

УДК 574.633: 581.526.325.2  
doi: 10.17223/19988591/41/7

**Т.В. Дрозденко, С.Г. Михалап**

*Псковский государственный университет, Псков, Россия*

## **Структурно-таксономическое разнообразие и экологические особенности фитопланктона дельты реки Великой (Псковская область)**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 17-12-60005 а (р).

*Рассмотрена возможность определения экологического состояния водоема по показателям фитопланктона. Показан таксономический состав фитопланктона дельты р. Великой в летний период 2016 г. Установлено, что основу альгофлоры составляют диатомовые и зеленые водоросли. Представлено биоразнообразие фитопланктона на альфа- и бета-уровнях. Дана эколого-географическая характеристика микроводорослей, согласно которой для альгофлоры дельты р. Великой характерно абсолютное преобладание космополитных пресноводных форм, предпочитающих нейтральные и слабощелочные воды. Проведен сапробиологический анализ качества воды, согласно которому установлена средняя степень загрязнения вод в дельте р. Великой. Показано сравнение полученных результатов с исследованиями прошлых лет.*

**Ключевые слова:** *экологический мониторинг; фитопланктон; таксономический состав; сапробность; бассейн Чудско-Псковского озера.*

### **Введение**

Биоразнообразие имеет важнейшее значение для мониторинга, поскольку является обобщенным показателем стабильности природных систем, изменение которого свидетельствует об их структурно-функциональной перестройке. Несмотря на достаточно давнее обсуждение темы многообразия в биосфере, впервые серьезное международное внимание этому вопросу уделили только в 1992 г., когда большинство мировых лидеров подписали Конвенцию о биологическом разнообразии в Рио-де-Жанейро [1].

Являясь интегральной экологической характеристикой, биоразнообразие играет важную роль в эволюционном и пространственно-временном развитии экосистем. Одним из важнейших критериев, доказывающих достижение экосистемой стабильного климаксного состояния, является существование в ней большого количества видов, разделяющих доступные ресурсы [2]. Анализируя многообразие элементов в экосистемах, следует учитывать систем-

ный характер биологических процессов, который предполагает сопряженное взаимодействие на всех структурных уровнях [3, 4]. Роль биоразнообразия в поддержании стабильности экосистем доказана целым рядом исследований [5, 6]. Вместе с тем необходимо учитывать значительное влияние внешних факторов среды, взаимодействие которых создает уникальные условия для формирования биоразнообразия. Весь комплекс взаимодействующих абиотических и биотических факторов делает изучение паттернов биологического разнообразия чрезвычайно сложной задачей, требующей многоуровневого подхода и привлечения сложных математических методов анализа, мощных средств обработки данных и моделирования.

Особую роль в биосфере играют водные экосистемы, характеризующиеся повышенной скоростью круговорота вещества и энергии и предоставляющие широкий спектр экосистемных услуг, таких как пищевые продукты, чистая вода, переработка отходов, круговорот питательных веществ, аккумуляция естественного углерода и рекреационные ресурсы. Водные экосистемы особенно чувствительны к таким процессам, как урбанизация и изменение климата, в силу высокой скорости метаболизма и сложной структурно-функциональной организации, особенности которой отражают существующие в таких экосистемах уровни биоразнообразия [7].

Ключевое значение в водных экосистемах имеют сообщества микроводорослей, которые лежат в основе всех существующих трофических сетей в водоемах. Именно фитопланктон первым реагирует на начальные изменения в водной экосистеме перестройкой своей внутренней структуры и изменением функционирования. Анализ биологического разнообразия сообществ микроводорослей позволяет получить полноценную картину о состоянии водной экосистемы и характере происходящих в ней изменений естественного или антропогенного характера [1, 8, 9]. Помимо теоретического, это имеет и важное прикладное значение, поскольку структура и динамика продуцентов в конечном итоге определяют формирование всей трофодинамической структуры водной экосистемы и предоставляют необходимые показатели для оценки аквакультурного потенциала любого водоема.

Цель работы – изучение структурно-таксономического разнообразия и экологических особенностей фитопланктона дельты р. Великой.

### **Материалы и методики исследований**

В качестве модельной экосистемы для оценки биоразнообразия сообществ микроводорослей использовалась дельта р. Великой, расположенная в 8 км к северо-западу от г. Пскова. Она представляет собой уникальный природный комплекс, в котором происходят соединение и трансформация водных масс реки и водоприемного бассейна Псковско-Чудского озера. По форме дельта близка к треугольнику, длина которого по медиане составляет 4,2 км, а ширина около 4 км. Ее общая площадь равна 2,7 км<sup>2</sup>. Дельта пред-

ставлена комплексом низких заболоченных островов, разделенных протоками [10].

Положение дельты р. Великой, испытывающей на себе комплексное воздействие водных масс Чудско-Псковского водоема, континентальной суши и группы островов дельты, обуславливает некоторые особенности ее мезоклиматического режима. Рассматриваемый участок характеризуется более мягкой и короткой зимой и более длительным и солнечным летом, что оказывает благоприятное влияние на вегетацию растительности. Данный район отличается от других ландшафтов северной части Псковской области более благоприятным климатическим балансом [10]. Сочетание этих факторов позволяет отметить дельту р. Великой как территорию с хорошим потенциалом для образования первичной продукции водных экосистем, а также как природный экотон, постоянно испытывающий на себе антропогенное воздействие.

В летний период 2016 г. проведены исследования в дельте р. Великой на пяти станциях: Вайменка, Большая Листовка, Средняя, Горки и Муровицы (рис. 1). Гидробиологический материал собран пластиковыми пробоотборниками объемом 0,5 л с глубины 0,3–0,5 м. Пробы фитопланктона зафиксированы 40%-ным раствором формалина до слабого запаха и обработаны по стандартной методике [11–13]. Все организмы по возможности определены до вида с использованием микроскопа Carl Zeiss Axio Lab. A1 (Германия) с помощью отечественных и зарубежных определителей [14–23].

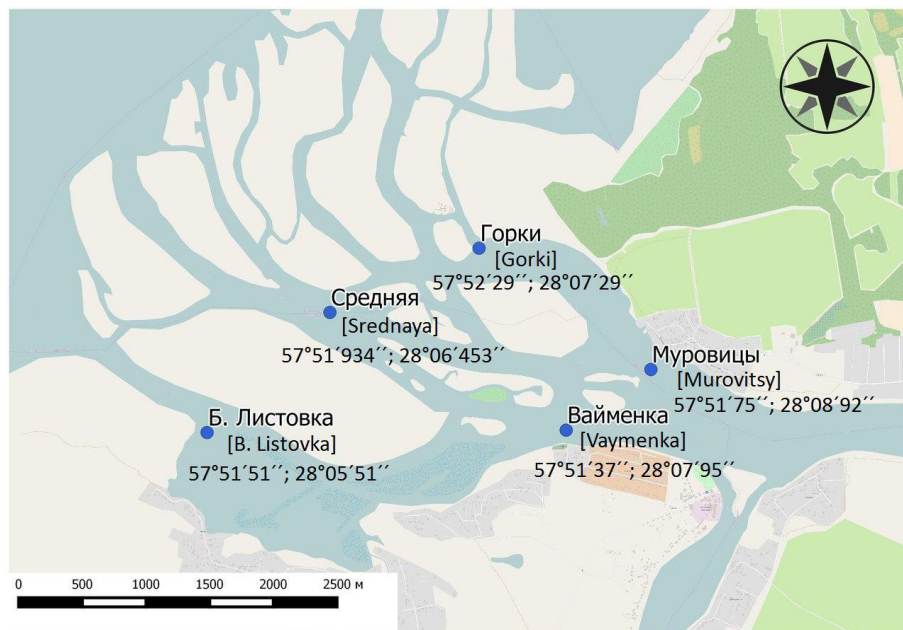


Рис. 1. Станции отбора проб в дельте р. Великой  
[Fig. 1. Sampling stations in the Velikaya River delta]

Определение численности фитопланктона проведено стандартным методом с использованием камеры Нажотта ( $V = 0,05 \text{ см}^3$ ) [13].

Биоразнообразии изучено на альфа- и бета-уровнях. Для изучения параметров альфа-разнообразия сообществ рассчитаны индекс разнообразия Шеннона, индекс доминирования Симпсона, индекс Маргалефа и индекс выравненности Пиелу [1, 8]. Анализ сходства таксономического состава водорослей в разных точках отбора проб (бета-разнообразие) проведен с использованием индекса Серенсена–Чекановского [24]. Для сравнения сообществ микроводорослей дельты р. Великой по видовой структуре использован кластерный анализ [25]. В качестве метода присоединения использован метод Варда, который отличается тем, что минимально увеличивает внутриклассовую дисперсию, т.е. создает наиболее компактные по степени сходства группы элементов. Для комплексного представления показателей видовой богатства и выравненности сообществ микроводорослей построены кривые доминирования–разнообразия [8, 25].

Для выделения экологических групп и уточнения эколого-географических характеристик водорослей использованы определители [14–23] и данные из ряда монографий [26, 27]. Индекс сапробности рассчитан по методу Пантле–Букка в модификации Сладечека [8].

Все этапы статистической обработки данных и построение графических изображений (таблицы, диаграммы, гистограммы) выполнены с использованием программ StatSoft STATISTICA 8.0 и MO Excel. Карта подготовлена с помощью свободно распространяемой ГИС-программы QGIS 2.12.1 (Международный сетевой проект) в виде векторных слоев в системе координат UTM 84.

### **Результаты исследования и обсуждение**

Согласно гидрохимическим данным, воды дельты р. Великой являются карбонатно-кальциевыми с повышенным содержанием ионов группы азота, что свидетельствует об активных процессах минерализации органического вещества [29, 30]. Показатель pH во всех точках отбора проб изменяется в пределах 7,5–8,0.

Важнейшим показателем для жизнедеятельности организмов в водной среде является концентрация растворенного кислорода. Результаты количественного химического анализа показывают, что уровень растворенного кислорода является удовлетворительным для существования гидробионтов и составляет в летний период 8,5–9,0 мг/дм<sup>3</sup>.

В ходе исследования качественного состава летнего фитопланктона дельты р. Великой выявлено 165 таксонов рангом ниже рода, относящихся к 8 отделам, 11 классам, 18 порядкам, 43 семействам, 90 родам (табл. 1).

Таблица 1 [Table 1]

**Таксономический состав фитопланктона дельты р. Великой, лето 2016 г.**  
**[Taxonomic composition of phytoplankton in the Velikaya River delta, summer 2016]**

Отдел [Phylum]	Класс [Class]	Порядок [Order]	Семей- ство [Family]	Род [Genus]	Вид [Species]	Доля от общего числа видов, % [Proportion of the total number of species,%]
<i>Bacillariophyta</i>	2	5	15	29	61	37,0
<i>Chlorophyta</i>	3	5	17	32	56	33,9
<i>Cyanobacteria</i>	2	3	6	11	16	9,7
<i>Euglenophyta</i>	1	1	1	6	10	6,1
<i>Chrysophyta</i>	1	1	1	7	10	6,1
<i>Dinophyta</i>	1	1	1	2	5	3,0
<i>Cryptophyta</i>	1	1	1	2	5	3,0
<i>Xanthophyta</i>	1	1	1	1	2	1,2
Итого [Total]	12	18	43	90	165	100

Распределение микроводорослей по отделам показало явное доминирование *Bacillariophyta* – 37,0% от общего числа видов (61 вид) и *Chlorophyta* – 33,9% (56 видов). Среди диатомовых наиболее богаты по числу видов семейства *Naviculaceae* Kütz. и *Fragilariaceae* Grev., включающие 14 и 11 видов соответственно. Среди зеленых выделяются семейства *Scenedesmaceae* Oltm. (13 видов) и *Selenastraceae* (Blach. et Tansl.) Fritsch (9 видов). На представителей данных отделов приходится в совокупности 32 семейства, 61 род и 117 видов (см. табл. 1). Доминирование данных отделов характерно для водоемов северо-западного региона [31].

На третьем месте по видовому богатству находится отдел *Cyanophyta* / *Cyanoprokaryota* / *Cyanobacteria* – 9,7% (16 видов).

На долю остальных отделов по числу видов приходится меньший процент: *Chrysophyta* и *Euglenophyta* – по 6,1% от общего числа, *Cryptophyta* и *Dinophyta* – по 3,0% (рис. 2). Желтозеленые водоросли (*Xanthophyta*) представлены только двумя видами – *Tribonema affine* (G. S. West) G. S. West. и *Tribonema vulgare* Pasch.

Таким образом, альгофлора дельты р. Великой в летний период 2016 г. характеризуется как диатомово-зеленая с присутствием цианопрокариот.

Анализ видового состава фитопланктона на станциях отбора проб показал, что наибольшее число таксонов рангом ниже рода отмечено в Вайменке – 131 таксон (79,4% от общего числа видов), а наименьшее – в Муровицах – 65 (39,4%) (табл. 2).

На всех исследуемых участках дельты доминирует диатомово-зеленый комплекс альгофлоры. На станции Муровицы, в отличие от остальных, где третье место по видовому разнообразию занимает отдел *Cyanobacteria*,

преобладают представители *Chrysophyta*. На станции Средняя не обнаружены представители отдела *Euglenophyta*, а в Муравицах – *Euglenophyta* и *Xanthophyta*.

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

**Таксономический состав фитопланктона на разных станциях  
дельты р. Великой, лето 2016 г.  
[Taxonomic composition of phytoplankton at different sampling  
stations of the Velikaya River delta, summer 2016]**

Отделы [Phylums]	Станции отбора проб [Sampling stations]									
	Вайменка [Vaymenka]		Б. Листовка [B. Listovka]		Средняя [Srednaya]		Горки [Gorki]		Муравицы [Murovitsy]	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
<i>Bacillariophyta</i>	52	39,7	24	30,0	31	37,3	34	41,5	24	36,9
<i>Chlorophyta</i>	47	35,9	23	28,7	28	33,7	27	32,9	22	33,8
<i>Cyanobacteria</i>	12	9,2	9	11,2	10	12,1	6	7,3	4	6,2
<i>Euglenophyta</i>	5	3,8	8	10,0	0	0	1	1,2	0	0
<i>Chrysophyta</i>	8	6,1	6	7,5	6,1	7,2	5	6,1	6	9,2
<i>Dinophyta</i>	2	1,5	4	5,0	2	2,4	4	4,9	4	6,2
<i>Cryptophyta</i>	4	3,0	5	6,3	5,1	6,1	4	4,9	5	7,7
<i>Xanthophyta</i>	1	0,8	1	1,3	1	1,2	1	1,2	0	0
Итого [Total]	131	100	80	100	83	100	82	100	65	100

Проведенный анализ альфа-разнообразия фитопланктона дельты р. Великой показал, что наибольшим значением индекса Шеннона характеризуется сообщество микроводорослей станции Вайменка ( $H = 3,36$ ), что указывает на максимальное количество составляющих его видов и отсутствие среди них выраженных доминантов. Наименьшее значение характерно для станции Средняя ( $H = 2,92$ ) (табл. 3). В целом значения индексов Шеннона указывают на среднюю сложность структуры сообществ дельты р. Великой.

Т а б л и ц а 3 [Table 3]

**Значения индексов биологического разнообразия  
[Values of biodiversity indices]**

Станция [Station]	H	E	C	d
Вайменка [Vaymenka]	3,36	0,78	0,06	5,96
Б. Листовка [B. Listovka]	3,11	0,78	0,07	4,60
Средняя [Srednaya]	2,92	0,71	0,11	5,40
Горки [Gorki]	2,98	0,70	0,11	6,01
Муравицы [Murovitsy]	2,94	0,73	0,12	5,05

*Примечание.* H – индекс Шеннона; E – выравненность Пиелу; C – индекс Симпсона; d – индекс Маргаллефа).

[Note. H - Shannon Index; E - Pielou's Evenness Index; C - Simpson Index; d - Margalef Index]

Индекс Маргалефа отражает плотность видов, или видовое богатство, на определенной территории, т.е. чем выше значение индекса, тем большим видовым богатством характеризуется данная территория. По значению индекса Маргалефа наибольшим видовым богатством характеризуется станция Вайменка ( $d = 5,96$ ), а наименьшим – станция Большая Листовка ( $d = 4,60$ ). Полученные значения индекса характеризуют все станции отбора проб дельты р. Великой как богатые видами участки.

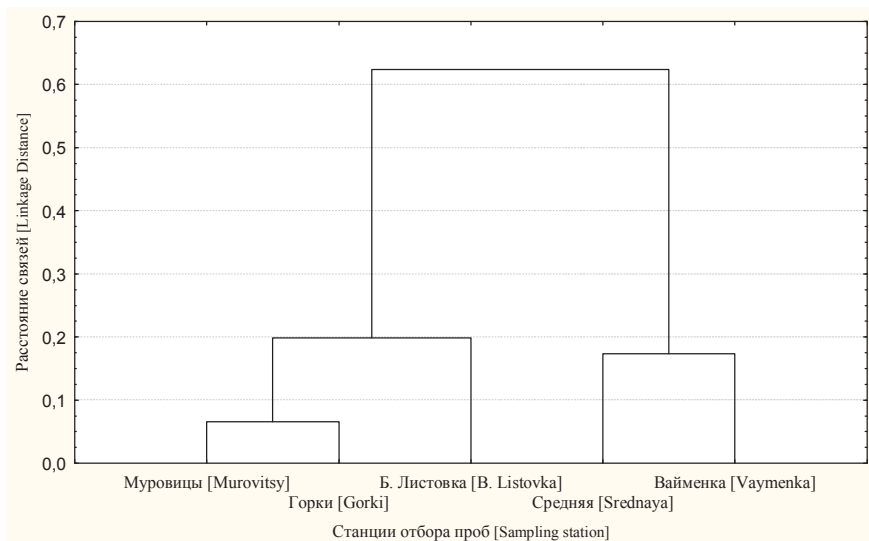
Высокое значение индекса Симпсона указывает на доминирование тех или иных видов сообщества. Именно по этой причине его еще называют индексом доминирования Симпсона. На всех исследуемых станциях дельты получены низкие значения индекса Симпсона, что соответствует сообществам с невыраженными доминантами (см. табл. 3).

Показатели индекса выравненности Пиелу, величина которого сопряжена с индексом разнообразия Шеннона, существенно не изменяются и имеют довольно высокие значения, что свидетельствует о выравненности структуры сообществ и дополнительно подтверждает отсутствие в них выраженных доминантов. При анализе сходства видового состава водорослей разных станций дельты с использованием индекса Серенсена–Чекановского наиболее высокая степень сходства выявлена между альгофлорами станций Горки и Муравицы ( $Ics = 0,82$ ), самая низкая – между станциями Вайменка и Большая Листовка ( $Ics = 0,57$ ). В целом степень сходства между сравниваемыми участками оценивается как высокая. Общими для всех пяти исследованных станций являются 30 видов, большая часть из которых принадлежит зеленым и диатомовым водорослям.

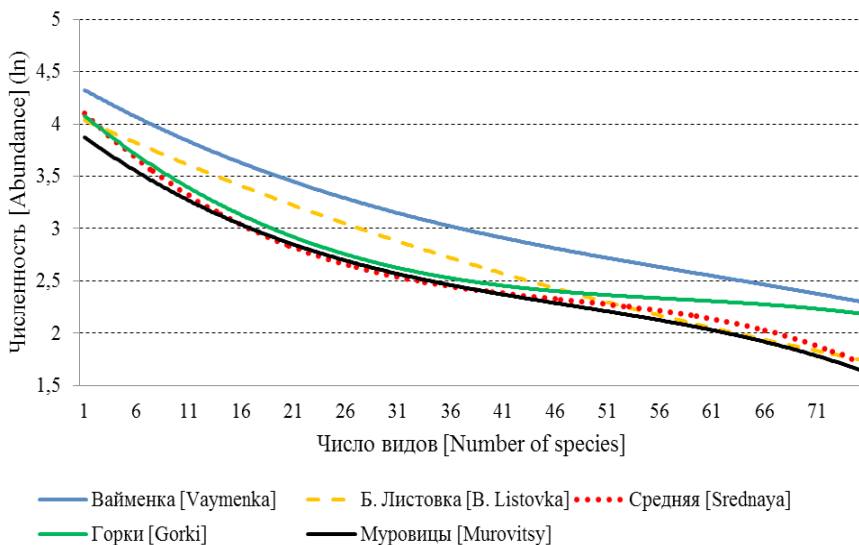
По особенностям видовой структуры все районы исследования дельты подразделяются на два кластера, один из которых представлен станциями Вайменка и Средняя, а другой – станциями Муравицы, Горки и Большая Листовка. Несмотря на относительно небольшую площадь, экосистема дельты р. Великой характеризуется определенной структурной гетерогенностью, что обусловлено характером течений, гидрохимическими и гидрофизическими особенностями, а также неоднородностью поступления и миграции аллохтонных веществ антропогенного происхождения. Сочетание этих факторов формирует необходимые предпосылки для экологической дифференциации сообществ микроводорослей (рис. 2).

Для представления комплексного отображения показателей видового богатства и выравненности построена кривая доминирования–разнообразия, где по оси ординат в логарифмическом масштабе отложена численность микроводорослей, а по оси абсцисс – ранжированная последовательность видов от наиболее представленного до наименее обильного (рис. 3). Все исходные данные для построения кривых получены в ходе отбора проб в летний период 2016 г. По форме и конфигурации этой кривой можно оценить не только видовую выравненность, но и функциональную роль отдельных видов, их статус и биотический потенциал, т.е. все то, что составляет основу понятия «экологическая ниша».





**Рис. 2.** Дендрограмма сходства видовой структуры сообществ фитопланктона дельты р. Великой  
 [Fig. 2. Dendrogram of species structure similarities of phytoplankton communities in the Velikaya River delta]

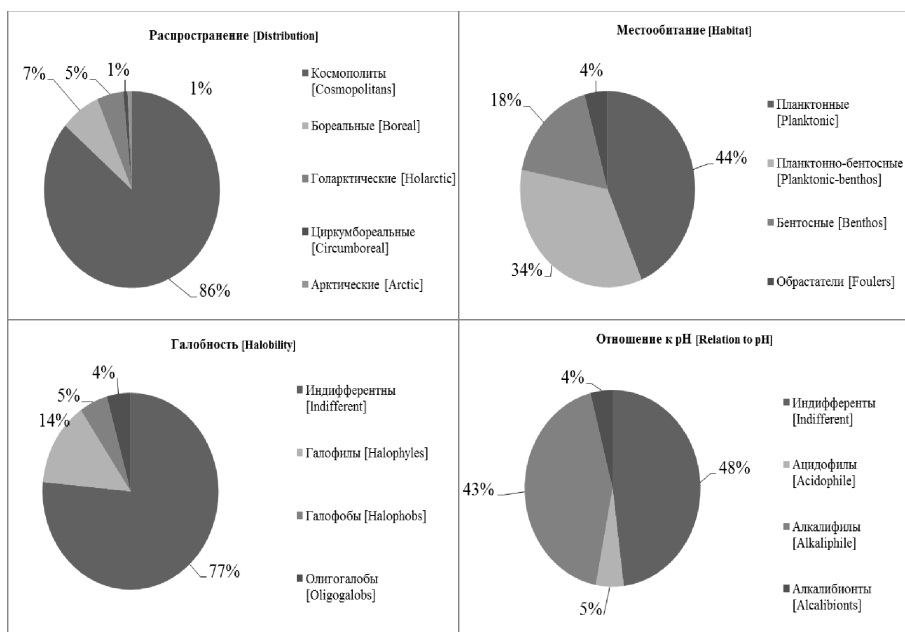


**Рис. 3.** Форма кривых доминирования–разнообразия для различных станций отбора проб (полиномиальная модель)  
 [Fig. 3. Forms of dominance-diversity curves for different sampling stations (polynomial model). On the X-axis - Number of species; on the Y-axis - Abundance of species (ln)]



Из конфигураций кривых, представленных на рис. 3, видно, что они в наибольшей степени подобны логарифмически нормальному типу распределения [28], что соответствует гипотезе многомерного нишевого пространства, включающего большое количество перекрывающихся экологических ниш. Это свидетельствует о том, что биоразнообразию микроводорослей дельты р. Великой довольно высоко и даже на первом трофическом уровне способствует возникновению большого количества альтернативных путей передачи вещества и энергии в экосистеме.

Эколого-географический анализ данных показал, что по характеру географического распространения для альгофлоры дельты р. Великой характерно абсолютное преобладание космополитных форм (86% от числа видов, имеющих данные). Информации по распространению не выявлено у 24,8% микроводорослей. По характеру местообитания большая часть видов относится к планктонным (44%) и планктонно-бентосным (34%) формам. Обитателей бентоса (18%) и обрастаний (4%), представленных в основном диатомовыми водорослями, значительно меньше (рис. 4).

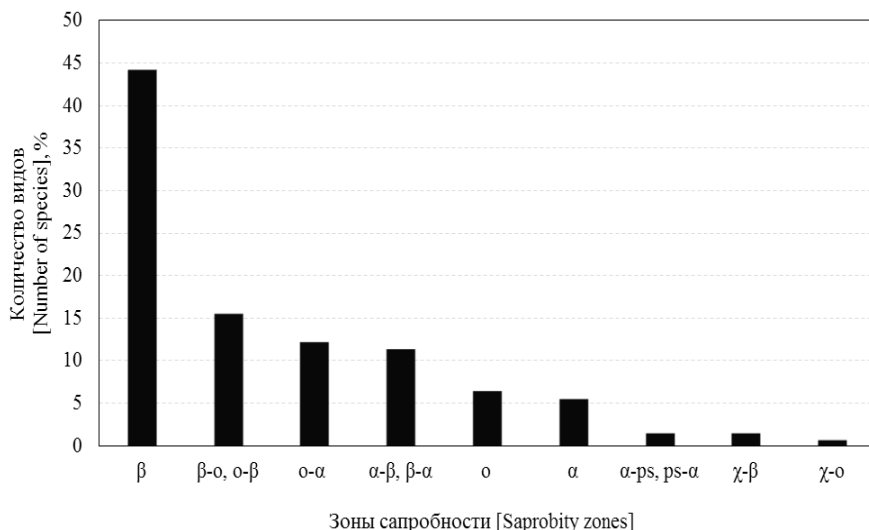


**Рис. 4.** Эколого-географическая характеристика фитопланктона дельты р. Великой  
 [Fig. 4. Ecological and geographical characteristics of phytoplankton of the Velikaya River delta]

Все встреченные виды по отношению к минерализации вод являются олигогалобами. Среди них преобладают индиференты – 77%, а на долю галофилов и галофобов приходится 14 и 5% от общего числа видов, имеющих данные, соответственно. Данные по этому показателю не имеют 30,3 %

водорослей. Сведений по отношению к рН среды нет для 40,6% микроводорослей. На группу индифферентов приходится 48 %, алкалифилов – 43%. Невелика доля ацидофилов и алкалибионтов (см. рис. 4).

При сравнении таксономического состава обнаруженных микроводорослей со списком водорослей-индикаторов степени органического загрязнения [28] выявлено преобладание бета-мезосапробов (44,3%), указывающих на среднюю степень загрязнения вод (рис. 5). Водоросли, предпочитающие чистые воды, составляют 25,4%, из которых единично встречен ксено-олигосапроб – *Sellaphora bacillum* (Ehr.) Mann. На долю микроводорослей, предпочитающих загрязненные воды, приходится 18% от общего числа видов-индикаторов, из которых 2 вида – обитатели вод повышенной загрязненности – эвгленовые *Colacium cyclopicola* (Gickl.) Woronich. et Popova и *Euglena proxima* P.A.Dangeard. Всего обнаружено 122 вида-индикатора сапробности.



**Рис. 5.** Распределение видов-индикаторов сапробности дельты р. Великой по отношению к загрязнению органическими веществами (%): (χ-о) – ксено-олигосапробы; (χ-β) – ксено-β-мезосапробы; (о) – олигосапробы; (о-β) – олиго-β-мезосапробы; (β-о) – β-олиго-мезосапробы; (о-α) – олиго-α-мезосапробы; (β) – β-мезосапробы; (β-α) – β-α-мезосапробы; (α-β) – α-β-мезосапробы; (α) – α-мезосапробы; (α-ps) – α-полисапробы; (ps-α) – поли-α-мезосапробы

**[Fig. 5.** Distribution of species-indicators of the Velikaya River delta saprobity in relation to contamination by organic substances, %. On the X-axis - Saprobity zones; on the Y-axis - Number of species (%): (χ-о) - xeno-oligosaprobates; (χ-β) - xeno-β-mesosaprobates; (о) - oligosaprobates; (о-β) - oligo-β-mesosaprobates; (β-о) - β-oligo-mesosaprobates; (о-α) - oligo-α-mesosaprobates; (β) - β-mesosaprobates; (β-α) - β-α-mesosaprobates; (α-β) - α-β-mesosaprobates; (α) - α-mesosaprobates; (α-ps) - α-polysaprobates; (ps-α) - poly-α-mesosaprobates]

Оценка качества воды по индексу Пантле–Букка в модификации Сладечека выявила  $\beta$ -мезосапробный характер вод в дельте р. Великой, что позволяет отнести их к разряду умеренно загрязненных. Рассчитанные индексы сапробности варьируют в пределах 2,0–2,2 (табл. 4). Максимальные значения индекса отмечены на станциях Большая Листовка и Горки (2,2). Наименьшее значение индекса показано для станции Средняя (2,0). В целом значения индекса в точках отбора проб существенно не различаются, что характеризует дельту как относительно однородную акваторию по содержанию в воде органических загрязнителей.

Сравнение флористического состава дельты р. Великой с исследованиями прошлых лет [10] показало, что в летний период 1992 и 2000 гг. обнаружено соответственно 57 и 33 таксона микроводорослей, а в 2016 г. – 165. Это может быть связано с рядом факторов. Во-первых, в 1992 г. из-за тяжелой экономической ситуации произошла остановка крупных предприятий г. Пскова, что сказалось на чистоте р. Великой и послужило увеличению видового разнообразия фитопланктона. Во-вторых, 2000 г. являлся многоводным (Экологический мониторинг..., 2003), этим можно объяснить наличие малого количества таксонов в отобранных пробах. Также за последние годы отмечается ускорение процессов эвтрофикации в Псковско-Чудском озере, о чем свидетельствует «цветение» водоема, начинающееся с начала лета. Это проявляется увеличением в водной толще биогенных элементов, что вызывает интенсификацию роста микроводорослей. В настоящее время, по сравнению с предыдущими годами, произошло существенное зарастание дельты макрофитами, вследствие чего помимо планктонных форм в пробах встречается достаточное количество обрастателей и бентосных форм (см. рис. 4). В целом во все годы наблюдений в дельте р. Великой основу фитопланктона составлял диатомово-зеленый комплекс.

Сапробиологический анализ показал, что существенных изменений индекса сапробности с 1992 г. не наблюдается (см. табл. 4). Воды дельты р. Великой характеризуются как умеренно загрязненные и относятся к третьему классу качества.

Т а б л и ц а 4 [Table 4]

**Сравнение значений индекса сапробности дельты  
р. Великой в различные годы летнего сезона**  
[Comparison of saprobity index values of the Velikaya River delta  
in different years of the summer season]

Годы исследований [Years of study]	Значение индекса Пантле–Букка [Value of the Pantle-Buck Index]
1992	1,9–2,2
2000	1,7–2,2
2001	2,3–2,5
2016	2,0–2,2

## Выводы

1. В фитопланктоне дельты р. Великой в летний период 2016 г. идентифицировано 165 видовых таксонов рангом ниже рода, принадлежащих 8 отделам, 11 классам, 18 порядкам, 43 семействам, 90 родам.

2. Экосистема дельты р. Великой характеризуется высоким видовым богатством, средней сложностью структур составляющих ее сообществ и высокой выравненностью видов, что свидетельствует об устойчивой структуре сообществ микроводорослей, образующих многомерное нишевое пространство с большим количеством альтернативных путей передачи энергии в экосистеме. Выявление определенных различий на бета-уровне указывает на существование в сообществах микроводорослей дельты определенной экологической дифференциации, которая может быть обусловлена разными условиями среды обитания.

3. Эколого-географический анализ фитопланктона показал, что в дельте р. Великой преобладают пресноводные широко распространенные планктонные виды, предпочитающие слабощелочные воды.

4. Данные сапробиологического анализа свидетельствуют об умеренном загрязнении исследуемых участков дельты р. Великой, что позволяет отнести ее воды к III классу качества.

## Литература

1. География и мониторинг биоразнообразия / Н.В. Лебедева, Д.А. Криволицкий, Ю.Г. Пузаченко, К.Н. Дьяконов, Г.М. Алещенко, А.В. Смуров, В.Н. Максимов, В.С. Тикунов, Г.Н. Огуреева, Т.В. Котова ; под ред. Н.С. Касимова, Э.П. Романовой, А.А. Тишкова. М. : Изд-во Научного и учебно-методического центра, 2002. 432 с.
2. Бигон М., Харпер Дж., Таунсенд К. Экология. Особи популяции и сообщества. М. : Мир, 1989. Т. 1. 667 с.; Т. 2. 477 с.
3. Одум Ю. Экология : в 2 т. М. : Мир, 1986. Т. 1. 328 с.
4. Kevin J. Gaston. Global patterns in biodiversity // *Nature*. 2000. Vol. 405. PP. 220–227. doi: [10.1038/35012228](https://doi.org/10.1038/35012228)
5. Kensa V. Mary. Biodiversity and Energy // *Jr. of Industrial Pollution Control*. 2012. Vol. 28 (1). PP. 95–98. URL: <http://www.icontrolpollution.com/articles/> (accessed: 20.04.2017).
6. Koshurnikova N., Verkhovets S., Antamoshkina O., Trofimova N., Zlenko L., Zhuikov A. Assessment of Central Siberia Forest Ecosystems Sustainability to Forest Fires: Academic Research Outcomes // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015. № 214. PP. 1008–1018. doi: [10.1016/j.sbspro.2015.11.694](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.694)
7. Junguo Liu, Giri Kattel, Hans Peter H. Arp, Hong Yang. Towards threshold-based management of freshwater ecosystems in the context of climate change // *Ecological Modelling*. 2015. № 318. PP. 265–274. doi: [10.1016/j.ecolmodel.2014.09.010](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.010)
8. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Розенберг Г.С. Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели. Тольятти : Кассандра, 2011. 255 с.
9. Дрозденко Т.В., Курка А.А. Оценка экологического состояния водоема по показателям фитопланктона (на примере озера Кучане, Псковская область) // *Самарский научный вестник*. 2017. Т. 6, № 1 (18). С. 22–26.

10. Экологический мониторинг дельты реки Великой / под ред. О.А. Лебедевой. Псков : ПГПИ, 2003. Ч. I. 156 с.
11. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / под ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовского. М. : Наука, 1975. 240 с.
12. Масюк Н.П., Радченко М.И. Методы сбора и изучения водорослей // Водоросли: справочник / отв. ред. С.П. Вассер. Киев : Наукова думка, 1989. С. 170–188.
13. Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона: методическое руководство. М. : Университет и школа, 2003. 157 с.
14. Голлербах М.М., Косинская Е.К., Полянский В.И. Синезеленые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. М. : Наука, 1953. Вып. 2. 650 с.
15. Дедусенко-Щеголева Н.Т., Матвиенко А.М., Шкорбатов Л.А. Зеленые водоросли. Класс Вольвоксовые. *Chlorophyta: Volvocineae* // Определитель пресноводных водорослей СССР. М. ; Л. : Наука, 1959. Вып. 8. 223 с.
16. Дедусенко-Щеголева Н.Т., Голлербах М.М. Желтозеленые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. М. ; Л. : Наука, 1962. Вып. 5. 272 с.
17. Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С. и др. Дiatомовые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. М. : Наука, 1951. Вып. 4. 620 с.
18. Матвиенко А.М. Золотистые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. М. : Сов. наука, 1954. Вып. 3. 188 с.
19. Царенко П.М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР / АН УССР. Ин-т ботаники им. Н.Г. Холодного ; отв. ред. Г.М. Паламарь-Мордвинцева. Киев : Наукова думка, 1990. 208 с.
20. Komarek J., Anagnostidis K. *Cyanoprokaryota*. Teil 1: *Chroococcales* // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Jena ; Stuttgart ; Lübeck ; Ulm, 1998. Bd. 19/1. 548 p.
21. Komarek J., Anagnostidis K. *Cyanoprokaryota*. Teil 2: *Oscillatoriales* // Süßwasserflora von Mitteleuropa. München, 2005. Bd. 19/2. 759 p.
22. Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae*. Teil 1. *Naviculaceae* // Die Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart ; New York : Gustav Fischer Verlag, 1986. Bd. 2/1. 876 p.
23. Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae*. Teil 3. *Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae* // Die Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart ; Jena : Gustav Fischer Verlag, 1991. Bd 2/3. 576 p.
24. Шмидт В.М. Статистические методы в сравнительной флористике. Л. : Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1980. 176 с.
25. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных : учебник. 3-е изд. М. : Бином, 2007. 512 с.
26. Баринаова С.С., Медведева А.Л., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив : PiliesStudio, 2006. 498 с.
27. Судницына Д.Н. Альгофлора водоемов Псковской области. Псков : ЛОГОС Плюс, 2012. 224 с.
28. Preston F.W. The commonness and rarity of species // Ecology. 1948. Vol. 29, № 3. PP. 254–283.
29. Колченко М.В., Дрозденко Т.В., Михалап С.Г. Особенности фитоперифитона тростника дельты реки Великой // Вода: химия и экология. 2016. № 5. С. 19–26.
30. Ястремский В.В. Структура и продуктивность фитопланктона Псковско-Чудского озера. СПб. : ГосНИОРХ, 2016. 296 с.
31. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л. : Наука, 1990. 184 с.

Поступила в редакцию 10.05.2017 г.; повторно 08.09.2017 г.;  
принята 17.01.2018 г.; опубликована 30.03.2018 г.

**Авторский коллектив:**

*Дрозденко Татьяна Викторовна* – канд. биол. наук, доцент кафедры ботаники и экологии растений факультета естественных наук медицинского и психологического образования Псковского государственного университета (Россия, 180000, г. Псков, ул. Советская, 21).

E-mail: [tboichuk@mail.ru](mailto:tboichuk@mail.ru)

*Михалап Сергей Геннадьевич* – ст. преподаватель кафедры ботаники и экологии растений факультета естественных наук медицинского и психологического образования Псковского государственного университета (Россия, 180000, г. Псков, ул. Советская, 21).

E-mail: [sgmikhailap@gmail.com](mailto:sgmikhailap@gmail.com)

**For citation:** Drozdenko TV, Mikhailap SG. Structural and taxonomic diversity and ecological features of phytoplankton in the Velikaya River delta (Pskov Oblast). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;41:118-134. doi: 10.17223/19988591/41/7 In Russian, English Summary

**Tatiana V. Drozdenko, Sergei G. Mikhailap**

*Pskov State University, Pskov, Russian Federation*

### **Structural and taxonomic diversity and ecological features of phytoplankton in the Velikaya River delta (Pskov Oblast)**

The basis of the existence of aquatic ecosystems is microalgae communities, which produce most part of biological products, play an important role in the sustainability of ecosystems and provide many types of different ecosystem services. The short life cycle and rapid metabolism of microalgae make them ideal targets for monitoring research. The structure and dynamics of producers determines the formation of the entire trophodynamic structure of the aquatic ecosystem and provides the necessary indicators for assessing the aquacultural potential of any water body. The aim of this research was to study the structural and taxonomic diversity of phytoplankton of the Velikaya River delta.

The Velikaya River delta (57°86'96"N, 28°11'54"E) presents a unique natural complex where connection and transformation of the river water masses and the water-receiving basin of Lake Peipus take place. We collected samples for phytoplankton study and basic physical and chemical measurements in summer 2016 at five sampling stations representing various ecological areas of the Velikaya River delta (See Fig. 1). The hydrobiological material (five samples) was collected by 0.5 liter plastic samplers from a depth of 0.3-0.5 m. Phytoplankton samples were fixed with a 40% formalin solution until a weak odor and were concentrated by the sediment method. We identified the species of all organisms, as far as possible, using a "Carl Zeiss Axio Lab. A1" microscope with the help of Russian and foreign determinants. The laboratory treatment was performed with a 0.05 cm<sup>3</sup> Najotta camera using conventional methods. The biodiversity was studied at alpha and beta levels. To study the parameters of alpha-diversity of communities, we calculated the Shannon's diversity index, the Simpson's dominance index, the Margalef's index and the Pielou's evenness index. Analysis of algae taxonomic composition similarity at different sampling sites (beta-diversity) was conducted using the Sørensen-Chekanovsky Index. For complex presentation of species richness parameters and algae community evenness, we constructed dominance-diversity curves. To compare the microalgae communities of the Velikaya river delta according to species structure, we used cluster analysis. We used the Ward's method as a method of linkage. To identify ecological groups and specify ecological and geographical characteristics of algae, we used determinants and data from a number

of monographs. The index of saprobity was calculated according to Pantle-Buck in the modification of Sladechek.

We identified one hundred sixty five species taxa of microalgae belonging to 8 phylums: *Bacillariophyta* (37%), *Chlorophyta* (33.9%), *Cyanophyta/Cyanoprokaryota* (9.7%), *Chrysophyta* (6.1%), *Euglenophyta* (6.1%), *Cryptophyta* (3%), *Dinophyta* (3%), *Xanthophyta* (1.2%) (See Tables 1 and 2). The Shannon index values indicate the average complexity of microalgae community structure. The Margalef index values describe the Velikaya River delta as an ecosystem of high species richness (See Table 3). Compared to the previous studies, a significant increase in the level of information diversity is observed, indicating an increase in the number of possible substance and energy flows in the ecosystem. The forms of dominance-diversity curves indicate that the structure of microalgae communities corresponds to the concept of Hutchinson's multidimensional niche space (See Fig. 3). Identification of differences in the structure of species communities also points out the existence of ecological differentiation in microalgae complexes of the delta, which is due to the habitat heterogeneity. Ecological and geographical analysis proves that the absolute dominance of cosmopolitan freshwater forms is typical of the algoflora of the Velikaya River delta. In relation to the pH-reaction, the inhabitants of neutral and slightly alkaline water dominate (See Fig. 4). The Pantle-Buck saprobity index is used for water quality assessment, which shows beta-mesosaprobic water quality in the ecosystem. Thus, the water of the Velikaya River delta could be referred to the category of moderately polluted water (class III of water quality) (See Fig. 5; Table 4).

*The paper contains 5 Figures, 4 Tables and 31 References.*

**Keywords:** ecological monitoring; phytoplankton; taxonomic composition; saprobity; Lake Peipus basin.

**Funding:** This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No 17-12-60005 a (r)).

## References

1. *Geografiya i monitoring bioraznoobraziya* [Geography and biodiversity monitoring]. Lebedeva NV, Krivolutskiy DA, Puzachenko YG, D'yakonov KN, Aleshchenko GM, Smurov AV, Maksimov VN, Tikunov VS, Ogureeva GN, Kotova TV, Kasimova NS, Romanovoy AA, editors. Moscow: Nauchnyy & uchebno-metodicheskiy tsentr Publ.; 2002. 432 p. In Russian
2. Begon M, Harper JL, Townsend K. Ecology: Individuals, Populations and Communities. Vol. 1. Translated from English Mikheeva VN, Snetkova MA; Gilarov AM, editor. Moscow: Mir Publ.; 1989. 477 p. In Russian
3. Odum EP. Fundamentals of Ecology. Vol. 1. Translated from English Frolova YM; Sokolov VE, editor. Moscow: Mir Publ.; 1986. 328 p. In Russian
4. Kevin J. Gaston. Global patterns in biodiversity. *Nature*. 2000;405:220-227. doi: [10.1038/35012228](https://doi.org/10.1038/35012228)
5. Kensa VM. Biodiversity and Energy. *Jr. of Industrial Pollution Control*. 2012; 28(1):95-98. [Electronic resource]. Available at: <http://www.icontrolpollution.com/articles/> (assessed: 20.04.2017).
6. Koshurnikova N, Verkhovets S, Antamoshkina O, Trofimova N, Zlenko L, Zhuikov A. Assessment of Central Siberia forest ecosystems sustainability to forest fires: Academic research outcomes. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2015;214:1008-1018. doi: [10.1016/j.sbspro.2015.11.694](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.694)
7. Liu J, Kattel G, Arp HPH, Yang H. Towards threshold-based management of freshwater ecosystems in the context of climate change. *Ecological Modelling*. 2015; 318:265-274. doi: [10.1016/j.ecolmodel.2014.09.010](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.010)



8. Shitikov VK, Zinchenko TD, Rozenberg GS. Makroekologiya rechnykh soobshchestv: kontseptsii, metody, modeli [Macroecology of river communities: Concepts, methods, models]. Togliatti: Cassandra Publ.; 2011. 255 p. In Russian
9. Drozdenko TV, Kurka AA. Assessment of the ecological state of the pond on the phytoplankton indicators (for example, Kuchane Lake, Pskov region). *Samara Journal of Science*. 2017;6(1-18): 22-26. In Russian, English Summary
10. *Ekologicheskoy monitoring del'ty reki Velikoy* [Environmental monitoring of the Velikaya river delta]. Vol. I. Lebedeva OA, editor. Pskov: Pskov State University Publ.; 2003. 156 p. In Russian
11. *Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoemov* [Methods of studying biogeocenosis of inland water bodies]. Mordukhay-Boltovskiy FD, editor. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 240 p. In Russian
12. Masyuk NP, Radchenko MI. Metody sbora i izucheniya vodorosley [Methods of collecting and studying algae]. Vasser SP, editor. Kiev: Nauk. Dumka Publ.; 1989. pp. 170-188. In Ukrainian
13. Sadchikov AP. Metody izucheniya presnovodnogo fitoplanktona: metodicheskoe rukovodstvo [Methods of studying freshwater phytoplankton: Practical guide]. Moscow: Universitet & shkola Publ.; 2003. 157 p. In Russian
14. Gollerbakh MM, Kosinskaya EK, Polyanskiy VI. Sinezelenye vodorosli. Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR [Cyanobacteria. The determinant of freshwater algae of the USSR]. Vol. 2. Moscow: Nauka Publ.; 1953. 650 p. In Russian
15. Dedusenko-Shchegoleva NT, Matvienko AM, Shkorbatov LA. Zelenye vodorosli. Klass Vol'vokovyey. Chlorophyta: Volvocineae. Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR [Green algae. Class Volvocaceae. Chlorophyta: Volvocineae. The determinant of freshwater algae of the USSR]. Vol. 8. Moscow; Leningrad: Nauka Publ.; 1959. 223 p. In Russian
16. Dedusenko-Shchegoleva NT, Gollerbakh MM. Zheltozelenye vodorosli. Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR [Yellow-green algae. The determinant of freshwater algae of the USSR]. Vol. 8. Moscow; Leningrad: Nauka Publ.; 1962. 272 p. In Russian
17. Zabelina MM, Kiselev IA, Proshkina-Lavrenko AI, Sheshukova VS. Diatomovye vodorosli. Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR [Yellow-green algae. The determinant of freshwater algae of the USSR]. Vol. 4. Moscow: Nauka Publ.; 1951. 620 p. In Russian
18. Matvienko AM. Zolotistyye vodorosli. Opredelitel' presnovodnykh vodorosley SSSR [Golden algae. The determinant of freshwater algae of the USSR]. Vol. 3. Moscow: Sov. Nauka Publ.; 1954. 188 p. In Russian
19. Tsarenko PM. Kratkiy opredelitel' khlorokokkovykh vodorosley Ukrainskoy SSR [Brief determinant of chlorococcal algae of the Ukrainian SSR]. Akademiya nauk USSR. In-t botaniki im. MG Kholodnogo [The Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. MG Kholodny Institute of Botany]. Palamar-Mordvintseva GM, editor. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1990. 208 p. In Ukrainian
20. Komarek J, Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. Teil 1. Chroococcales Süßwasserflora von Mitteleuropa [Cyanoprokaryota. Part 1. Chroococcales. Fresh water flora of Central Europe]. Bd. 19/1. Jena; Stuttgart; Lübeck; Ulm Publ.; 1998. 548 p. In German
21. Komarek J, Anagnostidis K. Cyanoprokaryota. Teil 2: Oscillatoriales. Süßwasserflora von Mitteleuropa [Cyanoprokaryota. Part 1. Oscillatoriales. Fresh water flora of Central Europe]. Bd. 19/2. München Publ.; 2005. 759 p. In German
22. Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil 1. Naviculaceae. Die Süßwasserflora von Mitteleuropa [Bacillariophyceae. Part 1. Naviculaceae. Fresh water flora of Central Europe]. Bd. 2/1. Gustav Fischer Verlag: Stuttgart, New York Publ.; 1986. 876 p. In German
23. Krammer K. Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Teil 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae Die Süßwasserflora von Mitteleuropa [Bacillariophyceae. Part 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Fresh water flora of Central Europe]. Bd 2/3. Gustav Fischer Verlag: Stuttgart, Jena Publ.; 1991. 576 p. In German

24. Shmidt VM. Statisticheskie metody v sravnitel'noy floristike [Statistical methods in comparative floristics]. Leningrad: Leningradskiy universitet Publ.; 1980. 176 p. In Russian
25. Khalafyan AA. STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannykh: uchebnik [STATISTICA 6. Statistical analysis of data: Textbook]. 3th ed. Moscow: Binom Publ.; 2007. 512 p. In Russian
26. Barinova SS, Medvedeva AL, Anisimova OV. Bioraznoobrazie vodorosley-indikatorov okruzhayushchey sredy [Biodiversity of algae-indicators of the environment]. Tel-Aviv: PiliesStudio Publ.; 2006. 498 p. In Russian
27. Sudnitsyna DN. Algoflora vodoemov Pskovskoy oblasti [Algoflora of water bodies of Pskov oblast']. Pskov: "LOGOS Plyus" Publ.; 2012. 224 p. In Russian
28. Preston FW. The commonness, and rarity, of species. *Ecology*. 1948;29(3):254-283. doi: [10.2307/1930989](https://doi.org/10.2307/1930989)
29. Kolchenko MV, Drozdenko TV, Mikhalap SG. Osobennosti fitoperifitona trostnika del'ty reki Velikoy [Reed phytoperifiton features specific to the Velikaya river delta]. *Water: chemistry and ecology*. 2016;5:19-26. In Russian, English Summary
30. Yastremskiy VV. Struktura i produktivnost' fitoplanktona Pskovsko-Chudskogo ozera [Structure and production of phytoplankton of Lake Peipus]. St. Petersburg: "GosNIORKh" Publ.; 2016. 296 p. In Russian
31. Trifonova IS. Ekologiya i suksessiya ozernogo fitoplanktona [Ecology and succession of lake phytoplankton]. Leningrad: Nauka Publ.; 1990. 184 p. In Russian

*Received 10 May 2017; Revised 08 September 2017;  
Accepted 17 January 2018; Published 30 March 2018*

**Author info:**

**Drozdenko Tatyana V**, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Department of Botany and Ecology of Plants, Pskov State University, 21 Sovetskaya Str., Pskov 180000, Russian Federation.

E-mail: [tboichuk@mail.ru](mailto:tboichuk@mail.ru)

**Mikhalap Sergey G**, Senior Lecturer, Department of Botany and Ecology of Plants, Pskov State University, 21 Sovetskaya Str., Pskov 180000, Russian Federation.

E-mail: [sgmikhalap@gmail.com](mailto:sgmikhalap@gmail.com)