

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 581.526.325:502.51
doi: 10.17223/19988591/66/10

Состав и структура фитопланктона Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища (Россия)

Полина Геннадьевна Беляева¹

¹ Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН,
филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия,
<https://orcid.org/0000-0001-6741-0424>, belyaeva@psu.ru

Аннотация. По материалам исследований фитопланктона Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища в июле 2020 и 2022 гг. изучены его таксономический состав, эколого-географическая структура и количественные показатели. Идентифицировано 267 видовых и внутривидовых таксонов водорослей из 9 отделов, основу видового богатства создают диатомовые, зеленые, золотистые водоросли и цианопрокариоты. По всей акватории наблюдается массовое развитие безгетероцистных цианопрокариот *Aphanocapsa holsatica*, *A. inserta*, *Anathece clathrata*, *Planktolynghya limnetica*, *Aphanothece bachmannii*. Трофический статус Сылвенско-Чусовского плеса по составу структурообразующих видов и уровню биомассы определен как мезотрофный (средняя биомасса 2,68 мг/л). К основным изменениям фитопланктона относится значительное возрастание таксономического разнообразия золотистых водорослей, а также усиление ценотической роли дизазототрофных цианопрокариот и динофитовых водорослей, что свидетельствует о прогрессирующей эвтрофикации вод Сылвенско-Чусовского плеса при совместном влиянии антропогенных факторов и потепления климата.

Ключевые слова: фитопланктон, видовой состав, эколого-географическая характеристика, структура сообществ, доминирующий комплекс, трофический статус, Сылвенско-Чусовской плес, Камское водохранилище

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках государственного задания Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН № 124020500028-4.

Для цитирования: Беляева П.Г. Состав и структура фитопланктона Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища (Россия) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2024. № 66. С. 193–212. doi: 10.17223/19988591/66/10

Composition and structure of phytoplankton in the Sylvensko-Chusovsky reach Kama Reservoir (Russia)

Polina G. Belyaeva¹

¹ Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, UB RAS, Perm, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0001-6741-0424>, belyaeva@psu.ru

Summary. Based on the materials from studies of phytoplankton in the Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama Reservoir in July 2020 and 2022, its taxonomic composition, ecological-geographical structure and quantitative indicators were studied. The large marginal Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama Reservoir is formed by the confluence of the Sylva and Chusovaya rivers and includes two districts and three sections (See Fig. 1). The mineralization of water throughout the reach varies significantly, from 225 to 1000 mgL⁻¹, which is associated with the influx of river water. In the Sylva River, the average mineralization values in summer are significantly higher (650 mgL⁻¹) than those of the Chusovaya River (250 mgL⁻¹). Precipitation and surface inflow volumes in the study area (July 2020 and 2022) were below long-term averages. The years of research varied significantly in temperature regime: the water temperature of the Sylvensko-Chusovsky reach in 2020 was $30.3 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$, in 2022 – $20.3 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$.

As a result of the study, 267 species and intraspecific taxa of algae from 9 departments were identified in the phytoplankton composition of the Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama Reservoir. The basis of the species richness was formed by diatoms (36.0%), green (28.5%), golden (12.5%) algae, and cyanoprokaryotes (11.6%); the share of other algae departments totaled 11% (See Table 1). The species composition of phytoplankton differs in various parts of the reach, which is associated with the flow of river waters from the Sylva and Chusovaya rivers into the bays; the degree of floristic similarity according to the Sørensen-Chekanovsky coefficients is low and ranges from 0.41 to 0.68 (See Fig. 2). As a result of the carried-out work, the floristic list of algae of the Sylvensky Bay was replenished by 41%, previously numbering 69 species and varieties from 5 departments (See Fig. 3). In the ecological and geographical aspect, the algal flora of plankton is represented by typically planktonic species, widespread in water bodies of the globe, indifferent to water salinity, living only in fresh water bodies and preferring neutral waters (See Table 2). In Sylvensky Bay, the ecological structure of algalenoses retained its proportions from 2004 to 2022.

During the summer low-water period of algal flora, the most significant contribution is made by cyanoprokaryotes, which appear with diatoms and green sea waves (See Fig. 4). Quantitative indicators of phytoplankton development varied significantly: abundance from 0.9 to 85.0 million cellsL⁻¹, biomass from 0.39 to 13.02 mgL⁻¹. Differences in the temperature regime during the years of the study determined the level of phytoplankton development; in 2022, the abundance and biomass values were three times higher compared to the abnormally hot 2020 (See Table 3). Throughout the entire water area, the dominant complex in number is represented mainly by species indicators of anthropogenic eutrophication (*Aphanizomenon flos-aquae*, *Aphanocapsa holsatica*, *Aulacoseira granulata*, *Stephanodiscus binderanus*) and there is a massive development of non-heterocyst cyanoprokaryotes (*Aphanocapsa holsatica*, *A. inserta*, *Anathece clathrata*, *Planktolingbya limnetica*, *A. phanothece bachmannii*). Dinophyte algae (*Apocathium aciculiferum*, *Peridinium cinctum*, *P. willei*, *Peridinium* sp. and *Gymnodinium* sp.) played a significant role in the composition of dominant species by biomass, along with diatoms (See Table 4). As a result of the development of small-sized algal species, phytoplankton abundance values have increased more than 20-fold from 2004 to the present, while phytoplankton biomass has increased only twofold.

The Shannon species diversity index values (2.96-5.02) indicate a complex structure and high biodiversity of phytoplankton. Higher index values were characteristic of riparian areas in 2022. Simpson's indices, reflecting the degree of expression of dominance of certain species, vary from 0.04 to 0.36 in the Sylvensko-Chusovsky Bay. The decrease of the index in the Chusovsky Bay (0.15 ± 0.03) is associated with a higher diversity of phytoplankton compared to the Sylvensky Bay (0.23 ± 0.05).

Based on the composition of structure-forming species and the level of biomass, the trophic status of the Sylvensko-Chusovsky reach is determined as mesotrophic. Since the distribution of phytoplankton across the water area is uneven, the trophic state was assessed from β -oligotrophic in the Sylvensko-Chusovsky area to mesotrophic in the bays in 2020, and from mesotrophic to α -eutrophic level in 2022. The main changes in phytoplankton include a significant increase in the taxonomic diversity of golden algae, an increase in the coenotic role of disazotrophic cyanoprokaryotes and dinophyte algae, which indicates the progressive eutrophication of the waters of the Sylvensko-Chusovsky reach under the combined influence of anthropogenic factors and climate warming.

The article contains 4 Figures, 4 Tables, 52 References.

Keywords: phytoplankton, species composition, ecological-geographical characteristics, dominant complex, trophic status, Sylvensko-Chusovsky reach, Kama Reservoir

Fundings: Field research was performed within the framework of the state assignment of the Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, UB RA, No. 124020500028-4.

For citation: Belyaeva PG. The composition and structure of phytoplankton in the Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama reservoir (Russia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2024;66:193-212. doi: 10.17223/19988591/66/10

Введение

Исследования фитопланктона позволяют выявить современное состояние водоемов, оценить качество их вод, дать прогноз изменениям экосистем и поэтому являются важнейшими компонентами в системе биологического мониторинга. Одной из основных задач современных гидроэкологических исследований является изучение таксономической структуры и эколого-географической характеристики водорослей планктона. Среди параметров структуры фитопланктонных сообществ особое значение имеет изучение состава доминирующих видов и показателей их развития, которые рассматриваются как наиболее информативные для оценки экологического состояния [1]. Количественные оценки, связанные с развитием фитопланктона, также считаются приоритетными среди биологических показателей [2].

Создание искусственных водоемов (водохранилищ, прудов) нарушает функционирование речных биоценозов, сильно изменяя условия обитания гидробионтов и облик их сообществ. Камское водохранилище, образованное в 1954 г. в результате перекрытия р. Камы плотиной Камского гидроузла в районе г. Перми, является первой ступенью каскада водохранилищ. В верхнем бьефе Камского водохранилища ниже слияния рек Чусовой и Сылвы расположен основной водозабор крупного промышленного центра на Урале – г. Перми. Исследование водорослей планктона р. Камы и крупнейших водоемов ее бассейна положено еще в начале XX в. [3–6], однако

сведения о фитопланктоне Сылвенско-Чусовского плеса до сих пор отсутствуют.

Цель работы – оценить современное экологическое состояние Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища по показателям фитопланктона.

Материалы и методы

Камское водохранилище – это узкий со значительной извилистостью береговой линии водоем долинного типа с сезонным регулированием стока. Площадь водного зеркала при НПУ составляет 337,6 км², длина водохранилища 219 км, средняя ширина – 1,8 км, максимальная – 5,1 км, средняя глубина – 7,2 м, максимальная глубина – 28,9 м. Морфометрически в водохранилище выделяют два плеса: главный – Камский и крупный краевой Сылвенско-Чусовской, образованный слиянием рек Сылва и Чусовая [7]. Последний включает в себя два района и три участка (рис. 1). Площадь мелководной зоны до 2 м составляет 16,4% в Чусовском заливе, 17,0% в Сылвенском и 3,8% в Сылвенско-Чусовском участке. Водотоки, образующие краевой плес, близки по водосборной площади, в нижних течениях равнинные, имеют преимущественно снеговое питание с коротким периодом стока талых вод, в летне-осенний период со значительной ролью дождевых паводков, и для р. Сылвы – грунтовых вод [8].

Гидродинамическая активность в плесе невысокая, более слабая в Сылвенском и Чусовском заливах за счет повышенной извилистости рек. Воды Сылвенско-Чусовского плеса относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы с большим количеством сульфатов. Из-за почвенно-геохимических особенностей водосборных площадей рек химический состав вод разных участков плеса существенно различается. Минерализация вод по акватории плеса значительно варьирует, от 225 до 1000 мг/л, что связано с поступлением речных вод. В р. Сылве средние значения минерализации в летнее время значительно выше (650 мг/л) минерализации воды р. Чусовой (250 мг/л) [9]. В связи с существенным различием минерализации рассматриваемых водотоков ниже их слияния наблюдается значительная вертикальная неоднородность из-за «подтекания» и «натекания» вод разной плотности [10].

Материалом для работы послужили батометрические пробы фитопланктона (42) объемом 1,0 л, отобранные в разных участках Сылвенско-Чусовского плеса (см. рис. 1) в поверхностном (0,5–1,0 м) слое воды 16–17 июля 2020 г. и 5–7 июля 2022 г. на 8 створах (левый берег, фарватер, правый берег). Обработку проб проводили стандартными методами. Пробы концентрировали методом фильтрации через мембранные фильтры «Владипор» с диаметром пор 1,2–3,0 мкм. Учет водорослей проводили в камере «Учинская» объемом 0,01 мл, биомассу определяли счетно-объемным методом [11, 12]. Диатомовые водоросли определяли после сжигания органики хромовой смесью в постоянных препаратах с применением смолы Naphrax в световом микроскопе (ZEISS Axiostar Plus, Германия) с использованием

масляной иммерсии ($\times 2500$) [12]. Таксономическую принадлежность различных групп водорослей устанавливали по определителям и справочникам [13–23]. Отделы водорослей приведены согласно классификации, принятой в справочнике «Водоросли» [11]. Для современной номенклатуры видов использовали международную базу данных интернет-ресурсов Algaebase [24]. Эколого-географическая характеристика водорослей составлена по наиболее разработанным системам, принятым в экологии и биогеографии водорослей [25–28].

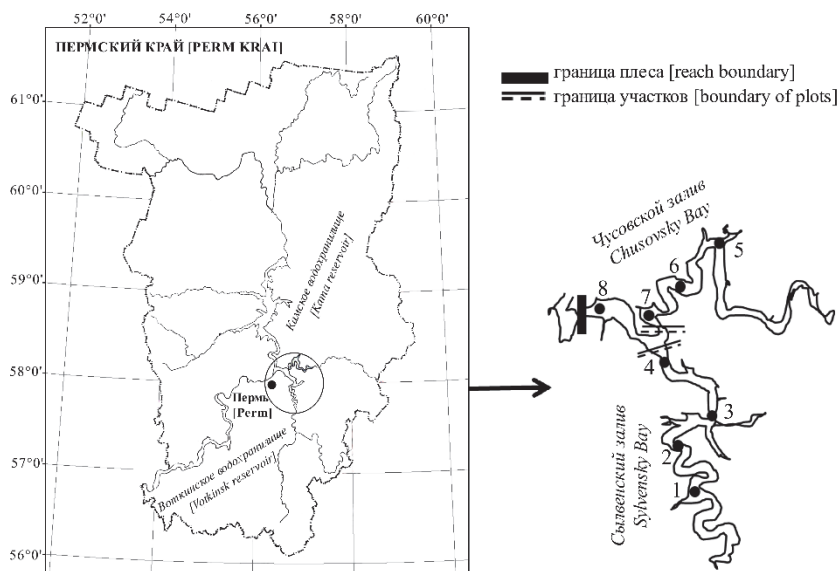


Рис. 1. Карта-схема расположения створов отбора проб фитопланктона в Сылвенско-Чусовском плесе Камского водохранилища (1–8 – створы отбора проб)
[Fig. 1. Map-scheme of phytoplankton sampling sites in the Sylvensko-Chusovsky reach of the Kamskoye reservoir (1-8 sampling sites)]

Полученные результаты статистически обрабатывали с применением программ Microsoft Excel и STATISTICA 6.0. Сходство альгоценозов оценивали по видовому составу методом попарных сравнений с использованием качественной меры Серенсена–Чекановского [29]. Дендрограммы иерархической кластеризации строили с использованием метода Варда. К доминантным относили виды с биомассой или численностью, большей и равной 10% от общих величин [29]. Для каждой пробы по численности и биомассе отдельных видов вычисляли индекс видового разнообразия – Шеннона–Уивера и доминирования – Симпсона [29, 30]. Для оценки степени органического загрязнения вод применяли метод Пантле и Букка в модификации Сладечека [31]. Для определения трофности водоема применена классификация С.П. Китаева [32]. Одновременно измеряли температуру, pH воды и содержание кислорода. Для оценки изменений в фитопланктоне Сылвенского залива привлечены данные более ранних исследований [33].

Результаты исследования и обсуждение

Годы исследований относились к теплым и маловодным. Количество осадков и объем поверхностного притока были ниже средних многолетних величин: в 2020 г. осадки составили 51% от нормы, в 2022 г. – 10% [34]. Вода в Сылвенско-Чусовском плесе значительно различалась по температурному режиму: средняя температура составляла $30,3 \pm 1,6^{\circ}\text{C}$ в 2020 г. и $20,3 \pm 0,6^{\circ}\text{C}$ в 2022 г. Значения pH воды и кислородный режим варьировали незначительно: pH – $8,00 \pm 0,27$ и $7,81 \pm 0,36$, содержание O_2 – $8,10 \pm 0,41$ и $6,84 \pm 0,26$ мг/л в 2020 и 2022 г. соответственно.

В период исследования в составе фитопланктона Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища выявлено 267 таксонов водорослей рангом ниже рода (254 вида) из 9 отделов (табл. 1). Наибольшим видовым богатством отличался отдел Bacillariophyta, в составе которого было зафиксировано 36% общего числа таксонов. Наряду с диатомовыми водорослями господствующее положение по числу представителей занимали отделы Chlorophyta, Chrysophyta и Cyanoprokaryota, на их долю приходилось 28,5; 12,5 и 11,6% соответственно. Доля представителей других отделов составляла около 11%: Dinophyta – 4%, Euglenophyta – 4%, Cryptophyta – 1,5%, Charophyta – 1% и Raphidophyta – 0,4%. Соотношение отделов фитопланктона как в заливах, так и для всего плеса водохранилища за период исследования сохранялось.

Удельное видовое богатство фитопланктона (УВБ) варьировало от 44 до 106 видов, разновидностей и форм водорослей: в Чусовском заливе выявлена наиболее разнообразная флора, УВБ составляло 78 ± 6 видов, в Сылвенском – в 1,3 раза ниже (см. табл. 1). Наименьшее УВБ (57 ± 5 видов) характерно для Сылвенско-Чусовского участка. Это, по-видимому, определяется изменением гидродинамической активности по акватории плеса, гетерогенностью смешиваемых вод по химическому составу и минерализации. В верхних по течению точках отбора проб Сылвенского (ст. 1 и 2) и Чусовского (ст. 5 и 6) заливов формируются сообщества с самым высоким видовым богатством (УВБ – 91 и 87 соответственно) и, как правило, высокими показателями обилия. Индекс сходства (Серенсена–Чекановского) фитопланктона разных участков краевого плеса варьировал от 0,41 до 0,68 и свидетельствовал о невысоком сходстве состава водорослей в связи с разнородностью вод. На дендрограмме выявлено 3 кластера (рис. 2), что определяется специфичностью станций верхних частей Сылвенского и Чусовского заливов по составу видов и где планктон наиболее разнообразен. Выражена также обособленность разнородного участка плеса (ст. 8) и нижних станций заливов (ст. 7 и 4). Например, фитопланктон ст. 7 отличается от соседних участков присутствием крупноразмерных диатомовых водорослей (*Ulnaria acus* (Kütz.) Aboal, *Surirella librile* (Ehrenb.) Ehrenb., видов рода *Navicula* Bory) и развитием *Pandorina morum* (O.F.Müll.) Bory (20–25% общей численности фитопланктона).

По сравнению с данными по фитопланктону Сылвенского залива за 2004 г. [33] в период исследования число видов увеличилось здесь на 41%

(с 69 до 168 видов). Ранее выявлены представители 5 отделов водорослей, в альгоценозах также преобладали диатомовые (45%, сейчас 32%), зеленые водоросли (37%, сейчас 31%) и в меньшей степени цианопрокариоты (ЦП) (12%, сейчас 12,5%).

Таблица 1 [Table 1]

**Таксономическая структура фитопланктона Сылвенско-Чусовского плеса
Камского водохранилища**
[Taxonomic structure of phytoplankton in the Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama Reservoir]

Таксон [Taxon]	Сылвенский залив [Sylvensky Bay]	Чусовской залив [Chusovsky Bay]	Сылвенско-Чусовской участок [Sylvensko-Chusovsky section]	Сылвенско-Чусовской плес [Sylvensko-Chusovsky reach]
Chlorophyta	52	60	24	76
Цианопрокариоты	21	25	7	31
Bacillariophyta	54	77	34	97
Dinophyta	9	5	2	11
Chrysophyta	19	33	13	33
Cryptophyta	4	3	2	4
Charophyta	1	3	1	3
Euglenophyta	8	8	1	11
Raphidophyta	—	1	1	1
Всего [Total]	168	215	85	267

Примечание: «—» — данные отсутствуют.

[Note: "-" - no data].

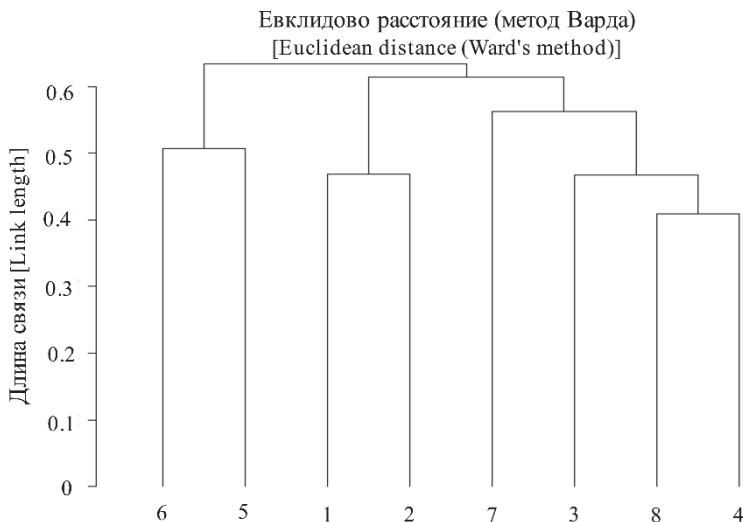


Рис. 2. Дендрограмма сходства видового состава фитопланктона Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища. По оси ординат – расстояние объединения (1-Ks), по оси абсцисс – станции отбора проб

[Fig. 2. Dendrogram of similarity of the species composition of phytoplankton in the Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama Reservoir. The ordinate axis is the merging distance (1-Ks), the abscissa axis is the sampling station]

Харофитовые водоросли, представленные десмидиевыми, составляли 5% флоры, золотистые – 1%, сейчас число видов золотистых водорослей увеличилось до 19 (11% видового состава) (рис. 3). Несмотря на равную долю ЦП в альгоценозах, именно в этом отделе выявлены наиболее существенные изменения в составе: сократилось число видов ЦП азотфиксаторов (гетероцистных *Anabaena* Bory ex Born. et Flah., *Dolichospermum* (Ralfs ex Born. et Flah.) P. Wack., Hoff. et Komárek) и возросло число представителей диатомофитов (безгетероцистных *Aphanocapsa* Näg., *Planktolinghya* Anagn. et Komárek, *Anathece* (Komárek & Anagn.) Komárek, Kastovsky et Jezberová). В целом увеличение разнообразия золотистых и диатомофитных ЦП в Сылвенско-Чусовском плесе связано как с периодом отбора проб (июль), когда в водоемах умеренной зоны получают развитие зеленые, диатомовые водоросли, часто при участии золотистых и ЦП [35–36], так и с «цветением воды» из-за происходящих глобальных климатических изменений [37–40] и условиями лет наблюдений. Также типичным является увеличение обилия миксотрофных фитофлагеллят, способных использовать дополнительные источники фосфора.

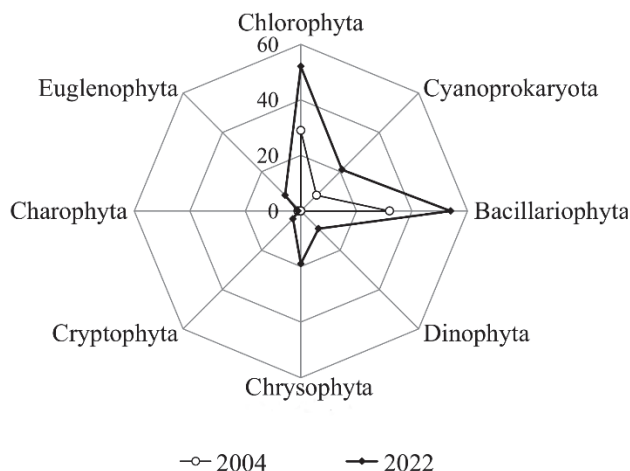


Рис. 3. Таксономическая структура фитопланктона Сылвенского залива Камского водохранилища
 [Fig. 3. Taxonomic structure of phytoplankton in the Sylvensky Bay of the Kama Reservoir]

Эколого-географическая характеристика водорослей планктона Сылвенско-Чусовского плеса представлена в табл. 2. Большинство видов водорослей являлись истинно планктонными (64%); меньшую часть альгоценозов составляли бентосные представители (18%), еще меньше планктонно-бентосных видов (9%). Основу планктона составляли широко распространенные виды и космополиты – 84%. По отношению к содержанию NaCl в воде практически весь перечень индикаторов образован пресноводными видами с низкой соленостью – олигогалолами. Виды-индифференты составляют

72%, галофилов, вегетирующих в пресноводных или слегка солоновато водных местообитаниях, – 19%. Доля галофобов, погибающих даже от незначительного повышения содержания NaCl в воде, составляла 5% состава индикаторов солености воды, мезогалобов – 4%. По отношению к степени кислотности водных масс состав показательных в этом отношении видов водорослей на 60% сформирован индифферентами, алкалифилы образуют 37% и только 8% – представители кислых вод – ацидобионты. Виды-индикаторы сапробности воды включали в себя более 65% от списочного состава, среди них 43% – β -мезосапробы, 32% относились к группе β -о- и о- β -мезосапробов. Индикаторы олигосапробных, а также загрязненных вод представлены в меньшей степени.

Таблица 2 [Table 2]

**Эколого-географическая характеристика фитопланктона
Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища**
[Environmental and geographic characteristics of phytoplankton of the studied
Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama reservoir]

Характеристика [Characteristic]	% от числа видов [% of the number of species]	Характеристика [Characteristic]	% от числа видов [% of the number of species]
Распространение [Distribution]		рН приуроченность [pH]	
Космополиты [Cosmopolites]	162 (84)	Ацидофилы [Acidophilic]	3 (2)
Бореальные [Boreal]	16 (8)	Индифференты [Indifferents]	93 (60)
Аркто-альпийские [Arctic-alpine]	15 (8)	Алкалифилы [Alkaliphilic]	57 (37)
Галобность [Halobnost]		Алкалибионты [Alkalibiontic]	2 (1)
Галофилы [Halophiles]	22 (19)	Сапробность [Saprobity]	
Индифференты [Indifferents]	86 (72)	о-сапробы [о-saprob]	1 (0,5)
Мезогалобы [Mezohalobes]	5 (4)	о- α -мезосапробы [о- α -saprob]	10 (6,4)
Галофобы [Halophobes]	6 (5)	о- β -(β -о)-мезосапробы [о- β -(β -о)-saprob]	50 (32)
Местообитание [Habitat]		β -мезосапробы [β -mesosaprob]	67 (43)
Планктонные [Planktonic]	129 (64)	α - β -(β - α)-мезосапробы [α - β -(β - α)-mesosaprob]	10 (6,4)
Бентосные [Benthic]	36 (18)	α -мезосапробы [α -mesosaprob]	7 (4,2)
Планктонно-бентосные [Planktonic-benthic]	19 (9)	о- χ (χ -о)-сапробы [о- χ (χ -о)-saprob]	8 (5)
Литоральные [Littoral]	7 (3)	χ -сапробы [χ -saprob]	3 (2)
Эпифитные [Epiphitic]	12 (6)	α - ρ -(ρ - α)-сапробы [α - ρ -(ρ - α)-saprob]	1 (0,5)

В Сылвенском заливе на протяжении ряда лет (с 2004 по 2022 г.) экологическая структура альгоценозов сохранила свои пропорции. Различия в эколого-географических спектрах наблюдали по отношению к рН воды,

доля индифферентных видов выросла (на 10%), алкалифильных – сократилась (на 14%). Также отмечено сокращение видов β - и α -мезосапробов (на 6%) и увеличение α -мезосапробов (на 5%).

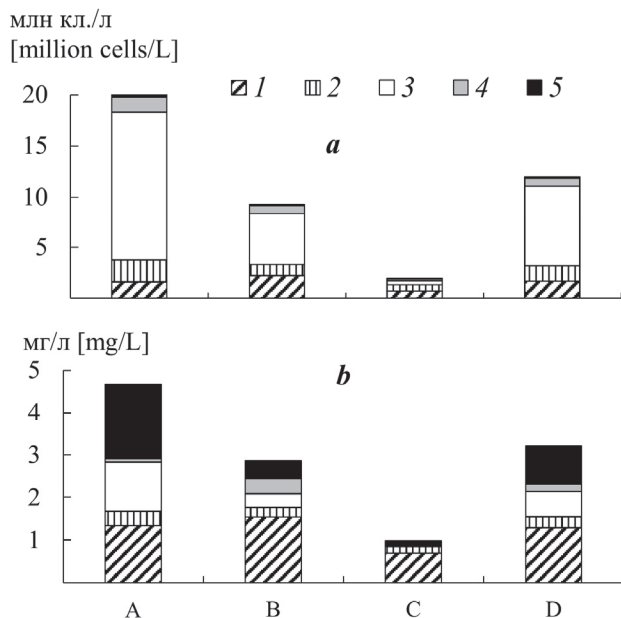


Рис. 4. Вклад отделов водорослей в структуру фитопланктона

Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища:

1 – Bacillariophyta; 2 – Chlorophyta; 3 – Cyanoprokaryota; 4 – Chrysophyta;

5 – прочие отделы водорослей; А – Сылвенский залив, В – Чусовской залив,

С – Сылвенско-Чусовской участок, D – Сылвенско-Чусовской плес.

По оси ординат: а – численность; б – биомасса

[Fig. 4. Contribution of main microalgae taxa in Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama reservoir (1 - Bacillariophyta; 2 - Chlorophyta; 3 - Cyanoprokaryota; 4 - Chrysophyta; 5 - other taxa of microalgae.

A - Sylvensky Bay, B - Chusovsky Bay, C - Sylvensko-Chusovsky section,

D - Sylvensko-Chusovsky reach; y-axis: a - number, million cells/L (a); b - biomass, mg/L (b))]

Значения численности планктонных водорослей Сылвенско-Чусовского плеса варьировали от 0,9 до 85,0 млн кл./л ($15,9 \pm 6,0$), биомассы – от 0,39 до 13,02 мг/л ($4,59 \pm 0,94$). Максимальные значения численности отмечены в Сылвенском заливе (створ 3) и связаны с высоким уровнем развития ЦП, основу биомассы здесь составляли динофитовые, диатомовые водоросли и в меньшей степени ЦП. На Сылвенско-Чусовском участке значения численности ниже в 15 раз, биомассы – в 8 раз, причем основу альгоценозов формировали диатомовые водоросли (рис. 4). В обоих заливах численность фитопланктона на русловых станциях в 2,0–2,5 раза ниже, чем на мелководных, при практически равных значениях биомассы, что определялось массовым развитием мелкоразмерных ЦП на мелководьях. До создания Камского водохранилища увеличение доли ЦП отмечали только в устьевых участках рек Сытва и Чусовая [41]. Зарегулирование стока рек, в том числе р. Камы, привело к перестройке диатомово-зеленых ценотических комплек-

сов в сторону ЦП [6, 35–36, 42]. В 2004 г. количественное развитие фитопланктона в Сылвенском заливе соответствовало $319,8 \pm 1,1$ тыс. кл./л, при биомассе $1,08 \pm 0,31$ мг/л при доминировании пеннатных бентосных диатомовых, а также зеленых хлорококковых водорослей *Pediastrum boryanum* (Turp.) Meneg. и *P. simplex* Meyen. В результате развития мелкоразмерных видов ЦП и золотистых водорослей значения численности фитопланктона в период исследования увеличились более чем в 20 раз, тогда как биомасса фитопланктона стала больше только в 2 раза (преимущественно за счет развития представителей динофитовых водорослей и ЦП *Aphanizomenon flos-aquae*). При этом уровень развития фитопланктона в 2022 г. значительно выше по сравнению с 2020 г. (аномально жарким), что определялось различием температурного режима в эти годы (табл. 3).

Поскольку распределение фитопланктона в Сылвенско-Чусовском плесе по станциям было неравномерным, трофическое состояние (по Китаеву, [32]) на акватории менялось от β -олиготрофного в Сылвенско-Чусовском участке до мезотрофного в заливах в 2020 г. и от мезотрофного до α -эвтрофного уровня в 2022 г.

Доминирующий комплекс летнего фитопланктона Сылвенско-Чусовского плеса богат и разнообразен, в него входили 14 видов по численности (Cyanoprokaryota – 6 видов, Bacillariophyta – 4, Chlorophyta – 2, Chrysophyta – 2) и 9 по биомассе (Cyanoprokaryota – 1, Bacillariophyta – 3, Chlorophyta – 1, Diaporphyta – 4). Существенных различий количества доминирующих видов правобережных и левобережных участков не выявлено. На отдельных участках залива количество доминантных видов достигало 7 таксонов, что могло быть связано со слиянием разнородных вод заливов и Камского плеса.

Таблица 3 [Table 3]

Количественное развитие фитопланктона, ценоотические индексы и сапробность Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища
[Structure of phytoplankton in Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama reservoir]

Участки плеса [Sections of the reach]	Числен- ность, млн кл./л [Numbers, million cells/L]	Биомасса, мг/л [Biomass, mg/L]	Индекс Шеннона– Уивера [Shannon index]	Индекс Симпсона [Simpson index]	Индекс са- пробности [Index saprobity]
Чусовской залив [Chusovsky Bay]	$4,8 \pm 2,3$ $13,1 \pm 2,8$	$1,25 \pm 0,52$ $3,86 \pm 0,94$	$3,48 \pm 0,58$ $3,92 \pm 0,31$	$0,19 \pm 0,001$ $0,10 \pm 0,001$	$1,92 \pm 0,08$ $2,10 \pm 0,03$
Сылвенский залив [Sylvensky Bay]	$9,1 \pm 2,4$ $30,9 \pm 14,3$	$1,88 \pm 0,29$ $7,48 \pm 1,56$	$3,42 \pm 0,54$ $3,85 \pm 0,34$	$0,23 \pm 0,02$ $0,25 \pm 0,03$	$1,81 \pm 0,13$ $2,00 \pm 0,02$
Сылвенско- Чусовской участок [Sylvensko- Chusovsky section]	$1,8 \pm 0,22$ $2,1 \pm 0,53$	$0,59 \pm 0,11$ $0,99 \pm 0,28$	– $3,72 \pm 0,09$	– $0,20 \pm 0,01$	– $1,86 \pm 0,02$

Примечание. Над чертой среднее с ошибкой за 2020 г., под чертой – 2022 г.; «–» – данные отсутствуют.

[Note: Above the line is the average with an error for 2020. Below the line is 2022; "-" - no data].

Ценотические комплексы фитопланктона в краевом плесе различались. На станциях Чусовского залива по численности доминировали ЦП (*Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet et Flah., *Anathece clathrata* (West et G.S. West) Komárek et al., *Aphanothece bachmannii* Komárk.-Legn. et Cronb., *Aphanocapsa holsatica* (Lemm.) Cronb. et Komárek, *A. inserta* (Lemm.) G. Cronb. & Komárek) и диатомовые, последние (*Aulacoseira granulata* (Ehr.) Sim., *A. ambigua* (Grun.) Sim., *Cyclotella meneghiniana* Kütz., *Lindavia radiosa* (Grun.) De Toni & Forti, *Stephanodiscus binderanus* (Kütz.) и *S. hantzschii* Grun.) практически полностью формировали биомассу фитопланктона.

Таблица 4 [Table 4]

Доминантные виды фитопланктона в Сылвенско-Чусовском плесе Камского водохранилища
[Dominant phytoplankton species in Sylvensko-Chusovsky reach of the Kama reservoir]

Участки плеса [Sections of the reach]	Доминантный комплекс видов [Dominant species complex]	
	по численности (в %) [in numbers (in %)]	по биомассе (в %) [in biomass (in %)]
2020 г.		
Чусовской [Chusovsky Bay]	<i>Aphanothece bachmannii</i> (15) <i>Aphanocapsa inserta</i> (11) <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (10) <i>Anabaena</i> spp. (10)	<i>Peridiniopsis penardii</i> (15) <i>Apocalathium aciculiferum</i> (13) <i>Peridinium cinctum</i> (10)
Сылвенский [Sylvensky Bay]	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (17), <i>Planktolyngbya limnetica</i> (33) <i>Dinobryon divergens</i> (15) <i>D. sertularia</i> (10)	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (10) <i>Peridinium cinctum</i> (31) <i>P. willei</i> (11)
2022 г.		
Чусовской [Chusovsky Bay]	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (13) <i>Planktolyngbya limnetica</i> (15) <i>Aphanothece bachmannii</i> (20) <i>Aphanocapsa holsatica</i> (10) <i>Aulacoseira granulata</i> (12) <i>A. ambigua</i> (10) <i>Stephanodiscus binderanus</i> (14)	<i>Aulacoseira granulata</i> (18) <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (10) <i>Stephanodiscus binderanus</i> (10)
Сылвенский [Sylvensky Bay]	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (28) <i>Aphanocapsa holsatica</i> (20) <i>A. delicatissima</i> (12) <i>Planktolyngbya limnetica</i> (10) <i>Coenochloris fotti</i> (10)	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (22) <i>Aulacoseira granulata</i> (22) <i>Apocalathium aciculiferum</i> (20) <i>Peridinium cinctum</i> (10)
Сылвенско-Чусовской [Sylvensko-Chusovsky]	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (18), <i>Limnithrix planctonica</i> (10) <i>Planktolyngbya limnetica</i> (10) <i>Pandorina morum</i> (14) <i>Aulacoseira granulata</i> (12) <i>A. ambigua</i> (10)	<i>Aulacoseira granulata</i> (20) <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> (11) <i>Pandorina morum</i> (10) <i>Aulacoseira ambigua</i> (10)

В сылвенских водах усиливалась ценотическая значимость зеленых хлорококковых водорослей (по численности *Coelastrum astroideum* De-Not,

C. microporum Nägeli, *Coenochloris fotti* (Hind.) *Tetraedron triangulare* Korsch.) при сохранении доминирования ЦП. В составе доминантных видов по биомассе наряду с диатомовыми, значительную роль играли динофитовые водоросли (*Apocalathium aciculiferum* (Lemm.) et al., *Peridinium cinctum* (O.F.M.) Ehr., *P. willei* Huitfeldt-Kaas, *Peridinium* sp. и *Gymnodinium* sp.) (табл. 4). На Сылвенско-Чусовском участке состав доминирующего комплекса по численности и биомассе состоял из представителей ЦП (*Planktolyngbya limnetica*, *Limnothrix planctonica* (Wolos.) Meffert и *Aphanizomenon flos-aquae*), диатомовых (*Aulacoseira granulata*, *Stephanodiscus binderanus*) водорослей и зеленой *Pandorina morum* (O.F. Müller) Bory.

Отличие фитопланктона отдельных станций Сылвенского залива в 2020 г. заключалось в массовом развитии золотистых водорослей, представленных видами рода *Dinobryon* (*D. sertularia* Ehrenb., *D. divergens* O.E. Imhof), а также отсутствием представителя рафидофитовых водорослей *Gonyostomum semen* (Ehr.) Diesing.

Несмотря на отличия в составе видов доминантного комплекса для современного этапа развития фитопланктона в целом характерен процесс расширения его состава за счет массового развития индикаторов антропогенного эвтрофирования: диатомовых (*Aphanizomenon flos-aquae*, *Aphanocapsa holsatica*, *Anathece clathrata*, *Planktolyngbya limnetica*), диатомовых (*Aulacoseira granulata*, *Stephanodiscus hantzschii*) и динофитовых (*Peridiniopsis penardii*, *Apocalathium aciculiferum*, *Peridinium cinctum*) водорослей. Установлено, что подобное явление наблюдается во многих водохранилищах (вожского каскада [41], Бухтарминского [43], ангарских [44], Красноярского [45], Камского и Воткинского [4, 6, 42], Новосибирского [46], Стыкувского (Центральная Польша, Европа) [47], Джатилухур (Западная Ява, Индонезия) [48], в озерах и водохранилищах Америки [49]) на заключительных стадиях олиго-эвтрофной сукцессии, что свидетельствует об увеличении трофического статуса вод [1, 36, 50–52].

В Сылвенско-Чусовском плесе средние коэффициенты видового разнообразия Шеннона, рассчитанные по численности и биомассе фитопланктона, варьировали от 2,96 до 5,02 и от 2,98 до 4,52 соответственно. Высокие значения индекса указывают на сложность структуры и высокое биоразнообразие фитопланктона и определялись тем, что в формировании общей численности и биомассы вклад доминантных видов редко превышал 20%. В целом более высокие показатели видового разнообразия характерны для прибрежий в 2022 г. Индексы Симпсона в Сылвенско-Чусовском плесе изменяются от 0,04 до 0,36 и по численности, и по биомассе фитопланктона. На мелководных участках индекс ниже ($0,13 \pm 0,02$), чем в русле ($0,20 \pm 0,03$). Как известно, этот индекс показывает степень выраженности доминирования определенных видов в структуре сообщества и понижается с увеличением разнообразия сообществ, поэтому его значения ниже в Чусовском заливе ($0,15 \pm 0,03$) по сравнению с Сылвенским ($0,23 \pm 0,05$).

Индексы сапробности, отражающие степень органического загрязнения водных масс, варьировали от 1,57 до 2,13. Различия значений индексов между разными участками в Сылвенско-Чусовском плесе незначительны и

характеризовали данный участок Камского водохранилища в летний сезон как β -мезосапробный с III классом качества воды – умеренно загрязненная.

Заключение

Приведены первые сведения о фитопланктоне Сылвенско-Чусовского плеса Камского водохранилища в июле 2020 и 2022 гг. В составе фитопланктона выявлено 267 видов и внутривидовых таксонов водорослей из 9 отделов. Основу видового богатства формировали диатомовые (36,0%), зеленые (28,5), золотистые (12,5) водоросли и цианопрокариоты (11,6%). В Сылвенском заливе по сравнению с июлем 2004 г. отмечено увеличение (на 41%) видового богатства фитопланктона. Видовой состав фитопланктона отличается на разных участках плеса, что связано с поступлением в заливы речных вод Сылвы и Чусовой различной минерализации. Поэтому степень флористического сходства по коэффициентам Серенсена–Чекановского невысокая и составила от 0,41 до 0,68.

Эколого-географическая структура фитопланктона показывает преобладание типично планктонных видов, широко распространенных в водоемах земного шара, индифферентных к уровню солености воды, обитающих только в пресных водоемах и предпочитающих нейтральные воды по величине pH. В эколого-географическом аспекте фитопланктон Сылвенского залива в 2022 г. не имел существенных различий по сравнению с 2004 г.

В формирование фитопланктона Сылвенско-Чусовского плеса в период летней межени наиболее весомый вклад вносили цианопрокариоты наряду с диатомовыми и зелеными водорослями. Количественные показатели развития фитопланктона варьировали: от 0,9 до 85,0 млн кл./л по численности и от 0,39 до 13,02 мг/л по биомассе. Различия температурного режима в годы исследований определяли уровень развития фитопланктона; в 2022 г. значения численности и биомассы были в три раза выше по сравнению с аномально жарким 2020 г. Трофический статус водоема изменялся от олиго-мезотрофного в 2020 г. до эвтрофного в 2022 г. Численность фитопланктона Сылвенского залива с 2004 г. по настоящее время в результате развития мелких видов водорослей увеличилась более чем в 20 раз, тогда как биомасса фитопланктона – лишь в 2 раза.

По всей акватории доминирующий комплекс представлен преимущественно видами-индикаторами антропогенного эвтрофирования (*Aphanizomenon flos-aquae*, *Aphanocapsa holsatica*, *Aulacoseira granulata*, *Stephanodiscus binderanus*), наблюдается массовое развитие безгетероцистных цианопрокариот (*Aphanocapsa holsatica*, *A. inserta*, *Anathece clathrata*, *Planktolyngbya limnetica*, *Aphanothece bachmannii*) и усиление ценотической роли динофитовых водорослей, способных использовать дополнительные источники фосфора.

Индексы сапробности, отражающие степень органического загрязнения, характеризовали водные массы Сылвенско-Чусовского плеса как β -мезосапробные III класса качества воды (умеренно загрязненная).

Список источников

1. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л. : Наука, 1990. 184 с.
2. Корнева Л.Г. Биологические последствия эвтрофирования // Экологический мониторинг. Ч. VIII: Современные проблемы мониторинга пресноводных экосистем / под ред. Г.С. Розенберг и др. Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 2014. С. 113–148.
3. Третьякова С.А. Фитопланктон Камских водохранилищ // Гидробиологическая характеристика водоемов Урала. 1989. С. 58–69.
4. Беляева П.Г. Видовой состав и структура фитопланктона Камского водохранилища // Вестник Пермского университета. Биология. 2013. № 3. С. 4–11.
5. Беляева П.Г. Трофический статус Камского водохранилища по фитопланктону в летний период // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 5. С. 244–248.
6. Беляева П.Г. Пространственно-временные изменения фитопланктона Камского водохранилища // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т.17, № 5. С. 733–738.
7. Михалев В.В., Мацкевич И.К. Современная морфометрия Камского водохранилища // Водное хозяйство России. 2010. № 3. С. 4–18.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Т. 11: Средний Урал и Приуралье, вып. 1: Кама. Л. : Гидрометеиздат, 1973. 650 с.
9. Китаев А.Б. Химический состав вод водохранилища, его внутригодовое изменение // Актуальные вопросы гидрологии и гидрохимии Камского водохранилища. Пермь : Перм. гос. ун-т, 2004. С. 180–185.
10. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Особенности численного моделирования плотностных стратификационных эффектов в динамике крупных водохранилищ // Водное хозяйство России. 2016. № 4. С. 32–46.
11. Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др. Справочник. Водоросли. Киев : Наукова думка, 1989. 608 с.
12. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М. : Наука, 1975. 239 с.
13. Определитель пресноводных водорослей СССР. 1951–1986. М. ; Л. : Советская наука. Т. 1–14.
14. Starmach K. Flora Ślōdkowodna Polski. T. 3: Euglenophyta - Eugleniny. Warszawa : PWN, 1983. 594 p.
15. Komárek J., Fott B. Chlorophyceae (Gruunalgen). Ordnung: Chlorococcales. Bd. 16 (7, 1). Schweizerbart : Stuttgart, 1983. 1044 p.
16. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. T. 1: Naviculaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/1. Jena : Gustav Fischer Verlag, 1986. 876 p.
17. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. T. 2: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/2. Stuttgart : Gustav Fischer Verlag, 1988. 596 p.
18. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. T. 3: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/3. Stuttgart : Gustav Fischer Verlag, 1991a. 576 p.
19. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. T. 4: Achnanthaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/4. Stuttgart : Gustav Fischer Verlag, 1991b. 437 p.
20. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 1. Teil. Chroococcales. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 19/1. Jena : Gustav Fischer, 1999. 548 p.
21. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2. Teil. Oscillatoriales. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 19/2. München : Elsevier 2005. 759 p.
22. Ettl H. Chlorophyta I. Phytomonadina. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 9. Jena : Gustav Fisher Verlag, 1983. 807 p.
23. Крахмальний А.Ф. Динофитовые водоросли Украины (иллюстрированный определитель). Киев: Альгепрес, 2011. 444 с.
24. Guiry M.D., Guiry G.M. AlgaeBase. 2022. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org> (дата обращения: 20.11.2022).

25. Прошкина-Лавренко А. И. Диатомовые водоросли – показатели солёности воды // Диатомовый сборник. 1953. С. 186–205.
26. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л. : Наука, 1985. 244 с.
27. Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив : PiliesStudio, 2006. 498 с.
28. Sládeček V. System of Water Quality from the Biological Point of View // Archiv für Hydrobiologie. Beih. 7: Ergebnisse der Limnologie. 1973. 218 p.
29. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М. : Мир, 1992. 184 с.
30. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М. : Наука, 1982. 287 с.
31. Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. 3: Методы биологического анализа вод. М. : СЭВ, 1983. 371 с.
32. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов / Карельский науч. центр РАН, Ин-т биологии. – Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 394 с.
33. Беляева П.Г., Мальшакова Е.В. К изучению альгофлоры р. Сылвы и Сылвенского залива Камского водохранилища // Проблемы загрязнения окружающей среды – 2005 : тезисы докладов VI Междунар. конф. Пермь–Казань–Пермь, сентябрь 2005. С. 58.
34. Климатические особенности в Пермском крае. URL: <http://accident.perm.ru/index.php/novosti/1784-klimaticheskie-osobennosti-2022-g-v-permskom-krae>, <http://accident.perm.ru/index.php/spravochnyj-razdel/klimat/1497-klimaticheskie-osobennosti-2020-goda-v-permskom-krae> (дата обращения: 15.09.2023).
35. Охапкин А.Г. Структура и сукцессия фитопланктона при зарегулировании речного стока (на примере р. Волги и её притоков) : дис. ... д-ра биол. наук. СПб. : Ин-т озерадения РАН, 1997. 280 с.
36. Корнева Л.Г. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома : Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
37. Lüring M., Van Oosterhout F., Faassen E. Eutrophication and warming boost cyanobacterial biomass and microcystins // Toxins. 2017. № 9 (2). P. 64. doi: 10.3390/toxins9020064
38. Rasconi S., Winter K., Kainz M.J. Temperature increase and fluctuation induce phytoplankton biodiversity loss—Evidence from a multi-seasonal mesocosm experiment // Ecology and Evolution. 2017. № 7. PP. 2936–2946. doi: 10.1002/ece3.2889
39. Golubkov S.M. Effect of climatic fluctuations on the structure and functioning of ecosystems of continental water bodies // Contemporary Problems of Ecology. 2021. № 14 (1). PP. 1–10. doi: 10.3390/toxins9020064
40. Liu C., Sun X., Su L., Cai J., Zhang L., Guo L. Assessment of phytoplankton community structure and water quality in the Hongmen Reservoir // Water Quality Research Journal. 2021. № 56. PP. 19–30. doi: 10.2166/wqrj.2021.022
41. Таусон А.О. Водные ресурсы Молотовской области. Молотов : ОГИЗ, 1947. 321 с.
42. Беляева П.Г. Многолетняя динамика состава и распределения фитопланктона Воткинского водохранилища (бассейн Камы, Пермский край) // Ботанический журнал. 2018. Т. 103, № 3. С. 297–312. doi: 10.2166/wqrj.2021.022
43. Сукцессии биоценозов Бухтарминского водохранилища. Омск : Изд-во Омского гос. аграрного ун-та, 2009. 244 с.
44. Кожова О.М., Башарова Н.И. Продуктивность ангарских водохранилищ // Биологические ресурсы внутренних водоемов Сибири и Дальнего Востока. М. : Наука, 1984. С. 175.
45. Кожевникова Н.А. Видовая структура фитопланктона Красноярского водохранилища (1977–2000 гг.) // Современные проблемы гидробиологии Сибири: тезисы докладов Всероссийской конференции. Томск, 2001. С. 48.
46. Баженова О.П., Михайлов В.В. Фитопланктон как показатель современного экологического состояния Новосибирского водохранилища // Биология внутренних вод. 2021. Т. 14, № 6. С. 564–573. doi: 10.1134/S1995082921050023

47. Корнева Л.Г., Глушенко Г.Ю. Состав и сезонная сукцессия фитопланктона Таганрогского залива Азовского моря и нижнего течения р. Дон в условиях изменяющегося климата // Биология внутренних вод. 2020. Т. 13, № 1. С. 18–26. doi: 10.1134/S1995082920010071
48. Анциферова Г.А. Биоиндикация в геоэкологии: об эвтрофировании межледниковых, голоценовых и современных поверхностных водных экосистем бассейна Верхнего Дона // Вестник Воронежского университета. Геология. 2005. № 1. С. 240–250.
49. Баженова О.П. Фитопланктон Верхнего и Среднего Иртыша в условиях зарегулированного стока. Омск : Изд-во ОмГАУ, 2005. 246 с.
50. Nowicka-Krawczyk P., Żelazna-Wieczorek J., Skrobek I., Ziulkiewicz M., Adamski M., Kaminski A., Żmudzki P. Persistent Cyanobacteria Blooms in Artificial Water Bodies-An Effect of Environmental Conditions or the Result of Anthropogenic Change // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19, № 12. P. 6990. doi: 10.3390/ijerph19126990
51. Astuti L.P., Sugianti Y., Warsa A., Sentosa A.A. Water Quality and Eutrophication in Jati-luhur Reservoir, West Java, Indonesia // Polish Journal of Environmental Studies. 2022. Vol. 31, № 2. PP. 1493–1503. doi: 10.15244/pjoes/142475
52. González E., Roldán G. Eutrophication and Phytoplankton: Some Generalities from Lakes and Reservoirs of the Americas. In: Microalgae - From Physiology to Application, IntechOpen; 2020. 244 p. [Electronic resource]. Available at: doi: 10.5772/intechopen.89010 (accessed: 12.09.2023)

References

1. Trifonova IS. Ekologiya i suksessiya ozernogo fitoplanktona [Ecology and succession of lake phytoplankton]. Leningrad: Nauka. Publ.; 1990. 184 p. In Russian
2. Korneva LG. Biologicheskie posledstviya evtrofirovaniya [Biological consequences of eutrophication]. In: *Ekologicheskij monitoring. Chast' VIII. Sovremennye problemy monitoringa presnovodnykh ekosistem* [Environmental monitoring. Part VIII. Modern problems of monitoring freshwater ecosystems]. Rozenberg GS, editor. Nizhniy Novgorod: izdatel'stvo Nizhegorodskogo gos. un-ta Publ.; 2014. PP. 113-148. In Russian
3. Tret'yakova SA. Fitoplankton Kamskikh vodokhranilishch [Phytoplankton of the Kama reservoirs]. In: *Gidrobiologicheskaya kharakteristika vodoemov Urala*. Sverdlovsk: Akademiya nauk SSSR, UrO. Publ.; 1989. PP. 58-69. In Russian
4. Belyaeva PG. Vidovoy sostav i struktura fitoplanktona Kamskogo vodokhranilishcha [Species composition and structure of phytoplankton in the Kama Reservoir]. *Vestnik Permskogo universiteta. Biologiya*. 2013;3:4-11. In Russian
5. Belyaeva PG. Troficheskiy status kamskogo vodokhranilishcha po fitoplanktonu v letniy period [Trophic status of the Kama reservoir for phytoplankton in summer]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2014;16(5):244-248. In Russian
6. Belyaeva PG. Prostranstvenno-vremennye izmeneniya fitoplanktona Kamskogo vodokhranilishcha [Spatiotemporal changes in phytoplankton in the Kama Reservoir]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2015;17(5):733-738. In Russian
7. Mikhalev VV, Matskevich IK. Sovremennaya morfometriya Kamskogo vodokhranilishcha [Modern morphometry of the Kama Reservoir]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. 2010;3:4-18. In Russian
8. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. T. 11. Sredniy Ural i Priural'e. Vyp. 1. Kama [Surface water resources of the USSR. Basic hydrological characteristics. T. 11. Middle Urals and Urals. Vol. 1. Kama]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 650 p.
9. Kitaev AB. Khimicheskiy sostav vod vodokhranilishcha, ego vnutrigodovoe izmenenie [Chemical composition of reservoir waters, its intra-annual changes]. *Aktual'nye voprosy gidrologii i gidrokhimii Kamskogo vodokhranilishcha*. Perm: Perm. gos. un-t Publ.; 2004. pp. 180-185. In Russian

10. Lepikhin AP, Lyubimova TP, Parshakova YaN, Lyakhin YuS, Bogomolov AV. Osobennosti chislennogo modelirovaniya plotnostnykh stratifikatsionnykh effektiv v dinamike krupnykh vodokhranilishch [Peculiarities of numerical modeling of density stratification effects in the dynamics of large reservoirs]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. 2016;4:32-46. In Russian
11. Vasser SP, Kondrat'eva NV, Masyuk NP, Palamar'-Mordvintseva GM, Vetrova ZI, Kordyum EL, Moshkova NA, Prihod'kova LP, Kovalenko OV, Stupina VV, Tsarenko PM, Yunger VP, Radchenko MI, Vinogradova ON, Buhtiyarova LN, Razumna LF. *Vodorosli. Spravochnik [Algae: Handbook]*. Kiev: Naukova Dumka Publ.; 1989. 608 p. In Russian
12. Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoemov [Methodology of studying biogeocenoses of inland water bodies]. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 239 p. In Russian
13. Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR; v 14 t. [Guide to of freshwater algae of the USSR]. Moscow; Leningrad: Sovetskaya nauka Publ.; 1951-1986. vols. 1-14. In Russian
14. Starmach K. Flora Ślōdkowodna Polski. T. 3. Euglenophyta - Eugleniny. Warszawa: PWN Publ.; 1983. 594 p.
15. Komárek J, Fott B. Chlorophyceae (Gruunalgen). Ordnung: Chlorococcales. Bd. 16 (7, 1). Schweizerbart: Stuttgart Publ.; 1983. 1044 p.
16. Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. T. 1: Naviculaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/1. Jena: Gustav Fischer Verlag; 1986. 876 p.
17. Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. T. 2: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/2. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag; 1988. 596 p.
18. Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. T. 3: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/3. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag; 1991a. 576 p.
19. Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. T. 4: Achnanthaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa. 2/4. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag; 1991b. 437 p.
20. Komárek J, Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 1. Teil. Chroococcales. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 19/1. Jena: Gustav Fischer Verlag; 1999. 548 p.
21. Komárek J, Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. 2. Teil. Oscillatoriales. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 19/2. München: Elsevier Verlag; 2005. 759 p.
22. Ettl H. Chlorophyta I. Phytomonadina. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 9. Jena: Gustav Fisher Verlag, 1983. 807 s. In German
23. Krakmal'nyy AF. Dinofitovy vodorosli Ukrainy (illyustrirovannyi opredelitel') [Dinophyte algae of Ukraine (illustrated key)]. Kiev: Al'terpres Publ.; 2011. 444 p.
24. Guiry MD, Guiry GM. AlgaeBase. 2022. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org> (date of the application 20.11.2022).
25. Proshkina-Lavrenko AI. Diatomovy vodorosli - pokazateli solenosti vody [Diatoms - indicators of water salinity]. In: *Diatomovy sbornik*. Leningrad: Lening. Univ. Publ.; 1953. PP. 186-205. In Russian
26. Davydova N. N. Diatomovy vodorosli - indikatory prirodnykh usloviy vodoemov v golotsene [Diatoms - indicators of natural conditions of water bodies in the Holocene]. Leningrad: Nauka Publ.; 1985. 244 p. In Russian
27. Barinova SS, Medvedeva LA, Anisimova OV. Bioraznoobrazie vodorosley - indikatorov okruzhayushchey sredy [Biodiversity of algae – environmental indicators]. Tel-Aviv: PiliesStudio Publ.; 2006. 498 p. In Russian
28. Sládeček V. System of Water Quality from the Biological Point of View. Archiv für Hydrobiologie. Beih. 7. Ergebnisse der Limnologie. 1973. 218 s. In German
29. Megarran E. Ekologicheskoe raznoobrazie i ego izmerenie [Ecological diversity and its measurement]. Moscow: Mir Publ.; 1992. 184 p. In Russian
30. Pesenko YuA. Printsipy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh [Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies]. Moscow: Nauka Publ.; 1982. 287 p. In Russian

31. Unifitsirovannyye metody issledovaniya kachestva vod [Unified methods for studying water quality]. Chast' 3. Metody biologicheskogo analiza vod. Moscow: SEV Publ.; 1983. 371 p. In Russian
32. Kitaev SP. Osnovy limnologii dlya gidrobiologov i ikhtologov [Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists] Karel'skiy nauch. tsentr RAN, In-t biologii. Petrozavodsk: Karel'skiy nauch. tsentr RAN Publ.; 2007. 394 p. In Russian
33. Belyaeva PG, Mal'shakova EV. K izucheniyu al'goflory r. Sylvy i Sylvenskogo zaliva Kamskogo vodokhranilishcha [To the study of algal flora of the Sylva River and Sylva Bay of the Kama Reservoir]. In: *Problemy zagryazneniya okruzhayushchey sredy. Tezisy dokladov VI mezhdunarodnoy konferentsii*. [Problems of environmental pollution. Proc. of the Sci. Conf. (Perm-Kazan-Perm, Russia, 20-25 September 2005)]. Perm: IEGM URO RAN Publ.; 2005. p. 58. In Russian
34. Klimaticheskie osobennosti v Permskom krae. [Climatic features in the Perm region] Elektronnyy resurs: <http://accident.perm.ru/index.php/novosti/1784-klimaticheskie-osobennosti-2022-g-v-permskom-krae>, <http://accident.perm.ru/index.php/spravochnyj-razdel/klimat/1497-klimaticheskie-osobennosti-2020-goda-v-permskom-krae> (date of the application 15.09.2023).
35. Okhapkin AG. *Struktura i suksessiya fitoplanktona pri zaregulirovanii rechnogo stoka (na primere r. Volgi i ee pritokov)* [Structure and succession of phytoplankton during river flow regulation (using the example of the Volga River and its tributaries) DoctoralSci. Dissertation, Biology] Saint Petersburg: Institute of Lake Science RAS; 1997. 280 p. In Russian
36. Korneva LG. Fitoplankton vodokhranilishch basseyna Volgi [Phytoplankton of reservoirs of the Volga basin] Kostroma: Kostromskoy pechatnyy dom Publ.; 2015. 284 p. In Russian
37. Lürling M, Van Oosterhout F, Faassen E. Eutrophication and warming boost cyanobacterial biomass and microcystins. *Toxins*. 2017;9(2):64. doi: 10.3390/toxins9020064
38. Rasconi S, Winter K, Kainz MJ. Temperature increase and fluctuation induce phytoplankton biodiversity loss—Evidence from a multi-seasonal mesocosm experiment. *Ecology and Evolution*. 2017;7:2936-2946. doi: 10.1002/ece3.2889
39. Golubkov SM. Effect of climatic fluctuations on the structure and functioning of ecosystems of continental water bodies. *Contemporary Problems of Ecology*. 2021;14(1):1-10. doi: 10.3390/toxins9020064
40. Liu C, Sun X, Su L, Cai J, Zhang L, Guo L. Assessment of phytoplankton community structure and water quality in the Hongmen Reservoir // *Water Quality Research Journal*. 2021;56:19-30. doi: 10.2166/wqrj.2021.022
41. Tauson AO. Vodnye resursy Molotovskoy oblasti. [Water resources of the Molotov region] Molotov: OGIZ Publ.; 1947. 321 p. In Russian
42. Belyaeva PG. Mnogoletnyaya dinamika sostava i raspredeleniya fitoplanktona Votkinskogo vodokhranilishcha (basseyn Kamy, Permskiy kray) [Long-term dynamics of the composition and distribution of phytoplankton in the Votkinsk Reservoir (Kama basin, Perm region)]. *Botanicheskiy zhurnal*. 2018;103(3):297-312. doi: 10.2166/wqrj.2021.022. In Russian
43. Suksessii biotsenozov Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Succession of biocenoses of the Bukhtarma Reservoir] Omsk: Omskii gos. agrarniy un-t Publ.; 2009. 244 p. In Russian
44. Kozhova OM, Basharova NI. Produktivnost' angarskikh vodokhranilishch [Productivity of Angara reservoirs]. Biologicheskie resursy vnutrennikh vodoemov Sibiri i Dal'nego Vostoka. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 175 p. In Russian
45. Kozhevnikova NA. Vidovaya struktura fitoplanktona Krasnoyarskogo vodokhranilishcha (1977-2000 gg.) [Species structure of phytoplankton in the Krasnoyarsk reservoir (1977-2000)]. In: *Sovremennyye problemy gidrobiologii Sibiri. Tezisy dokladov Vserossiyskoy konferentsii* [Modern problems of hydrobiology of Siberia. Proc. of the Sci. Conf. (Tomsk, Russia, 2001)]. Tomsk: Tomsk. Gos. Univ. Publ.; 2001 p. 48. In Russian
46. Bazhenova OP, Mikhailov VV. Phytoplankton as an Indicator of the Modern Ecological State of the Novosibirsk Reservoir. *Inland Water Biology*. 2021;14(6):670-678. doi: 10.1134/S1995082921050023

47. Korneva LG, Glushchenko GYu. Sostav i sezonnaya suktsessiya fitoplanktona Taganrogskego zaliva Azovskogo morya i nizhnego techeniya r. Don v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata [Composition and Seasonal Succession of Phytoplankton of Taganrog Bay in the Sea of Azov and the Downstream Reaches of the Don River under a Changing Climate]. *Inland Water Biology*. 2020;13(1):23-30. doi: 10.1134/S1995082920010071
48. Antsiferova GA. Bioindikatsiya v geoekologii: ob evtrofirovanii mezhlednikovyykh, golotsenovykh i sovremennykh poverkhnostnykh vodnykh ekosistem basseyna Verkhnego Dona [Bioindication in geoecology: on the eutrophication of interglacial, Holocene and modern surface water ecosystems of the Upper Don basin]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*. 2005;1:240-250. In Russian
49. Bazhenova OP. Fitoplankton Verkhnego i Srednego Irtysya v usloviyakh zaregulirovannogo stoka [Phytoplankton of the Upper and Middle Irtysh under regulated flow conditions]. Omsk: Omskii gos. agrarnyi un-t Publ.; 2005. 246 p. In Russian
50. Nowicka-Krawczyk P, Żelazna-Wieczorek J, Skrobek I, Ziulkiewicz M, Adamski M, Kaminski A, Żmudzki P. Persistent Cyanobacteria Blooms in Artificial Water Bodies-An Effect of Environmental Conditions or the Result of Anthropogenic Change. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(12):6990. doi: 10.3390/ijerph19126990
51. Astuti LP, Sugianti Y, Warsa A, Sentosa AA. Water Quality and Eutrophication in Jatiluhur Reservoir, West Java, Indonesia. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2022;31(2):1493-1503. doi: 10.15244/pjoes/142475
52. J. González E., Roldán G. Eutrophication and Phytoplankton: Some Generalities from Lakes and Reservoirs of the Americas. In: *Microalgae - From Physiology to Application*, IntechOpen; 2020. 244 p. [Electronic resource]. Available at: doi: 10.5772/intechopen.89010 (accessed 12.09.2023)

Информация об авторе:

Беляева Полина Геннадьевна, д-р биол. наук, с. н. с., лаборатория клеточной иммунологии и нанобиотехнологии, Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (Пермь, Россия)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6741-0424>

E-mail: belyaeva@psu.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Polina G. Belyaeva, Cand.Sci. (Biol.), Senior researcher of the laboratory of freshwater microbiology Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch RAS (Perm, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6741-0424>

E-mail: belyaeva@psu.ru

The Author declares no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 09.10.2023;
одобрена после рецензирования 31.01.2024; принята к публикации 14.06.2024.

The article was submitted 09.10.2023;
approved after reviewing 31.01.2024; accepted for publication 14.06.2024.