

УДК 574.5(28):581

## ИЗМЕНЕНИЯ ТАКСОНОМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ФИТОПЛАНКТОНА МАЛЫХ ВОДОЕМОВ ПОСЛЕ ПРЕКРАЩЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Е.С. Кривина<sup>1</sup>, Н.Г. Тарасова<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, 445003, Россия*

<sup>2</sup>*Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, 445020, Россия*

### Аннотация

В работе представлены результаты исследования трансформации таксономической структуры фитопланктона малых водоемов, изначально испытывавших техногенную нагрузку, в результате изменения уровня и характера антропогенного воздействия. Материалом послужили результаты исследований сообщества планктонных водорослей в период с 1991 по 2014 г. в оз. Отстойник и оз. Шламонакопительное, которые были выбраны в качестве моделей как наиболее типичные техногенные водоемы Поволжского региона. В результате развернутого таксономического и графического анализа было установлено, что уменьшение техногенной нагрузки на водоемы привело к значительному увеличению видового богатства альгофлоры планктона, причем на уровне всех систематических единиц (включая отделы). Анализ родства альгофлор выявил высокую видовую специфичность альгофлоры на начальном и конечном этапах исследования, что говорит о значительной трансформации экосистемы. Поскольку трансформация сопровождалась увеличением видового богатства, с одной стороны, и повышением уровня трофо-метаболической целостности, с другой, можно сказать, что характер трансформации имел позитивный характер.

**Ключевые слова:** фитопланктон, таксономическая структура, техногенные водоемы, трансформация экосистемы

### Введение

Малые водоемы, расположенные на измененных в результате антропогенной деятельности ландшафтов, сохраняют свои рекреационную, климатообразующую и эстетическую функции. Оценка их состояний, мониторинг и прогнозирование происходящих в них изменений – одна из актуальных проблем современной гидроэкологии [1].

Как известно, водоросли являются одним из важнейших компонентов экосистемы водоема, выступая в роли продуцентов органического вещества. В то же время характеристики альгофлоры планктона (видовой состав, доминирующие виды, биомасса, сапробность), служат показателем качества воды в нем [2, 3].

С ростом городов, развитием производства техногенная трансформация среды приобретает все более глобальный характер. Разнообразие техногенного воздействия на естественные экосистемы приводит к образованию множества

специфических форм техногенных биоценозов, в том числе и водных. На фоне увеличения темпов промышленного производства и урбанизации такие водные объекты становятся важной частью городского ландшафта. При этом именно они из-за постоянного техногенного стресса становятся наиболее уязвимыми [4]. В настоящее время многие приемники стоков и отстойники уже перестали быть необходимыми промышленным предприятиям. В связи с этим ведутся работы по диагностике экологического состояния водоемов, а также по разработке комплексов мер по сохранению и восстановлению экосистем этих водных объектов. Так, лабораторией водных экосистем Казанского государственного университета была предложена концепция по восстановлению малых озер [5]. В ИЭВБ РАН Самарской области и Нижегородском государственном университете были разработаны экологические паспорта городских водоемов [6, 7]. В Европе для водоемов, подвергшихся техногенной эксплуатации, в рамках EU Life Program была предложена компьютерная модель управления состоянием данных водоемов, рассчитанная на менеджеров и чиновников разного уровня, не являющихся специалистами в области экологии [8, 9].

Цель настоящей работы – изучить характер трансформации таксономической структуры фитопланктона техногенных водоемов, антропогенная нагрузка на которые прекратилась, но работ, связанных с их восстановлением, проведено не было.

### Материалы и методы исследования

Материалом для данной работы послужили результаты исследований сообщества планктонных водорослей в двух водоемах – оз. Отстойник и оз. Шламонакопительное, выбранных в качестве модельных как наиболее типичные техногенные водоемы Поволжского региона [10, 11].

Озеро Отстойник – искусственный водоем, созданный как приемник отходов азотно-тукового производства ОАО «КуйбышевАзот». До 1994 г. находился в режиме активной эксплуатации, но впоследствии объемы сбросов были снижены, а в 1996 г. и вовсе прекращены [11, 12]. Озеро Шламонакопительное раньше служило приемником золы и шлаков Тольяттинской ТЭЦ, в конце 90-х годов вследствие заиливания разделилось на ряд мелких водоемов глубиной несколько десятков сантиметров и к настоящему времени почти полностью пересохло.

Данные водоемы входят в систему Васильевских озер, расположенную на северо-восточной границе г. о. Тольятти Самарской области. Они возникли после создания Жигулевской ГЭС в 1957 г., и их питание в основном определяется атмосферными осадками и подземными водами. Поскольку оз. Отстойник представляет собой бетонированный водоем, подземные воды в его питании никакой роли не играют [7, 11].

На экологическую обстановку в районе системы Васильевских озер долгое время оказывают влияние северный промышленный узел г. Тольятти, а также деятельность садоводческих и дачных кооперативов, которые поставляли и продолжают поставлять в водоемы биогенные элементы [7, 12].

По очертанию акватории оз. Шламонакопительное относится к IV типу – овальной формы [13], а оз. Отстойник – водоем прямоугольной формы.

Табл. 1

Некоторые морфометрические показатели озер Шламонакопительное и Отстойник

Название	Год	Географические координаты	Происхождение	Площадь, м <sup>2</sup>	Длина, м	Объем, м <sup>3</sup>	Средняя глубина, м
оз. Шламонакопительное	1991–1992	53°52'12" с.ш. 49°50'94" в.д.	Естественное	205024	596	307536	1.5
	2001			101232	244	50616	0.5
оз. Отстойник	1991–2014	53°50'13" с.ш. 49°49'57" в.д.	Искусственное	96559	446	135183	1.4

По основным морфологическим показателям (табл. 1) оба озера относятся к классу малых и очень малых озер [13].

Пробы фитопланктона отбирали раз в 10 дней в период с июня по сентябрь 1991 г., с мая по октябрь 1992 г. и в 2001 г. В 2014 г. пробы отбирали ежемесячно с мая по сентябрь только в оз. Отстойник, так как оз. Шламонакопительное стало эфемероидным.

Отбор материала проводили по стандартным гидробиологическим методикам. Пробы отбирали батометром Рутгнера, фиксировали 40%-ным раствором формалина, концентрировали методом прямой фильтрации. Подсчет клеток проводили в камере «Учинская» объемом 0.01 мл, биомассу рассчитывали по методу приведенных геометрических фигур [14]. Для определения видовой принадлежности водорослей пользовались определителями серий «Определители пресноводных водорослей СССР» [15–21] и “Susswasserflora von Mitteleuropa” [22–26].

При оценке таксономической структуры альгофлоры использовали методы геоботаники [27], оценивая вклад в ее формирование порядков, семейств, родов и выделяя среди них десять «ведущих». В ранг «ведущих таксонов» мы выделили те, которые в общей сумме давали более 60% общего числа видов, разновидностей и форм.

Степень сходства видового состава альгофлор оценивали на основании коэффициента Серенсена – Чекановского [27]. По его величинам была проведена кластеризация данных в программе Statistica (v. 8.0), методом Варда.

Комплекс преобладающих видов определяли в соответствии с алгоритмом Колмара [28]. Оценка трофо-метаболической целостности системы проводилась по установленной методике графического анализа в модификации применительно к экосистемам [28, 29]. При построении исходной матрицы использовалось число идентифицированных таксонов видового и внутривидового ранга и их относительная численность. Таксоны ранжировались по показателю относительной численности в сторону ее уменьшения. Анализ полученных гистограмм проводился в линейной и логарифмической системе координат. В логарифмической системе координат анализировались тренды исходных зависимостей, представленные результирующими прямыми линиями, и их генерации. Дальнейший анализ характера пространственно-временной трансформации таксономических пропорций производился, исходя из соответствия тому или иному основному (базовому) типу сценария [29].

Табл. 2

Таксономическая структура альгофлоры планктона озер Шламонакопительное и Отстойник

Отдел	Число				Число таксонов		
Cyanophyta	2	3	10	23	39	0	39
Bacillariophyta	2	4	9	11	21	3	24
Cryptophyta	1	1	1	3	10	0	10
Dinophyta	1	3	3	6	9	0	9
Raphidophyta	1	1	1	1	1	0	1
Euglenophyta	1	1	1	2	5	3	8
Chlorophyta	3	4	13	23	62	0	62
Streptophyta	1	1	2	3	9	1	10
Итого	12	18	40	72	156	7	163

### Результаты и их обсуждение

Как известно, видовое богатство, таксономическая структура альгофлоры планктона в водоеме, состав комплекса доминирующих таксономических единиц разного ранга во многом зависят от особенностей воздействия факторов среды, морфометрии и водообмена, биогенной обеспеченности. В связи с этим анализ таксономической структуры фитопланктона на временном промежутке, связанном с изменением степени антропогенной нагрузки на водоем, может помочь проследить особенности ответной реакции водорослей на эти изменения [2, 7].

В составе альгофлоры исследованных техногенных водоемов за весь период наблюдений было зарегистрировано 163 таксона водорослей рангом ниже рода (табл. 2). Они относились к 12 отделам, 18 порядкам, 40 семействам и 72 родам.

Наибольшим числом видовых и внутривидовых таксонов водорослей отличался отдел зеленых водорослей, в котором было сосредоточено 38% от общего числа видов, разновидностей и форм. Затем следовали синезеленые (24%), диатомовые (15%), стрептофитовые, криптофитовые и динофитовые (по 6%), эвгленовые (5%), рафидофитовые (1%) водоросли. Отметим, что обычно в основной массе водоемов умеренной зоны при ранжированном распределении основных отделов водорослей в зависимости от числа входящих в них видовых и внутривидовых таксонов второе место традиционно занимают диатомовые водоросли, а синезеленые – третье [2, 7].

На начальном этапе исследования альгофлоры планктона каждого из озер характеризовались достаточно высокой видовой специфичностью. После изменения характера и уровня антропогенной нагрузки в 2001 г. наблюдалось возрастание сродства видового состава водорослей водоемов. Вполне вероятно, что к 2014 г. эта тенденция могла сохраниться, если бы оз. Шламонакопительное не превратилось в эфемероидный водоем (рис. 1).

Графический анализ выявил в обоих водоемах пространственно-временную трансформацию таксономических пропорций по типу образования генерации результирующих линий с единым центром локализации (рис. 2).

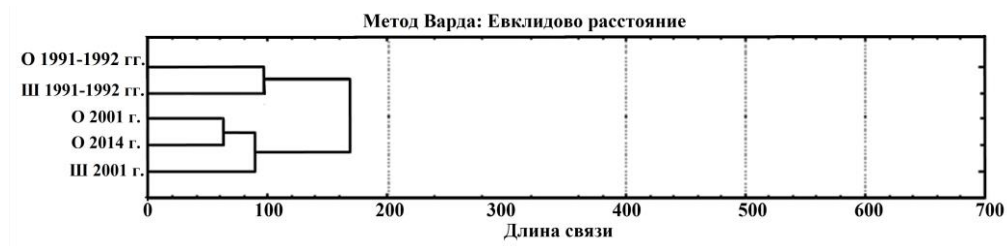


Рис. 1. Анализ сходства таксономической структуры изучаемых водоемов на различных этапах исследования: О – оз. Отстойник, Ш – оз. Шламонакопительное

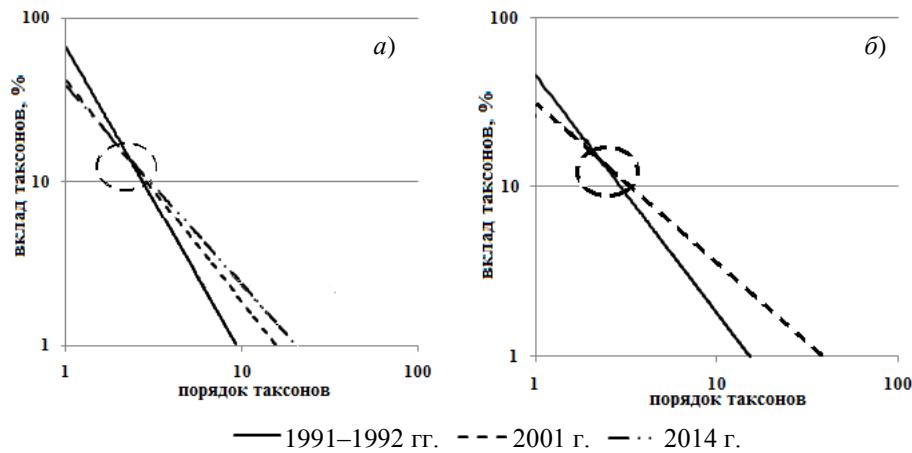


Рис. 2. Графический анализ трансформации таксономической структуры фитопланктонных комплексов оз. Отстойник (а) и оз. Шламонакопительное (б) в 1991–2014 гг. в логарифмической системе координат

Табл. 3

Уравнения результирующих линий трансформации таксономической структуры фитопланктонных комплексов озер Отстойник и Шламонакопительное в 1991–2014 гг.

Водоем	Годы	Уравнение	Коэффициент детерминации $R^2$
Оз. Отстойник	1991–1992	$y = 67.13x^{-1.90}$	0.933
	2001	$y = 41.59x^{-1.35}$	0.922
	2013–2014	$y = 38.31x^{-1.22}$	0.926
Оз. Шламонакопительное	1991–1992	$y = 46.21x^{-1.41}$	0.859
	2001	$y = 26.47x^{-0.53}$	0.895

В логарифмической системе координат были получены уравнения результирующих линий трансформации таксономической структуры фитопланктонных комплексов, по типу степенной зависимости  $Y = k_i X^a$  между значениями  $X$  (порядком таксона) и  $Y$  (его относительной численностью) (табл. 3). Изменение значений  $a_i$  от 1991 г. к 2014 г. указывает на ослабление негативного влияния на экосистему. Уменьшение значения коэффициента  $k_i$  свидетельствует об увеличении числа таксонов и допустимого нижнего порога их относительной численности, которые обеспечивают поддержание трофо-метаболической целостности экосистемы [29].

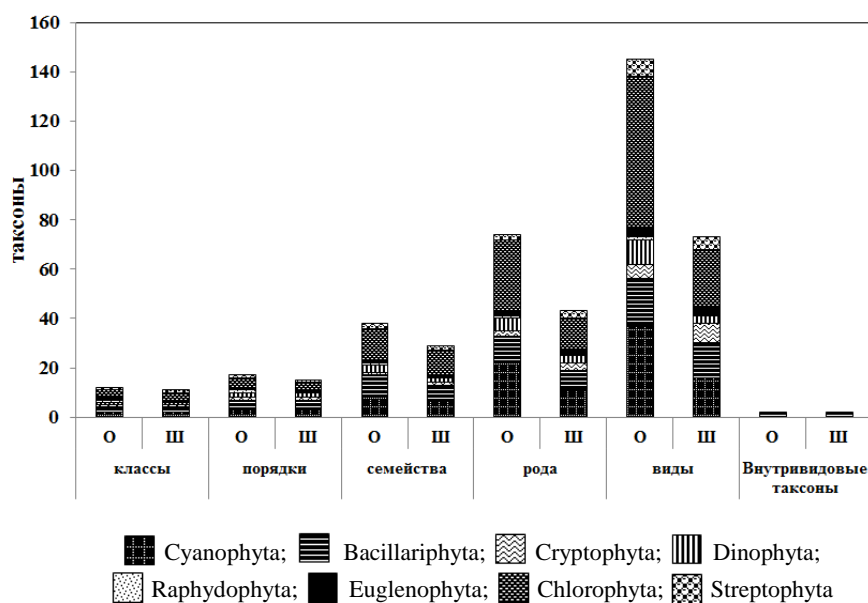


Рис. 3. Таксономическая структура альгофлоры планктона изучаемых водоемов: О – оз. Отстойник, Ш – оз. Шламонакопительное

Иными словами, анализ результирующих линий трансформации таксономической структуры фитопланктона изучаемых озер во времени указывает на увеличение степени трофо-метаболической целостности экосистем, постепенное формирование и рост комплекса основополагающих видов ее поддерживающих. Это, несомненно, является позитивным признаком самопроизвольной трансформации после снятия техногенного пресса. Однако положение точки «вращения» результирующих линий и значения допустимых нижних порогов числа основополагающих доминирующих таксонов говорит о том, что переход произошел относительно недавно и система находится еще в нестабильном состоянии [28]. Поскольку при этом наблюдалось возрастание богатства и разнообразия таксонов различного ранга (начиная с отделов), можно предположить, что во многом это было связано с процессами самовосстановления после прекращения поступления промышленных сбросов, сопутствующими обмелению и перестройки водоема на эфемероидный тип [28, 29].

В составе альгофлоры оз. Отстойник за весь период исследования было выявлено 146 видов, разновидностей и форм водорослей, в оз. Шламонакопительное общее видовое богатство было почти в 2 раза ниже – 76 таксонов рангом ниже рода (рис. 3). Наибольшим таксономическим богатством выделялись отделы Chlorophyta и Cyanophyta, далее следовал отдел Bacillariophyta. Традиционно в большинстве озер умеренной зоны второе место занимают диатомовые водоросли, различие в данном случае связано со спецификой эксплуатации водоемов и их морфометрии. Этим можно объяснить также отсутствие в водоемах представителей некоторых отделов. Например, представители золотистых водорослей, предпочитающих чистые воды и являющихся индикаторами низкой степени органического загрязнения, на протяжении всего периода исследования ни в одном из озер не регистрировались [2, 30].

В процессе исследования отмечалась кардинальная структурная перестройка таксономического состава альгофлоры. Так, в 1991–1992 гг. в период интенсивной техногенной нагрузки в оз. Отстойник альгофлору можно было охарактеризовать как зелено-синезеленую, в оз. Шламонакопительное – как синезелено-диатомовую. Как уже говорилось выше, после мероприятия 1994–1996 гг. сброс отходов был практически полностью прекращен. В связи с этим в составе фитопланктона стали происходить важные структурные изменения. На фоне увеличения общего видового богатства снижалась доля в нем синезеленых и зеленых и возрастала доля диатомовых водорослей, и уже в 2001 г. альгофлору в каждом из этих водоемов можно было охарактеризовать как зелено-синезеленую с заметным участием диатомовых водорослей. Вместе с тем в водоемах существенно увеличилось число видов, разновидностей и форм представителей отделов водорослей, способных к миксотрофному типу питания (криптофитовые, динофитовые, эвгленовые). Водоросли этих отделов могут питаться как осмотрофно, так и голозойно [31]. Это позволило предположить, что с прекращением жесткого техногенного воздействия на водоемы в них стало появляться в достаточном количестве растворимое органическое вещество (РОВ) в результате прижизненного внеклеточного выделения и разложения отмерших клеток фитопланктона. Как известно, главными потребителями такого вещества являются именно миксотрофные флагелляты [2, 31]. В связи с этим логично предположить, что увеличение в воде РОВ создало благоприятные условия для развития ряда криптофитовых, динофитовых и эвгленовых водорослей [30].

При оценке таксономической структуры альгофлоры планктона основное внимание было уделено роли в ее формировании порядков, семейств и родов. Состав спектров «ведущих» по видовому богатству порядков был невелик в виду небольшого общего количества видовых и внутривидовых таксонов (табл. 4). В оз. Отстойник на протяжении всего периода исследований наиболее богато были представлены порядки *Chlorococcales*, *Oscillatoriales*, *Raphales*, в оз. Шламонакопительное – *Chlorococcales* и *Cryptomonadales*.

Обращает на себя внимание отсутствие порядка *Euglenales* среди таксономически значимых на протяжении всего исследования, особенно, учитывая, что эвглениды предпочитают мелководные, хорошо прогреваемые участки водоемов с высоким содержанием органического вещества [2, 7]. В оз. Шламонакопительное они появились в небольшом количестве в 2001 г., в оз. Отстойник же практически не встречались вплоть до 2014 г. Возможно, отчасти это связано с высокой остаточной концентрацией в воде ряда токсичных для эвгленовых водорослей загрязняющих веществ, поступавших в начале XX века в изучаемые водоемы. В первую очередь речь идет о капролактаме, поступавшем в оз. Отстойник в составе сбросов азотно-тукового производства [11, 12]. С другой стороны, данная особенность в таксономическом ранжировании была связана с уровнем РОВ, неудовлетворительным для данной группы организмов долгое время [31].

В оз. Шламонакопительное нетипично высокий для водоемов Средней и Нижней Волги ранг порядка *Cryptomonadales* можно связать с особенностями экологии данных организмов. Пресноводные виды криптомонад, во-первых, предпочитают водоемы со стоячей водой, во-вторых, они очень устойчивы к загрязнению и могут в массе развиваться в сточных водах, являясь индикаторами высокой

Табл. 4

Спектр «ведущих» по видовому богатству порядков альгофлоры озер Отстойник и Шламонакопительное

Годы	оз. Отстойник		оз. Шламонакопительное	
	1991–1992	Chlorococcales	23/48.92*	Cryptomonadales
Oscillatoriales		7/14.58	Chlorococcales	5/16.13
Chroococcales		6/12.51	Chroococcales	4/12.90
Raphales		4/8.33	Raphales	4/12.90
			Oscillatoriales	3/9.67
2001	Chlorococcales	23/31.94	Chlorococcales	15/21.12
	Oscillatoriales	10/13.84	Cryptomonadales	8/11.27
	Raphales	7/9.73	Raphales	7/9.86
	Nostocales	5/6.94	Chroococcales	6/8.46
			Desmidiiales	6/8.46
2013–2014	Chlorococcales	39/30.95	пересохло	
	Oscillatoriales	14/11.11		
	Raphales	10/7.94		
	Chroococcales	9/7.14		
	Nostocales	9/7.14		

\* Над чертой – число видовых и внутривидовых таксонов, под чертой – доля от общего видового богатства, %.

степени органического загрязнения [30, 31]. Криptomonеды как представители миксотрофных флагеллят являются активными участниками планктонной трофической сети. Это одна из наиболее конкурентно способных групп в борьбе за пищевые объекты с другими консументами, а также за биогенные элементы с бактериями и фитопланктоном [31].

В оз. Отстойник криптофитовые водоросли отсутствовали в составе «ведущих» по видовому богатству таксонов, что, вероятно, было связано с чувствительностью этих организмов к капролактаму, который поступал в водоем со сточными водами [12, 31].

В оз. Шламонакопительное, в отличие от оз. Отстойник, в составе таксонов, отличающихся наиболее высоким видовым богатством, появляется порядок Desmidiiales из отдела Streptophyta. Десмидиевые водоросли предпочитают небольшие чистые водоемы с низким значением pH. Однако отдельные представители хорошо развиваются и в щелочных водах, а некоторые виды родов *Closterium*, *Cosmarium*, *Staurastrum* встречаются в сильно загрязненных местах, в том числе в сточных водах [29]. В оз. Шламонакопительное нами были зарегистрированы представители именно этих родов.

Спектр семейств «ведущих» по количеству таксонов рангом ниже рода, для альгофлоры планктона оз. Отстойник и оз. Шламонакопительное представлен в табл. 5. После прекращения жесткого техногенного воздействия и, видимо, начавшихся процессов самоочищения было отмечено как общее увеличение семейств, являющих собой «лицо» альгофлоры водоемов, так и возрастание внутрисемейственной видовой насыщенности. Эти позитивные явления позволяют предположить, что в данных водоемах трансформация структуры экосистемы была положительной [6, 28]. В процессе исследования происходило увеличение сходства по качественному составу спектров «ведущих» семейств техногенных



Табл. 5

Спектр «ведущих» по видовому богатству семейств альгофлоры озер Отстойник и Шламонакопительное

Годы	оз. Отстойник		оз. Шламонакопительное	
1991–1992	Chlorellaceae	11/23.91*	Cryptomonadaceae	6/19.35
	Pseudanabaenaceae	5/10.7	Pseudanabaenaceae	3/9.68
	Scenedesmaceae	5/10.87	Nitzschiaceae	3/9.68
	Merismopediaceae	3/6.52	Microcystaceae	2/6.45
	Oocystaceae	3/6.52	Stephanodiscaceae	2/6.45
			Euglenaceae	2/6.45
Chlorellaceae			2/6.45	
2001	Scenedesmaceae	10/13.89	Cryptomonadaceae	8/11.27
	Pseudanabaenaceae	9/12.5	Scenedesmaceae	6/8.45
	Chlorellaceae	8/11.11	Pseudanabaenaceae	4/5.63
	Anabaenaceae	4/5.56	Anabaenaceae	4/5.63
	Fragilariaceae	4/5.56	Nitzschiaceae	4/5.63
	Peridiniaceae	4/5.56	Euglenaceae	4/5.63
			Chlamydomonadaceae	4/5.63
			Desmidiaceae	4/5.63
2014	Scenedesmaceae	17/13.49	пересохло	
	Pseudanabaenaceae	11/8.73		
	Chlorellaceae	8/6.35		
	Anabaenaceae	6/4.76		
	Cryptomonadaceae	6/4.76		
	Desmidiaceae	6/4.76		
	Nitzschiaceae	5/3.97		
	Peridiniaceae	5/3.97		
	Chlamydomonadaceae	5/3.97		
	Euglenaceae	4/3.17		
	Oocystaceae	4/3.17		

\* Над чертой – число видовых и внутривидовых таксонов, под чертой – доля от общего видового богатства, %.

водоемов с прочими водоемами системы Васильевских озер: для оз. Отстойник – с 47.06% до 86.95%, для оз. Шламонакопительное – с 52.63% до 80.03% [32]. Поэтому можно сказать, что после исчезновения мощного техногенного загрязнения экосистемы озер стали изменяться в сторону альготипа, характерного для данного региона.

Состав спектра «ведущих» родов с течением времени также значительно расширился по сравнению с 1991–1992 гг. (табл. 6). При этом если в озерах на начальном этапе исследования доля моно- и дитипических родов составляла более 90%, то на конечном этапе доля таких родов снизилась в среднем на 25–30%. Усложнение таксономической структуры, проявляющееся в расширение состава комплекса наиболее значимых родов, включение в его состав представителей различных отделов водорослей и изменение ее изменение в сторону политипичности – признаки, свидетельствующие об улучшении экологического состояния водоема, что, вероятно, объясняется прекращением техногенной эксплуатации. Это, безусловно, является позитивным моментом трансформации [6, 28].

Говорить о полностью позитивной перестройке мы не можем по ряду причин. Так, уровень внутритаксонной насыщенности в целом по-прежнему оставался

Табл. 6

Спектр «ведущих» по видовому богатству родов альгофлоры озера Отстойник и Шламонакопительное

Годы	оз. Отстойник		оз. Шламонакопительное	
1991–1992	Monoraphidium	5/10.87*	Nitzschia	3/9.68
			Cryptomonas	3/9.68
2001	Scenedesmus	6/8.33	Cryptomonas	5/7.04
	Monoraphidium	5/6.95	Nitzschia	4/5.63
	Fragilaria	4/5.56	Scenedesmus	4/5.64
	Anabaenopsis	3/4.17	Cosmarium	4/5.65
	Nitzschia	3/4.17	Anabaena	3/4.23
			Navicula	3/4.23
Monoraphidium			3/4.23	
2014	Scenedesmus	13/10.32	пересохло	
	Nitzschia	5/3.96		
	Cryptomonas	5/3.96		
	Monoraphidium	4/3.17		
	Cosmarium	4/3.17		
	Microcystis	3/2.38		
	Anabaena	3/2.38		
	Anabaenopsis	3/2.38		

\* Над чертой – число видовых и внутривидовых таксонов, под чертой – доля от общего видового богатства, %.

Табл. 7

Насыщенность основных таксономических единиц альгофлоры планктона Васильевских озер на разных этапах исследования

Водоем	Годы	Число семейств / число порядков	Число родов / число семейств	Число видов / число родов	Число внутривидовых таксонов / число видов
оз. Отстойник	1991–1992	2.11	1.00	2.37	0.02
	2001	1.63	1.81	1.51	0.01
	2014	2.11	1.82	1.80	0.02
	Общее	2.17	1.92	1.92	0.01
оз. Шламонакопительное	1991–1992	1.64	1.00	1.67	0.03
	2001	1.93	1.59	1.48	0.04
	Общее	1.93	1.59	1.59	0.04

невысоким (табл. 7), а среди разноранговых таксонов преобладают моно- и дитипические, что может быть связано с остаточными загрязнениями и усилившейся аграрно-культурной нагрузкой [6, 7].

### Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Во-первых, прекращение техногенной нагрузки на водоемы привело к значительному увеличению видового богатства альгофлоры планктона, причем на уровне всех систематических единиц (отделов).

Во-вторых, высокая видовая специфичность альгофлоры на начальном и конечном этапах исследования свидетельствует о значительной трансформации экосистемы. Отметим также, что увеличение видового богатства водорослей с уменьшением степени антропогенной нагрузки на водоем позволяет предположить, что характер трансформации имел позитивный характер.

Материалы настоящего исследования могут быть использованы при разработке комплексов мер по сохранению и восстановлению экосистем водных объектов, подвергшихся техногенному воздействию, в том числе при разработке так называемого «нулевого сценария», то есть без проведения специальных работ по восстановлению и рекультивации экосистем таких водоемов после снятия техногенной нагрузки. Данные по состоянию фитопланктонных сообществ могут быть использованы также в системе экологического мониторинга водоемов, подвергшихся техногенной эксплуатации, и для дальнейшего изучения трансформации планктонных альгоценозов в водоемах малой экологической емкости в условиях прекращения техногенной нагрузки.

#### Литература

1. Мингазова Н.М., Павлова Л.Р., Деревенская О.Ю., Рафикова Ф.Ф., Монасыпов М.А., Рахимов И.И., Ибрагимова Н.Н. Экологические проблемы «Голубого чуда Приказанья» и пути их решения // Материалы VII Съезда ГБО РАН. – Казань, 1996. – Т. 3. – С. 168–172.
2. Трифонова И.С. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. – Л.: Наука, 1990. – 182 с.
3. Olding D.D., Hellebust J.A., Douglas M.S.V. Phytoplankton community composition in relation to water quality and water-body morphometry in urban lakes, reservoirs, and ponds // Can. J. Fish. Aquat. Sci. – 2000. – V. 57, No 10. – P. 2163–2174. – doi: 10.1139/f00-176.
4. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Айриянц А.А. Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду / Отв. ред. д-р геол.-мин. наук Г.Н. Аношин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2003. – 120 с.
5. Мингазова Н.М., Деревенская О.Ю. Концепция и методология восстановления малых озер // Гидробиол. журн. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 22–31.
6. Старцева Н.А., Охапкин А.Г. Состав и структура фитопланктона некоторых пойменных озер культурного ландшафта (на примере г. Нижнего Новгорода) // Биология внутренних вод. – 2003. – № 4. – С. 35–42.
7. Протисты и бактерии озер Самарской области / Под ред. В.В. Жарикова. – Тольятти: Кассандра, 2009. – 240 с.
8. Birch S., McCaskie J. Shallow urban lakes: a challenge for lake management // Hydrobiologia. – 1999. – V. 395. – P. 365–378. – doi: 10.1023/A:1017099030774.
9. Anneville O., Ginot V., Angeli N. Restoration of Lake Geneva: Expected versus observed responses of phytoplankton to decreases in phosphorus // Lakes & Reservoirs: Research and Management. – 2002. – V. 7, No 2. – P. 67–80. – doi: 10.1046/j.1440-169X.2002.00179.x.
10. Предельно-допустимые сбросы. ПДС загрязняющих веществ сточных вод Тольяттинской ТЭЦ. – Тольятти, 1995. – 181 с.
11. Материалы оценки воздействия на окружающую среду при реализации намечаемой деятельности: строительство очистных сооружений смешанного потока сточных

- вод предприятий Северного промузла (СПУ) г. Тольятти в районе регулирующей емкости / Под ред. А.А. Пименова. – Самара: СамГТУ. 2012. – 10 с.
12. *Огуречника М.А., Пименов А.А.* Об использовании активных илов для очистки сточных вод. – Самара: СамГТУ. 2012. – 94 с.
  13. *Литинский Ю.Б.* Некоторые вопросы геоморфологии озер Карельского региона // Труды Карел. филиала. АН СССР. –1960. – Вып. 27. – С. 10–59.
  14. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. – М.: Наука, 1975. – 239 с.
  15. *Голлербах М.М., Косинская Е.К., Полянский В.И.* Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2: Синезеленые водоросли. – М.: Сов. наука, 1953. – 652 с.
  16. *Дедусенко-Щеголева Н.Т., Матвиенко А.М., Шкорбатов Ф.Ф.* Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 8: Зеленые водоросли. Класс Вольвоксовые. (Chlorophyta: Volvocineae). – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. – 230 с.
  17. *Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова В.С.* Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4: Диатомовые водоросли. – М.: Сов. наука, 1951. – 619 с.
  18. *Киселев И.А.* Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 6: Пирофитовые водоросли. – М.: Сов. наука, 1954. – 209 с.
  19. *Кондратьева Н.В.* Визначник прісноводних водоростей Української РСР. I. Синьо-зелені водорості – Суанопхита. Ч. 2: Класс Гормогонієві – Hormogoniophyceae. – Київ, 1968. – 523 с.
  20. *Паламарь-Мордвинцева Г.М.* Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 11(2): Зеленые водоросли. Класс Конъюгаты. Порядок Десмидиевые. Chlorophyta. Conjugatophyceae. Desmidiiales (2). – Л.: Наука, 1982. – 620 с.
  21. *Попова Т.Г.* Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 7: Эвгленовые водоросли. – М.: Сов. наука, 1955. – 282 с.
  22. *Komárek J., Anagnostidis K.* Cyanoprokaryota. I. Chroococcales // Ettl H., Gärtner G., Heynig H., Mollenhauer D. (Eds.) Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/3: Cyanoprokaryota. 1. Teil Chroococcales. – Heidelberg; Berlin: Spektrum, 1999. – P. 1–548.
  23. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae // Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (Eds.) Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 2/1. – Stuttgart; New York: G. Fisher, 1986. – 876 p.
  24. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae // Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (Eds.) Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 2/2. – Stuttgart; New York: G. Fisher, 1988 – 596 p.
  25. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Bacillariophyceae. 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 2(3). – Stuttgart; New York: G. Fisher, 1991. – 576 p.
  26. *Krammer K., Lange-Bertalot H.* Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis Eunotiaceae // Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 2(4). – Stuttgart; New York: G. Fisher, 1991. – 437 p.
  27. *Толмачев А.И.* Методы сравнительной флористики и проблемы флорогенеза. – Новосибирск: Наука, 1986. – 197 с.
  28. *Колмар А.* География и мониторинг биоразнообразия. – М., 2006. – 379 с.
  29. *Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И.* Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // Докл. РАН. – 2009. – Т. 429, № 3. – С. 274–277.

30. Балашова Н.Б., Никитин В.Н. Водоросли (Природа Ленинградской области). – Л.: Лениздат, 1989. – 92 с.
31. Копылов А.И., Косолапов Д.Б. Микробная «петля» в планктонных сообществах морских и пресноводных экосистем. – Ижевск: КнигоГрад, 2011. – 332 с.
32. Кривина Е.С., Тарасова Н.Г. Изменение структуры альгофлоры планктона малых водоемов урбанизированного ландшафта под влиянием антропогенной нагрузки // *PontusEuxinus 2017: Тез. X Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых по проблемам водных экосистем, в рамках проведения Года экологии в Российской Федерации (11–16 сент. 2017 г.)*. – Севастополь: DigitPrint, 2017. – С. 105–109.

Поступила в редакцию  
01.08.17

---

**Кривина Елена Сергеевна**, младший научный сотрудник лаборатории экологии простейших и микроорганизмов

Институт экологии Волжского бассейна РАН  
ул. Комзина, д. 10, г. Тольятти, 445003, Россия  
E-mail: *pepelisa@yandex.ru*

**Тарасова Наталья Геннадьевна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии простейших и микроорганизмов; преподаватель

Институт экологии Волжского бассейна РАН  
ул. Комзина, д. 10, г. Тольятти, 445003, Россия  
Тольяттинский государственный университет  
ул. Белорусская, д. 14, г. Тольятти, 445020, Россия

---

ISSN 2542-064X (Print)  
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI  
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2018, vol. 160, no. 2, pp. 292–307

---

**Changes in the Taxonomic Structure of Phytoplankton  
Inhabiting Small Water Bodies as a Consequence of the Technogenic Impact**

*E.S. Krivina<sup>a,\*</sup>, N.G. Tarasova<sup>a,b</sup>*

<sup>a</sup>*Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Sciences, Togliatti, 445003 Russia*

<sup>b</sup>*Togliatti State University, Togliatti, 445020 Russia*

E-mail: \* *pepelisa@yandex.ru*

Received August 1, 2017

**Abstract**

This paper considers the transformation of phytoplankton communities inhabiting anthropogenic ecosystems of water bodies as a consequence of the technogenic load. Cleaning and restoration of the balance in such ecosystems is a complex and expensive process. Therefore, it is of great importance to study the natural processes of self-recovery and stabilization in them. The purpose of this study is to investigate the character of transformation of the phytoplankton taxonomic structure of anthropogenic water bodies after the end of their use. The objects of study are Lake Otstoinik (received wastes from nitrogen fertilizer production) and Lake Shlamonakopitel'noe (received ash and slugs produced by the Togliatti TPP) located in the city of Togliatti, Samara region. Based on the analysis of changes in the taxonomic structure of phytoplankton before and after the anthropogenic impact, the following

conclusions have been made: a decrease of the technogenic load on the water bodies enhanced the species richness of phytoplankton in all major taxonomic groups. In more than 20 years (from 1991 to 2014), the taxonomic spectra of phytoplankton extended significantly along with the dramatic transformation of ecosystems (divisions), which is evidenced by the high species specificity of algal flora at the initial and final stages of the study. Based on a number of the important parameters, it can be concluded that the general character of the transformation is positive. The obtained results will be of great interest for experts developing methods for restoration of ecosystems following the anthropogenic load, because they prove the ability of such ecosystems to self-regeneration and stabilization even under the conditions of anthropogenically transformed landscape and the lack of specific nutrient limitation.

**Keywords:** phytoplankton, taxonomic structure, anthropogenic water bodies, transformation of ecosystem

### Figure Captions

Fig. 1. The analysis of similarities in the taxonomic structure of water bodies at different stages of our investigation: O – Lake Otstoinik, Sh – Lake Shlamonakopitel'noe.

Fig. 2. The graphical analysis of the transformation of the taxonomic structure of phytoplankton complexes in Lake Otstoinik (a) and Lake Shlamonakopitel'noe (b) in 1991–2014 performed in a logarithmic system of coordinates.

Fig. 3. The taxonomic structure of phytoplankton in the studied water bodies: O – Lake Otstoinik, Sh – Lake Shlamonakopitel'noe.

### References

- Mingazova N.M., Pavlova L.R., Derevenskaya O.Yu., Rafikova F.F., Monasypov M.A., Rakhimov I.I., Ibragimova N.N. Environmental problems of the Blue miracle of Kazan and ways to solve them. *Materialy VII S'ezda GBO RAN* [Proc. VII Congr. of Hydrobiological Society of Russian Academy of Sciences]. Vol. 3. Kazan, 1996, pp. 168–172. (In Russian)
- Trifonova I.S. *Ekologiya i suksessiya ozernogo fitoplanktona* [Ecology and Succession of Lake Phytoplankton]. Leningrad, Nauka, 1990. 182 p. (In Russian)
- Olding D.D., Hellebust J.A., Douglas M.S.V. Phytoplankton community composition in relation to water quality and water-body morphometry in urban lakes, reservoirs, and ponds. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2000, vol. 57, no. 10, pp. 2163–2174. doi: 10.1139/f00-176.
- Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Airiyants A.A. *Tekhnogennye ozera: formirovanie, razvitie i vliyaniye na okruzhayushchuyu sredu* [Anthropogenic Lakes: Formation, Development, and Environmental Impact]. Anoshin G.N. (Ed.). Novosibirsk, Izd. Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, Teo, 2003. 120 p. (In Russian)
- Mingazova N.M., Derevenskaya O.Yu. Concept and methodology of small-lake restoration. *Gidrobiol. Zh.*, 1998, vol. 34, no. 5, pp. 22–31. (In Russian)
- Startseva N.A., Okhapkin A.G. Composition and structure of phytoplankton in floodplain lakes of cultural landscape (by example of Nizhny Novgorod). *Biol. Vnutr. Vod.*, 2003, no. 4, pp. 35–42. (In Russian)
- Protisty i bakterii ozer Samarskoi oblasti* [Protists and Bacteria of Lakes in Samara Region]. Zharikova V.V. (Ed.). Togliatti, Kassandra, 2009. 240 p. (In Russian)
- Birch S., McCaskie J. Shallow urban lakes: A challenge for lake management. *Hydrobiologia*, 1999, vol. 395, pp. 365–378. doi: 10.1023/A:1017099030774.
- Anneville O., Ginot V., Angeli N. Restoration of Lake Geneva: Expected versus observed responses of phytoplankton to decreases in phosphorus. *Lakes Reservoirs: Res. Manage.*, 2002, vol. 7, no. 2, pp. 67–80. doi: 10.1046/j.1440-169X.2002.00179.x.
- Predel'no dopustimye sbrosy. PDS zagryaznyayushchikh veshchestv stochnykh vod Tol'yattinskoi TETs* [Maximum Permissible Discharge. MPD of Sewage Pollutants of Togliatti TPP]. Togliatti, 1995. 181 p. (In Russian)
- Materialy otsenki vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu pri realizatsii namechaemoi deyatel'nosti: stroitel'stvo ochistnykh sooruzhenii smeshannogo potoka stochnykh vod predpriyatii Severnogo promuzla (SPU) g. Tol'yatti v raione reguliruyushchei emkosti* [Materials on Assessing

- Environmental Impact during Implementation of the Projected Activity: Construction of Treatment Plants for Mixed Wastewater Stream from enterprises of the Northern Industrial Hub (NIH) of Togliatti in the Area of Regulating Storage]. Pimenov A.A. (Ed.). Samara, SamGTU, 2012. 10 p. (In Russian)
12. Ogurechnika M.A., Pimenov A.A. *Ob ispol'zovanii aktivnykh ilov dlya ochistki stochnykh vod* [On the Use of Active Sludge for Wastewater Treatment]. Samara, SamGTU, 2012. 94 p. (In Russian)
  13. Litinsky Yu.B. Some problems of lake geomorphology in Karelian region. *Tr. Karel. Fil. Akad. Nauk SSSR*, 1960, no. 27, pp. 10–59. (In Russian)
  14. *Metodika izucheniya biogeotsenozov vnutrennikh vodoemov* [Methods for Studying Biogeocenoses of Inland Water Bodies]. Moscow, Nauka, 1975. 239 p. (In Russian)
  15. Hollerbach M.M., Kosinskaya E.K., Polyanskii V.I. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR* [Key to Freshwater Algae of USSR]. Vol. 2: Blue-Green Algae. Moscow, Sov. Nauka, 1953. 652 p. (In Russian)
  16. Dedusenko-Shchegoleva N.T., Matvienko A.M., Shkorbatov F.F. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR* [Key to Freshwater Algae of USSR]. Vol. 8: Green Algae. Class of Volvocales (Chlorophyta: Volvocineae). Moscow, Leningrad, Izd. Akad. Nauk SSSR, 1959. 230 p. (In Russian)
  17. Zabelina, M.M., Kiselev I.A., Proshkina-Lavrenko A.I., Sheshukova V.S. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR* [Key to Freshwater Algae of USSR]. Vol. 4: Diatomic Algae. Moscow, Sov. Nauka, 1951. 619 p. (In Russian)
  18. Kiselev I.A. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR* [Key to Freshwater Algae of USSR]. Vol. 6: Pyrophytic Algae. Moscow, Sov. Nauka, 1954. 209 p. (In Russian)
  19. Kondrat'eva N.V. *Viznachnik prisnovodnykh vodorostei Ukrainskoi RSR. I. Sin'o-zeleni vodorosti – Cyanophyta* [Key to Freshwater Algae of Ukrainian SSR. Part 2. I. Blue-Green Algae – Cyanophyta]. Part 2: Class of Hormogonales – Hormogoniophyceae. Kiev, 1968. 523 p. (In Ukrainian)
  20. Palamar'-Mordvintseva G.M. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR* [Key to Freshwater Algae of USSR]. Vol. 11(2): Green Algae. Class of Conjugates. Order of Desmids. Chlorophyta. Conjugatophyceae. Desmidiales (2). Leningrad, Nauka, 1982. 620 p. (In Russian)
  21. Popova T.G. *Opredelitel' presnovodnykh vodoroslei SSSR* [Key to Freshwater Algae of USSR]. Vol. 7. Euglena Algae. Moscow, Sov. Nauka, 1955. 282 p. (In Russian)
  22. Komárek J., Anagnostidis K. Cyanoprocariota. I. Chroococcales. In: Ettl H., Gärtner G., Heynig H., Mollenhauer D. (Eds.) *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Bd. 19/3: Cyanoprokaryota. 1. Teil Chroococcales. Heidelberg, Berlin, Spektrum, 1999. pp. 1–548. (In German)
  23. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae. In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (Eds.) *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Bd. 2/1. Stuttgart, New York, G. Fisher, 1986. 876 p. (In German)
  24. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (Eds.) *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Bd. 2/2. Stuttgart, New York, G. Fisher, 1988. 596 p. (In German)
  25. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (Eds.) *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Bd. 2(3). Stuttgart, New York, G. Fisher, 1991. 576 p. (In German)
  26. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 4. Teil: Achnantheaceae, Kritische Ergänzung zu Navicula (Lieolatae) und Gomphonema. Geamliteraturverzeichnis Eunotiaceae. In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (Eds.) *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Bd. 2(4). Stuttgart, New York, G. Fisher, 1991. 437 p. (In German)
  27. Tolmachev A.I. *Metody sravnitel'noi floristiki i problemy florigeneza* [Methods of Comparative Floristics and Problems of Florogenesis]. Novosibirsk, Nauka, 1986. 197 p. (In Russian)
  28. Kolmar A. *Geografiya i monitoring bioraznoobraziya* [Geography and Monitoring of Biodiversity]. Moscow, 2006. 379 p. (In Russian)
  29. Razumovskii L.V., Moiseenko T.I. Assessment of space-time transformations of lake ecosystems by diatom analysis. *Dokl. Ross. Akad. Nauk*, 2009, vol. 429, no. 3, pp. 274–277. (In Russian)
  30. Balashova N.B., Nikitin V.Kh. *Vodorosli (Priroda Leningradskoi oblasti)* [Algae. Nature of Leningrad Region]. Leningrad, Lenizdat, 1989. 92 p. (In Russian)

31. Kopylov A.I., Kosolapov D.B. *Mikrobnaya "petlya" v planktonnykh soobshchestvakh morskikh i presnovodnykh ekosistem* [Microbial "Loop" in Planktonic Communities of Marine and Freshwater Ecosystems]. Izhevsk, KnigoGrad, 2011. 332 p. (In Russian)
32. Krivina E.S., Tarasova N.G. Changes in the structure of algal flora of the plankton of small ponds of urbanized landscapes under the influence of anthropogenic load. *PontusEuxinus 2017: Tez. X Vseros. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh po problemam vodnykh ekosistem, v ramkakh provedeniya Goda ekologii v Rossiiskoi Federatsii (11–16 sent. 2017 g.)* [PontusEuxinus 2017: Proc. X All-Russ. Sci.-Pract. Conf. of Young Scientists on Problems of Aquatic Ecosystems, in the Framework of the Year of Ecology in the Russian Federation (Sept. 11–16, 2017)]. Sevastopol, DigitPrint, 2017, pp. 105–109. (In Russian)

⟨ **Для цитирования:** Кривина Е.С., Тарасова Н.Г.. Изменения таксономической структуры фитопланктона малых водоемов после прекращения техногенной эксплуатации // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 2. – С. 292–307. ⟩

⟨ **For citation:** Krivina E.S., Tarasova N.G. Changes in the taxonomic structure of phytoplankton inhabiting small water bodies as a consequence of the technogenic impact. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 2, pp. 292–307. (In Russian) ⟩