового состава фитопланктонных сообществ Псковского и Чудского озер была средней и составляла 51.9%. Общим для обеих акваторий являлся 91 видовой таксон фитопланктона.

Число видовых таксонов фитопланктона в зависимости от станции и сезона исследования изменялось от 37 до 88.

В мае было зарегистрировано 168 таксонов микроводорослей рангом ниже рода (в Псковском озере – 128, в Чудском – 137) из 8 отделов (см. рис. 2). Количество видовых таксонов изменялось от 51 (ст. 7) до 88 (ст. 22). Согласно индексу Сьеренсена – Чекановского степень общности видового состава планктонных альгоцианофлор Псковского и Чудского озер была достаточно высокой и составляла 73.2%. Общими для обеих акваторий являлись 97 видовых таксонов фитопланктона.

Флористический комплекс весенней альгоцианофлоры составляли отдел Bacillariophyta, содержащий 61 видовой таксон (36.3% от общего количества видов), Chlorophyta – 49 видов (29.2%) и Cyanobacteria – 30 видов (17.9%). Наиболее представительными родами диатомовых водорослей были *Aulacoseira* (7 видов), *Fragilaria* (6), *Navicula* (5) и *Nitzschia* (4), зеленых – род *Desmodesmus* (7), цианобактерий – *Aphanocapsa* (4) и *Microcystis* (5 видов).

По представленности видами доминировал отдел Bacillariophyta, содержащий 33.0% видовых таксонов микроводорослей от общего видового богатства. Наиболее насыщенными родами были *Aulacoseira* Thwaites и *Navicula* Bory (по 7 видов), *Fragilaria* Lyngbye (6 видов) и *Nitzschia* Hassall (5 видов).

На втором месте располагался отдел Chlorophyta, включающий 28.5% видовых таксонов микроводорослей. Больше всего представителей содержали роды *Desmodesmus* (Chodat) An, Friedl & Hegewald (7 видов) и *Monoraphidium* Komarkova-Legnerova (4 вида).

На третьем месте по количеству видовых таксонов нахо-

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И КАЧЕСТВА ВОДЫ

На представителей охрофитовых водорослей приходилось 8.3% от общего числа видовых таксонов, на криптофитовых – 3.0%. Микроводоросли остальных отделов заметный вклад в видовое разнообразие альгоцианофлоры не вносили (см. рис. 2).

В августе на всей акватории обнаружено 139 видовых и внутривидовых таксонов фитопланктона (в Псковском озере – 106, в Чудском – 120) из 8 отделов (см. рис. 2). Количество видовых таксонов варьировало от 37 (ст. 5) до 72 (ст. 56). Степень сходства видового состава планктонных альгоцианофлор Псковского и Чудского озер была высокой и составляла 81.4% (92 общих видовых таксона).

Доминировал по видовому богатству отдел Chlorophyta, представленный 46 видовыми таксонами микроводорослей (33.1% от общего числа видов). Далее следовали отделы Bacillariophyta, содержащий 40 видов (около 28.8%), и Cyanobacteria – 34 вида (около 24.5%). Наиболее богатыми по числу видов были роды *Aulacoseira* (6), *Fragilaria* (4) из диатомовых, *Desmodesmus* (4 вида) из зеленых водорослей, роды *Aphanocapsa* (5 видов) и *Microcystis* (6) из цианобактерий.

Микроводоросли из отдела Ochrophyta были представлены 8 видовыми таксонами (5.8%). На долю остальных отделов в совокупности приходилось 7.9% (см. рис. 2).

В октябре было выявлено 133 видовых и внутривидовых таксона фитопланктона (в Псковском озере – 107, в Чудском – 111) также из 8 отделов (см. рис. 2). Число видовых таксонов колебалось в зависимости от станции исследования от 47 (ст. 5) до 67 (ст. 43).

По представленности видами превалировал отдел Bacillariophyta, в котором был зарегистрирован 51 видовой таксон фитопланктона (38.3%). По количеству видов доминировали роды *Aulacoseira* (6 видов), *Fragilaria*, *Navicula* и *Nitzschia* (по 5 видов).

Далее следовал отдел Chlorophyta, содержащий 34 таксона фитопланктона рангом ниже рода (25.6%). Наиболее насыщен видами был род *Desmodesmus* (4 вида).

На третьем месте располагались цианобактерии, содержащие 27 видовых таксонов микроорганизмов (20.3%) с максимальным количеством видов в родах *Aphanocapsa* (5) и *Microcystis* (6). Микроводоросли, принадлежащие к остальным отделам, заметный вклад в видовое богатство планктонной альгоцианофлоры не вносили (см. рис. 2).

Таким образом, флористический комплекс планктонной альгоцианофлоры в мае и октябре 2022 г. характеризовался как диатомово-хлорофитово-цианобактериальный, в августе – как хлорофитово-диатомово-цианобактериальный.

Согласно опубликованным и фондовым данным подобная картина наблюдалась в 2020 и 2021 гг. (Drozdhenko et al., 2021), за исключением лета 2021 г., когда по видовому богатству превалировал отдел Bacillariophyta.

Преобладание в таксономическом составе диатомовых, зеленых водорослей и цианобактерий характерно для большинства проточных водоемов севера бореальной зоны (Габышев, Габышева, 2009).

Видовой состав фитопланктона в большей степени зависит от физико-географических особенностей рассматриваемых станций, морфологии берега, характера и степени антропогенного воздействия. Наибольшее видовое богатство

фитопланктона наблюдалось на участках, находящихся в относительной близости к берегу, и подверженным антропогенному загрязнению в районе населенных пунктов. К таким станциям относится, например, ст. 22 в Псковском озере, расположенная близ дельты р. Великой, представленной системой низких, большей частью заболоченных островов (около 40), разделенных протоками. На этой станции и в весенний, и в летний периоды было зарегистрировано большее число видовых таксонов микроводорослей, по сравнению с другими станциями (88 и 68 видов соответственно). В Чудском озере максимальным видовым богатством характеризовались ст. 43 в мае (80 видовых таксонов) и ст. 56 в августе (72 видовых таксона). Данные станции, по сравнению с другими, ближе находятся к береговой линии, а также к соединяющему с Псковским Теплым озеру (см. рис. 1).

Полученное в результате исследований распределение видов водорослей по отделам характерно для такового в умеренных широтах: весной и летом наиболее представлен видами был отдел Bacillariophyta, летом – Chlorophyta.

Известно, что весной и осенью в озерах умеренных широт возникает природное явление – термобар, представляющее собой узкую зону, где происходит погружение воды, имеющей наибольшую плотность, от поверхности до дна. Термобар существенно влияет на экосистему озера, препятствуя горизонтальному перемешиванию между участками с разными параметрами воды (температурой, минерализацией, скоростью течения и т.д.) и формирует барьер между областями с благоприятными (с теплой водной массой) и менее благоприятными (с холодной водной массой) условиями для роста и развития фитопланктонных сообществ (Цыденов, 2016). Отмечено, что благодаря нисходящему течению термобар может аккумулировать в себе фитопланктон и другие организмы на поверхности с локальным максимумом популяции (Parfenova et al., 2000). Кроме того, диатомовые водоросли, несмотря на значительную скорость погружения воды внутри фронта термобара, имеют тенденцию оставаться в эвфотической зоне (Kelley, 1997), чем, возможно, и объясняется их превалирование по числу видов в весенний и осенний сезоны.

Количественный состав фитопланктона. Сезонная периодичность фитопланктона является составляющей его многолетней сукцессии, которая определяется, в первую очередь, сменой гидролого-климатических фаз (Корнева, 2015).

Весна. Численность фитопланктона весной изменялась от 723.3 тыс. кл./л на ст. 7 до 39.6 млн кл./л на ст. 22. Средняя численность фитопланктона по всей акватории составила 14.4 млн кл./л (в Псковском озере – 25.6 млн кл./л, в Чудском – 7.9 млн кл./л.) (табл. 2), что почти в 7 раз превышает значения, полученные в мае 2020 и 2021 гг. (Drozdenko et al., 2021).

Наибольший вклад в численность вносили цианобактерии (69.4 – 91.6%) с максимальным содержанием на ст. 22. Среди доминант в зависимости от станций отмечались представители родов *Aphanocapsa*, *Aphanothece*, *Woronichinia*, *Microcystis*, *Snowella*.

Биомасса весеннего фитопланктона варьировала от 164.8 мг/м³ на ст. 7 до 3.7 г/м³ на ст. 22, в среднем составляя 1.7 г/м³ (в Псковском озере – 2.9 г/м³, в Чудском – 923.4 мг/м³) (см. табл. 2), что в 2 раза выше полученных ранее значений (Drozdenko et al., 2021).

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И КАЧЕСТВА ВОДЫ

Таблица 2. Средние по станциям численность и биомасса фитопланктона Чудско-Псковского озера («итого» с учетом неидентифицированных жгутиковых), 2022 г.

Table 2. Station-average abundance and biomass of phytoplankton in the Peipus-Pskov Lake ("total" including unidentified flagellates), 2022

Сезон / Season	Отдел водорослей / Alga phylums								Итого / Total
	Cyanobacteria	Euglenozoa	Ochrophyta	Charophyta	Bacillariophyta	Miozoa	Cryptophyta	Chlorophyta	
Средняя численность, тыс. кл./л / Average abundance, thousand cells/L									
Май / May	12219.8±11077.2	4.2±6.6	122.9±156.1	4.0±5.8	782.3±663.9	3.0±4.5	132.2±159.5	930.7±712.3	14354.1±12375.8
Август / August	13408.3±18068.6	2.8±4.8	129.7±262.7	1.0±2.0	419.3±307.7	4.9±5.2	28.9±29.0	687.8±609.4	14685.3±18793.5
Октябрь / October	4601.3±1770.2	1.2±2.8	15.0±15.4	4.8±6.6	625.9±224.5	1.2±2.8	4.5±4.7	613.0±390.0	5845.8±2250.7
Средняя биомасса, мг/м³ / Average biomass, mg/m³									
Май / May	104.4±124.3	7.4±11.7	16.8±15.0	12.9±22.9	1050.3±830.6	5.1±8.2	163.3±232.2	242.7±170.7	1651.0±1257.9
Август / August	377.7±413.2	6.8±11.9	77.2±202.9	1.2±2.4	539.1±383.6	70.1±83.1	6.5±9.6	262.6±208.8	1344.4±650.7
Октябрь / October	94.5±58.8	2.2±4.9	3.4±3.9	11.9±21.8	1492.7±614.8	0.9±2.1	0.5±1.1	177.4±52.5	1783.7±698.4

Наибольшую роль в биомассе играли диатомовые водоросли (42.9 – 79.7%). В количественном отношении преобладали виды родов: *Aulacoseira*, *Cyclotella*. Биомасса зеленых водорослей достигала 38.3% на ст. 57 при более низких показателях на остальных станциях. Лидирующие по численности цианобактерии в биомассу вносили 1.3 – 11.6%.

Лето. Численность летнего фитопланктона колебалась от 960.0 тыс. кл./л на ст. 10 до 67.0 млн кл./л на ст. 56. Средняя численность микроводорослей составила 14.7 млн кл./л (в Псковском озере – 11.1 млн кл./л, в Чудском – 16.8 млн кл./л) (см. табл. 2), что, согласно опубликованным и фондовым данным, сопоставимо со значениями численности фитопланктона в 2020 г. и в 2 раза больше, чем в августе 2021 г. (Drozdhenko et al., 2021).

Максимальный вклад в численность, как и в весенний период, вносили цианобактерии. Их доля изменялось от 46.4% на ст. 7 до 95.0% на ст. 57. Максимальным развитием отличались микроводоросли родов *Aphanocapsa*, *Aphanothece*, *Microcystis*, как и в предыдущий год мониторинга. Представители отдела Bacillariophyta в общую численность в зависимости от станции вносили 11.2 – 48.3%, Chlorophyta – 1.2 – 14.5%.

Биомасса фитопланктона в исследованной акватории изменялась от 190.7 мг/м³ на ст. 10 до 2.8 г/м³ на ст. 56, в среднем составляя 1.3 г/м³ (в Псковском озере – 1.4 г/м³, в Чудском – 1.3 г/м³), что примерно в 3-4 раза ниже, чем в августе 2020 – 2021 гг. (Drozdhenko et al., 2021).

Значительный вклад в биомассу фитопланктона вносили диатомовые водоросли: 9.3 – 88.8%. На представителей отдела Chlorophyta в общей биомассе приходилось не более 20.0%, цианобактерий – 28.1%.

Осень. Численность осеннего фитопланктона в акватории изменялась от 3.5 млн кл./л на ст. 5 до 10.9 млн кл./л на ст. 22, в среднем составляя 5.9 млн кл./л (в Псковском озере – 8.0 млн кл./л, в Чудском – 4.6 млн кл./л) (см. табл. 2), что в 1.5 раза ниже, чем в предыдущие 2 года исследований (Drozdenco et al., 2021).

Как и в предыдущие сезоны, наибольший вклад в численность вносили цианобактерии (70.2 – 86.9%) с максимальным их содержанием на ст. 27. Количественными характеристиками отличались представители родов *Aphanocapsa*, *Aphanothece*, *Cyanocatena*, *Cyanodictyon*, *Microcystis*, *Woronichinia*. Содержание диатомовых и зеленых водорослей в общей численности не превышало 20.0 и 16.0% соответственно.

Биомасса фитопланктона в октябре изменялась от 0.6 г/м³ на ст. 57 до 2.9 г/м³ на ст. 52 при средней – 1.8 г/м³ (в Псковском озере – 2.4 г/м³, в Чудском – 1.4 г/м³) (см. табл. 2), что в 1.5 раза ниже, чем в 2020 г. и сопоставимо с данными 2021 г. (Drozdenco et al., 2021).

Основной вклад в биомассу осенней альгоцианофлоры озера вносили диатомовые водоросли: 76.8 – 90.3% в зависимости от станции исследования. Наиболее яркую роль играли виды родов *Aulacoseira*, *Cyclotella*, а также некоторые крупноклеточные виды из родов *Cumatopleura*, *Gyrosigma*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Iconella*.

Таким образом, расчеты количественных показателей за весь вегетационный период 2022 г. показали, что средняя численность фитопланктона составила 11.6 млн кл./л, что в 1.2 раза больше значений, полученных в 2020 г. и почти в 2 раза выше прошлогодних значений. Такая разница объясняется бурным развитием мелкоклеточных цианобактерий в 2022 г. Средняя биомасса фитопланктона в 2022 г. по всей акватории составила 1.6 г/м³, что в 1.5 раза ниже, чем в 2020 – 2021 гг., за счет большего содержания мелкоклеточных форм водорослей.

Известно, что сезонная динамика фитопланктона водоемов умеренной зоны характеризуется, как правило, тремя пиками биомассы: весенним, летним и осенним. Развитие фитопланктона в весенний и осенний сезоны чаще всего определено диатомовыми водорослями. Летом, наряду с диатомовыми, увеличивается доля зеленых водорослей, а также наблюдается повышение активности цианопрокариот и золотистых (Корнева, 2015). Осенью планктонная альгоцианофлора снова характеризуется превалированием представителей отдела Bacillariophyta (Трифонов, 1990).

Так, согласно полученным результатам, вклад диатомовых в общую биомассу был максимален весной и осенью – 64.8 и 83.7% соответственно. Летом наблюдалось незначительное снижение диатомовых в общей биомассе до 40.1% и увеличение роли зеленых до 19.5% (в мае и октябре вклад зеленых в биомассу был 14.7 и 9.9% соответственно). У цианобактерий пик развития приходился на летний сезон – до 28.1% от общей биомассы, а весной и осенью их содержание было незначительным: 6.3 и 5.3% соответственно.

Таким образом, наблюдаемая годовая динамика фитопланктона является характерной для водоемов умеренной зоны.

Эколого-географический анализ. Согласно экологической характеристике, по отношению к местообитанию в Чудско-Псковском озере в 2022 г. группа планктонных водорослей насчитывала 51.5% от общего числа микроводорослей.

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И КАЧЕСТВА ВОДЫ

На группу планктонно-бентосных и донных организмов, представленных в основном диатомовыми водорослями, приходилось 27.5 и 18.3% соответственно. Обитатели обрастаний составляли 2.8%.

По отношению к галобности в планктонной альгоцианофлоре озера более половины организмов являлись индифферентами (50.5% от общего числа). На долю галофилов приходилось 9.6%, галофобов – 2.8%, олигогалобов – 2.8%. Единично встречен мезаголоб – диатомовая водоросль *Eucosconeis flexella* (Kützing) F. Meister. У трети обнаруженных микроводорослей данных по отношению к солености не имелось.

По отношению к pH у большей части водорослей информации не было (67.0%). На группу алкалифилов приходилось 20.2%, индифферентов – 8.3%, ацидофилов – 2.8%, алкалибионтов – 1.8%.

Стояче-текучие воды предпочитали 27.5% микроводорослей, стоячие – 5.1%, текучие – 0.5%. Информации по отношению к реофильности не было у 67.0% обнаруженных видов.

Географический анализ фитопланктона Чудско-Псковского озера показал, что большинство водорослей являлись космополитами (56.8% от общего числа). Бореляльные виды составляли 6.4%, голарктические – 3.2%, арктоальпийские – 2.3%, циркумбореальные и арктические – по 0.5%. Данные по распространению не имели 30.3% микроводорослей.

В целом по эколого-географической характеристике альгоцианофлору Чудско-Псковского озера можно отнести к типично умеренной, свойственной большинству озер балтийского типа.

Сапробиологический анализ. Для определения уровня органического загрязнения и степени антропогенной нагрузки на биогеоценозы Чудско-Псковского озера был проведен сапробиологический анализ. Большинство микроводорослей являлись бета-мезосапробионтами. Значения индексов сапробности по Пантле – Букк варьировали от 1.63 в мае на ст. 57 до 2.21 в августе на ст. 9 (табл. 3). Среднее значение индекса сапробности за весь вегетационный период 2022 г. составило 1.91. Это позволяет отнести воды озера к бета-мезосапробной зоне самоочищения, II классу качества чистоты вод, что в целом сопоставимо с исследованиями прошлых лет (Drozdzenko et al., 2021).

Таблица 3. Значения индекса сапробности Чудского-Псковского озера в 2022 г.

Table 3. Values of the saprobity index of the Peipus-Pskov Lake in 2022

Станции / Station	Месяц / Month		
	Май / May	Август / August	Октябрь / October
1	2	3	4
Псковское озеро / Pskov Lake			
22	1.80	1.80	1.97
52	1.96	2.06	1.99
51	1.87	1.91	1.92
27	1.98	1.82	1.97
Среднее / Average	1.90±0.07	1.90±0.10	1.96±0.03

Окончание табл. 3
Table 3. Continuation

1	2	3	4
Чудское озеро / Peipsi Lake			
56	2.06	1.70	2.04
43	1.84	1.84	1.83
57	1.63	1.80	1.73
91	1.89	2.21	1.76
10	1.81	1.94	1.77
5	1.88	2.05	1.85
7	1.97	2.17	1.87
Среднее / Average	1.87±0.13	1.96±0.18	1.84±0.10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидробиологический мониторинг позволяет оценить современное состояние водоемов и их возможную трансформацию. Водные организмы одни из первых реагируют на антропогенное воздействие, в связи с чем выступают надежными индикаторами качества среды.

В водных экосистемах ведущая роль в продуцировании первичного органического вещества отводится фитопланктону. От функционирования водорослей зависит жизнедеятельность остальных звеньев трофических цепей водоема. Фитопланктон представляет собой чувствительный и надежный индикатор водных экосистем, благодаря которому можно диагностировать загрязнение водной среды еще до выявления его химическими методами.

Согласно результатам настоящего исследования в мае, августе и октябре 2022 г. в Чудско-Псковском озере был зарегистрирован 221 таксон фитопланктона рангом ниже рода из 8 отделов: Bacillariophyta, Chlorophyta, Cyanobacteria, Ochrophyta, Charophyta, Euglenozoa, Cryptophyta и Miozoa. Флористический комплекс планктонной альгоцианофлоры составляли диатомовые, зеленые водоросли и цианобактерии.

В акватории озера преобладали широко распространенные пресноводные планктонные формы микроводорослей, предпочитающие стояче-текущие слабощелочные воды.

Средняя численность фитопланктона озера за весь период исследования составляла 11.6 млн кл./л, средняя биомасса – 1.6 г/м³.

Сапробиологический анализ показал, что воды исследуемой акватории в 2022 г. относились к слабо загрязненным, II классу качества чистоты вод.

Если проследить динамику общей биомассы фитопланктона, используя данные более ранних исследований, то наблюдается следующее. Средняя биомасса фитопланктона за период 1970 – 2010 гг. в мае составляла 8.70 г/м³ (0.87 – 28.22 г/м³), в августе – 15.85 г/м³ (1.36 – 40.05 г/м³), а в октябре – 13.95 (3.49 – 67.77 г/м³) (Ястремский, 2016). В результате исследований 2012 – 2015 гг. установлено, что значение биомассы фитопланктона в Чудском озере составляло 2.1 г/м³, в Псковском – 5.4 г/м³ (Шаров, Андреева, 2016).

Таким образом, наблюдается общая тенденция к снижению биомассы фитопланктона в Чудско-Псковском озере, что может быть связано с изменениями рьяда

гидрохимических и гидрологических показателей, уровня воды в водоеме, а также значительным уменьшением антропогенной нагрузки в связи с закрытием промышленных предприятий в 90-х гг. XX в.

Результаты настоящего исследования вносят существенный вклад в исследование структурной организации и особенностей функционирования фитопланктона Чудско-Псковского озера, выявляют устойчивость фитопланктонных сообществ в условиях меняющихся абиотических условий, эвтрофирования и загрязнения природных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барина С. С., Медведева А. Л., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio Publ., 2006. 498 с.

Габышев В. А., Габышева О. И. Водоросли планктона реки Анабар // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 324. С. 354 – 358.

ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2014. 63 с.

Дрозденко Т. В., Антал Т. К. Оценка качества воды устья реки Великой по показателям фитопланктона // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Рыбное хозяйство. 2021. № 1. С. 51 – 60. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2021-1-51-60>

Дрозденко Т. В., Волгушева А. А. Фитопланктон и качество воды озера Кучане (Псковская область, Россия) // Поволжский экологический журнал. 2021. № 3. С. 251 – 261. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-3-251-261>

Дрозденко Т. В., Александрова С. М., Антал Т. К., Тихомирова Е. И. Структурные показатели и токсичные виды цианобактерий Псковского озера // Поволжский экологический журнал. 2022. № 4. С. 388 – 399. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-388-399>

Корнева Л. Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.

Псковско-Чудское озеро / науч. ред. Т. Тимм, А. Раукас, Ю. Хаберман, А. Яани. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. 490 с.

Псковско-Чудское озеро // Рыбы и озера Псковской области. Псков, 2022. URL: http://pskovfish.ru/ozero-sp/ozera_pskovsko_chydscoe.htm (дата обращения: 15.04.2023).

Радченко И. Г., Капков В. И., Федоров В. Д. Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона: учебно-методическое пособие для студентов биологических специальностей университетов. М.: Мордвинцев, 2010. 60 с.

РД 52.24.309-2011. Руководящий документ. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2011. 67 с.

Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015. 389 с.

Садчиков А. П. Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство. М.: Университет и школа, 2003. 157 с.

Судницина Д. Н. Альгофлора водоемов Псковской области. Псков: ЛОГОС Плюс, 2012. 224 с.

Трифонов И. С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 184 с.

Фрумин Г. Т., Малышева Н. А. Динамика качества воды Псковского озера (2000 – 2018 гг.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 4. С. 32 – 39. <https://doi.org/10.17076/lim1133>

Цыденов Б. О. Численное воспроизведение гидробиологических процессов в период развития весеннего термобара на основе модели «нутриент – фитопланктон – зоопланктон» // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2016. № 3 (41). С. 86 – 97. <https://doi.org/10.17223/19988621/41/9>

Шаров А. Н., Андреева И. В. Пространственно-временная организация фитопланктона Чудско-Псковского озера // Принципы экологии. 2016. Т. 5, № 5. С. 71 – 80. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2016.5502>

Шмидт В. М. Статистические методы в сравнительной флористике. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1980. 176 с.

Ястремский В. В. Структура и продуктивность фитопланктона Чудско-Псковского озера. СПб.: ГосНИОРХ, 2016. 296 с.

Drozdenko T., Fedorov S., Kek I. Seasonal dynamics of phytoplankton and some hydrochemical indicators of the Peipsi-Pskov Lake // Environment. Technology. Resources: Proceeding of the 13th International Scientific and Practical Conference. Rezekne: Rezekne Academy of Technologies, 2021. Vol. 1. P. 50 – 54. <https://doi.org/10.17770/etr2021vol1.6557>

Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. Galway: National University of Ireland, 2022. Available at: <http://www.algaebase.org> (accessed December 22, 2022).

Jakhar P. Role of phytoplankton and zooplankton as health indicators of aquatic ecosystem: A review // International Journal of Innovative Research and Studies. 2013. Vol. 2. P. 389 – 500.

Kelley D. E. Convection in ice-covered lakes: Effects on algal suspension // Journal of Plankton Research. 1997. Vol. 19, iss. 12. P. 1859 – 1880. <https://doi.org/10.1093/plankt/19.12.1859>

Machado K. B., Andrade A. T., Almeida M. F., Nabout J. C. Systematic mapping of phytoplankton literature about global climate change: Revealing temporal trends in research // Hydrobiologia. 2023. Vol. 850, iss. 1. P. 167 – 182. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-05052-y>

Parfenova V. V., Shimaraev M. N., Kostornova T. Y., Domysheva V. M., Levin L. A., Dryuker V. V., Zhdanov A. A., Gnatovskii R. Y., Tsekhanovskii V. V., Logacheva N. F. On the vertical distribution of microorganisms in Lake Baikal during spring deep-water renewal // Microbiology. 2000. Vol. 69, iss. 3. P. 357 – 363. <https://doi.org/10.1007/BF02756748>

Sládeček V. System of Water Quality from the Biological Point of View // Achieves für Hydrobiologie – Beiheft Ergebnisse der Limnologie. 1973. Bd. 7, № 1. S. 1 – 218.

Estimation of indicators of phytoplankton development and water quality of the Peipus-Pskov Lake in modern conditions

T. V. Drozdenko ^{1✉}, M. V. Medyankina ², T. K. Antal ¹

¹ Pskov State University

2 Lenin Square, Pskov 180000, Russia

² K. G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management

73 Zemlyanoy val St., Moscow 109004, Russia

Received: September 7, 2023 / revised: October 11, 2023 / accepted: October 12, 2023 / published: December 12, 2023

Abstract. Currently, there is an acute problem of pollution of the hydrosphere, which results in a drop in the stability of ecosystems, destruction of the signaling links of biocenoses, and food pyramid violation. This paper presents the results of our monitoring the current state of phytoplankton communities and water quality of the Peipus-Pskov Lake, a large transboundary reservoir located in the northwest of the Pskov region. During the growing season of 2022, 221 phytoplankton taxa with ranks below the genus from 8 divisions were identified. The average abundance of phytoplankton over the entire period of our study was 11.6 million cells/L, the average biomass was 1.6 g/m³. An ecological and geographical analysis was carried out, according to which widespread freshwater planktonic forms of microalgae predominated in the lake, preferring stagnant-flowing weakly alkaline waters. According to the Sjörensén–Chekanovsky index, the degree of commonality of the species composition of the planktonic algal floras in the Pskov and Peipsi Lakes was 73.2%. Saprobiological analysis showed that the waters of the study area in 2022 were slightly polluted (class II of water quality).

Keywords: ecological monitoring, bioindication, phytoplankton, abundance, biomass, saprobity, Peipus-Pskov Lake

Funding. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 23-24-00353) and partial financial support of Pskov State University (Project “Ecological monitoring of the Velikaya River delta by the structure and physiological activity of phytoplankton and water quality indicators”).

Ethics approval and consent to participate: This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Drozdenko T. V., Medyankina M. V., Antal T. K. Estimation of indicators of phytoplankton development and water quality of the Peipus-Pskov Lake in modern conditions. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 4, pp. 404–419 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-4-404-419>

✉ *Corresponding author.* Laboratory of Integrated Environmental Research, Pskov State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Tatiana V. Drozdenko: <https://orcid.org/0000-0002-5553-2296>, tboichuk@mail.ru; Mariya V. Medyankina: <https://orcid.org/0000-0002-9195-0399>, 79263841762@yandex.ru; Taras K. Antal: <https://orcid.org/0000-0002-9690-8034>, taras_an@mail.ru.

REFERENCES

- Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V. *Biodiversity of Algae-indicators of the Environment*. Tel Aviv, Pilies Studio Publ., 2006. 498 p. (in Russian).
- Gabyshhev V. A., Gabyshcheva O. I. Plankton algae of the Anabar river. *Tomsk State University*, 2009, no. 324, pp. 354–358 (in Russian).
- GOST 31861-2012. *Water. General Requirements for Sampling*. Moscow, Standardinform, 2014. 63 p. (in Russian).
- Drozdenko T. V., Antal T. K. Evaluating water quality in Velikaya River by using phytoplankton characteristics. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*, 2021, no. 1, pp. 51–60 (in Russian). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2021-1-51-60>
- Drozdenko T. V., Volgusheva A. A. Phytoplankton and water quality of Lake Kuchane (Pskov region, Russia). *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2021, no. 3, pp. 251–261 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2021-3-251-261>
- Drozdenko T. V., Aleksandrova S. M., Antal T. K., Tikhomirova E. I. Structural indicators and toxic species of cyanobacteria of Pskov Lake. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2022, no. 4, pp. 388–399 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-4-388-399>
- Korneva L. G. *Phytoplankton of Volga River Basin Reservoirs*. Kostroma, Kostroma Print House, 2015. 284 p. (in Russian).
- Timm T., Raukas A., Haberman Ju., Jaani A., eds. *Pskov-Peipsi Lake*. Tartu, Eesti Loodusfoto, 2012. 490 p. (in Russian).
- Pskov-Peipsi Lake. In: *Ryby i ozero Pskovskoi oblasti* [Fish and Lakes of the Pskov Region]. Pskov, 2022. Available at: http://pskovfish.ru/ozero-sp/ozera_pskovsko_chyidskoe.htm (accessed April 15, 2023).
- Radchenko I. G., Kapkov V. I., Fedorov V. D. *Prakticheskoe rukovodstvo po sboru i analizu prob morskogo fitoplanktona: uchebno-metodicheskoe posobie dlia studentov biologicheskikh spetsial'nostei universitetov* [Practical Guide to Collection and Analysis of Marine Phytoplankton Samples: Textbook for Students of Biological Specialties of Universities]. Moscow, Mordvintsev, 2010. 60 p. (in Russian).
- RD 52.24.309-2011. *Guiding Document. Organization and Conduct of Regime Observations of the Condition and Pollution of Surface Waters of Land*. Rostov-on-Don, Roshydromet, 2011. 67 p. (in Russian).
- Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. *Ozera evropeiskoi chasti Rossii* [Lakes of the European part of Russia]. Saint Petersburg, LEMA, 2015. 389 p. (in Russian).
- Sadchikov A. P. *Metody izucheniia presnovodnogo fitoplanktona: metodicheskoe rukovodstvo* [Methods for Studying Freshwater Phytoplankton: A Methodological Guide]. Moscow, Universitet i shkola, 2003. 157 p. (in Russian).
- Sudnitsyna D. N. *Al'goflora vodoemov Pskovskoi oblasti* [Algoflora of Water Bodies of the Pskov Oblast]. Pskov, LOGOS Plus, 2012. 224 p. (in Russian).
- Trifonova I. S. *Ekologiya i suksessiya ozernogo fitoplanktona* [Ecology and Succession of Lake Phytoplankton]. Leningrad, Nauka, 1990. 184 p. (in Russian).
- Frumin G. T., Malysheva N. A. Water quality changes in lake Pskovskoe (2000–2018). *Transactions of the Karelian Research Centre RAS*, 2020, no. 4, pp. 32–39 (in Russian). <https://doi.org/10.17076/lim1133>
- Tsydenov B. O. Numerical simulation of hydrobiological processes during the spring thermal bar on the basis of the nutrient phytoplankton–zooplankton model. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2016, no. 3(41), pp. 86 – 97 (in Russian). <https://doi.org/10.17223/19988621/41/9>
- Sharov A. N., Andreeva I. V. Spatio-temporal organization of phytoplankton in Peipsi Lake. *Principy ekologii*, 2016, vol. 5, no. 5, pp. 71–80 (in Russian). <https://doi.org/10.15393/j1.art.2016.5502>

Shmidt V. M. *Statisticheskie metody v sravnitel'noi floristike* [Statistical Methods in Comparative Floristry]. Leningrad, Leningrad State University Publ., 1980. 176 p. (in Russian).

Yastremsky V. V. *Struktura i produktivnost' fitoplanktona Chudsko-Pskovskogo ozera* [Structure and Productivity of Phytoplankton of Lake Peipus-Pskov]. Saint Petersburg, State Research Institute of Lake and River Fishery Publ., 2016. 296 p. (in Russian).

Drozdenco T., Fedorov S., Kek I. Seasonal dynamics of phytoplankton and some hydrochemical indicators of the Peipsi-Pskov Lake. *Environment. Technology. Resources: Proceeding of the 13th International Scientific and Practical Conference*. Rezekne, Rezekne Academy of Technologies, 2021, vol. 1, pp. 50–54. <https://doi.org/10.17770/etr2021vol1.6557>

Guiry M. D., Guiry G. M. *AlgaeBase*. Galway, National University of Ireland, 2022. Available at: <http://www.algaebase.org> (accessed December 22, 2022).

Jakhar P. Role of phytoplankton and zooplankton as health indicators of aquatic ecosystem: A review. *International Journal of Innovative Research and Studies*, 2013, vol. 2, pp. 389–500.

Kelley D. E. Convection in ice-covered lakes: Effects on algal suspension. *Journal of Plankton Research*, 1997, vol. 19, iss. 12, pp. 1859–1880. <https://doi.org/10.1093/plankt/19.12.1859>

Machado K. B., Andrade A. T., Almeida M. F., Nabout J. C. Systematic mapping of phytoplankton literature about global climate change: Revealing temporal trends in research. *Hydrobiologia*, 2023, vol. 850, iss. 1, pp. 167–182. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-05052-y>

Parfenova V. V., Shimaraev M. N., Kostornova T. Y., Domyшева V. M., Levin L. A., Dryukker V. V., Zhdanov A. A., Gnatovskii R. Y., Tsekhanovskii V. V., Logacheva N. F. On the vertical distribution of microorganisms in Lake Baikal during spring deep-water renewal. *Microbiology*, 2000, vol. 69, iss. 3, pp. 357–363. <https://doi.org/10.1007/BF02756748>

Sládeček V. System of Water Quality from the Biological Point of View. *Achieves für Hydrobiologie – Beiheft Ergebnisse der Limnologie*, 1973, Bd. 7, no. 1, S. 1–218.