

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 2 (52). Июнь, 2024

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
В. Krasnov
А. Gugotek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК 574.583; 574.522

ПИГМЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИТОПЛАНКТОНА БЕЛОХОЛУНИЦКОГО И ОМУТНИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ

КУТЯВИНА
Татьяна Игоревна

кандидат биологических наук, Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
kutyavinati@gmail.com

Ключевые слова:
водохранилище
фитопланктон
цианобактерии
пигменты
хлорофилл
каротиноиды
трофический статус

Аннотация: С целью оценки экологического и трофического состояния двух крупнейших водохранилищ Кировской области (Белохолуницкого и Омутнинского), испытывающих разную антропогенную нагрузку, проведено изучение видового состава фитопланктона и определение его пигментных характеристик. Отмечено, что фитопланктон исследуемых водоемов представлен преимущественно зелеными и диатомовыми водорослями, в период цветения доминирующее положение занимают цианобактерии. По величине индекса сапробности Пантле и Букка в модификации Сладчека оба водохранилища соответствуют бета-мезосапробной зоне, класс качества воды III – умерено загрязненные воды. В ходе исследования, проведенного в летний период 2023 г., впервые для данных водоемов определено содержание в воде хлорофиллов (а, b, c), феофитина и каротиноидов. В Белохолуницком водохранилище общее содержание хлорофиллов составляло 6.4–26.2 мкг/л, каротиноидов – 2.5–10.8 мкг/л; в Омутнинском водохранилище – 16.4–18.8 и 4.9–5.2 мкг/л соответственно. Доля основного пигмента фитопланктона – хлорофилла а от суммы содержания хлорофиллов (а, b, c) в Белохолуницком водохранилище составляла 70–76 %, в Омутнинском – 56–60 %. По средней величине концентрации хлорофилла а (9.8–10.5 мкг/л) исследуемые водохранилища занимают пограничное положение между мезотрофными и умеренно эвтрофными водоемами. Для содержания феофитина во всех случаях получены отрицательные значения, что указывает на летнюю доминирующую роль активных форм фотосинтетических пигментов в продукционных процессах. Отношение содержания каротиноидов к содержанию хлорофилла а, составлявшее в среднем для всех исследуемых участков 0.50, свидетельствует о благоприятных условиях для развития фитопланктона и соответствует водам «хлорофильного типа», характерным для эвтрофных водоемов. Рассчитанные величины пигментных индексов I430/664 (индекс Маргалефа) и I480/664, составляющие 2.5–2.8 и 1.3–1.6 отн. ед. соответственно, свидетельствуют о высоком разнообразии планктонного альгоценоза, преобладании в нем жизнеспособных активных клеток и о достаточной обеспеченности водорослей минеральным азотным питанием. Существенных различий в составе фитопланктона и его пигментных характеристиках между изучаемыми водоемами не обнаружено.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Е. Ю. Митрофанова

Получена: 05 марта 2024 года

Подписана к печати: 03 июня 2024 года

Введение

Одноклеточные водоросли и цианобактерии широко используются в биомониторинге в качестве индикаторов состояния водных объектов. Фотосинтетические пигменты фитопланктона являются одними из важнейших критериев при оценке качества вод, т. к. по их составу, количеству и соотношению можно определить физиологическое состояние водорослей и экологическое состояние водоемов. Хлорофилл *a* (Chl *a*) – основной пигмент зеленых растений и универсальный показатель, отражающий их обилие и фотосинтетическую активность (Дымова, Головкин, 2018). Кроме основного пигмента фотосинтеза научный интерес представляют и другие компоненты пигментного аппарата водорослей: дополнительные хлорофиллы *b* и *c*, феопигменты (продукты распада хлорофилла), а также желтые пигменты

– каротиноиды. Каждый из перечисленных пигментов выполняет определенную роль в процессе фотосинтеза и несет важную информацию о состоянии водорослевого сообщества как элемента экосистемы (Минева, Абрамова, 2009).

Цель данной работы – оценка экологического состояния и трофического статуса Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ Кировской области, отличающихся по степени антропогенной нагрузки и пигментным характеристикам фитопланктона.

Материалы

Белохолуницкое и Омутнинское водохранилища находятся на северо-востоке Русской равнины в центрально-восточной части Европейской России. Основные морфометрические и гидрологические характеристики объектов исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Морфометрические и гидрологические показатели Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ Кировской области

Показатель, единица измерения	Водохранилище	
	Белохолуницкое	Омутнинское
Площадь зеркала, км ²	17.4	9.5
Полный статический объем, млн м ³	51.0	32.5
Длина, км	11.6	10.0
Ширина, км: средняя / максимальная	1.5 / 3.0	1.1 / 2.3
Глубина, м: средняя / максимальная	2.9 / 11.0	3.4 / 11.0
Среднегодовой сток, млн м ³	480.0	143.9
Модуль стока, л/сек. км ²	9.5	10.0
Коэффициент внешнего водообмена	9.4	4.4

Согласно классификации по положению в географической зоне (Дьяконов, Аношко, 1995), оба изучаемых водоема являются лесными, по приуроченности к макрорельефу – равнинными, по площади водного зеркала (Авакян и др., 1987) относятся к категории небольших, по объему (классификация по ГОСТ 17.1.1.02-77) – малых, по величине внешнего водообмена (Догановский, Мякишева, 2015) являются среднепроточными, или аккумуляционно-транзитными. Таким образом, Белохолуницкое и Омутнинское водохранилища сходны по морфометрическим и гидрологическим показателям.

Изучаемые водохранилища созданы в XVIII в. путем зарегулирования малых рек Белая Холуница и Омутная для обеспечения водными ресурсами чугунолитейного производства. В настоящее время водоемы используются для культурно-бытовых и рекреационных целей, а также для водоснабже-

ния промышленных производств. Изучение водохранилищ Кировской области проводится сотрудниками Вятского государственного университета с 2011 г. с целью определения степени их эвтрофирования и разработки мер по улучшению их экологического состояния. Согласно классификации вод по трофо-сапробным показателям (растворенный кислород, содержание биогенных элементов и органических веществ) в соответствии с ГОСТ 17.1.2.04-77, изучаемые водохранилища являются бета-мезосапробными, по трофической шкале классификации водоемов соответствуют эвтрофному классу (Кутявина и др., 2019). Вода в Белохолуницком водохранилище соответствует второму классу качества – слабозагрязненная вода, в Омутнинском – третьему классу качества, загрязненная вода. Комбинаторный индекс загрязнения воды Белохолуницкого водохранилища составляет 12.82, Омутнинско-

го водохранилища – 26.25. Для водосбора Омутнинского водохранилища характерна более высокая заселенность по сравнению с Белохолуницким водохранилищем и соответственно более высокая антропогенная нагрузка.

Изучение пигментных характеристик Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ проводится нами впервые с целью

определения физиологического состояния водорослей и сравнения экологического состояния водоемов.

Пробы воды для изучения фитопланктона отбирали путем зачерпывания воды с поверхности (глубина 0–30 см) дважды: в июле и августе 2023 г., на двенадцати участках водохранилищ (рис. 1). Характеристика участков пробоотбора представлена в табл. 2.

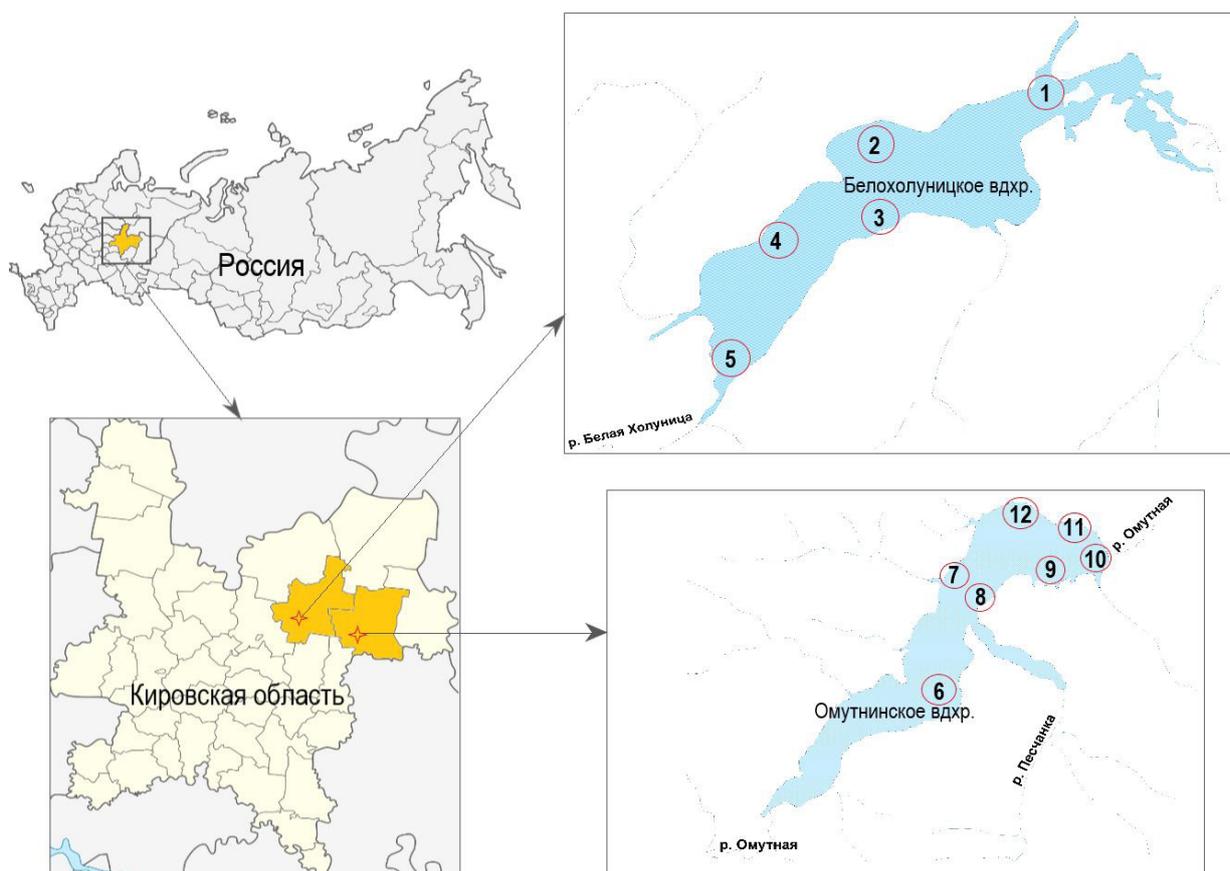


Рис. 1. Участки отбора проб воды на Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах Кировской области

Fig. 1. Water sampling sites at Belokholunitskoye and Omutninskoye reservoirs in the Kirov Region

Методы

Температура воды в период исследования составляла 23–27 °С, прозрачность – 0.7–1.3 м, рН 6.1–7.9, содержание растворенного в воде кислорода – 7.6–11.9 мг/дм³. Пробы воды для изучения видового состава фитопланктона объемом 0.5 дм³ непосредственно после отбора фиксировали 4%-ным раствором формалина, транспортировали в лабораторию и осаждали в течение недели. Определение видов фитопланктона проводили с помощью микроскопа лабораторного «Микмед-6», вариант 7 (АО «Ломо», Россия) при увеличении 400х и классических от-

ественных и зарубежных определителей (Водоросли..., 1989; Голлербах и др., 1953; Дедусенко-Щеголева, Голлербах, 1962; Дедусенко-Щеголева и др., 1959; Забелина и др., 1951; Царенко, 1990; Флора..., 2009; Komarek, 1998, 2005). Названия видов даны согласно системе, принятой в базе данных Algaebase (Guiry, Guiry, 2023). Оценку качества вод производили по индексу сапробности Пантле и Букка в модификации Сладечка (Шитиков и др., 2003).

Фильтрацию проб воды для концентрирования фитопланктона и последующего определения пигментов проводили непосредственно на водоемах с использованием

Таблица 2. Виды антропогенной нагрузки на участках отбора проб воды в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах Кировской области

Часть водохранилища	Номера участков отбора проб	Характер антропогенной нагрузки
Белохолуницкое водохранилище		
Верховье	1	рыболовство
Средняя	2, 3, 4	рекреационная, рыболовство
Приплотинная	5	жилая застройка на берегах
Омутнинское водохранилище		
Верховье	труднодоступные участки, пробы не отбирали	рыболовство
Средняя	6, 7, 8	рекреационная, рыболовство, садоводческие участки, лечебно-оздоровительные учреждения на берегах
Приплотинная	9, 10, 11, 12	жилая застройка, промышленные предприятия на берегах

мембранных фильтров МФАС-ОС-2 с диаметром пор 0.45 мкм («Владипор», Россия) и вакуумного насоса. Фильтрацию проводили до тех пор, пока на фильтре не появлялся видимый зеленый осадок. При этом фиксировали объем воды, пропущенный через фильтр. С каждого участка пробоотбора было получено по три мембранных фильтра с фитопланктоном в июле и по три – в августе, всего 72 пробы. Фильтры с фитопланктоном подсушивали на воздухе, а затем хранили в замороженном виде до проведения анализа.

Содержание пигментов фитопланктона в воде определяли стандартным спектрофотометрическим методом в 90 % ацетоновом экстракте до и после подкисления проб 10%-ным раствором соляной кислоты (ГОСТ 17.1.4.02-90) на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ (ООО «ЭКРОСХИМ», Россия). Расчет концентраций хлорофиллов (Chl) *a*, *b* и *c* ($c_1 + c_2$) проводили по формулам (Jeffrey, Humphrey, 1975), феофитина *a* и каротиноидов (*K*) – по ГОСТ 17.1.4.02-90.

Также в ходе работы рассчитывали пигментные индексы: 1) индекс Маргалефа ($I_{430/664}$), рассчитываемый как отношение оптической плотности (*D*) ацетонового экстракта при длине волны $\lambda = 430$ нм к оптической плотности экстракта при $\lambda = 664$ нм (D_{430}/D_{664}) (Margalef, 1961); 2) пигментный индекс $I_{480/664}$, рассчитываемый как D_{480}/D_{664} ; 3) отношение содержания каротиноидов к содержанию хлорофилла *a* (*K/Chl a*).

Все перечисленные индексы отражают соотношение желтых пигментов (каротиноидов) и зеленых (хлорофиллов) и являются показателями отношения гетеротрофного метаболизма к автотрофному в сообществе

водоема. Значение индекса Маргалефа от 1 до 2 обычно отмечают в молодых культурах или во время весеннего цветения водоемов, когда дыхание невелико, а значение от 3 до 5 – в стареющих культурах или планктонных сообществах в конце лета, когда дыхание относительно усиленное (Одум, 1975). Отношение *K/Chl a* выше 1 указывает на то, что создаются условия, неблагоприятные для развития водорослей в водоеме (Ермолаев, 1989; Минеева, 2004; Цыбекмитова, Ташлыкова, 2021).

Результаты

Как и в большинстве водоемов умеренных широт, в летнее время в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах преобладали представители отделов Chlorophyta и Bacillariophyta, на локальных участках акватории в период цветения воды – Cyanobacteria (рис. 2). Все обнаруженные виды – типичные представители фитопланктона пресных водоемов с замедленным водообменом.

Из зеленых водорослей наиболее часто в исследуемых водоемах встречались виды pp. *Scenedesmus*, *Pediastrum*, *Oocystis*, а также *Chlorella vulgaris* Beijerinck, *Staurastrum* sp.; из диатомовых – виды pp. *Nitzschia*, *Navicula*, *Melosira*, *Fragilaria*, *Pinnularia*. Цианобактерии были представлены видами *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Dolichospermum* sp., *Pseudanabaena galeata* Böcher и др. Стоит отметить, что видовое разнообразие и численность цианобактерий в Белохолуницком водохранилище были выше, чем в Омутнинском. В августе на всех участках Белохолуницкого водохранилища домини-

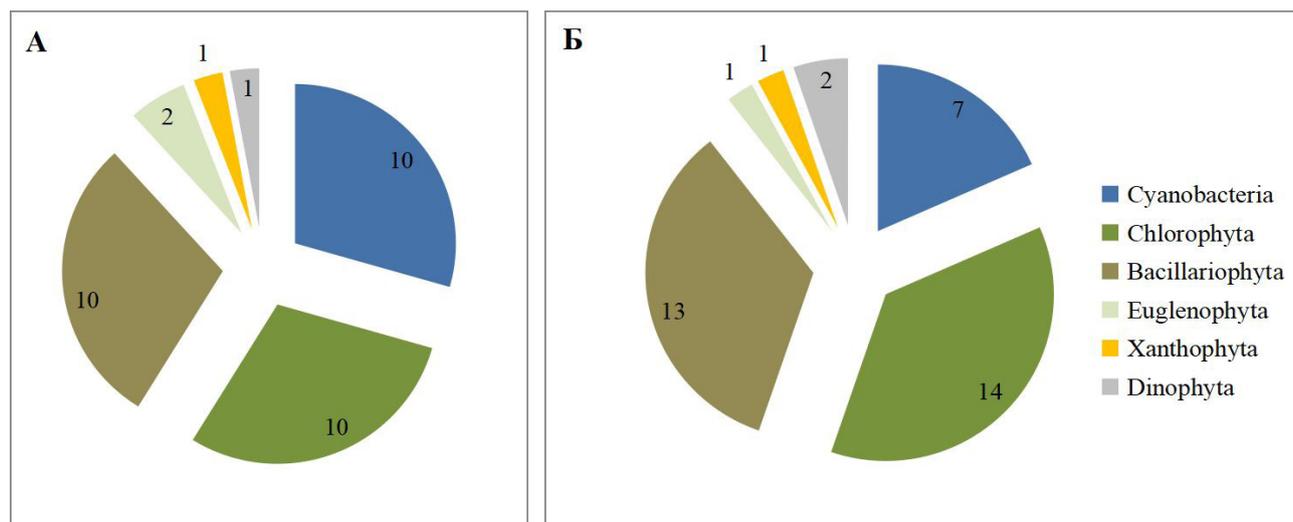


Рис. 2. Состав летнего фитопланктона Белохолуницкого (А) и Омутнинского водохранилищ (Б) в 2023 г. Цифрами обозначено количество видов в разных отделах

Fig. 2. Composition of summer phytoplankton in the Belokholunitskoye (A) and Omutninskoye reservoirs (B) in 2023. The figures indicate the number of species in different departments

нировал *Aphanizomenon flos-aquae*, вызывающая цветение воды. *Aphanizomenon flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa* ранее неоднократно отмечены в числе доминантов цветения водохранилищ Кировской области (Штина, 1997; Кутявина и др., 2019) и других водоемов, например Ижевского водохранилища (Иванова, Шарипова, 2006), Камского (Беляева, 2014), Куйбышевского (Абрамова и др., 2019) и др. Цианотоксины, продуцируемые некоторыми видами цианобактерий и попадающие в воду при массовом их развитии, представляют опасность для человека, т. к. могут вызывать различные аллергические реакции и заболевания, такие как рак печени, боковой амиотрофический склероз, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона (Румянцев, Крюков, 2013; Bradley et al., 2013; Белых и др., 2020; Sini et al., 2021).

По наличию в фитопланктоне видов-индикаторов сапробности была проведена оценка органического загрязнения изучаемых водоемов. Значения индекса сапробности по Пантле и Букку в модификации Сладчека в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах составляли 2.3–2.4, что соответствовало бета-мезосапробной зоне, класс качества вод (согласно ГОСТ 17.1.3.07-82) – III, умеренно загрязненные воды. Результаты оценки качества вод по показателям фитопланктона подтвердили ранее полученные результаты оценки качества вод в изучаемых водохранилищах по трофо-сапробным показателям.

Содержание определяемых фотосинтетических пигментов и их процентное соотно-

шение в воде исследуемых водохранилищ представлены в табл. 3.

Согласно полученным результатам (см. табл. 3), содержание основного фотосинтетического пигмента (Chl *a*) на участках отбора проб фитопланктона в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах изменялось от 4.5 до 33.5 мкг/л, в большинстве случаев составляло 9.8–10.5 мкг/л. В соответствии со шкалой трофического состояния водоемов по средней величине концентрации Chl *a*, предложенной в работе (Минеева, Макарова, 2018), Белохолуницкое и Омутнинское водохранилища занимают пограничное положение между мезотрофными и умеренно эвтрофными водоемами.

В табл. 4 представлены результаты расчета основных пигментных индексов, наиболее часто используемых отечественными и зарубежными исследователями при изучении фитопланктона водоемов.

Согласно полученным данным (см. табл. 4), значения пигментных индексов и отношения концентрации каротиноидов к концентрации Chl *a* для Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ были довольно близки между собой и соответствовали величинам, характерным для водоемов умеренных широт в конце летнего сезона.

Обсуждение

Полученные нами данные о содержании Chl *a* в воде водохранилищ Кировской области (см. табл. 3) сопоставимы с данными исследователей по водохранилищам соседних регионов. Для сравнения: среднее содержа-

Таблица 3. Среднее содержание пигментов фитопланктона в воде Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ в июле – августе 2023 г.

Часть водохранилища	Chl <i>a</i> , мкг/л (% от Σ Chl)	Chl <i>b</i> , мкг/л (% от Σ Chl)	Chl <i>c</i> ($c_1 + c_2$), мкг/л (% от Σ Chl)	Σ Chl, мкг/л	Феопитин <i>a</i> , мкг/л	<i>K</i> , мкг/л
Белохолуницкое водохранилище						
Верховье	5.8 ± 0.6 (72 %)	0.94 ± 0.09 (12 %)	1.36 ± 0.14 (17 %)	8.1 ± 0.8	-0.71	2.67 ± 0.27
Средняя	21.6 ± 2.7 (76 %)	1.14 ± 0.11 (7 %)	3.46 ± 0.35 (17 %)	26.2 ± 0.26	-6.70	10.8 ± 1.1
Приплотинная	4.5 ± 0.4 (70 %)	0.65 ± 0.07 (10 %)	1.26 ± 0.13 (20 %)	6.4 ± 0.6	-1.06	2.50 ± 0.25
Омутнинское водохранилище						
Средняя	10.5 ± 1.1 (56 %)	1.10 ± 0.11 (6 %)	7.1 ± 0.7 (38 %)	18.8 ± 1.9	-1.80	4.9 ± 0.5
Приплотинная	9.9 ± 1.0 (60 %)	1.01 ± 0.10 (6 %)	5.5 ± 0.6 (34 %)	16.4 ± 1.6	-0.94	5.2 ± 0.5

Таблица 4. Пигментные индексы фитопланктона Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ в июле – августе 2023 г.

Часть водохранилища	Пигментный индекс Маргалефа $I_{430/664}$	Пигментный индекс $I_{480/664}$	Отношение концентраций $K/Chl\ a$
Белохолуницкое водохранилище			
Верховье	2.70	1.28	0.46
Средняя	2.55	1.48	0.53
Приплотинная	2.81	1.29	0.46
Омутнинское водохранилище			
Средняя	2.54	1.41	0.50
Приплотинная	2.79	1.56	0.56

ние Chl *a* в воде ближайших к району исследования Камских водохранилищ (Камского, Воткинского, Нижнекамского и камской ветви Куйбышевского) варьирует в диапазоне от 4.2 до 82.5 мкг/л (Беляева и др., 2018), а в воде Горьковского, Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ в среднем составляет 10.9 ± 0.7; 26.7 ± 3.9 и 9.2 ± 1.0 мкг/л соответственно (Минеева и др., 2022). Относительное количество Chl *a* от суммы Chl *a*, *b*, *c* было выше в Белохолуницком водохранилище (70–76 %), чем в Омутнинском (56–60 %), но в целом оставалось довольно низким по сравнению с водохранилищами Волжского каскада, за исключением Чебоксарского водохранилища. Согласно работе (Минеева, Абрамова, 2009), относительное количество Chl *a* в воде Чебоксарского водохранилища составляет примерно 70 %, что обусловлено преобладанием в планктоне водоема диатомовых водорослей в условиях повышенной проточности.

Содержание Chl *b*, компонента зеленых и эвгленовых водорослей, в воде обоих исследуемых водоемов было довольно низким (6–12 % от суммарного содержания

хлорофиллов) и значительно уступало содержанию Chl *c*, компонентов диатомовых, золотистых, динофитовых и криптофитовых водорослей (17–38 %) (см. табл. 3). Отмечено превышение значений отношения Chl *c* к Chl *a* (c/a) над величинами соотношения Chl *b* к Chl *a* (b/a) в 2–7 раз, что, согласно работам (Беляева, 2014; Минеева, 2019), может свидетельствовать о ведущем положении в фитопланктоне диатомовых водорослей.

Суммарное содержание Chl *a*, *b*, *c* достигало максимальных значений на средних участках водоемов (см. табл. 3). Для этих участков акваторий характерны высокая доля хорошо прогреваемых мелководий и поступление питательных элементов с водосбора с неорганизованным ливневым стоком. В совокупности эти факторы оказывают стимулирующее влияние на развитие фитопланктона и, соответственно, на содержание в воде фотосинтетических пигментов фитопланктона.

Согласно результатам спектрофотометрии, для содержания феопитина *a* (неактивной формы Chl *a*) на всех исследуемых

участках водохранилищ в июле – августе 2023 г. получены отрицательные значения (см. табл. 3). Как отмечено в работе (Цыбекмитова, Ташлыкова, 2021), отрицательные величины содержания феофитина a указывают на летнюю доминирующую роль активных форм фотосинтетических пигментов в продукционных процессах.

Содержание дополнительных пигментов (каротиноидов) не превышало содержания основного пигмента (Chl a) в воде исследуемых водохранилищ (см. табл. 3). Это указывает на нормальное соотношение пигментов и свидетельствует о физиологическом благополучии фитопланктона водоемов (Беляева, 2014; Минеева, 2020).

Помимо абсолютного и относительного содержания фотосинтетических пигментов в водных объектах важное биоиндикационное значение имеют пигментные индексы, отражающие физиологическое состояние фитопланктона и развитие продукционных / деструкционных процессов в водоеме. Так, средняя величина индекса Маргалефа для исследуемых водохранилищ составила 2.7, что более характерно для фитопланктона в конце летнего периода, когда фотосинтетическая активность водорослей снижается, а в водных экосистемах в целом наблюдается преобладание процессов гетеротрофного метаболизма над автотрофным.

Еще один часто используемый индекс – $I_{480/664}$ показывает соотношение каротиноидов и хлорофилла, а также отражает условия обитания и обеспеченность фитопланктона биогенным питанием (Котовщиков, Кириллова, 2011). В исследуемых водохранилищах величина этого индекса достигала значений 1.28–1.56 отн. ед. (см. табл. 4), что было на 30–40 % выше, чем в Камских водохранилищах (Беляева и др., 2018). По величине $I_{480/664}$, отмеченной для исследуемых водохранилищ, можно судить о преобладании в фитопланктоне жизнеспособных активных клеток, а также о достаточной обеспеченности водорослей минеральным азотным питанием.

Отношение $K/Chl\ a$ в воде Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ, составлявшее в июле – августе 2023 г. в среднем 0.50 (см. табл. 4), подтверждает, что условия для развития водорослей в обоих водоемах были благоприятные. Согласно работе (Беляева, 2014), такое невысокое отношение $K/Chl\ a$ соответствует водам «хлорофильного типа» и характерно для эвтрофных водоемов.

Заключение

Таким образом, изучен фитопланктон и его пигментные характеристики в Белохолуницком и Омутнинском водохранилищах Кировской области, отличающихся по степени антропогенной нагрузки и физико-химическим показателям воды. Летний фитопланктон в двух водохранилищах преимущественно состоит из представителей отделов Chlorophyta и Bacillariophyta, что является типичным для водоемов умеренных широт. В периоды цветения воды доминирующее положение на локальных участках акватории водохранилищ занимают цианобактерии, в т.ч. *Aphanizomenon flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa*, являющиеся потенциально токсичными видами.

Впервые для Белохолуницкого и Омутнинского водохранилищ проведено определение пигментных характеристик фитопланктона. Среднее содержание фотосинтетических пигментов в воде исследуемых водоемов сопоставимо со значениями, характерными для водохранилищ соседних регионов (Нижегородской, Костромской областей, Республики Татарстан, Пермского края). Так, содержание хлорофилла a на разных участках акватории водохранилищ составляло от 4.5 до 33.5 мкг/л, что соответствовало 56–76 % от общего содержания хлорофиллов, содержание дополнительных пигментов хлорофиллов b и c составляло 0.65–1.14 мкг/л (6–12 %) и 1.36–7.10 мкг/л (17–38 %) соответственно. Содержание каротиноидов было ниже содержания хлорофилла a , что свидетельствовало о нормальном физиологическом состоянии фитопланктона в изучаемый период. Величины пигментных индексов $I_{430/664}$ и $I_{480/664}$ позволили сделать вывод о высоком разнообразии фитопланктона, преобладании в нем жизнеспособных активных клеток и о достаточной обеспеченности водорослей минеральным азотным питанием. Согласно оценке органического загрязнения водоемов по величине индекса сапробности Пантле и Букка в модификации Сладечека, изучаемые водохранилища соответствуют бета-мезосапробной зоне, III классу качества вод, умеренной степени загрязнения. По результатам анализа пигментных характеристик фитопланктона Белохолуницкое и Омутнинское водохранилища занимают переходное положение от мезотрофного к слабо эвтрофному трофическому типу. По состоянию на 2023 г. существенных различий в видовом составе и пигментных

характеристиках фитопланктона между изучаемыми водохранилищами не выявлено. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для сравнительной оценки изменений, происходящих в экосистемах изучаемых водохранилищ под влиянием природных и антропогенных факторов окружающей среды.

Библиография

- Абрамова К. И., Токинова Р. П., Шагидуллин Р. Р. Динамика сезонного развития альгоценоза в «Казанском» заливе Куйбышевского водохранилища // Вода: химия и экология. 2019. № 7–9. С. 62–66.
- Авакян А. Б., Салтанкин В. П., Шарапов В. А. Водохранилища . М.: Мысль, 1987. 331 с.
- Белых О. И., Тихонова И. В., Кузьмин А. В., Сороковикова Е. Г., Потапов С. А., Галкин А. В., Федорова Г. А. Токсин-продуцирующие цианобактерии в озере Байкал и водоемах Байкальского региона (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 21–27. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-1-021-027
- Беляева П. Г. Трофический статус Камского водохранилища по фитопланктону в летний период // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 5. С. 244–248.
- Беляева П. Г., Минеева Н. М., Сигарева Л. Е., Тимофеева Н. А., Макарова О. С. Содержание растительных пигментов в воде и донных отложениях водохранилищ р. Камы // Труды ИБВВ РАН. 2018. № 81 (84). С. 97–104. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0007
- Водоросли: Справочник / С. П. Вассер, Н. В. Кондратьев, Н. П. Масюк и др. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
- Голлербах М. М., Косинская Е. К., Полянский В. И. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2: Синезеленые водоросли . М.: Наука, 1953. 650 с.
- ГОСТ 17.1.4.02-90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a* . М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. 15 с.
- ГОСТ 17.1.1.02-77 Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов . М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 13 с.
- ГОСТ 17.1.2.04-77 Охрана природы. Гидросфера. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов . М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. 12 с.
- ГОСТ 17.1.3.07-82 Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков . М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. 10 с.
- Дедусенко-Щеголева Н. Т., Голлербах М. М. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 5: Желтозеленые водоросли . М.; Л.: Наука, 1962. 272 с.
- Дедусенко-Щеголева Н. Т., Матвиенко А. М., Шкорбатов Л. А. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 8: Зеленые водоросли. Класс Вольвоксовые . М.; Л.: Наука, 1959. 223 с.
- Догановский А. М., Мякишева Н. В. Водный баланс и внешний водообмен озер России и сопредельных территорий // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 41. С. 63–75.
- Дымова О. В., Головкин Т. К. Фотосинтетические пигменты: функционирование, экология, биологическая активность // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 3 (4). С. 5–16. DOI: 10.31040/2222-8349-2018-4-3-5-16
- Дьяконов К. Н., Аношко В. С. Мелиоративная география . М.: Изд-во МГУ, 1995. 254 с.
- Ермолаев В. И. Фитопланктон водоемов бассейна озера Сартлан . Новосибирск: Наука, 1989. 96 с.
- Забелина М. М., Киселев И. А., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова В. С. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4: Диатомовые водоросли . М.: Наука, 1951. 620 с.
- Иванова Н. А., Шарипова Л. А. Состояние фитопланктона Ижевского пруда в районе водозабора МУП города Ижевска «Ижводоканал» в 2002–2005 годах // Вестник Удмуртского университета. 2006. № 10. С. 17–24.
- Котовщиков А. В., Кириллова Т. В. Пространственная неоднородность и динамика пигментных характеристик фитопланктона гипергалинного озера Большое Яровое // Мир науки, культуры, образования. 2011. № 6 (31). С. 422–428.
- Кутявина Т. И., Ашихмина Т. Я., Кондакова Л. В. Применение комплекса наземных методов исследования для диагностики загрязнения и процессов эвтрофирования водохранилищ Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 44–52. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-044-052
- Минеева Н. М. Пигментный состав фитопланктона и его многолетняя динамика в водохранилищах Верхней Волги // Вопросы современной альгологии. 2020. № 2 (23). С. 74–78. DOI: 10.33624/2311-0147-2020-2(23)-74-78
- Минеева Н. М. Растительные пигменты в воде Волжских водохранилищ . М.: Наука, 2004. 156 с.
- Минеева Н. М. Содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах Верхней Волги (2005–2016 гг.) // Биология внутренних вод. 2019. № 2. С. 33–41. DOI: 10.1134/S0320965219020104

- Минеева Н. М., Абрамова Н. Н. Пигменты фитопланктона как показатели экологического состояния Чебоксарского водохранилища // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. С. 588–596.
- Минеева Н. М., Макарова О. С. Содержание хлорофилла как показатель современного (2015–2016 гг.) трофического состояния водохранилищ Волги // Биология внутренних вод. 2018. № 3. С. 107–110. DOI: 10.1134/S0320965218030129
- Минеева Н. М., Поддубный С. А., Степанова И. Э., Цветков А. И. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Средней Волги // Биология внутренних вод. 2022. № 6. С. 640–651. DOI: 10.31857/S0320965222060158
- Одум Ю. Основы экологии / Под ред. Н. П. Наумова. М.: Мир, 1975. 741 с.
- Румянцев В. А., Крюков Л. Н. «Цветение» воды – угроза экологической безопасности // Известия Русского географического общества. 2013. Т. 145, № 2. С. 1–9.
- Царенко П. М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР / АН УССР. Институт ботаники им. Н. Г. Холодного; Отв. ред. Г. М. Паламарь-Мордвинцева. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
- Цыбекмитова Г. Ц., Ташлыкова Н. А. Оценка экологического состояния Харанорского водохранилища по фитопланктону и его пигментным характеристикам // Принципы экологии. 2021. № 1. С. 90–102. DOI: 10.15393/j1.art.2021.10842
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Штина Э. А. Флора водорослей бассейна реки Вятки. Киров: Кировская областная типография, 1997. 96 с.
- Флора водоростей водойм України. Том I. Синьозелені водорості. Вип. 1. Порядок хроококальні / О. И. Коваленко. Київ: Инст. бот. ім. М. Г. Холодного НАН України, 2009. 397 с.
- Bradley W. G., Borenstein A. R., Nelson L. M., Codd G. A., Rosen B. H., Stommel E. W., Cox P. A. Is exposure to cyanobacteria an environmental risk factor for amyotrophic lateral sclerosis and other neurodegenerative diseases? // Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener. 2013. Vol. 14, No 5–6. P. 325–333. DOI: 10.3109/21678421.2012.750364
- Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication. Galway: National University of Ireland, 2023. URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 02.05.2024).
- Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochem. Physiol. Pflanzen (BPP). 1975. Vol. 167. P. 191–194. DOI: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3
- Komarek J. Cyanoprokaryota. Teil 1: Chroococcales / J. Komarek, K. Anagnostidis // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/1. Jena; Stuttgart; Lübeck; Ulm., 1998. 548 p.
- Komarek J. Cyanoprokaryota. Teil 2: Oscillatoriales / J. Komarek, K. Anagnostidis // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/2. München, 2005. 759 p.
- Margalef R. Correlations entre certains caractères synthétiques des populations de phytoplancton // Hydrobiologia. 1961. No 18. P. 155–164. DOI: 10.1007/BF00208088
- Sini P., Dang T. B. C., Fais M., Galioto M., Padedda B. M., Lugliè A., Iaccarino C., Crosio C. Cyanobacteria, cyanotoxins, and neurodegenerative diseases: Dangerous liaisons // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22. Article No 8726. DOI: 10.3390/ijms22168726

Благодарности

Автор выражает благодарность д. б. н., профессору кафедры экологии и природопользования Вятского государственного университета Л. В. Кондаковой за определение видового состава фитопланктона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-77-01034).

PIGMENT CHARACTERISTICS OF PHYTOPLANKTON IN THE BELOKHOLUNITSKOYE AND O MUTNINSKOYE RESERVOIRS

KUTYAVINA Tatyana Igorevna *PhD, Vyatka State University, 610000, Russia, Kirov, Moskovskaya st., 36, kutyavinati@gmail.com*

Keywords:
reservoir
phytoplankton
cyanobacteria
pigments
chlorophyll
carotenoids
trophic status

Summary: In order to assess the ecological and trophic state of the two largest reservoirs in the Kirov region (Belokholunitskoye and Omutninskoye) experiencing different anthropogenic loads, the study of the species composition of phytoplankton and the determination of its pigment characteristics was carried out. It is noted that the phytoplankton of the studied reservoirs is mainly represented by green algae and diatoms, but cyanobacteria occupy a dominant position during the flowering period. According to the value of Pantle and Bucc saprobity index in the Sladeczek modification, both reservoirs correspond to the beta-mesosaprobic zone, water quality class III – moderately polluted waters. During the study conducted in the summer of 2023, for the first time the content of chlorophylls (a, b, c), pheophytin and carotenoids was determined for the studied reservoirs. In the Belokholunitskoye reservoir, the total content of chlorophylls was 6.4–26.2 µg/l, carotenoids – 2.5–10.8 µg/l; in the Omutninskoye reservoir 16.4–18.8 and 4.9–5.2 µg/l, respectively. The proportion of the main phytoplankton pigment – chlorophyll a – from the total content of chlorophylls (a, b, c) in the Belokholunitskoye reservoir was 70–76 %, in the Omutninskoye reservoir – 56–60 %. According to the average concentration of chlorophyll a (9.8–10.5 µg/l), the studied reservoirs occupy a borderline position between mesotrophic and moderately eutrophic reservoirs. For the pheophytin content, negative values were obtained in all cases; this indicates the summer dominant role of active forms of photosynthetic pigments in production processes. The ratio of carotenoids to the content of chlorophyll a averages 0.50 for all studied areas; this demonstrates favorable conditions for the development of phytoplankton and corresponds to “chlorophyll-type” waters characteristic of eutrophic reservoirs. The calculated values of the pigment indices I430/664 (Margalef index) and I480/664 are 2.5–2.8 and 1.3–1.6 rel. units, respectively, show a high diversity of planktonic algocenosis, the predominance of viable active cells in it and sufficient provision of algae with mineral nitrogen nutrition. Accordingly, they indicate a high diversity of planktonic algocenosis, the predominance of viable active cells in it, and a sufficient supply of algae with mineral nitrogen nutrition. No significant differences in the composition of phytoplankton and its pigment characteristics were found between the studied water bodies.

Reviewer: E. U. Mitrofanova

Received on: 05 March 2024

Published on: 03 June 2024

References

- Abramova K. I. Tokinova R. P. Shagidullin R. R. Dynamics of seasonal development of algocenosis in the «Kazan» Bay of the Kuibyshev reservoir, Voda: himiya i ekologiya. 2019. No. 7–9. P. 62–66.
- Algae flora of water bodies of Ukraine. Tom I. Sin'ozeleni vodorosti. Vip. 1. Poryadok hrookokal'ni, O. I. Kovalenko. Kiiiv: Inst. bot. im. M. G. Holodnogo NAN Ukraïni, 2009. 397 p.
- Avakyan A. B. Saltankin V. P. Sharapov V. A. Reservoirs. M.: Mysl', 1987. 331 p.
- Belyaeva P. G. Mineeva N. M. Sigareva L. E. Timofeeva N. A. Makarova O. S. The content of plant pigments in the water and bottom sediments of the reservoirs of the Kama River, Trudy IBVV RAN. 2018. No. 81 (84). P. 97–104. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0007
- Belyaeva P. G. Trophic status of the Kama reservoir for phytoplankton in summer, Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. 2014. T. 16, No. 5. P. 244–248.
- Belyh O. I. Tihonova I. V. Kuz'min A. V. Sorokovikova E. G. Potapov S. A. Galkin A. V. Fedorova G. A. Toxin-producing cyanobacteria in Lake Baikal and reservoirs of the Baikal region (review), Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2020. No. 1. P. 21–27. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-1-021-027
- Bradley W. G., Borenstein A. R., Nelson L. M., Codd G. A., Rosen B. H., Stommel E. W., Cox P. A. Is exposure to cyanobacteria an environmental risk factor for amyotrophic lateral sclerosis and other

- neurodegenerative diseases?, Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener. 2013. Vol. 14, No 5–6. P. 325–333. DOI: 10.3109/21678421.2012.750364
- Carenko P. M. A brief determinant of chlorococcal algae of the Ukrainian SSR, AN USSR. Institut botaniki im. N. G. Holodnogo; Otv. red. G. M. Palamar'-Mordvinceva. Kiev: Naukova dumka, 1990. 208 p.
- Cybekmitova G. C. Tashlykova N. A. Assessment of the ecological state of the Kharanor reservoir by phytoplankton and its pigment characteristics, Principy ekologii. 2021. No. 1. P. 90–102. DOI: 10.15393/j1.art.2021.10842
- D'yakonov K. N. Anoshko V. S. Reclamation geography. M.: Izd-vo MGU, 1995. 254 p.
- Doganovskiy A. M. Myakisheva N. V. Water balance and external water exchange of lakes in Russia and adjacent territories, Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. 2015. No. 41. P. 63–75.
- Dymova O. V. Golovko T. K. Photosynthetic pigments: functioning, ecology, biological activity Photosynthetic pigments: functioning, ecology, biological activity, Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN. 2018. No. 3 (4). P. 5–16. DOI: 10.31040/2222-8349-2018-4-3-5-16
- Ermolaev V. I. Phytoplankton of water bodies of the Sartlan Lake basin. Novosibirsk: Nauka, 1989. 96 p.
- Gollerbah M. M. Kosinskaya E. K. Polyanskiy V. I. SR. Definitel of freshwater algae of the USSR. Vyp. 2: Blue-green algae. M.: Nauka, 1953. 650 p.
- Guiry M. D., Guiry G. M. AlgaeBase. World-wide electronic publication. Galway: National University of Ireland, 2023. URL: <https://www.algaebase.org> (data obrascheniya: 02.05.2024).
- Ivanova N. A. Sharipova L. A. The state of phytoplankton of Izhevsk pond in the area of the Municipal Unitary Enterprise of Izhevsk, Vestnik Udmurtskogo universiteta. 2006. No. 10. P. 17–24.
- Jeffrey S. W., Humphrey G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton, Biochem. Physiol. Pflanzen (BPP). 1975. Vol. 167. P. 191–194. DOI: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3
- Komarek J. Cyanoprokaryota. Teil 1: Chroococcales, J. Komarek, K. Anagnostidis, Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/1. Jena; Stuttgart; Lübeck; Ulm., 1998. 548 p.
- Komarek J. Cyanoprokaryota. Teil 2: Oscillatoriales, J. Komarek, K. Anagnostidis, Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19/2. München, 2005. 759 p.
- Kotovschikov A. V. Kirillova T. V. Spatial heterogeneity and dynamics of pigment characteristics of phytoplankton of the Bolshoe Yarovoye hypergaline lake, Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya. 2011. No. 6 (31). P. 422–428.
- Kutyavina T. I. Ashihmina T. Ya. Kondakova L. V. Application of a complex of ground-based research methods for the diagnosis of pollution and eutrophication processes in reservoirs of the Kirov region, Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2019. No. 2. P. 44–52. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-044-052
- Margalef R. Correlations entre certains caractères synthétiques des populations de phytoplankton, Hydrobiologia. 1961. No 18. P. 155–164. DOI: 10.1007/BF00208088
- Mineeva N. M. Abramova N. N. Phytoplankton pigments as indicators of the ecological state of the Cheboksary reservoir, Vodnye resursy. 2009. T. 36, No. 5. P. 588–596.
- Mineeva N. M. Makarova O. S. Chlorophyll content as an indicator of the current (2015–2016) trophic state of the Volga reservoirs, Biologiya vnutrennih vod. 2018. No. 3. P. 107–110. DOI: 10.1134/S0320965218030129
- Mineeva N. M. Poddubnyy S. A. Stepanova I. E. Cvetkov A. I. Abiotic factors and their role in the development of phytoplankton in reservoirs of the Middle Volga, Biologiya vnutrennih vod. 2022. No. 6. P. 640–651. DOI: 10.31857/S0320965222060158
- Mineeva N. M. Pigment composition of phytoplankton and its long-term dynamics in reservoirs of the Upper Volga, Voprosy sovremennoy al'gologii. 2020. No. 2 (23). P. 74–78. DOI: 10.33624/2311-0147-2020-2(23)-74-78
- Mineeva N. M. Plant pigments in the water of the Volga reservoirs. M.: Nauka, 2004. 156 p.
- Mineeva N. M. The content of photosynthetic pigments in reservoirs of the Upper Volga (2005–2016), Biologiya vnutrennih vod. 2019. No. 2. P. 33–41. DOI: 10.1134/S0320965219020104
- Nature conservation. The hydrosphere. Classification of water bodies. M.: IPK Izd-vo standartov, 1998. 13 p.
- Nature conservation. The hydrosphere. Indicators of the condition and rules of taxation of fishery water bodies. M.: IPK Izd-vo standartov, 2000. 12 p.
- Nature conservation. The hydrosphere. Rules for water quality control of reservoirs and watercourses. M.: IPK Izd-vo standartov, 2001. 10 p.
- Odum Yu. Fundamentals of ecology, Pod red. N. P. Naumova. M.: Mir, 1975. 741 p.
- Rumyanov V. A. Kryukov L. N. «Blooming» of water is a threat to environmental safety, Izvestiya Russkogo geograficheskogo obschestva. 2013. T. 145, No. 2. P. 1–9.
- Schegoleva N. T. Gollerbah M. M. SR. Definitel of freshwater algae of the USSR. Vyp. 5: Blue-green algae. M.; L.: Nauka, 1962. 272 p.

- Schegoleva N. T. Matvienko A. M. Shkorbatov L. A. SR. Definitel of freshwater algae of the USSR. Vyp. 8: Green algae. Class Volvox. Chlorophyta: Volvocineae. M.; L.: Nauka, 1959. 223 p.
- Seaweed: Guide, P. P. Vasser, N. V. Kondrat'ev, N. P. Masyuk i dr. Kiev: Naukova dumka, 1989. 608 p.
- Shitikov V. K. Rozenberg G. S. Zinchenko T. D. Quantitative hydroecology: methods of system identification. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.
- Shtina E. A. Algae flora of the Vyatka River basin. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 1997. 96 p.
- Sini P., Dang T. B. C., Fais M., Galioto M., Padedda B. M., Lugliè A., Iaccarino C., Crosio C. Cyanobacteria, cyanotoxins, and neurodegenerative diseases: Dangerous liaisons, *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22. Article No 8726. DOI: 10.3390/ijms22168726
- Water. The method of spectrophotometric determination of chlorophyll a. M.: IPK Izd-vo standartov, 2001. 15 p.
- Zabelina M. M. Kiselev I. A. Lavrenko A. I. Sheshukova V. S. SR. Definitel of freshwater algae of the USSR. Vyp. 4: Diatoms. M.: Nauka, 1951. 620 p.