

**Сапробиологическая характеристика малых водоемов и водотоков
Средне-волжского биосферного резервата по водорослям-индикаторам**

О.Г. Горохова

*Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна
РАН, Тольятти, Россия.*

Эл. почта: o.gorokhova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.07.2024; принята к печати 30.10.2024

Проведен сапробиологический анализ малых водоемов и водотоков на территории Средне-Волжского комплексного биосферного резервата (Самарская область) по водорослям-индикаторам. Впервые приводятся данные о таксономическом составе индикаторов, величинах и сезонной динамике индексов сапробности. В водоемах к индикаторным относятся от 60 до 93% видов, в водотоках – от 62 до 87%. Среди доминирующих видов показателями сапробности являются от 55 до 75%. Средние величины индексов сапробности составляют: в водоемах 1,79–1,99, в водотоках 1,78, что соответствует β -мезосапробной зоне самоочищения. Для водоемов отмечено разнообразие типов сезонной динамики величин индексов, связанное с различиями по гидролого-гидрохимическим условиям, структурирующим доминирующий комплекс видов. В водотоках индексы сапробности ниже, чем в водоемах. По их величинам в верхнем течении рек качество вод соответствует олигосапробному состоянию, в среднем и нижнем – β -мезосапробному; повышение индексов отмечается у населенных пунктов, в запрудах, в зоне подпора водохранилища. Содержание легко окисляемых органических веществ (по БПК₅) положительно коррелирует с численностью видов отделов Dinophyta и Cyanoprokaryota, а также некоторых групп фитофлагеллят. При оценке сапробности в условиях небольшой антропогенной нагрузки информативными являются не только величины индексов, но и видовые составы индикаторов, а также соотношения чисел видов-индикаторов и численностей каждого в сравниваемых водных объектах.

Ключевые слова: сапробиологический анализ, виды-индикаторы, автотрофный планктон, Средне-Волжский комплексный биосферный резерват

Indicator algae-based saprobiological characteristics of small reservoirs and watercourses in Middle Volga Biosphere Reserve

O.G. Gorokhova

*Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of Volga River Basin RAS, Togliatti,
Russia*

Email: o.gorokhova@yandex.ru

A saprobiological analysis of small reservoirs and watercourses in the territory of the Middle Volga Complex Biosphere Reserve (Samara Region) was carried out using indicator algae. For the first time, data are presented on the taxonomic composition of indicator algae and on the values and seasonal dynamics of saprobity indices. In small reservoirs, 60 to 93% of species are indicator species and in watercourses, 62 to 87%. Among the dominant species, 55 to 75% are indicator species. The average values of saprobity indices are 1.79-1.99 in reservoirs and 1.78 in watercourses consistent with the β -mesosaprobic self-purification zone. For small reservoirs, a variety of types of seasonal dynamics of indices is noted. This is associated with differences in hydrological and hydrochemical conditions that structure the dominant complex of species. In watercourses, saprobity indices are lower than in reservoirs. According to their values, water quality corresponds to the oligosaprobic state in the upper reaches of the rivers and to the β -mesosaprobic state in the middle and lower reaches. An increase in indices is observed near populated areas, in dams, and in the backwater zone of reservoirs. The content of easily oxidizable organic matter (according to BOD₅) positively correlates with the number of algae of the Dinophyta and Cyanoprokaryota divisions, as well as with some groups of phytoflagellates. When assessing saprobity under conditions of low anthropogenic load, not only the index values are informative, but also the species composition of indicators, as well as the ratios of the number and abundance of indicator species in the compared water bodies.

Key words: saprobiological analysis, indicator species, autotrophic plankton, Middle Volga Complex Biosphere Reserve

Введение

Одним из методов оценки качества вод природных водоемов по состоянию гидробионтов является сапробиологический анализ. Биологическое самоочищение осуществляется планктонными и донными сообществами, вовлекающими в метаболизм различные вещества и обеспечивающими

процесс формирования качества вод. Автотрофный планктон является важнейшим агентом влияния на газовый режим и участником процессов преобразования веществ в водной среде [30]. Структурные и функциональные характеристики сообществ водорослей отражают экологические изменения и степень воздействия на среду их обитания, а многие виды являются биологическими индикаторами, развиваясь в пределах допустимых для них условий [18, 19, 21, 25; 28, 30, 31, 34].

Экологическое состояние водоемов на охраняемых территориях наиболее благополучно, поэтому исследования, проводимые на ООПТ актуальны для сравнения и оценки воздействия на водные объекты в условиях антропогенной нагрузки. Средневожский биосферный резерват (СВБР) находится в пределах Приволжской возвышенности, лесостепной физико-географической области Русской равнины. Резерват обеспечивает охрану уникального природно-территориального комплекса Самарской Луки (основная зона резервата) и ряда природных объектов в переходной зоне [2, 8]. В ходе многолетних гидробиологических исследований водоемов и водотоков территории резервата [2, 12, 13] были получены данные о таксономическом составе и количественном развитии водорослей-индикаторов сапробности. Доля видов-индикаторов в альгофлоре составляет от 60 до 93% в каждом из водных объектов, а среди доминирующих видов – 55–75%, что позволяет провести сапробиологический анализ.

Цель настоящей работы – альгологическая характеристика сапробности малых водоемов и водотоков на территории Средне-Волжского комплексного биосферного резервата.

Материалы и методы.

Характеристика района исследований

В национальном парке Самарская Лука (рис. 1) исследованиями охвачены различные по происхождению водоемы: пойменные озера, водоемы заторфованных староречий на надпойменной террасе, озера в карстовых воронках, пруды. Часть этих водоемов также являются памятниками природы: пойменное озеро Большое Шелехметское, карстовое озеро Золотенка, озеро надпойменной террасы Клюквенное и др. [2].

Все изученные водные объекты находятся на охраняемых территориях федерального значения (СВБР), некоторые имеют также и самостоятельный статус охраны. Например, на территории памятника природы «Рачейский бор» (рис. 1) изучены три водоема в ландшафте верховых болот. В Самарской области болота отнесены к группе редких гидробиоценозов [2]. Из болот «Рачейского бора» два объявлены памятники природы: «Узилово болото» и «Моховое болото».



Рис. 1. Схема района исследований.

Наиболее беден поверхностными и грунтовыми водами ландшафт Жигулевских гор: водоемы, изученные на территории Жигулевского заповедника (рис. 1), имеют техногенное происхождение – они появились в первой половине прошлого века в карьерах после выработки глины, а также разработки битуминозного песчаника – так называемые «гудронные озера» [2].

Из числа исследованных прудов большинство расположены у населенных пунктов в пределах территории СВБР.

Из водотоков на территории СВБР изучены река Уса (рис. 1) и ее основные притоки Теренгулька, Тишерек, Муранка [2, 7].

Для удобства рассмотрения и анализа данных сгруппировать водные объекты СВБР можно различными способами: по происхождению, по составу и структуре сообществ гидробионтов. В данной статье водные объекты будут объединены в группы главным образом по положению в ландшафтах СВБР и нахождению на территории резервата.

Комплексные гидробиологические исследования были проведены в 1998–2009 годах для водоемов и в 2015–2022 годах для водотоков. В 2017–2018 с целью оценить значимость показателей альгоценозов на участке воздействия точечного источника антропогенного загрязнения водотока были проведены гидробиологические исследования реки Уса в зоне выпуска очищенных сточных вод населенного пункта (с. Шигоны). Сбор проб был проведен в 2 км до места сброса и после него, а также в 4 км ниже по течению.

Методы сбора и обработки проб

Сбор и обработка проб проведены в соответствии с методами, принятыми при альгологических исследованиях [10]. Пробы объемом 0,5 л отбирали с поверхностного горизонта, а для изучения вертикального распределения фитопланктона – через 1 м от поверхности до дна; пробы фиксировали раствором Люголя в модификации Г.В. Кузьмина и концентрировали вакуумной фильтрацией через мембранные фильтры [10]. Часть проб обрабатывали живыми для более полного изучения состава альгофлоры. Для определения таксономической принадлежности диатомовых водорослей готовили постоянные препараты. Определение, подсчет и измерение водорослей проведено в счетной камере типа «учинская», биомассы вычислены счетно-объемным методом [10]. К массовым (субдоминантам и доминантам) отнесены виды, формирующие соответственно от 5 до 10% и более 10% суммарной численности или биомассы фитопланктона.

Индекс сапробности для каждой пробы рассчитан по численности индикаторов с помощью индивидуальных характеристик сапробности видов по принятым методикам [1, 9, 14, 32, 34]. Для оценки связи численности видов-индикаторов с величиной БПК₅ и перманганатной окисляемостью, а также с численностью бактерий рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена. Значимыми приняты корреляции при ($p \leq 0,05$).

Характеристика абиотических условий.

Подробная гидролого-гидрохимическая характеристика каждого из водоемов с оценкой трофического статуса приведена в более ранней публикации [4]. В целом же изученные водоемы в морфометрическом отношении являются малыми: площадь от 0,6 до 6 га (у пойменных озер – до 30 га); максимальные глубины от 0,7 до 4,0 м (у пойменных и карстовых – до 7,5 м). К гидролого-гидрохимическим особенностям следует отнести разнообразие водоемов по цветности (от 14 до 344 °Pt) и pH (от 3,0 до 8,1), а также небольшие величины прозрачности – до 1,0–1,5 м (в водоемах с «цветением» воды – 0,1–0,5 м). Характерно высокое содержание биогенных элементов в воде большинства водоемов: концентрация общего фосфора часто выше 0,1 мг/л, максимальные значения до 1,4–2,6 мг/л; содержание минерального азота, представленного в основном аммонийным ионом – от 0,2 до 11,3 мг/л, в среднем 1 мг/л [2, 11–13]. Температурный режим существенно зависит от погодных условий: в период открытой воды температура изменяется в поверхностном горизонте от 3–4 до 24 °С (в наиболее мелководных до 27–30°C). Водоемы с глубиной более 1,5 м летом термически стратифицированы, это в свою очередь создает вертикальные градиенты гидрохимических параметров, в том числе различия в содержании кислорода и биогенных элементов [2, 11–13]. В большинстве озер обильны макрофиты (погруженные и прибрежные), в водотоках на участках с замедленным течением и мелководьях макрофиты также развиты.

Малые реки, исследованные на территории СВБР – небольшие по протяженности равнинные водотоки. Они имеют длину от 18 до 76 км, глубины на разных участках от 0,2 до 3,5 м. Величины прозрачности часто составляют не более 1 м, максимальные – до 2 м; значения pH воды – от 6,9 до 7,4. Температура воды летом от истока к устью рек изменяется от 9 до 24°C. Концентрация основных биогенов в водотоках, так же как в водоемах, высокая: минерального фосфора – от 0,4 до 1,8 мг/л (максимальные величины 2,3–3,6 мг/л); минерального азота с преобладанием нитратной формы – от 0,2 до 2,3 мг/л [7, 23]. Трофическое состояние водных объектов, оцененное по среднему содержанию

общего фосфора, концентрации хлорофилла, биомассе водорослей в озерах эвтрофное и гиперэвтрофное [4, 11], в водотоках же оно изменяется на разных участках в основном от олиго- до эвтрофного [23].

Поскольку термин «сапробность» касается способности вида развиваться при большей или меньшей концентрации органических загрязнений в воде, следует отметить, что для исследованных водоемов СВБР в целом характерно высокое содержание органических веществ в воде. Например, величина биологического потребления кислорода (БПК₅) как критерия уровня содержания легкоокисляемых органических веществ для пойменных озер и водоемов надпойменной террасы Самарской Луки находится в пределах 2,9–13,2 мг/л, для прудов – 2,4–19,2 мг/л [15], для карстовых озер – 1,7–0,2 [3]. Максимальное значение БПК₅ в поверхностных горизонтах воды исследованных водоемов регистрируют в июле-августе [12; 13], что связано с активным развитием фитопланктона. В водоемах Жигулевского заповедника и болотных озерах содержание органического вещества оценено по перманганатной окисляемости, ее величина составляла соответственно 5,2–76,2 и 9,6–48,0 мг О/л [6, 12]. Наиболее высоким содержанием органического вещества и низкой долей его легко окисляемой фракции отличаются водоемы с высокой цветностью воды (более 100°Pt) обусловленной как содержанием гуминовых кислот, так и высокими концентрациями железа в ряде озер [6, 12, 15]. Содержание растворенного в воде кислорода максимально в летние месяцы, когда поверхностный слой воды насыщен кислородом из-за фотосинтеза, в то же время в придонных горизонтах термически стратифицированных озер наблюдаются анаэробные условия [2, 12, 15]. В отличие от водоемов, в водотоках содержание органического вещества меньше: по данным аккредитованной гидрохимической лаборатории ООО «Центр мониторинга водной и геологической среды» г. Самара величина БПК₅ находится в пределах 0,98–1,26 мг/л, перманганатной окисляемости – 2,4–7,4 мг О/л.

Результаты и обсуждение

Особенности таксономической структуры автотрофного планктона.

Многолетними исследованиями на территории СВБР выявлено высокое видовое богатство и разнообразие водорослей. Только в 23 озерах идентифицировано 909 видов и внутривидовых таксонов из 9 систематических отделов [4], в сводном списке альгофлоры планктона малых рек СВБР (р. Уса и ее притоки) зарегистрировано более 200 видов [7]; в настоящее время эти сведения дополняются данными современных исследований. В водоемах наибольшее видовое богатство отмечено в отделах Chlorophyta (38%), Bacillariophyta (19%) и Euglenophyta (16%). В отличие от озер, в водотоках преобладали Bacillariophyta – 41%, доля Chlorophyta также высока – 35%; на третьем месте – Euglenophyta и Cyanoprokaryota (по 8%). Представители перечисленных отделов создают основу видового богатства на уровне таксонов различного ранга: порядков, семейств и родов. В эколого-географическом отношении состав формируют планктонные виды водорослей со значительной долей обитателей бентоса, обрастаний и литорали. Большинство видов – широко распространенные пресноводные формы, предпочитающие нейтральные и слабощелочные мезо-эвтрофные воды.

Таксономический состав индикаторов и сезонная динамика величин индексов сапробности

Разнообразие водных объектов по морфометрическим и гидролого-гидрохимическим характеристикам привело к формированию в каждом из них индивидуальной таксономической структуры альгофлоры даже в близко расположенных водоемах одного ландшафта [4]. Также разнообразен в них и состав преобладающих групп водорослей – как видно (табл. 1) среди доминирующих представлены почти все отделы, при этом видовой состав и структура доминирующего комплекса исключительно специфичны.

Индикаторы сапробности представлены большим числом видов в каждом из водных объектов: доля их в составе альгофлоры не менее 60% (табл. 1). Много индикаторных видов среди фитофлагеллят отделов Chlorophyta, Cryptophyta, Chrysophyta. В большинстве водоемов разнообразны Euglenophyta, число индикаторов сапробности в этом отделе максимально. По средним величинам индексов состояние всех исследованных водных объектов β-мезосапробное (умеренное загрязнение, класс III качества). Диапазон индексов характеризует условия от олигосапробных до α-мезосапробных. Сезонная динамика индексов сапробности, а также показателей содержания органических веществ в исследованных водоемах различалась; максимальные величины индексов отмечены в разное время, что могло быть связано с привнесением аллохтонной органики (весной и в послепаводковый период) или с внутриводоемными процессами (например, разложением макрофитов поздней осенью).

Доля индикаторов сапробности в составе альгофлоры, средние значения и пределы изменения величин индексов и таксономический состав преобладающих отделов фитопланктона

Доля* видов- индикаторов	Средние значения и пределы изменения величин индексов	Таксономический состав преобладающих** отделов автотрофного планктона
Озёра волжской поймы		
66–83	1,84 (1,78–2,23)	Суанопрокaryota, Bacillariophyta, <i>Chlorophyta, Cryptophyta</i>
Озёра надпойменной террасы		
63–80	1,79 (0,88–2,69)	Bacillariophyta, Суанопрокaryota, Chlorophyta, Cryptophyta, <i>Chrysophyta</i>
Пруды		
73–93	1,99 (1,64–2,42)	Chlorophyta, Euglenophyta, <i>Суанопрокaryota</i>
Карстовые озёра		
60–82	1,86 (1,24–2,20)	Chlorophyta, Суанопрокaryota, <i>Euglenophyta, Cryptophyta, Chrysophyta</i>
Техногенные водоёмы		
61–84	1,89 (1,80–3,06)	Chlorophyta, Суанопрокaryota, <i>Dinophyta, Chrysophyta</i>
Болотные водоёмы		
62–79	1,85 (1,60–2,27)	Chlorophyta, Euglenophyta, <i>Raphidophyta, Cryptophyta, Суанопрокaryota, Chrysophyta</i>
Малые реки		
62–87	1,78 (1,12–2,21)	Bacillariophyta, <i>Chlorophyta</i>

* Доля дана в процентах от общего состава альгофлоры в группе водоёмов. ** Простым шрифтом обозначены отделы, виды которых доминируют с высокой численностью большую часть периода открытой воды, курсивом – в отдельные сезоны.

В каждом водном объекте группа индикаторов сапробности из числа массовых видов фитопланктона включает от 55 до 75% видов. Анализ их состава, а также сезонных изменений индексов сапробности позволил выделить ряд особенностей связанных с гидролого-гидрохимическими характеристиками водных объектов.

Озёра волжской поймы.

В пойменных озёрах состав индикаторов и динамика индексов зависят от степени гидрологической связи с водохранилищем. Из многочисленной группы предварительно обследованных пойменных озёр, для подробного изучения было выбрано озеро Шелехметское как наиболее типичный водоем поймы в районе проведения исследований [2, 13, 15]. В фитопланктоне озера в зоне подпора, в особенности весной, индикационные показатели почти идентичны таковым самого водохранилища (рис. 2 А,В). Весь период открытой воды наблюдается преобладание видов, характерных для волжских водохранилищ: Bacillariophyta (виды класса Centrophyceae) и Суанопрокaryota (*Microcystis aeruginosa* Kütz. emend. Elenk.; *Anabaena flos-aquae* (Lyngb.) Breb). Индексы сапробности изменялись в зависимости от состава доминирующих видов: в апреле–мае и в ноябре доминировали Centrophyceae: *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cl. et Möller, *Cyclotella meneghiniana* Kütz., *Stephanodiscus hantzschii* Grun. Это α -мезосапробы и α -мезо-полисапробы. Летом наблюдалось снижение величин индексов (рис. 1В), поскольку к доминирующим видам в основном принадлежали β -мезосапробы: из цианопрокарриот – *Anabaena flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*,

Aphanizomenon flos-aquae (L.) Ralfs.; из диатомовых – *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Sim. В то же время по мере удаления от места соединения пойменного озера с водохранилищем изменяются как индексы сапробности, так и видовой состав индикаторов. Так, при сравнении фитопланктона наиболее близкой к водохранилищу станции озера Шелехметское и наиболее удаленной от него отмечен ряд изменений. Главное из них касается обогащения видового состава (в том числе и группы массовых видов) лимнофильными компонентами: фитофлагеллятами отделов Euglenophyta, Chlorophyta. Кроме того хорошо заметно увеличение таксономического богатства и численности представителей порядка Chlorococcales (Chlorophyta), предпочитающих стоячие и медленнотекущие воды. Эти изменения состава влияют на величины индексов сапробности, нередко в сторону их увеличения. Наконец, в пойменных озерах, которые летом полностью теряют связь с водохранилищем, состав массовых видов, в том числе индикаторов сапробности, настолько же индивидуален, как и в бессточных озерах территории Самарской Луки.

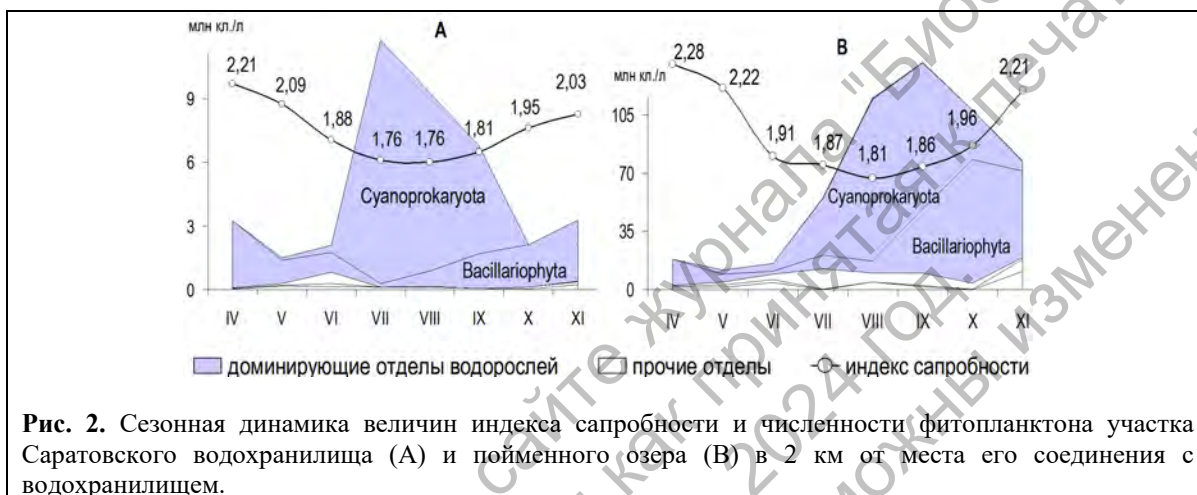


Рис. 2. Сезонная динамика величин индекса сапробности и численности фитопланктона участка Саратовского водохранилища (А) и пойменного озера (В) в 2 км от места его соединения с водохранилищем.

К следующей группе можно отнести водоемы, в которых условия для развития планктонных водорослей неблагоприятны. В основном это относится к изученным водоемам надпойменной террасы, в которых мелководность, зарастание, пересыхание и высокая цветность – основные факторы, контролируемые видовой состав и структуру их альгоценозов [4]. В этой группе озер пределы изменения индексов сапробности наибольшие, а сезонные изменения величин во многих из них хаотичны (рис. 3А). В то же время, один из ацидных техногенных водоемов (из группы так называемых «Гудронных озер» в Жигулевском заповеднике) является примером того, как жесткие экологические условия приводят к длительному доминированию одного-двух видов, что обуславливает почти неизменную величину индекса сапробности в течение нескольких месяцев (рис. 3В). Так, низкие значения pH (3,4–3,6) стали фактором, приведшим к упрощению структуры альгоценоза этого водоема, к ее низкому видовому разнообразию (индекс Шеннона составил 0,01) и к преобладанию в планктоне нескольких ацидоустойчивых видов (*Euglena mutabilis* Schmitz, *Chlamydomonas reinhardtii* Dang.) [4].

Поскольку в каждом из водоемов этой группы сочетание стрессовых факторов специфично, это ведет к экологическому подбору адаптированных видов и к большому разнообразию состава индикаторов.

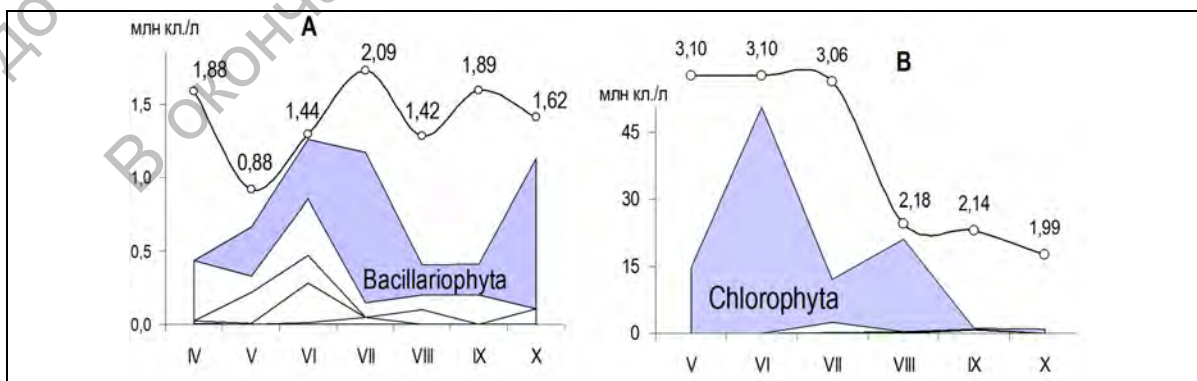
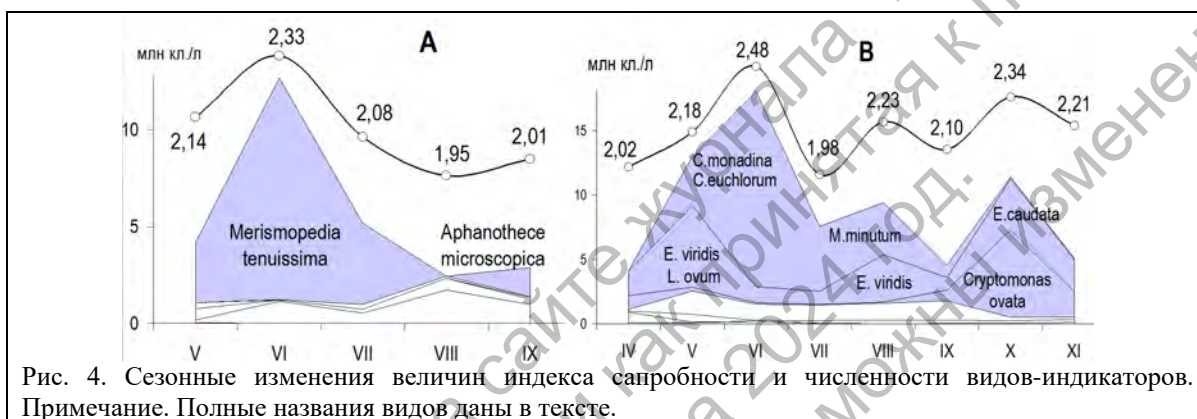


Рис. 3. Сезонная динамика величин индекса сапробности и численности фитопланктона водоемов в связи с действием неблагоприятных экологических факторов: А – мелководный водоем надпойменной террасы; В – кислотный техногенный водоем. Обозначения см. рис. 2.

Пруды территории СВБР

Эти водоемы отличаются самыми высокими средними величинами индексов сапробности и долей видов-индикаторов (табл.). Это вероятно связано с тем, что в большинстве пруды находятся у населенных пунктов и используются населением в различных целях. По численности летом в некоторых из прудов доминируют Cyanoprokaryota, но состав массовых видов у них иной, чем в озерах поймы: нередко отмечены *Aphanothece stagnina* (Sprengel) A. Braun, *A. microscopica* Nägeli, *A. clathrata* W. et G.S. West, *Merismopedia tenuissima* Lemm., *Aphanocapsa incerta* (Lemm.) Cronb. & Kom. Развитие этих видов в планктоне может продолжаться весь летне-осенний период. Так, в одном из прудов наблюдалось длительное доминирование вида *Merismopedia tenuissima* – индикатора β-α-мезосапробной зоны самоочищения, в это время отмечены и максимальные величины индексов (рис. 4А).



Однако во многих прудах представители Cyanoprokaryota не доминируют, в их планктоне в массе развиваются в основном виды отделов Chlorophyta и Euglenophyta. Из зеленых водорослей это жгутиковые формы: виды родов *Carteria*, *Chlamydomonas* (*C. monadina* (Ehr.) Stein; *C. globosa* Snow), *Chlorogonium* (*C. euchlorum* Ehr.), *Pandorina morum* (O.Müll.) Bory, а также разнообразные виды порядка Chlorococcales из родов *Monoraphidium* (*M. contortum* (Thuret) Kom.-Legn., *M. minutum* (Näg.) Kom.-Legn.), *Dictyosphaerium*, *Coelastrum*, *Scenedesmus* и др. Эвгленовые водоросли в озерах и прудах СВБР представлены очень разнообразно, но в массе развиваются немногие виды этого отдела. К доминирующим относятся, например: *Trachelomonas hispida* (Perty) emend. Defl., *T. volvocina* Ehr., *Euglena acus* Ehr., эпизодически высокой численности достигают *Euglena viridis* Ehr., *E. hemichromata* Skuja, *E. caudata* Hubner., *Lepocinclis ovum* (Ehr.) Lemm. На рис. 4В показана сезонная динамика численности и состава доминирующих видов и связанные с этим изменения индекса сапробности. Большинство указанных видов – α-β-мезосапробы, α-мезосапробы, α-мезо-полисапробы. Как видно (рис. 4В) со сменой состава этих массовых форм происходит понижение, а с максимумом развития вида – повышение величин индексов сапробности.

Группа карстовых озер

Сезонная динамика индексов сапробности в таких озерах также отражает изменения структуры доминирующего комплекса видов, состав которого в каждом водоеме специфичен. Например, одно из слабокислых озер этой группы (Золотенка) характеризуется почти полной периодической потерей воды. Видовой состав его альгоценозов небогат, однако в годы наполнения карстовой воронки в воде наблюдалось массовое развитие представителей отдела Chrysophyta (виды рода *Dinobryon* и *Mallomonas caudata* Iwan.). Эти виды доминировали в планктоне на протяжении нескольких месяцев, поэтому изменения индекса сапробности были незначительны. Однако в озерах с мозаичной структурой комплекса массовых форм изменения величин индексов хорошо выражены при смене состава доминирующих видов-индикаторов. Именно такие особенности были отмечены, например, для мелководного заросшего макрофитами карстового озера. Его альгоценозы были исключительно разнообразны (индекс Шеннона по численности 3,1–4,4), а для сезонной сукцессии характерна быстрая смена видового состава, в том числе доминирующих видов, а также индикаторов сапробности.

Группы техногенных и болотных водоемов

Сезонные изменения величин индексов сапробности в них аналогичны: преобладание или массовое развитие тех или иных видов-индикаторов меняет величину индекса.

Связь величин индексов сапробности с таксономическим составом фитопланктона и содержанием органических веществ

В 85% водоемов, для которых определено БПК₅, связь этого показателя с суммарной численностью видов-индикаторов значимо положительная (R от 0,60 до 0,84). Дальнейший анализ показал следующее: в 60% водоемов величина БПК₅ положительно коррелирует с численностью Dinophyta (R от 0,50 до 0,72) и Chlorophyta (R 0,51–0,60); еще в 45% водоемов – с численностью Euglenophyta (R 0,58–0,89), Chrysophyta (R 0,53–0,72) и Цианопрокариота (R 0,50–0,94).

В отделах Dinophyta и Цианопрокариота корреляционная связь численности с величиной БПК₅ всегда положительная, в других отделах отмечена как прямая, так и обратная зависимость этих показателей: в частности для фитофлагеллят отделов Cryptophyta, Chrysophyta и Euglenophyta. Ряд представителей этих отделов – миксотрофы, которые могут использовать осмотрофию, фаготрофию для получения питательных и других необходимых веществ при ограничении доступности световых и трофических условий. Так, для некоторых видов родов *Mallomonas*, *Euglena*, *Cryptomonas* показано, что эффективной стратегией питания у них является поглощение растворенных органических соединений [22, 29], а для представителей родов *Dinobryon*, *Cryptomonas* описана способность поглощать бактерий [20, 26, 27, 33]. В исследованных нами озерах СВБР для численности видов Cryptophyta и величин БПК₅ значимыми в целом ряде озер были только отрицательные корреляции.

Поскольку в озерах СВБР сезонные изменения численности бактериопланктона отражают динамику содержания легкоокисляемого органического вещества и уровня развития фитопланктона [12, 16, 17], была проанализирована связь численностей видов рода *Cryptomonas* (Cryptophyta) и рода *Dinobryon* (Chrysophyta) с общей численностью бактерий. В ряде водоемов с отрицательной корреляцией численности этих родов с БПК₅ были получены положительные коэффициенты корреляции с общей численностью бактерий (R 0,51–0,75). Проведенный анализ связи численности видов-индикаторов и величин индексов сапробности с перманганатной окисляемостью показал, что в большинстве озер коэффициенты корреляции этих параметров незначимы.

Несмотря на то, что водоемы СВБР различаются по количеству растворенного органического вещества и по содержанию его легко окисляемой фракции [12, 13, 15], на эту разницу в основном реагирует видовой состав фитопланктона, а не доля видов-индикаторов сапробности. Например, при термической стратификации и изменении вертикального распределения основных биогенов, растворенного органического вещества и содержания кислорода, в водоеме формируются такая видовая структура альгоценоза, которая позволяет использовать эти особенности видам, способным изменять свое положение по профилю глубины: крупноклеточным подвижным фитофлагеллятам или видам, регулирующим свой удельный вес. Для водоемов СВБР установлено, что массовые виды совершают суточные вертикальные миграции и формируют максимумы плотности на разной глубине, что следует рассматривать как адаптивную стратегию для использования трофических и световых ресурсов и избегания межвидовой конкуренции [24].

Характеристика сапробности рек

Для альгоценозов рек СВБР показано, что экологическая неоднородность по длине водотоков обуславливает значительную динамику таксономического состава и количественной структуры, которые в отсутствие биогенного лимитирования зависят от гидрологических факторов и биотопической неоднородности естественного и антропогенного происхождения [23]. В исследованных водотоках индексы сапробности ниже, чем в водоемах (табл.) и в целом увеличиваются от истока к устью. В верхнем течении состояние рек в основном олигосапробное (чистые воды), в среднем и нижнем течение – β-мезосапробное (умеренное загрязнение). Индексы сапробности выше у населенных пунктов, на подпруженных участках, а также в зоне подпора водохранилища; в отличие от этого участки водотоков со свободным течением характеризуются снижением индексов: найдена значимая отрицательная корреляция между величинами индексов и скоростями течения (R от –0,66 до –0,72).

Количество растворенного кислорода в воде рек в 75% проб близко к насыщению или выше (от 7 до 14 мг/л); отмечена значимая корреляционная связь изменения концентрации растворенного кислорода с продольной динамикой индексов сапробности (R 0,55). Например, в нижнем течение р. Уса в зоне подпора Куйбышевского водохранилища содержание кислорода снижается, а сапробность вод к устьевому участку возрастает. Это может свидетельствовать об увеличении загрязнения вод органическими веществами и снижении самоочистительной способности. В отличие от водотоков достоверная положительная связь этих показателей отмечена лишь для трети водоемов СВБР.

Оценка информативности показателей сапробности в условиях ООПТ

Гидробиологические исследования, проведенные на ООПТ, выявили, что таксономические и структурные особенности сообществ гидробионтов являются хорошими показателями экологического состояния водных объектов [2-7, 11-13]. Что касается оценки сапробности по показателям альгоценозов, то видовой состав индикаторов и величины индексов также являются характеристиками, которые достаточно четко реагируют на изменения условий обитания. Для водных объектов СВБР это особенно важно, поскольку такая оценка позволяет в условиях небольшой антропогенной нагрузки зарегистрировать изменения, не выявленные методами гидрохимического анализа [5].

Для замкнутых водоемов СВБР наиболее высокими величинами индексов сапробности и долей видов-индикаторов, как сказано выше, отличаются пруды (табл.). Среди них следует выделить те, которые находятся непосредственно у населенных пунктов и испытывают такие виды антропогенного воздействия как рекреация, рыбная ловля и др. Нередко в планктоне этих водоемов доминируют «высокосапробные» виды-индикаторы органического загрязнения, что является наиболее показательным для характеристики сапробных условий. В частности из отдела Cryptophyta в массе отмечены *Cryptomonas ovata* Ehr., *C. erosa* Ehr., из Euglenophyta – *Euglena viridis* Ehr., *Euglena caudata* Hubner, *E. variabilis* Klebs, *Lepocinclis ovum* (Ehr.) Mink., из Cyanoprokaryota – *Merismopedia tenuissima* и др. Несмотря на то, что эти виды встречаются практически в каждом из водоемов СВБР, результативным для оценки сапробности является сравнительная оценка их количественного развития, поскольку в прудах их численность обычно на порядок-два выше, что также следует рассматривать как чувствительный показатель для оценки экологического состояния водоема.

В водотоках повышение индексов сапробности отмечается в местах усиления воздействия на их самоочистительный потенциал, в частности у населенных пунктов и в зонах снижения скорости течения [5, 7]. В 2017–2018 годах гидробиологические исследования р. Уса с одновременным отбором гидрохимических проб от истока до устья [7] позволили оценить значимость показателей альгоценозов на воздействие точечного источника загрязнения в зоне выпуска очищенных сточных вод населенного пункта. По гидрохимическим показателям превышение ПДК загрязняющих веществ на исследуемом участке установлено не было [5, 7]. Но при оценке сапробности в альгоценозах изменения отмечены. Так, при сравнении с вышележащим участком реки, имеющем β -мезосапробное состояние, ниже по течению от места выпуска сточных вод среди массовых видов отмечено появление показателей β - α -мезосапробной и α -мезосапробной степени органического загрязнения, а также увеличение индекса сапробности. Кроме того максимальное для реки число α -мезосапробов и α -мезо-полисапробов в видовом составе отмечено на этом же участке [5].

Заключение

В исследованных водоемах и водотоках СВБР зарегистрирован разнообразный таксономический состав индикаторов сапробности, представленный большим числом видов (не менее 60%) в каждом из водных объектов. Проведенный сапробиологический анализ выявил условия от олигосапробных до α -мезосапробных; по средним величинам индексов состояние всех исследованных водных объектов соответствует β -мезосапробной зоне самоочищения. Комплекс массовых видов на 55-75% состоит из индикаторов сапробности, поэтому сезонная динамика индексов отражает изменения его структуры.

Величины индексов положительно коррелируют с численностью видов индикаторов во всех водных объектах (R 0,50–0,89). Отмечена положительная корреляционная связь численности отделов Dinophyta и Cyanoprokaryota с величиной БПК₅, в то же время для фитофлагеллят отделов Cryptophyta, Chrysophyta и Euglenophyta зависимость этих показателей может быть как прямой, так и обратной. В ряде водоемов установлена достоверная положительная корреляция численности миксотрофных фитофлагеллят и общей численности бактерий.

В водотоках СВБР индексы сапробности ниже, чем в водоемах. Верхнее течение рек в основном соответствует олигосапробному состоянию, среднее и нижнее – β -мезосапробному. Величины индексов в целом увеличиваются от истока к устью, кроме того их повышение отмечается у населенных пунктов, в запрудах, в зоне подпора водохранилища, что свидетельствует о процессах интенсификации органического загрязнения и усиления нагрузки на самоочистительный потенциал водотока.

В целом приведенные результаты характеризуют сапробные условия разнотипных эвтрофных водоемов и водотоков, находящихся на охраняемой территории и поэтому информативны для экологического направления исследований и оценки состояния аналогичных водных объектов в зоне антропогенного воздействия.

Работа выполнена по программе фундаментальных исследований по теме: «Изменение, устойчивость и сохранение биологического разнообразия под воздействием глобальных изменений климата и интенсивной антропогенной нагрузки на экосистемы Волжского бассейна» № 122032500063-0.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Барина СС, Медведева ЛА, Анисимова ОВ. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio; 2006.
2. Голубая книга Самарской области: редкие и охраняемые гидробиоценозы. Под ред. ГС Розенберга, СВ Саксонова. Самара. Самарский НЦ РАН; 2007.
3. Горбунов МЮ, Уманская МВ. Абиотические условия в водной толще озер. В кн.: Жариков ВВ, Горбунов МЮ, Уманская МВ, Быкова СВ, Шерышева НГ. Экология сообществ бактерий и свободноживущих инфузорий малых водоемов Самарской Луки. Тольятти: ИЭВБ РАН; 2007. С.17-41.
4. Горохова ОГ. Характеристика трофического состояния малых водоемов Средне-Волжского биосферного резервата по фитопланктону. Вода: химия и экология; 2013;(11):46-53.
5. Горохова ОГ. Биоиндикационная значимость таксономических и структурных показателей альгоценозов малой реки при оценке точечного источника антропогенного воздействия. Известия СНЦ РАН. 2023;25(5):119-24.
6. Горохова ОГ, Номоконова ВИ. Фитопланктон и условия его развития в болотных озерах юга лесостепного Поволжья (Самарская область). Самарская Лука. 2011;1(20):71-8.
7. Зинченко ТД, Саксонов СВ, Сенатор СА, Минеев АК, Головатюк ЛВ, Горохова ОГ, Болотов СЭ, Курина ЕМ, Абросимова ЭВ, Уманская МВ, Кузнецова РС, Михайлов РА, Попченко ТВ. Экологический паспорт реки Усы (правобережный приток Волги). Самарская Лука. 2019;28(2):156-88.
8. Краснобаев ЮП, Чап ТФ. Средне-Волжский комплексный биосферный резерват. Степной бюллетень. 2009;(26):27-30.
9. Макрушин АВ. Биологический анализ качества вод. Л.: Зоологический ин-т АН СССР; 1974.
10. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975.
11. Номоконова ВИ. Гидрохимический режим и трофическое состояние озер Самарской Луки и сопредельной территории. Известия СНЦ РАН. 2009;11(1):155-64.
12. Розенберга ГС, Саксонова СВ, ред. Ресурсы экосистем Волжского бассейна. Т. 1. Водные экосистемы. Тольятти: ИЭВБ РАН; Кассандра; 2008.
13. Розенберг ГС, Паутова ВН, Поспелов АП, Поспелова МД, Номоконова ВИ, Горбунов МЮ, Уманская МВ, Малиновская ЕИ, Горохова ОГ, Быкова СВ, Жариков ВВ, Романова ЕП, Шошин АА. Комплексная характеристика некоторых водоемов юго-восточной части Национального парка «Самарская Лука». Самарская Лука. 2006;(18):38-96.
14. Оксий ОИ, Жукин ВН, Брагинский ЛП, Линник ПН, Кузьменко МИ, Кленус ВГ. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши. Гидробиологический журнал. 1993;29(4):62-77.
15. Поспелов АП, Горбунов МЮ, Уманская МВ, Поспелова МД. Характеристика гидрохимического режима водоемов Самарской Луки. Известия СНЦ РАН. 2000;2(2):216-23.
16. Уманская МВ. Лимнологические исследования в юго-восточной части Самарской Луки. Особенности развития бактериопланктона. Известия СНЦ РАН. 2002;4(2):290-99.
17. Уманская МВ. Бактериопланктон разнотипных водоемов Самарской области. В кн.: Жариков ВВ, Горбунов МЮ, Быкова СВ, Уманская МВ, Тарасова НГ, Буркова ТН, Шерышева НГ, Ротарь ЮМ. Протисты и бактерии озер Самарской области. Тольятти; 2009. С.61-77.
18. Яценко-Степанова ТН, Немцева НВ, Шабанов СВ. Альгофлора Оренбуржья. Екатеринбург: УрО РАН; 2005.

Общий список литературы / References

1. Barinova SS, Medvedeva LA, Anisimova OV. [Diversity of algal indicators in environmental assessment]. Tel'-Aviv: PiliesStudio; 2006. (In Russ.).
2. Golubaya Kniga Samarskoy Oblasti: Redkiye i Okhraniyemye Hidrobiotsenozy. Ed by Rosenberg GS, Saksonov SV. Samara: Samarskiy NTs RAN; 2007. (In Russ.).

3. Gorbunov MYu, Umanskaya MV. [Abiotic conditions in the water column of lakes] In: Zharikov VV, ed. *Ekologiya Soobshchestv Bakteriy i Svobodnozhivushchikh Infuzoriy Malykh Vodoyemov Samarskoy Luki*. Togliatti: IEVB RAN; 2007. P. 17-41. (In Russ.).
4. Gorokhova OG. [Characteristics of trophic status of small reservoirs in the middle volga biosphere reserve using phytoplankton]. *Voda Khimiya i Ekologiya*; 2013;(11):46-53. (In Russ.).
5. Gorokhova OG. [Bioindicative value of taxonomic and structural indicators of plankton algae communities for assessing a point source of anthropogenic impact]. *Izvestiya SNTs RAN*. 2023;25(5):119-24. (In Russ.).
6. Gorokhova OG, Nomokonova VI. [Phytoplankton and condition of its development in marsh lakes of the south forest-steppe Povolzhye (Samara Region)]. *Samarskaya Luka*. 2011;1(20):71-8. (In Russ.).
7. Zinchenko TD, Saksonov SV, Senator SA, Mineyev AK, Golovatiuk LV, Gorokhova OG, Bolotov SYe, Kurina YeM, Abrosimova EV, Umanskaya MV, Kuznetsova RS, Mihaylov RA, Popchenko TV. [Ecological passport of Usa River (a right bank tributary of Volga)]. *Samarskaya Luka* 2019;28(2):156-88. (In Russ.).
8. Krasnobaev YuP, Chap TF. [Middle Volga Biosphere Reserve complex]. *Stepnoy Biulleten*. 2009;(26):27-30. (In Russ.).
9. Makrushin AV. *Biologicheskiy Analiz Kachestva Vod*. [Biological Analysis of Water Quality]. Leningrad: Zoologicheskiy Institut AN SSSR\$ 1974. (In Russ.).
10. *Metodika Izucheniya Biogeotsenozov Vnutrennikh Vodoyemov*. Moscow: Nauka\$ 1975.
11. Nomokonova VI. [Hydrochemical regimen and trophic state of lakes in Samarskaya Luka and adjacent territory]. *Izvestiya SNTs RAN*. 2009;11(1):155-64. (In Russ.).
12. Rozenberg GS, Saksonov SV, eds. *Resursy Ekosistem Volzhskogo Basseyna Tom 1. Vodnye Ekosistemy*. Togliatti: Kassandra; 2008.
13. Rozenberg GS, Pautova VN, Pospelov AP, Pospelova MD, Nomokonova VI, Gorbunov MYu, Umanskaya MV, Malinovskaya YeI, Gorokhova OG, Bykova SV, Zharikov VV, Romanova YeP, Shoshin AA. [Comprehensive assessment of water bodies in the southeast of the national park Samarskaya Luka]. *Samarskaya Luka*. 2006;(18):38-96. (In Russ.).
14. Oksiyuk OP, Zhukinskiy VN, Braginskiy LP, Linnik PN, Kuzmenko MI, Klenus VG. [Comprehensive ecological classification of the quality of terrestrial surface waters]. *Gidrobiologicheskiy Zhurnal*. 1993;29(4):62-77. (In Russ.).
15. Pospelov AP, Gorbunov MYu, Umanskaya MV, Pospelova MD. [Hydrochemical regimen characteristics of water bodies of the national park Samarskaya Luka]. *Izvestiya SNTs RAN*. 2000;2(2):216-23. (In Russ.).
16. Umanskaya MV. [Limnological research in the southeast part of Samarskaya Luka. Characteristics of bacterioplankton development]. *Izvestiya SNTs RAN*. 2002;4(2):290-9. (In Russ.).
17. Umanskaya MV. [Bacterioplankton of different types in reservoirs of Samara Region]. In: Zharikov VV, Gorbunov MYu, Bykova SV, Umanskaya MV, Tarasova NG, Burkova TN, Sherysheva NG, Rotar' YuM. *Protisty i Bakterii Ozer Samarskoy Oblasti*. Togliatti; 2009. P. 61-77. (In Russ.).
18. Yatsenko-Stepanova TN, Nemtseva NV, Shabanov SV. [Algae-vegetation of the Orenburg region]. *Yekaterinburg: UrO RAN*; 2005. (In Russ.).
19. Abdelfattah A, Ali SS, Ramadan H, El-Aswar EI, Eltawab R, Ho SH, Elsamahy T, Li S, El-Sheekh MM, Schagerl M. Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environ Sci Ecotechnol*. 2022;13:100-205.
20. Bird DF, Kalff J. Bacterial grazing by planktonic lake algae. *Science*. 1986; 231:493-5
21. Dixit SS, Smol JP, Kingston JC, Charles DF. Diatoms: Powerful indicators of environmental change. *Environ Sci Technol*. 1992;26:23-3.
22. Flynn KJ, Mitra A, Anestis K, Anschütz AA, Calbet A, Ferreira GD, Gypens N, Hansen PJ, John U, Martin JL, Mansour JS, Maselli M, Medić N, Norlin A, Not F, Pitta P, Romano F, Saiz E, Schneider LK, Stolte W, Traboni C. Mixotrophic protists and a new paradigm for marine ecology: where does plankton research go now? *J Plankton Res*. 2019;41(4):375-91.
23. Gorokhova OG, Zinchenko TD. Phytoplankton of the Usa River (Kuibyshev Reservoir Basin). *Biology Bulletin*. 2019;46(10):1382-9.
24. Gorokhova OG. Vertical distribution and migration of algae under thermal stratification in small water bodies of the forest steppe Volga Region. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2021;(818):012013
25. Irvine KN, Murphy TP. Assessment of eutrophication and phytoplankton community impairment in the Buffalo River Area of Concern. *J Great Lakes Res*. 2009;35(1):83-93.
26. Isaksson A. Phagotrophic phytoflagellates in lakes: A literature review. *Arch Hydrobiol Spec Issues Adv Limnol*. 1998;51:63-90.
27. Nygaard K, Tobiesen A. Bacterivory in algae: A survival strategy during nutrient limitation. *Limnol Oceanogr*. 1993;38:273-9.

28. Palmer CM. A composite rating of algae tolerating organic pollution. *J Phycol.* 1969;5(1):78-82.
29. Peltomaa ET, Taipale S. Osmotrophic glucose and leucine assimilation and its impact on EPA and DHA content in algae. *PeerJ.* 2020. [https://doi.org/ 10.7717/peerj.8363](https://doi.org/10.7717/peerj.8363)
30. Reynolds CS. *The Ecology of Phytoplankton.* New York: Cambridge University Press; 2006.
31. Round FE. Diatoms in river water-monitoring studies. *J App Phycol.* 1991;3:129-45.
32. Sládeček V. System of water quality from the biological point of view. *Arch Hydrobiol Ergebn Limnol.* 1973;7:1-218.
33. Urabe J, Gurung TB, Yoshida T, Sekino T, Nakanishi M. Diel changes in phagotrophy by *Cryptomonas* in Lake Biwa. *Limnol Oceanogr.* 2000;45:1558-63.
34. Wegl R. *Index für die Limnosaprobität.* Wasser und Abwasser; 1983.

Статья опубликована на сайте журнала "Биосфера"
До корректуры и верстки как принятая к печати
в № 4 тома 16 за 2024 год.
В окончательной версии возможны изменения