

DOI 10.31029/vestdnc94/3

УДК 583:574.21:574.633

МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ ФИТОПЛАНКТОНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ВЕЛИКОЙ

Т. В. Дрозденко¹, ORCID: 0000-0002-5553-2296

М. В. Медянкина², ORCID: 0000-0002-9195-0399

¹Псковский государственный университет, Псков, Россия

²Московский государственный университет технологий и управления
им. К.Г. Разумовского, Москва, Россия

LONG-TERM MONITORING OF PHYTOPLANKTON TO ASSESS THE ECOLOGICAL STATE OF THE VELIKAYA RIVER DELTA

T. V. Drozdenko¹, ORCID: 0000-0002-5553-2296

M. V. Medyankina², ORCID: 0000-0002-9195-0399

¹Pskov State University, Pskov, Russia

²Moscow State University of Technology and Management
named after K.G. Razumovsky, Moscow, Russia

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты длительного мониторинга фитопланктонных сообществ, проведенного в весенний период с 2016 по 2023 г. в дельте реки Великой (Псковская область). Всего было отобрано и обработано 70 качественных и количественных проб фитопланктона. За время исследований зарегистрировано 293 видовых и внутривидовых таксона микроводорослей, относящихся к 8 систематическим группам: Bacillariophytina, Chlorophyta, Ochrophytina, Cyanobacteria, Euglenophyta, Dinoflagellata, Charophyta и Cryptista. В основе флористического комплекса планктонной альгофлоры дельты р. Великой во все годы наблюдений лежали диатомовые, зеленые и охрофитовые водоросли. Средняя численность фитопланктона за весь период исследования составила $1,36 \pm 1,25$ млн кл./л, изменяясь в зависимости от года от 597,8 тыс. кл./л до 4,13 млн кл./л. Среди доминирующих видов в общей численности постоянно отмечались представители отдела Cyanobacteria, а с 2019 по 2023 г. среди доминантов всегда присутствовала одноклеточная водоросль *Kephyrion doliolum* Conrad из класса Chrysophyceae. Значения биомассы весеннего фитопланктона колебались в пределах 0,20–2,30 мг/л, составляя в среднем за весь период $0,65 \pm 0,75$ мг/л. Рассчитанные индексы видового разнообразия показали достаточно среднюю сложность структуры фитопланктонных сообществ. Согласно индексу трофности Милиуса воды дельты р. Великой в рассматриваемые годы наблюдений определялись как олиготрофные или мезотрофные. Проведенный сапробиологический анализ показал, что качество воды дельты характеризуется как умеренно загрязненное и классифицируется как класс III.

Abstract. This paper presents the results of long-term monitoring of phytoplankton communities conducted in the spring periods from 2016 to 2023 in the Velikaya River Delta (the Pskov region). In total, 70 qualitative and quantitative phytoplankton samples were selected and processed. During the research, 293 species and intraspecific taxa of microalgae belonging to 8 systematic groups were registered: Bacillariophytina, Chlorophyta, Ochrophytina, Cyanobacteria, Euglenophyta, Dinoflagellata, Charophyta and Cryptista. The floral complex of the planktonic algaeflora of the Velikaya River Delta were based on diatom, green and ochrophytic algae during all the years of observation. The average number of phytoplankton over the entire study period was $1,36 \pm 1,25$ million cells/l, varying from 597,8 thousand cells/l to 4,13 million cells/l depending on the year. Among the dominant species in the total number, representatives of the Cyanobacteria phylum were constantly noted, and from 2019 to 2023, the unicellular algae *Kephyrion doliolum* Conrad from the Chrysophyceae class was always present among the dominants. The values of the biomass of spring phytoplankton ranged from 0,20–2,30 mg/l, averaging $0,65 \pm 0,75$ mg/l over the entire period. The calculated indices of species diversity showed a fairly average complexity of structure of the phytoplankton communities. According to the Milius trophic index, the waters of the Velikaya River Delta in the years under review were defined as oligotrophic or mesotrophic. The conducted saprobiological analysis showed that the delta water quality is characterized as moderately polluted and classified as Class III.

Ключевые слова: фитопланктон, таксономический состав, численность, биомасса, индексы видового разнообразия, трофность, сапробность, дельта реки Великой, Псковская область.

Keywords: phytoplankton, taxonomic composition, abundance, biomass, indices of species diversity, trophicity, saprobity, Velikaya River delta, the Pskov region.

Введение

Одной из наиболее актуальных экологических проблем XXI в. является сохранение экосистем и их биологического разнообразия. Влияние антропогенной деятельности на гидросферу обусловлено глобальными изменениями атмосферы, трансграничным переносом загрязняющих веществ и локальным

воздействием производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод [1]. В свою очередь, водные экосистемы благодаря самоочищению способны перерабатывать и утилизировать попавшие в водную среду биогенные вещества, тем самым создавая благоприятные условия для существования гидробионтов [2, 3].

Дельта реки Великой расположена в 8 км к северо-западу от г. Пскова и является экотонном, где происходит взаимодействие и преобразование водных масс р. Великой и Псковского озера. Протяженность дельты составляет 4,2 км, ширина достигает 4,0 км, площадь – 2,7 км². В дельте сосредоточены низкие болотистые острова, разделенные водными протоками. Здесь сосредоточены места нереста рыбы и гнездования птиц. Значительная акватория дельты является частью природного заказника «Псковско-Чудская приозерная низменность» [4].

Фитопланктон – важнейший компонент водных объектов, участвующий в образовании первичной биологической продукции. Планктонные водоросли широко используются в биоиндикационных исследованиях качества природных вод. Высокая чувствительность микроводорослей к загрязняющим компонентам позволяет в кратчайшие сроки установить начинающиеся процессы деградации в водоемах и предпринять необходимые природоохранные мероприятия для сохранения водных экосистем [5–7].

В настоящее время темпы экономического развития Псковского региона существенно увеличиваются, что в той или иной степени сказывается на экологическом благополучии водных объектов. Рост антропогенной нагрузки приводит не только к снижению водного биоразнообразия, включая фитопланктон, но и к истощению адаптационного потенциала популяций и, как следствие, к их сокращению. Поэтому необходимость проведения наблюдений за качеством водной среды на сегодняшний день не вызывает сомнений.

Целью работы стало исследование таксономического состава, видового разнообразия и количественных характеристик фитопланктона для оценки экологического состояния дельты р. Великой.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в мае 2016–2023 гг. на пяти постоянных станциях дельты р. Великой (рис. 1). Отбор проб осуществляли с поверхностного горизонта, используя пробоотборники объемом 500 мл. Параллельно измеряли температуру и pH воды. Пробы фиксировали 4%-м формалином, транспортировали в лабораторию и обрабатывали стандартными методами [8].

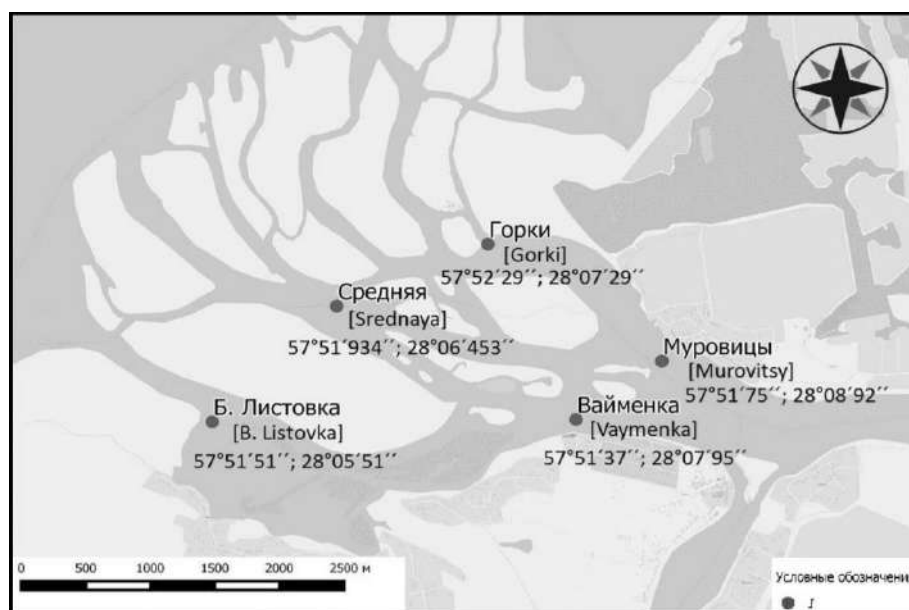


Рис. 1. Станции отбора проб фитопланктона в дельте р. Великой

Фитопланктон количественно подсчитывали в камере Нажотта объемом 0,05 мл. Для идентификации таксонов водорослей использовали систему, применяемую в международной базе данных AlgaeBase [9].

К видам-доминантам по численности относили виды водорослей, количество которых было больше 10% от общей численности. Биомассу рассчитывали на основе средних размеров клеток путем сравнения с подобными по форме геометрическими фигурами [10].

Для каждой станции вычисляли индекс видового богатства Маргалефа, индекс разнообразия Шеннона, индекс доминирования Симпсона и индекс выравненности Пиелу [11].

Трофический статус озера рассчитывали с помощью индекса трофности Милиус [12]. Класс качества вод устанавливали, основываясь на эколого-санитарной классификации [13]. Индикаторную значимость водорослей узнавали из ряда монографий [14, 15].

Результаты и их обсуждение

За все время исследований было зарегистрировано 293 видовых и внутривидовых таксона весеннего фитопланктона из 8 систематических групп рангом выше класса (отделы/подотделы): Bacillariophytina (114 видовых таксонов), Chlorophyta (74), Ochrophytina (34), Cyanobacteria (27), Euglenophyta (16), Dinoflagellata (12), Charophyta (11) и Cryptista (5). Основу флористического комплекса планктонной альгофлоры составляли представители подотдела Bacillariophytina (38,9% от общего видового богатства), отдела Chlorophyta (25,3%) и подотдела Ochrophytina (11,6%). Видимый вклад в видовое богатство фитопланктонных сообществ вносил отдел Cyanobacteria (9,2%). На представителей остальных отделов приходилось в совокупности 15,0% (рис. 2).

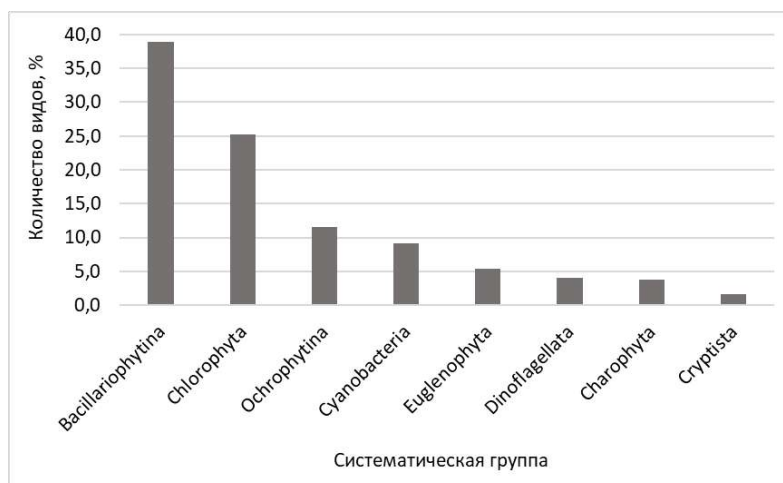


Рис. 2. Таксономический состав фитопланктона дельты р. Великой за весь период исследований

Наибольшее видовое богатство весеннего фитопланктона отмечалось в 2016 г., когда было зарегистрировано 165 видовых таксонов микроводорослей, наименьшее в 2023 г. – 92 видовых таксона. Максимальный вклад в видовое богатство фитопланктонных сообществ вносили диатомовые водоросли во все годы исследования, кроме 2018 г., когда по числу видов превалировал отдел Chlorophyta (рис. 3). Второе и третье место по видовой представленности занимали зеленые и охрофитовые водоросли. В 2022 и 2023 гг. роль цианобактерий, по сравнению с предыдущими годами, немного возросла. Представители отдела Charophyta не обнаружены в 2016, 2022 и 2023 гг.

За весь период мониторинга фитопланктона дельты р. Великой pH воды носила слабощелочной характер, составляя в среднем по акватории $7,9 \pm 0,4$. Показатели температуры в зависимости от года исследования заметно варьировали (рис. 4).

Средние по всем станциям дельты показатели численности фитопланктона в разные годы наблюдений заметно различались и варьировали от 597,8 тыс. кл./л в 2020 г. до 4,13 млн кл./л в 2018 г. (среднее значение = $1,36 \pm 1,25$ млн кл./л) (рис. 4).

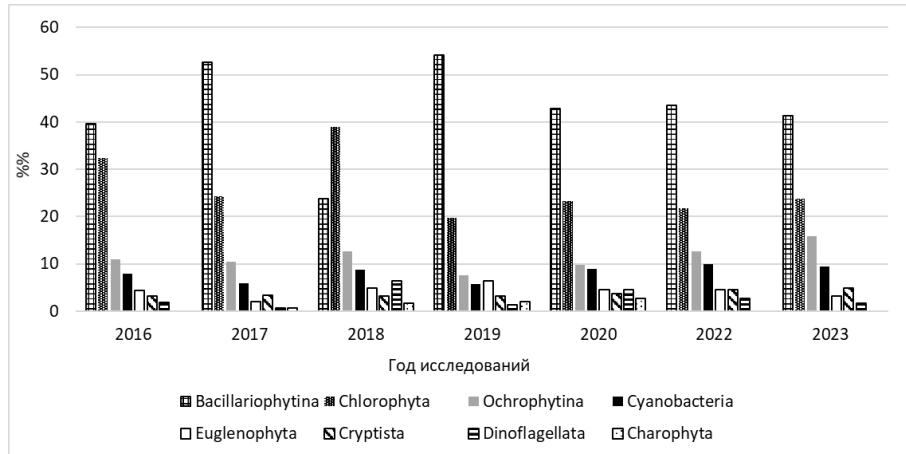


Рис. 3. Доля систематических групп водорослей в весенней альгофлоре дельты р. Великой

Средние по акватории дельты показатели биомассы фитопланктона в зависимости от года исследования изменялись от 0,20 мг/л в 2022 г. до 2,30 мг/л в 2018 г. (среднее значение = $0,65 \pm 0,75$ мг/л).

Как видно из рис. 4, максимум количественного развития весеннего фитопланктона приходился на самый теплый весенний период 2018 г., когда средняя по акватории температура составляла 19,6 °С. Снижение температуры воды, как правило, влекло за собой уменьшение численности и биомассы планктонных водорослей.

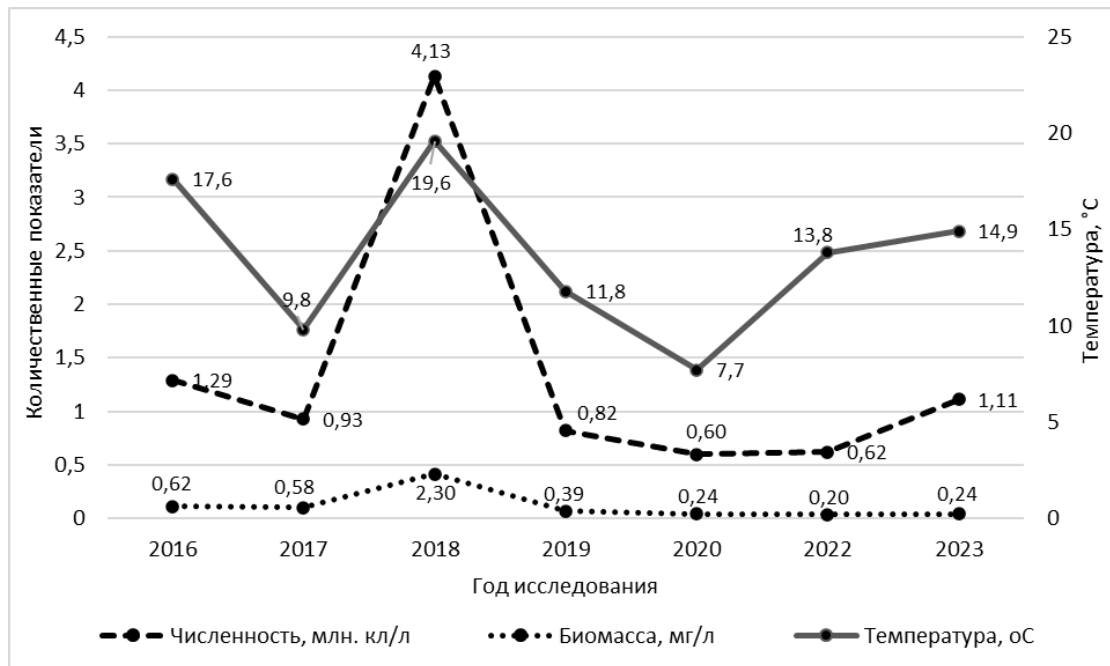


Рис. 4. Динамика количественных показателей планктонных водорослей в зависимости от температуры

Во все годы исследований в акватории дельты р. Великой среди доминантов по численности присутствовали представители отдела Cyanobacteria. Среди них в зависимости от года отмечались мелкоклеточные хроококковые *Aphanocapsa delicatissima* West & G.S. West, *Aphanocapsa incerta* (Lemmermann) G. Cronberg & Komárek, *Aphanothece* sp., *Coelosphaerium kuetzingianum* Nägeli, *Microcystis pulverea* (H.C. Wood) Forti, *Snowella rosea* (J.W. Snow) Elenkin, а также нитчатая цианобактерия *Anabaena* sp. (табл. 1).

Таблица 1. Доминирующие по численности виды фитопланктона

Год	Доминанты	Отдел/подотдел*	Доля от общей численности, % (max)
2016	<i>Microcystis pulverea</i>	Cyanobacteria	11,1
	<i>Komma caudata</i>	Cryptista	10,5
	<i>Snowella rosea</i>	Cyanobacteria	10,3
2017	<i>Aphanocapsa incerta</i>	Cyanobacteria	23,8
	<i>Fragilaria sp.</i>	Bacillariophytina*	13,9
	<i>Melosira varians</i>	Bacillariophytina*	12,8
2018	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	Cyanobacteria	31,7
	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	Bacillariophytina*	21,8
2019	<i>Kephyrion doliolum</i>	Ochrophytina*	18,2
	<i>Microcystis pulverea</i>	Cyanobacteria	16,7
	<i>Stephanodiscus pusillus</i>	Bacillariophytina*	14,4
2020	<i>Kephyrion doliolum</i>	Ochrophytina	27,6
	<i>Ulnaria acus</i>	Bacillariophytina*	12,7
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	Cyanobacteria	11,2
2022	<i>Aphanothece sp.</i>	Cyanobacteria	21,0
	<i>Kephyrion doliolum</i>	Ochrophytina*	17,6
	<i>Anabaena sp.</i>	Cyanobacteria	17,2
	<i>Chlamydomonas globosa</i>	Chlorophyta	13,7
2023	<i>Chlamydomonas globosa</i>	Chlorophyta	50,9
	<i>Kephyrion doliolum</i>	Ochrophytina*	19,4
	<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	Cyanobacteria	12,6
	<i>Coelosphaerium kuetzingianum</i>	Cyanobacteria	11,1

Примечание: * отмечены подотделы фитопланктона; в столбце «Доля от общей численности» указана максимальная доля (%) видов-доминантов в общей численности, зарегистрированная на одной из пяти станций исследования.

Представители диатомовых водорослей отмечались среди доминантов с 2017 по 2020 г. Наибольший вклад в численность в зависимости от станции вносили такие водоросли, как *Fragilaria sp.*, *Melosira varians* C. Agardh, *Stephanodiscus hantzschii* Grunow, *Stephanodiscus pusillus* (Grunow) Willi Krieger, *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal.

С 2019 по 2023 г. заметный вклад в количественные показатели фитопланктонных сообществ дельты вносила золотистая водоросль *Kephyrion doliolum* Conrad, а в 2022 и 2023 г. среди доминантов отмечалась зеленая водоросль *Chlamydomonas globosa* J.W. Snow. Только в 2016 г. среди доминантов отмечалась криптофитовая водоросль *Komma caudata* (L. Geitler) D.R.A. Hill (табл. 1).

Важным показателем экологического состояния водных объектов является их биоразнообразие. Значения индекса Маргалефа тем выше, чем выше количество видов и ниже количество особей. Рассчитанные значения индекса Маргалефа свидетельствовали о наибольшем видовом богатстве фитопланктонных сообществ весной 2016 и 2017 гг. и наименьшем – в 2023 г. (табл. 2).

Таблица 2. Индексы биоразнообразия фитопланктонных сообществ

Год	Индексы биоразнообразия			
	D	H	C	E
2016	6,58±1,12	3,63±0,07	0,04±0,002	0,80±0,02
2017	6,55±0,72	3,64±0,11	0,05±0,02	0,81±0,03
2018	5,35±0,45	2,97±0,25	0,11±0,04	0,67±0,05
2019	6,15±1,10	3,57±0,14	0,06±0,01	0,81±0,03
2020	4,58±0,43	3,31±0,17	0,07±0,02	0,80±0,04
2022	4,71±0,50	3,18±0,19	0,07±0,02	0,77±0,03
2023	3,71±0,42	2,49±0,30	0,17±0,07	0,63±0,06

Примечание: D – индекс Маргалефа, H – индекс Шеннона, C – индекс Симпсона, E – индекс Пиелу

Согласно индексу Шеннона наибольшее видовое разнообразие в фитопланктонном сообществе отмечалось также в 2016 и 2017 гг., наименьшее – в 2023 г. В среднем за все годы наблюдений индекс Шеннона составил $3,26 \pm 0,42$, что немного ниже полученных ранее для фитопланктонных сообществ дельты значений [16]. Индекс Симпсона, чувствительный к наличию в выборке обильных видов, слабо зависит от видового богатства. Полученные значения индекса доминирования свидетельствовали о достаточно равномерном распределении микроводорослей в сообществе в целом по всей акватории (индекс Симпсона не превышал 0,17). Вычисленный на основе индекса Шеннона индекс выравнивания Пиелу показал, что виды по их обилию в фитопланктонном сообществе дельты распределялись также достаточно равномерно, средний индекс Пиелу за все годы исследований составил $0,76 \pm 0,07$ (табл. 2).

Рассчитанный для акватории дельты средний по станциям индекс трофности Милиус изменялся от 27,7, что указывает на олиготрофный тип вод в 2022 г., до 53,3, что говорит о мезотрофном типе исследуемой акватории в 2018 г. (рис. 5). Средний индекс Милиус за весь период наблюдений составил $36,8 \pm 8,9$, что входит в диапазон, характеризующий олиготрофный тип вод.

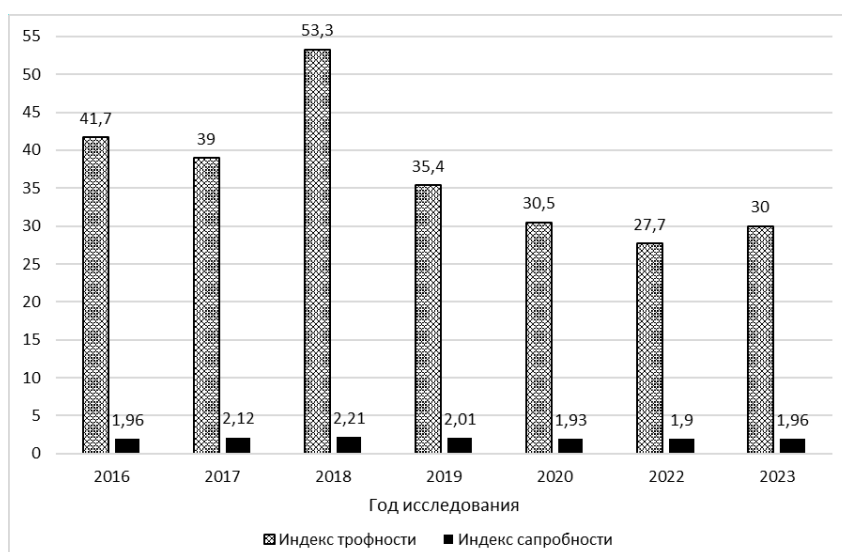


Рис. 5. Значения индексов трофности и сапробности вод дельты р. Великой

Индекс сапробности вод дельты изменялся от 1,9 в 2022 г. до 2,21 в 2018 г., в среднем составляя за весь период мониторинга 2,01, что свидетельствует об умеренном загрязнении вод, III классу качества (рис. 5).

Заключение

Таким образом, за весенний период 2016–2023 гг. в дельте р. Великой было зарегистрировано 293 видовых таксона планктонных водорослей, принадлежащих к 8 систематическим группам. В доминирующий комплекс входили представители Bacillariophytina, Chlorophyta и Ochrophytina.

Полученные значения численности фитопланктона колебались от 597,8 тыс. кл./л до 4,13 млн кл./л, составляя в среднем за весь период исследований $1,36 \pm 1,25$ млн кл./л. Биомасса фитопланктона варьировала в пределах 0,20–2,30 мг/л, в среднем – $0,65 \pm 0,75$ мг/л.

Во все годы исследований в акватории дельты р. Великой среди доминантов по численности присутствовали различные представители отдела Cyanobacteria. С 2019 г. среди доминантов постоянно отмечалась охрофитовая водоросль *Kephyrion doliolum*.

Средний индекс трофности Милиус составил 36,8, что характеризует акваторию дельты как олиготрофный водоем. Значения индекса сапробности вод дельты за весь период мониторинга соответствовали бета-мезосапробной зоне самоочищения, III классу качества вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаров А.Н. Фитопланктон холодноводных озерных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов : автореф. дис. ... д-ра. биол. наук. Борок, 2020. 42 с.

2. *Остроумов С.А.* Гидробионты в самоочищении вод и биогенной миграции элементов. М.: МАКС-Пресс, 2008. 200 с.
3. *Zaghloul A., Saber M., Gadow S. et al.* Biological indicators for pollution detection in terrestrial and aquatic ecosystems. *Bull Natl Res Cent* 44, 127 (2020). <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00385-x>
4. *Лебедева О.А.* Экосистема дельты реки Великой и ее влияние на Псковско-Чудское озеро // Псковский региональный журнал. 2006. № 1. С. 107–121.
5. *Дрозденко Т.В.* Фитопланктон как индикатор экологического состояния водоема (на примере озера Барское, Псковская область) // Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2018. Т. 18, вып. 2. С. 225–231. DOI: 10.18500/1816-9775-2018-18-2-225-231.
6. *Дрозденко Т.В., Кек И.В., Мишкова Т.А.* Фитопланктон как биоиндикатор качества воды озера Маленец (Псковская область) // Самарский научный вестник. 2020. Т. 9, № 3. С. 58–61. DOI: 10.17816/snvn202093110.
7. *Khuram I., Ahmad N., Solak C.N., Barinova S.* Assessment of Water Quality by Bioindication of Algae and Cyanobacteria in the Peshawar Valley, Pakistan. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2022. Vol. 22(3). TRJFAS19805. <http://doi.org/10.4194/TRJFAS19805>.
8. *Садчиков А.П.* Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство. М.: Изд-во «Университет и школа», 2003. 157 с.
9. *Guiry M.D., Guiry G.M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available at: <http://www.algaebase.org> (accessed: 22.02.2021 – 22.05.2023).
10. *Кузьмин Г.В.* Таблицы для вычисления биомассы водорослей. Магадан: ДВНЦ АН СССР, 1984. 47 с.
11. *Мэгарран Э.* Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 181 с.
12. *Исаченко А.Г., Бовыкин И.В., Румянцев В.А., Сорокин И.Н.* Теоретические вопросы классификации озер / под ред. *Н.П. Смирнова*. СПб.: Наука, 1993. 185 с.
13. *Оксиюк О.П., Жуковский В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г.* Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.
14. *Баринова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В.* Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. 498 с.
15. *Судницына Д.Н.* Альгофлора водоемов Псковской области. Псков: ООО «ЛОГОС Плюс», 2012. 224 с.
16. *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. DOI: 10.24143/2073-5529-2021-1-51-60.

Поступила в редакцию 02.04.2024 г.

Принята к печати 26.09.2024 г.

Дрозденко Татьяна Викторовна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и экспериментальной биологии, старший научный сотрудник лаборатории комплексных экологических исследований, Псковский государственный университет; e-mail: tboichuk@mail.ru

Tatiana V. Drozdenko, Candidate of Biology, associate professor of the Department of Ecology and Experimental Biology, senior researcher of the Laboratory of Integrated Environmental Research, Pskov State University; e-mail: tboichuk@mail.ru

Медянкина Мария Владимировна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и природопользования факультета биотехнологий и рыбного хозяйства, Московский государственный университет им. К.Г. Разумовского; e-mail: 79263841762@ya.ru

Mariya V. Medyankina, Candidate of Biology, associate professor of the Department of Ecology and Environmental Management of the Faculty of Biotechnology and Fisheries, Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky; e-mail: 79263841762@ya.ru