

Издатель

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

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 1 (39). Март, 2021

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

Редакционная коллегия

Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
А. М. Макаров
А. Ю. Мейгал
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов
A. Gugolek B.
J. B. Jakovlev
R. Krasnov
J. P. Kurhinen

Службы поддержки

А. А. Зорина
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 502.51:574.5:556.114

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ХАРАНОРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ФИТОПЛАНКТОНУ И ЕГО ПИГМЕНТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

ЦЫБЕКМИТОВА
Гажит Цыбекмитовна

кандидат биологических наук, доцент, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014, Забайкальский край, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, gazhit@bk.ru

ТАШЛЫКОВА
Наталья Александровна

кандидат биологических наук, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, gazhit@bk.ru

Ключевые слова:
фитопланктон
хлорофилл
феофитин
каротиноиды
пигментный индекс
водоём-охладитель
Харанорская ГРЭС

Аннотация: Харанорское водохранилище является искусственным водоемом, созданным для водоснабжения Харанорской ГРЭС. Ложе водохранилища было сформировано в пределах естественного русла р. Турга и заполнено водой в 1995 г. Уровненный режим (573–574 м БС) водохранилища поддерживается за счет подкачки воды из р. Онон. Качественный и количественный состав фитопланктона и его фотосинтетическая активность определяют экологическое состояние водоемов. По данным экспедиционных исследований за безледный период изучен качественный и количественный состав и соотношение пигментов фитопланктона Харанорского водохранилища. Выявлен доминирующий комплекс фитопланктона, представленный 16 видами из 6 отделов. В формировании общей биомассы ведущая роль принадлежала зеленым, диатомовым и золотистым водорослям. Полученные значения индексов видового разнообразия, выравниваемости и доминирования для водохранилища указывают на упрощение структуры и монодоминантность фитопланктонного комплекса. Неоднородность биотопических характеристик различных участков водохранилища проявляется в вариабельности значений зеленых пигментов. В области сбросного канала ГРЭС экосистема находится под постоянным воздействием температурного фактора. Увеличение содержания хлорофилла а в районе насосной станции связано с интенсивным перемешиванием водных масс при подкачке воды из реки Онон. Постоянное смешивание речных и озерных вод в водохранилище не способствует стабилизации экосистемы, на что указывает преобладание каротиноидов над зелеными пигментами, положительные показатели феофитина и соотношения каротиноиды/хлорофиллы. Значения пигментного индекса свидетельствуют о физиологической активности фитопланктона в продукции органического вещества. В целом экосистема сохраняет мезотрофный уровень своего развития.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Т. И. Кутявина

Получена: 23 июня 2020 года

Подписана к печати: 19 марта 2021 года

Введение

Харанорское водохранилище по физико-географическому местоположению находится в центрально-азиатской пустынно-степной области монгольской степной провинции Онон-Аргунского округа. В геоморфологическом отношении водоем расположен в Тургинском межгорном понижении Улдза-Торейской высокой равнины (500–800 м) Онон-Аргунского района Агинско-Керуленской горной и равнинной области. С севера и северо-запада район ограничен Борщовочным хребтом (максимальная высота – 1360 м), с востока и северо-востока – склонами Ононского хребта (1323 м) и хребта Кукульбей (1380 м), с юга – поймами рек Онон и Турга. Плоские и холмисто-увалистые равнины имеют сравнительно небольшое вертикальное и горизонтальное расчленение (Атлас..., 1997).

Харанорское водохранилище является искусственным водоемом, созданным для водоснабжения Харанорской ГРЭС. Ложе водохранилища было сформировано в пределах естественного русла р. Турга и заполнено водой в 1995 г. Уровненный режим (573–574 м БС) водохранилища поддерживается за счет подкачки воды из р. Онон.

Качественный и количественный состав фитопланктона и его фотосинтетическая активность определяют экологическое состояние водоемов и в целом уровень их биологической продуктивности (Сиренко, 1988; Минеева, 2004; Алимов, 2013).

Фотосинтетические пигменты определяются для оценки активности фитопланктона в образовании органических веществ, использующихся в цепях питания водных организмов. Следовательно, учет пигментных показателей фитопланктона является одним

из индикаторов состояния водной экосистемы. В процессе фотосинтеза участвуют кроме хлорофилла *a* и дополнительные пигменты, такие как хлорофилл *b* и *c*. Для оценки функциональной активности и активного состояния сообщества водорослей определяют содержание деградированных форм хлорофилла – феофитина. При старении популяции, истощении минерального питания, при недостатке и избытке света происходит накопление желтых пигментов – каротиноидов. Пигментный индекс, выраженный через отношение оптических плотностей ацетонового экстракта в соответствующих максимумах поглощения (E_{430}/E_{664}), характеризует соотношение общих каротиноидов и хлорофилла *a*. Считается, что повышение пигментного индекса свидетельствует об ухудшении физиологического состояния фитопланктона и увеличении его пигментного разнообразия (Бульон, 1983; Ермолаев, 1989; Минеева, 2004).

Основная цель представленной работы заключалась в оценке современного экологического состояния Харанорского водохранилища в безледный период по фитопланктону и его пигментным характеристикам.

Материалы

В работе использованы материалы экспедиционных исследований, проведенных за вегетационный сезон 2019 г. Точки отбора проб для изучения фитопланктона и характера распределения его фотосинтетических пигментов в Харанорском водохранилище (апрель, июль и октябрь 2019 г.) представлены на рис. 1. Локация мест отбора проб в Харанорском водохранилище проведена с помощью GPS-навигатора и представлена в табл. 1.

Таблица 1. Координаты точек отбора проб в Харанорском водохранилище

№ мест отбора проб	1	2	3	4	5	6
Координаты	50.868285°	50.864337°	50.855029°	50.860315°	50.850155°	50.859896°
	115.658760°	115.661705°	115.677683°	115.671329°	115.669138°	115.688286°
7	8	9	10	11	12	13
50.851686°	50.851753°	50.845140°	50.849307°	50.843573°	50.859962°	50.865428°
115.685810°	115.694820°	115.681193°	115.697423°	115.676977°	115.661964°	115.657088°

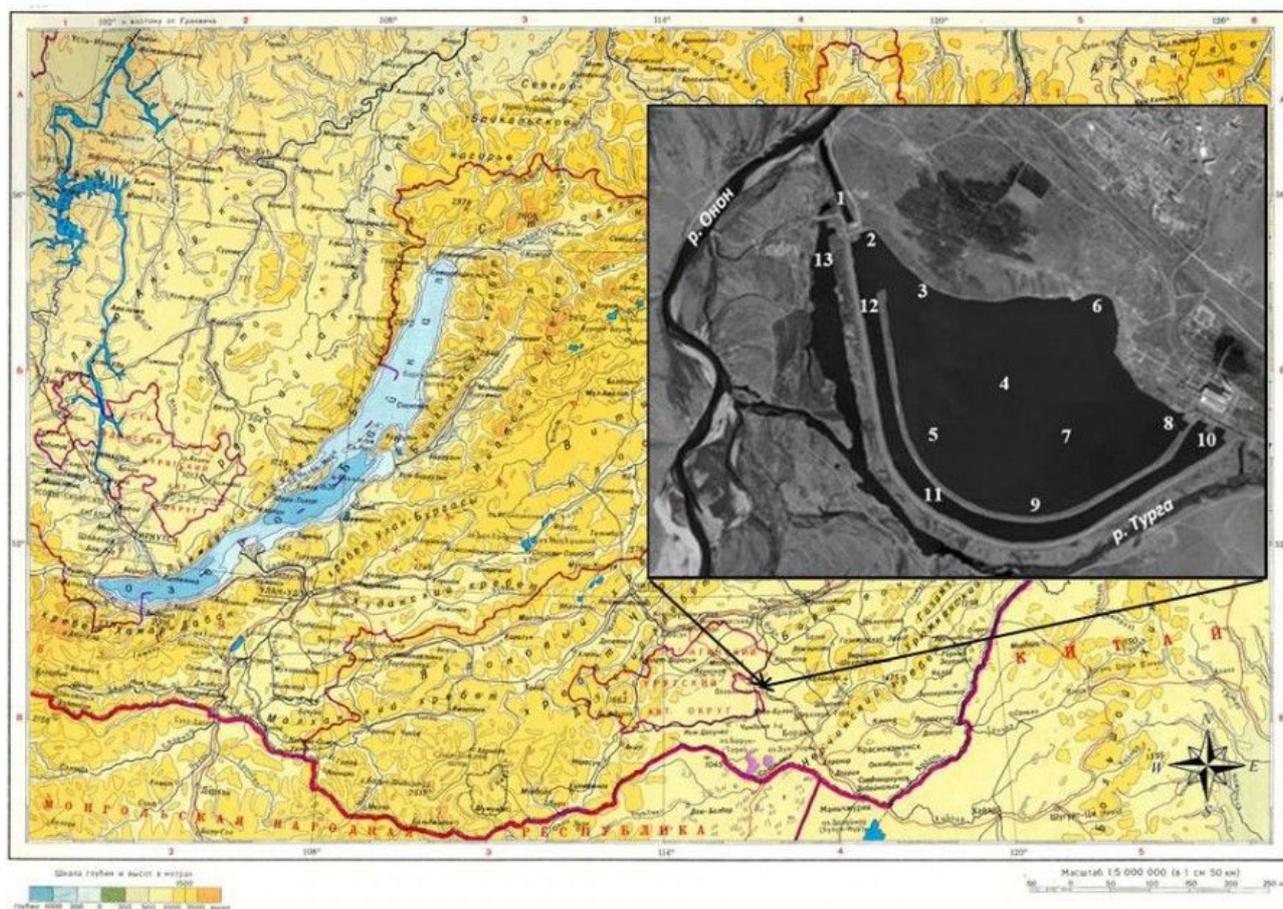


Рис. 1. Район работ и точки отбора проб в гидросооружениях Харанорской ГРЭС. 1 – водоподводящий канал, 2 – береговая насосная станция, 3 – северный высокий берег, 4 – центр, 5, 7, 9 – ложе водохранилища, 6 – пляж, 8 – водосбросной канал, 10–12 – водозаборный канал, 13 – дренажный канал

Fig. 1. The study area and sampling points in the hydraulic structures of the Kharanor hydroelectric power station. 1 – water supply channel, 2 – onshore pumping station, 3 – northern high coast, 4 – center, 5, 7, 9 – the bed of the reservoir, 6 – beach, 8 – discharge channel, 10–12 – water intake canal, 13 – drainage channel

Методы

Отбор проб фитопланктона (объем 0.5 л) для качественного и количественного учета производили в приповерхностном и придонном слоях водной толщи. В приповерхностных горизонтах пробы собирали путем зачерпывания воды в емкость. В придонных – с помощью батометра Паталаса. Материал фиксировали раствором Люголя. Пробы обрабатывали согласно стандартным гидробиологическим методам. Биомассу фитопланктона определяли по объему отдельных клеток или колоний водорослей (Садчиков, 2003). Классификацию таксонов и синонимию каждой группы водорослей проводили по альгологическому сайту AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2019). Степень флористического сходства альгоценозов рассчитывали по коэффициенту Серенсена (Sorensen, 1948). Для оценки экологического состояния водохранилища использовали метод Пантле – Букка

в модификации Сладечека (Макрушин, 1974; Баринава, 1996, 2000, 2006), основанный на индикаторной значимости отдельных систематических видов. Для определения разнообразия и структуры фитопланктона использовали индексы видового разнообразия Шеннона, Симпсона и Пиелу (Садчиков, 2003). Оценку трофического статуса экосистемы водохранилища проводили по биомассе фитопланктона (Оксиюк и др., 1993).

Отбор, фильтрация проб и дальнейшая их обработка на пигментную характеристику фитопланктона осуществлялись в соответствии с ГОСТ 17.1.4.02-90 (с изменениями от 13.07.2017 г.). Идентификацию экстракта проводили на спектрофотометре SPICOL-1300. Одновременно с определением хлорофилла а определяли концентрацию феофитина а, хлорофиллов b и $c_1 + c_2$. С этой целью до подкисления экстракта дополнительно взяты отсчеты на двух длинах волн

– 430 и 480 нм. Концентрацию хлорофиллов а, b, с определяли по уравнениям, представленным в (ГОСТ..., 2017).

Результаты

Фитопланктон. В составе фитопланктона гидросооружений Харанорской ГРЭС зарегистрирован 141 таксон водорослей (Cyanobacteria – 15, Chrysophyta – 10, Bacillariophyta – 41, Cryptophyta – 3, Dinophyta – 4, Chlorophyta – 56, Charophyta – 8, Euglenophyta – 4). Прослеживается диатомово-хлорофитовый характер фитопланктона со значительным участием цианобактерий.

Все гидросооружения Харанорской ГРЭС (наливное водохранилище, водоподводящий канал, дренажный канал) представляют единую систему. Коэффициент сходства альгофлоры по Серенсену между обследованными объектами в апреле изменялся от 0.34 до 0.48, в июле – от 0.29 до 0.44, в октябре – от 0.56 до 0.63.

Доминирующий комплекс фитопланктона гидросооружений Харанорской ГРЭС представлен 16 видами (11.3 % от общего количества идентифицированных в водоеме видов, разновидностей и форм) из 6 отделов, в том числе: Cyanobacteria (*Aphanizomenon flosaquae* Ralfs ex Bornet & Flahault), Chrysophyta (*Chrysococcus rufescens*

Klebs Dinobryon divergens O. E. Imhof), Bacillariophyta (*Stephanodiscus hantzschii* Grunow in Cleve & Grunow, *S. minutulus* (Kützing) Cleve & Möller, *Nitzschia graciliformis* Lange-Bertalot & Simonsen, *Fragilaria radians* (Kützing) D. M. Williams & Round, *Asterionella formosa* Hassall), Dinophyta (*Peridinium* sp., *Gymnodinium paradoxum* A. J. Schilling), Charophyta (*Elakatothrix genevensis* (Reverdin) Hindák), Chlorophyta (*Tetrastrum komarekii* Hindák, *Pseudopediastrum boryanum* (Turpin) E. Hegewald in Buchheim et al., *Scenedesmus ellipticus* Corda, *Oocystis lacustris* Chodat, *O. borgei* J. W. Snow).

Распределение количественных показателей фитопланктона в водохранилище характеризуется неоднородностью. Средние значения численности и биомассы за исследуемый период соответственно составили: в апреле – 173.90 ± 135.91 тыс. кл./л при биомассе 356.63 ± 251.00 мг/м³; в июле – 463.64 ± 278.29 тыс. кл./л при биомассе 398.96 ± 311.62 мг/м³; в октябре – 67.23 ± 26.56 тыс. кл./л при биомассе 77.52 ± 13.53 мг/м³.

В сезонной динамике фитопланктона было выделено три пика развития: весенний, летний и осенний. При этом ход сезонной динамики фитопланктона в водохранилище (станции № 2–9) и водоподводящем (станция № 1) и дренажном (станция № 13) каналах значительно отличался (рис. 2).

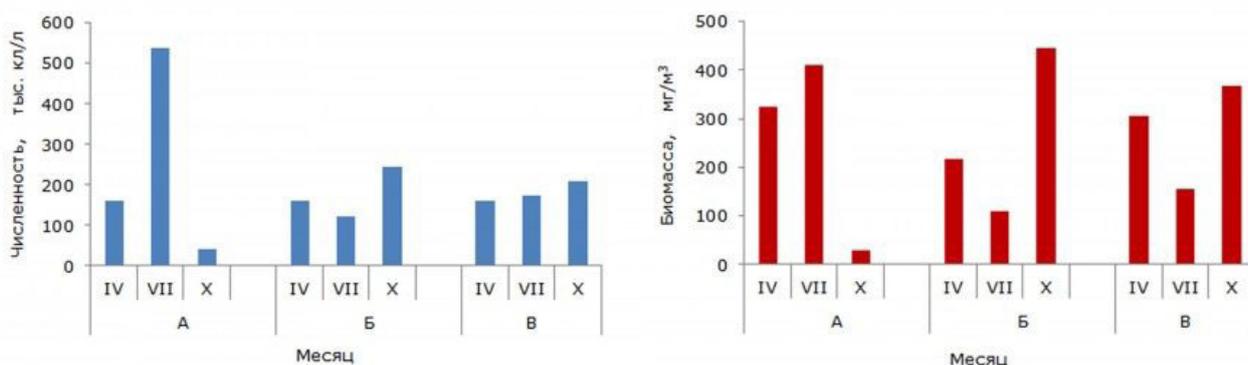


Рис. 2. Ход сезонной динамики фитопланктона в гидросооружениях Харанорской ГРЭС в 2019 г. А – ложе водохранилища, Б – водоподводящий канал, В – дренажный канал

Fig. 2. The course of seasonal dynamics of phytoplankton in hydraulic structures of the Kharanor hydroelectric power station in 2019. A – bed of the reservoir, B – water supply channel, C – drainage channel

В ложе водохранилища весенний и осенний пики были выражены слабо. Максимум развития приходился на летний период. В водоподводящем и дренажном каналах максимум развития водорослей приходился на осенний период. Весенний фитопланктон носил преимущественно диатомовый характер с незначительным участием хризофитовых

водорослей (рис. 3). На долю диатомей приходилось 25–80 % от общей численности и 35–98 % от общей биомассы. В толще воды преобладали *S. hantzschii* (29.6–67.8 % от общей численности и 38.9–62 % от общей биомассы), *N. graciliformis* (10–15 %, 25–63.8 % соответственно), *A. formosa* (10.5–27.7 %, 15–18 % соответственно). На долю золотистой водоросли

C. rufescens приходилось 12.3–16.1 % от общего количества фитопланктона.

В июле в формировании общей численности и биомассы водорослей наибольшую роль играли представители отделов Cyanobacteria (5–80 % от общей численности и 5–50 % от общей биомассы), Bacillariophyta (20–80 % и 30–90 %), Chlorophyta (20–40 % и 2–45 %). Доля представителей отдела Dinophyta в общей биомассе составляла 3–30 %. На долю цианобактериальной водоросли *A. flosaquae* приходилось 20–30 % от общего количество водорослей планктона. У диатомовых в июльском планктоне преобладали *A. formosa* (19–55.2 % и 15–46.5 %) и *F. radians* (19–64 % и 34.9–72 %). У зеленых – *S. ellipticus*, у динофитовых – *Peridinium* sp.

Осенью по численности преобладали зеленые (до 72 %) и золотистые водоросли (2–75 %), а также представители отдела харовых водорослей (20–42 %).

Из хлорофитовых доминировали такие виды, как *O. lacustris* (14–37.5 %), *S. ellipticus* (19–36.6 %), *T. komarekii* (15–16.1 %), из золотистых – *C. rufescens* (23.9–74.1 %), *D. divergens* (12.3–26 %), из харовых – *E. genevensis* (25.2–41.6 %). В формировании общей биомассы ведущая роль принадлежала зеленому (до 80 %), диатомовому (до 75 %) и золотистым (до 60 %) водорослям.

На некоторых станциях существенный вклад в создание биомассы вносили динофитовые (до 50 %) и харовые (до 20 %) водоросли. Из представителей диатомей преобладали *N. graciliformis* (55–60 %), *S. hantzschii* (13–37 %), из зеленых – *O. lacustris* (до 50 %), *O. borgei* (18–30 %), из золотистых – *D. divergens* (17–62 %), из динофитовых – *G. paradoxum* (13–51.4 %), из харовых – *E. genevensis* (до 25 %).

Оценка биоразнообразия в фитопланктонценозах проводилась с помощью индексов Шеннона, Пиелу и Симпсона. Среднее значение индекса Шеннона в апреле составляло 2.85 ± 0.45 , индекса Пиелу – 0.58 ± 0.12 , индекса доминирования – 0.28 ± 0.13 , в июле – 2.91 ± 0.48 , 0.58 ± 0.06 и 0.28 ± 0.09 соответственно, в октябре – 2.83 ± 0.58 , 0.67 ± 0.19 , 0.27 ± 0.19 соответственно. Полученные значения индексов видового разнообразия, выравнивания и доминирования для водохранилища указывают на упрощение структуры и среднее биоразнообразие фитопланктонного сообщества, а также подтверждают монодоминантность доминирующего комплекса фитопланктона.

В 2019 г. более половины обнаруженных

водорослей (75.2 %) являлись показателями сапробности воды. Среди них преобладали индикаторы β-мезосапробы (27.35 % от общего числа видов-индикаторов). Величина индекса сапробности в апреле 2019 г. колебалась в пределах от 1.6 до 2.18, в июле – от 1.45 до 2.27, в октябре – от 1.32 до 2.13, т. е. в течение года изменялась от олиго-бета-мезосапробной до олиго-альфамезосапробной зоны. Качество воды соответствовало II–III классу «удовлетворительной чистоты», разряд качества колебался от «достаточно чистой» до «слабо загрязненной».

Одним из важнейших показателей состояния водной экосистемы, позволяющих оценить его экологическое состояние, является биомасса фитопланктона (Оксиук и др., 1993; Баженова, 2005). Этот показатель был использован при оценке качества воды и трофического статуса исследованного водного объекта. Как уже отмечалось выше, биомасса фитопланктона в среднем за год исследований изменялась от 5.57 до 1381.24 мг/м³, что соответствует олиготрофной – мезотрофной категории вод, разряду олиго-мезотрофная – мезо-эвтрофная (Оксиук и др., 1993; Шитиков и др., 2003). На отдельных участках водохранилища весной и летом уровень трофности соответствовал эвтрофной категории (табл. 2).

Пигменты фитопланктона. Полученные в ходе исследования значения пигментных показателей фитопланктона в различные периоды 2019 г. представлены в табл. 3.

Хлорофилл *a*. Концентрация хлорофилла *a* возрастает с апреля по июль и уменьшается к октябрю, но не достигает уровня весенних показателей (см. табл. 3). Весной концентрация хлорофилла *a* по акватории водохранилища изменяется от 0.14 до 0.64 мкг/л, летом – от 0.35 до 2.14 мкг/л, осенью – от 0.29 до 1.13 мкг/л. Средние значения указаны в табл. 3.

Весной наибольшие концентрации хлорофилла *a* выявлены в районе сброса подогретых вод и в водоподводящем канале и составили 0.55 и 0.64 мкг/л соответственно. Летом наибольшее содержание хлорофилла *a* также отмечается в водоподводящем канале (2.14 мкг/л) и в районе насосной станции (0.95 мкг/л). Увеличение показателей хлорофилла *a* связано с внешними факторами, оказывающими давление на данные участки экосистемы. В области сбросного канала ГРЭС экосистема находится под постоянным давлением температурного фактора. Водоподводящий канал представляет собой уз-

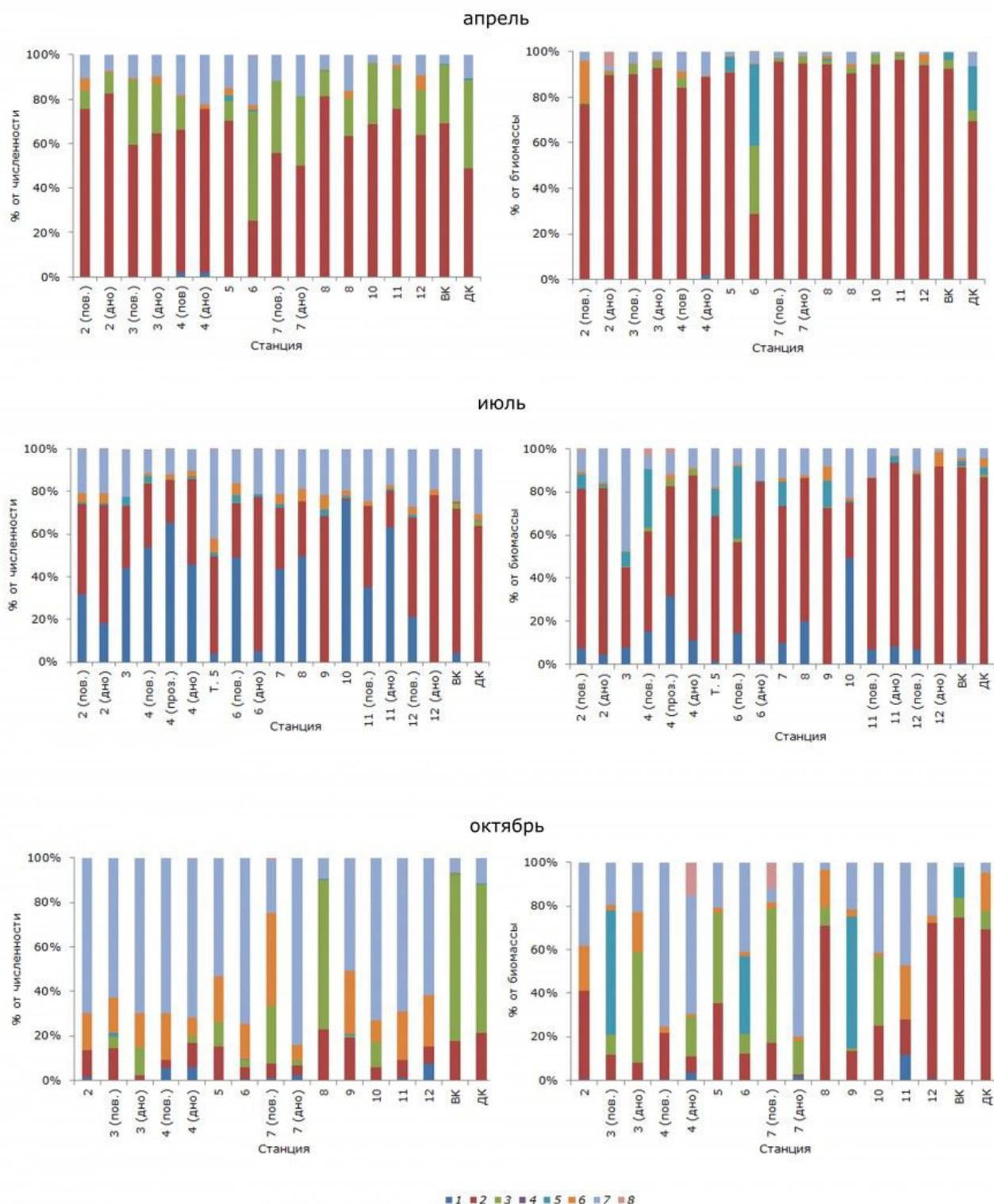


Рис. 3. Доля основных групп водорослей в общей численности и биомассе фитопланктона в гидросооружениях Харанорской ГРЭС в 2019 г. 1 – Cyanobacteria, 2 – Bacillariophyta, 3 – Chrysophyta, 4 – Cryptophyta, 5 – Dinophyta, 6 – Charophyta, 7 – Chlorophyta, 8 – Euglenophyta

Fig. 3. The share of the main groups of algae in the total number and biomass of phytoplankton in hydraulic structures of the Kharanor hydroelectric power station in 2019. 1 – Cyanobacteria, 2 – Bacillariophyta, 3 – Chrysophyta, 4 – Cryptophyta, 5 – Dinophyta, 6 – Charophyta, 7 – Chlorophyta, 8 – Euglenophyta

Таблица 3. Пигментная характеристика фитопланктона по акватории Харанорского водохранилища в 2019 г.

Месяц	Концентрации, мкг/л				Пигментный индекс, отн. ед.		
	хлорофилл <i>a</i>	феофитин <i>a</i>	хлорофилл <i>b</i>	хлорофилл <i>c</i> (<i>c</i> ₁ + <i>c</i> ₂)	каротиноиды	$I_{(430/664)}$	
					цианобактерии	диатомовые	
Апрель	0.27 ± 0.09	0.07 ± 0.06	0.93 ± 0.43	-0.84	1.4 ± 0.65	3.5 ± 1.68	1.2 ± 0.16
Июль	0.87 ± 0.35	-0.23	0.91 ± 0.31	-0.71	1.6 ± 0.36	2.7 ± 0.83	1.3 ± 0.13
Октябрь	0.44 ± 0.18	0.14 ± 0.08	0.28 ± 0.08	-0.05	0.6 ± 0.25	3.6 ± 0.85	1.4 ± 0.12

кую протоку, заросшую водной и береговой растительностью. Увеличение содержания хлорофилла *a* в районе насосной станции связано с интенсивным перемешиванием водных масс при подкачке воды из р. Онон, способствующих вымыванию органического вещества из донных отложений.

По трансекте ложа водохранилища «северный высокий берег (№ 3) – центр (№ 4) – наиболее приближенная точка к сбросным водам ГРЭС (№ 7)» отмечается увеличение концентрации хлорофилла *a* от 0.14 до 0.24 мкг/л по мере приближения к ГРЭС. Следовательно, по мере приближения к теплым сточным водам ГРЭС создаются условия для повышения концентрации хлорофилла *a*.

Феофитин, являясь неактивной формой хлорофилла *a*, служит индикатором его физиологического состояния. В июле, по сравнению с результатами, полученными в апреле и октябре, по всем станциям отбора проб выявлены отрицательные значения в концентрациях феофитина, указывающие на летнюю доминирующую роль активных форм фотосинтетических пигментов в продукционных процессах.

Весной положительные значения феофитина отмечаются в районе сброса сточных вод ГРЭС и в водозаборном канале. Доля феофитина в общей сумме хлорофилла *a* и феофитина весной варьировала от 6 до 51 % при среднем значении 38 ± 11 %. Положительные показатели, полученные в районе сбросного канала ГРЭС, возможно, связаны с благоприятными температурными условиями для развития фитофагов. Повышение концентрации феофитина в водозаборном канале связано с весенним прогревом вод р. Онон, способствующим развитию фитопланктона.

Осенью во всех точках отбора проб отмечают положительные значения в концентрациях феофитина, указывающие на начало

спада в развитии популяций фитопланктона. Доля феофитина в общей сумме хлорофилла *a* и феофитина в данный период варьировала от 11 до 89 % при среднем значении 48 ± 18 %.

Хлорофилл b. Концентрации хлорофилла *b* незначительно отличаются весной и летом и снижаются осенью (см. табл. 3). В апреле содержание хлорофилла *b* изменяется от 0.11 до 2.66 мкг/л, в июле – от 0.32 до 1.76 мкг/л, в октябре – от 0.14 до 0.49 мкг/л. Значительная доля хлорофилла *b* в общей сумме хлорофиллов указывает на доминирующую роль зеленых водорослей.

Хлорофиллы c. Концентрации хлорофиллов *c*₁ + *c*₂, выявленные весной и летом, указывают на отсутствие криптофитовых водорослей (см. табл. 3). Положительные значения выявлены лишь осенью непосредственно в ложе водохранилища (от 0.04 до 0.08 со средним значением 0.05 ± 0.01 мкг/л).

Каротиноиды. Содержание каротиноидов в воде водохранилища значительно превышает содержание хлорофилла и феофитина (см. табл. 3). Весной самые высокие их концентрации выявлены в водоподводящем канале (№ 1) (3.26 мкг/л – каротиноиды цианобактерий и 8.16 мкг/л – каротиноиды диатомовых), в районе сброса подогретых вод (№ 8) – 2.18 и 5.46 мкг/л и в водозаборном канале (№ 11) – 3.84 и 9.60 мкг/л соответственно. Летом данная закономерность сохраняется. Осенние показатели каротиноидов цианобактерий в ложе водохранилища варьировали от 0.27 до 0.49 мкг/л, а каротиноидов диатомовых были выше летних и варьировали от 2.88 до 6.95 мкг/л.

Пигментный индекс. Значение пигментного индекса в водохранилище изменяется от 1.2 до 1.4 за время исследования (см. табл. 3). Весной и летом значения $I_{430/664}$ варьируют от 0.7 до 1.6, осенью – от 1.0 до 1.7 отн. ед.

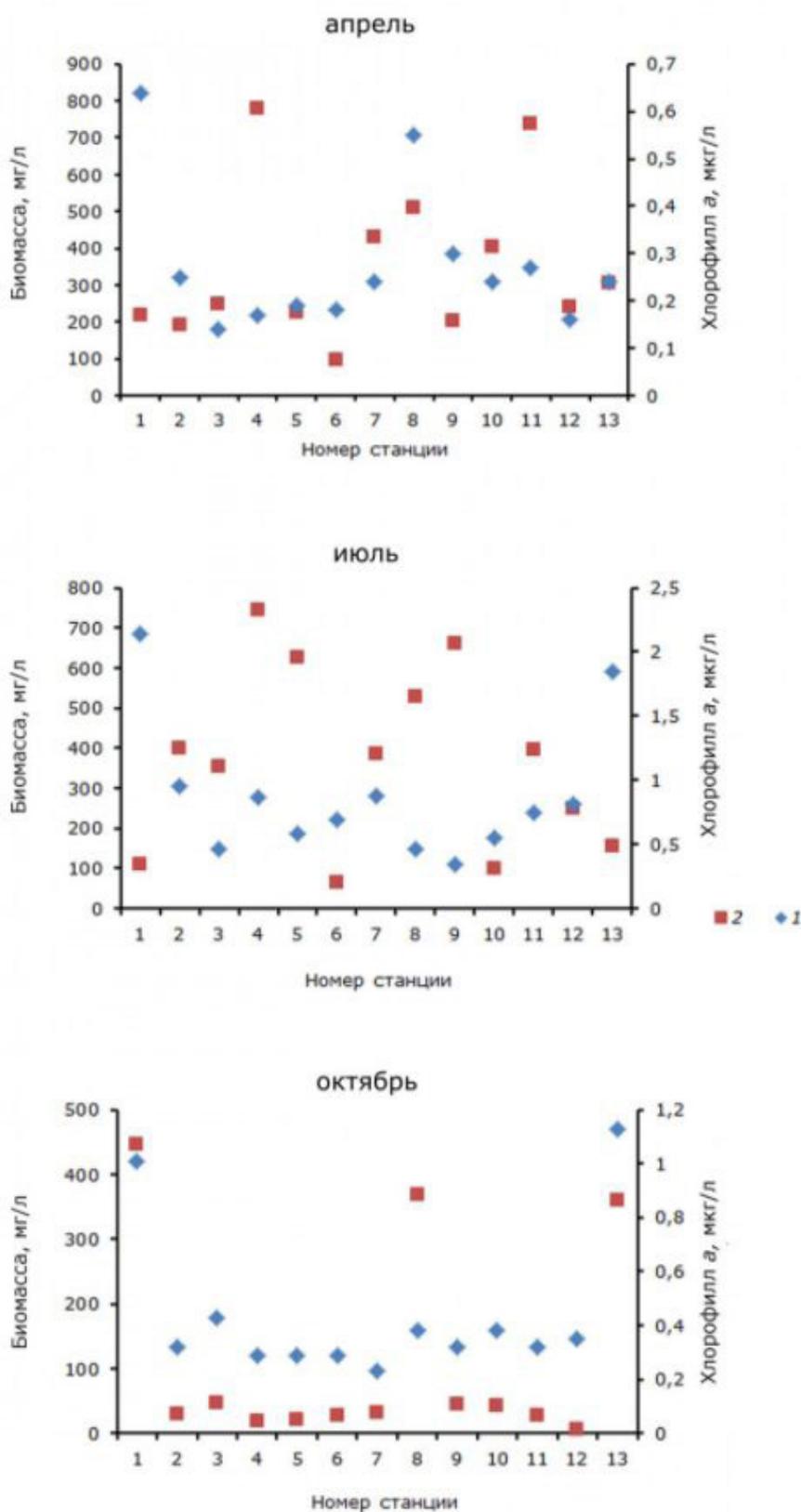


Рис. 4. Пространственное распределение концентраций хлорофилла *a* и биомассы фитопланктона в апреле, июле и октябре 2019 г. на станциях Харанорского водохранилища.

1 – хлорофилл *a*, 2 – фитопланктон

Fig. 4. Spatial distribution of chlorophyll-*a* concentrations and phytoplankton biomass in April, July and October 2019 at the stations of the Kharanor reservoir.

1 – chlorophyll-*a*, 2 – phytoplankton

*Соотношение биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла *a**. Анализ данных по биомассе фитопланктона и содержанию хлорофилла *a* показан на рис. 4. При анализе пространственного распределения изучаемых параметров по всей акватории озера наблюдалось хорошее совпадение концентраций хлорофилла *a* и биомассы водорослей в октябре 2019 г. и некоторое расхождение в апреле и июле 2019 г.

Обсуждение

Исследование состава и количественных характеристик фитопланктона, его пигментной характеристики позволяет оценить экологическое состояние водоемов. Использование в качестве характеристик физиологического состояния фитопланктона содержания феофитина, пигментного индекса позволяет более полно оценить процессы, происходящие в сообществе фотосинтетиков (Сиренко, 1988; Бульон, 1983; Минеева, 2004; Трофимова и др., 2006).

Содержание хлорофилла *a* в Харанорском водохранилище подвержено сезонным изменениям с нарастанием значений летом и спадом к осени. Подобная закономерность наблюдается в Волжском и Шошинском плесах Ивановского водохранилища (Минеева, 2004). В соответствии со средними концентрациями хлорофилла *a* в 2019 г. Харанорское водохранилище относится к ряду мезотрофных водоемов (<10 мкг/л).

Хлорофиллы *a* и *b* дополняют друг друга по улавливанию различных спектров дневного света (Сиренко, 1988). В Харанорском водохранилище в концентрациях хлорофиллов *a* и *b* выявлена противофазность: с увеличением основного пигмента – хлорофилла *a* происходит уменьшение содержания хлорофилла зеленых водорослей (см. табл. 3).

Весной в Харанорском водохранилище доля феофитина в общей сумме хлорофилла *a* и феофитина не превышала 40 %. Осенью варьировала от 11 до 89 % при среднем значении 48 ± 18 %. Полученные соотношения сравнимы с данными, характеризующими водохранилища Верхней Волги (Минеева, Мухутдинов, 2017; Петров и др., 2018). Содержание феофитина в сумме пигментов до 40 % свидетельствует о высоком продукционном потенциале фитопланктонного сообщества. В диапазоне 40–65 % фитопланктон находится в угнетенном состоянии, при повышении более 65 % клетки водорослей не обладают нужным для фотосинтеза по-

тенциалом и отмирают (Foy, 1987; Мошаров и др., 2016).

Каротиноиды играют ключевую роль в сборе света, передаче энергии во время фотосинтеза и защите фотосинтетического аппарата от фотоокислительного повреждения (Минеева, 2004; Priyadarshani, Biswajit, 2012; Mulders et al., 2014). В ряде работ экологическое состояние водоемов оценивается соотношением каротиноидов к хлорофиллу: если оно выше 1, то создаются условия, неблагоприятные для развития водорослей (Ермолаев, 1989; Priyadarshani, Biswajit, 2012; Минеева, 2004). Данное соотношение в Харанорском водохранилище немного выше 1, что указывает на преобладание желтых пигментов над зелеными. В Ивановском и Угличском водохранилищах это соотношение ниже 1. Изменение соотношения в сторону увеличения в Рыбинском водохранилище объясняется штормовыми погодными условиями, неблагоприятными для развития фитопланктона (Беляева и др., 2018). Преобладание каротиноидов над зелеными водорослями (см. табл. 3) в Харанорском водохранилище показывает нестабильное состояние экосистемы. Нестабильность создается из-за постоянного восполнения его вод из р. Онон. Вода в водохранилище возобновляется 34 раза в год (Андрюк, 2005).

Пигментный индекс работает как маркер отношения гетеротрофного метаболизма в сообществе к автотрофному. Это отношение обычно мало (от 1 до 2) в молодых культурах или во время цветения водорослей, когда дыхание невелико, и составляет 3–5 в стареющих культурах или планктонных сообществах в конце лета при интенсивном дыхании (Одум, 1975). Повышение пигментного индекса более 3 свидетельствует о низкой фотосинтетической активности планктона и увеличении его пигментного разнообразия (Бульон, 1983; Ермолаев, 1989; Минеева, 2004). В Харанорском водохранилище значения $I_{480/664}$ незначительны и изменялись от 1.2 до 1.4 за время исследования, что свидетельствует о физиологической активности планктона.

Зависимость содержания хлорофилла *a* от биомассы фитопланктона показана для ряда водоемов разного трофического статуса. При этом увеличение биомассы фитопланктона не всегда приводит к пропорциональному возрастанию концентраций хлорофилла *a* (Елизарова, 1974; Измествьева, 1989). Одни исследователи связывают это с «физиологическим» состоянием доминиру-

ющих популяций водорослей (Елизарова, 1993). Другие указывают на сукцессионные видовые изменения, связанные с размерами клеток водорослей, которые появляются в фазе роста фитопланктона (White et al., 1988; Kalchev et al., 1996; Filip, Catalan, 2000).

Отмечаемое расхождение концентраций хлорофилла *a* и биомассы водорослей в экосистеме Харанорского водохранилища связано с режимом абиотических факторов разных участков гидросооружений, таких как температура, освещенность, поступление речных вод, а также сезонными характеристиками в развитии фитопланктона. Так, весной расхождения данных отмечаются в местах отбора проб 3, 5 и 10, а летом – в 1, 6, 9 и 13 (см. рис. 4). Полученные результаты характеризуют разнотипность биотопа в сезонном аспекте.

Заключение

Фитопланктон Харанорского водохранилища сформирован зелеными и диатомовыми водорослями, а также цианобактериями, об этом свидетельствует и соотношение их пигментов. Полученные значения индексов видового разнообразия, выравненности и доминирования для водохранилища указывают на упрощение структуры и среднего биоразнообразия фитопланктонного сообщества. Величина индекса сапробности вод гидросооружений Харанорской ГРЭС в течение разных сезонов изменялась от олиго-бетамезосапробной зоны до олиго-альфамезосапробной зоны. Качество воды соответствовало II–III классу.

Весной по своему трофическому статусу водоем относился преимущественно к категории мезотрофных вод. Качество вод по показателям биомассы фитопланктона и значениям хлорофилла изменялось от клас-

са «предельно чистая» до класса «чистая». В летний период трофический статус соответствовал мезотрофно-эвтрофной категории. Качество воды изменялось от «чистой» до «удовлетворительно чистой». Осенью трофический статус определялся как олиго-мезотрофный. Воды принадлежали к классу качества «предельно чистая» – «чистая».

Неоднородность биотопических характеристик различных участков отбора проб проявляется в вариабельности значений зеленых пигментов. В области сбросного канала ГРЭС экосистема находится под постоянным воздействием температурного фактора. Водоподводящий канал представляет собой узкую протоку, заросшую водной и береговой растительностью. Увеличение содержания хлорофилла *a* в районе насосной станции связано с интенсивным перемешиванием водных масс при подкачке воды из р. Онон, способствующих вымыванию органических веществ из донных отложений. В период наибольшего развития фитопланктона доминируют активные формы фотосинтетических пигментов в продукционных процессах. Осенние концентрации феофитина указывают на начало спада в развитии популяций фитопланктона.

В период засушливого климата последних лет отмечается некоторая нестабильность экосистемы водохранилища в связи с постоянным восполнением его вод из р. Онон. Тем не менее в целом значения пигментного индекса свидетельствуют о физиологической активности первичного звена в продуцировании органического вещества.

Таким образом, проведенные исследования показали, что, несмотря на антропогенное влияние, оказываемое на Харанорское водохранилище, экосистема сохраняет мезотрофный уровень развития.

Библиография

- Алимов А. Ф. Продукционная гидробиология. Л.: Наука, 2013. 339 с.
- Андрюк А. А. Система технического водоснабжения ГРЭС // Водоем-охладитель Харанорской ГРЭС. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 27–29.
- Атлас Читинской области и Агинского Бурятского автономного округа. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1997. 48 с.
- Баженова О. П. Фитопланктон Верхнего и Среднего Иртыша в условиях зарегулированного стока. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2005. 248 с.
- Барина С. С. Атлас водорослей – индикаторов сапробности. Владивосток: Дальнаука, 1996. 364 с.
- Барина С. С. Экологические и географические характеристики водорослей-индикаторов // Водоросли-индикаторы в оценке качества окружающей среды. М.: ВНИИ природы, 2000. С. 60–146.
- Барина С. С. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 498 с.
- Беляева П. Г., Минеева Н. М., Сигарева Л. Е. и др. Содержание растительных пигментов в воде и донных отложениях водохранилищ р. Камы // Труды ИБВВ РАН. Борок, 2018. Вып. 81 (84). С. 95–104.

- Бульон В. В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов . Л.: Наука, 1983. 150 с.
- ГОСТ 17.1.4.02-90. Межгосударственный стандарт. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a* . М.: Изд-во стандартов, 2017. 15 с.
- Елизарова В. А. Содержание фотосинтетических пигментов в единице биомассы фитопланктона Рыбинского водохранилища . Рыбинск: ИБВВ АН СССР, 1974. С. 46–66.
- Елизарова В. А. Хлорофилл как показатель биомассы фитопланктона // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. С. 126–131.
- Ермолаев В. И. Фитопланктон водоемов бассейна озера Сартлан . Новосибирск: Наука, 1989. 96 с.
- Изместьева Л. Р. Связь между биомассой фитопланктона и концентрацией хлорофилла // Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Л.: Наука, 1989. С. 199–202.
- Макрушин А. Б. Биологический анализ качества вод . Л.: ЗИН АН СССР, 1974. 54 с.
- Минеева Н. М. Растительные пигменты в воде Волжских водохранилищ . М.: Наука, 2004. 156 с.
- Минеева Н. М., Мухутдинов В. Ф. Сравнительная оценка содержания хлорофилла в водохранилищах Верхней Волги по данным спектрофотометрического и флуоресцентного методов // Вода: химия и экология. 2017. № 4. С. 3–9.
- Мошаров С. А., Демидов А. Б., Симакова У. В. Особенности процессов первичного продуцирования в Карском море в конце вегетационного периода // Океанология. 2016. Т. 56, № 1. С. 90–100. DOI: 10.7868/S003015741601010X
- Одум Ю. Основы экологии . М.: Мир, 1975. 84 с.
- Оксиюк О. П., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. П. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, № 4. С. 62–76.
- Петров Е. Л., Непорожня И. А., Калинина Д. Н. Оценка экологического состояния донных отложений водоемов г. Череповца Вологодской области // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 4. С. 584–588. URL: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=18821> (дата обращения: 30.10.2020).
- Садчиков А. П. Методы изучения пресноводного фитопланктона . М.: Университет и школа, 2003. 159 с.
- Сиренко Л. А. Информационное значение хлорофиллового показателя // Гидробиологический журнал. 1988. Т. 24, № 4. С. 12–16.
- Трофимова В. В., Олейник А. А., Макаревич П. Р. Фотосинтетические пигменты фитопланктона южного колена Кольского залива (Баренцево море) в зимне-весенний период // Вестник Мурманского ГТУ. 2006. Т. 9, № 5. С. 779–784.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидрология: методы системной идентификации . Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Filip M., Catalan J. The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima // J. Plankton Res. 2000. Vol. 1. P. 91–106. DOI: 10.1093/plankt/22.1.91
- Foy R. H. A comparison of chlorophyll *a* and carotenoid concentrations as indicators of algal volume // Freshwater Biol. 1987. Vol. 17, № 2. P. 237–250. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1987.tb01045.x
- Guiry M. D., Guiry G. M. Algaebase. World-wide electronic publication (Galway: National University of Ireland). URL: <http://www.algaebase.org/> (дата обращения 15.07.2019).
- Kalchev R. K., Beshkova M. B., Boumbarova C. S., Tsvetkova R. L., Saia D. Some allometric and non-allometric between chlorophyll-*a* and abundance variables of phytoplankton // Hydrobiologia. 1996. Vol. 341. P. 235–245. DOI: 10.1007/BF00014688
- Mulders K. J. M., Lamers P. P., Martens D. E., Wijffels R. H. Phototrophic pigment production with microalgae: biological constraints and opportunities // J. Phycol. 2014. Vol. 50. P. 229–242. DOI: 10.1111/jpy.12173
- Priyadarshani I., Biswajit R. Commercial and industrial applications of micro algae – a review // J. Algal Biomass Utiln. 2012. Vol. 3 (4). P. 89–100.
- Sorensen T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant ecology // Biol. Sci. 1948. Vol. 5. P. 25–39.
- White E. A., Payne G., Pickmore S. Limitation to the usefulness of chlorophyll as a biomass indicator in eutrophication studies // SIL Proceedings, 1922–2010. 1988. Vol. 23. P. 598–601. DOI: 10.1080/03680770.1987.11897987

Благодарности

Работа выполнена в рамках Проекта IX.137.1.3 «Биоразнообразие природных и природно-техногенных экосистем Забайкалья (Центральной Азии) как индикатор динамики региональных изменений климата», № государственной регистрации AAAA-A17-117011210078-9.

ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE THE KHARANOR RESERVOIR BY PHYTOPLANKTON AND ITS PIGMENT CHARACTERISTICS

TSYBEKMITOVA

Gazhit Tsybekmitovna

Ph.D., Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,

gazhit@bk.ru

TASHLYKOVA

Natalia Aleksandrovna

Ph.D., Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,

gazhit@bk.ru

Keywords:

phytoplankton
chlorophyll
pheophytin
carotenoids
pigment index
cooling pond
Kharanor hydroelectric
power station

Summary: The ecosystem of water bodies and their general organic productivity are determined by the composition of phytoplankton and its photosynthetic activity. The qualitative and quantitative composition and the ratio of phytoplankton pigments in the Kharanor reservoir were studied according to the data of field studies during the ice-free period. The dominant complex of phytoplankton, represented by 16 species from 6 divisions, was revealed. In the formation of the total biomass, the leading role belonged to green, diatoms and golden algae. The obtained values of the indices of biodiversity, equalization and dominance for the reservoir indicate the simplification of the structure and average biodiversity of the phytoplankton community as well as the monodominance of the phytoplankton complex. The heterogeneity of the biotopic characteristics of different parts of the reservoir is manifested in the variability of the values of green pigments. In the area of the discharge channel of the hydroelectric power station, the ecosystem is under constant influence of the temperature factor. The increase in the content of chlorophyll-a in the area of the pumping station is associated with the intense mixing of water masses when pumping water from the Onon River. The constant mixing of river and lake waters in the reservoir does not contribute to the stabilization of the ecosystem, as indicated by the predominance of carotenoids over green pigments, positive indicators of pheophytin and the ratio of carotenoids/chlorophylls. The values of the pigment index indicate the physiological activity of phytoplankton in the production of organic matter. In general, the ecosystem retains its mesotrophic level of development.

Reviewer: T. I. Kutyavina

Received on: 23 June 2020

Published on: 19 March 2021

References

- Alimov A. F. Production hydrobiology. L.: Nauka, 2013. 339 p.
- Andryuk A. A. The system of technical water supply for the state district power station, Vodoem-ohladitel' Haranorskoy GREP. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2005. P. 27–29.
- Atlas of the Chita region and the Aginsky Buryat Autonomous Okrug. M.: Federal'naya sluzhba geodezii i kartografii Rossii, 1997. 48 p.
- Barinova S. S. Atlas of algae – indicators of saprobity. Vladivostok: Dal'nauka, 1996. 364 p.
- Barinova S. S. Biodiversity of algae-indicators of the environment. Tel'-Aviv, 2006. 498 p.
- Barinova S. S. Ecological and geographical characteristics of algae indicators, Vodorosli-indikator v ocnke kachestva okruzhayushey sredy. M.: VNIi prirody, 2000. P. 60–146.
- Bazhenova O. P. Phytoplankton of the Upper and Middle Irtysh in conditions of regulated runoff. Omsk: Izd-vo FGOU VPO OmGAU, 2005. 248 p.
- Belyaeva P. G. Mineeva N. M. Sigareva L. E. Content of plant pigments in water and bottom sediments in reservoirs of the Kama river, Trudy IBVV RAN. Borok, 2018. Vyp. 81 (84). P. 95–104.
- Bul'on V. V. Primary production of plankton in inland water bodies. L.: Nauka, 1983. 150 p.
- Cirenko L. A. Informational value of the chlorophyll index, *Gidrobiologicheskij zhurnal*. 1988. T. 24, No. 4. P. 12–16.
- Elizarova V. A. Chlorophyll as an indicator of phytoplankton biomass, *Metodicheskie voprosy izucheniya*

- pervichnoy produktsii planktona vnutrennih vodoemov. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993. P. 126–131.
- Elizarova V. A. Content of photosynthetic pigments per unit of phytoplankton biomass of the Rybinsk Reservoir. Rybinsk: IBVV AN SSSR, 1974. P. 46–66.
- Ermolaev V. I. Phytoplankton of reservoirs in the basin of Lake Sartlan. Novosibirsk: Nauka, 1989. 96 p.
- Filip M., Catalan J. The relationship between phytoplankton biovolume and chlorophyll in a deep oligotrophic lake: decoupling in their spatial and temporal maxima, *J. Plankton Res.* 2000. Vol. 1. P. 91–106. DOI: 10.1093/plankt/22.1.91
- Foy R. H. A comparison of chlorophyll a and carotenoid concentrations as indicators of algal volume, *Freshwater Biol.* 1987. Vol. 17, No. 2. P. 237–250. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1987.tb01045.x
- GOST 17.1.4.02-90. Interstate standard. Method of spectrophotometric determination of chlorophyll-a. M.: Izd-vo standartov, 2017. 15 p.
- Guiry M. D., Guiry G. M. Algaebase. World-wide electronic publication (Galway: National University of Ireland). URL: <http://www.algaebase.org/> (data obrascheniya 15.07.2019).
- Izmest'eva L. R. Relationship between phytoplankton biomass and chlorophyll concentration, *Ekologiya fitoplanktona Kuybyshevskogo vodohranilisha*. L.: Nauka, 1989. P. 199–202.
- Kalchev R. K., Beshkova M. B., Boumbarova C. S., Tsvetkova R. L., Saia D. Some allometric and non-allometric between chlorophyll-a and abundance variables of phytoplankton, *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 341. P. 235–245. DOI: 10.1007/BF00014688
- Makrushin A. B. Biological analysis of water quality. L.: ZIN AN SSSR, 1974. 54 p.
- Mineeva N. M., Muhutdinov V. F. Comparative assessment of chlorophyll content in the reservoirs of the Upper Volga according to spectrophotometric and fluorescent methods, *Voda: himiya i ekologiya*. 2017. No. 4. P. 3–9.
- Mineeva N. M. Plant pigments in the water of the Volga river reservoirs. M.: Nauka, 2004. 156 p.
- Mosharov S. A., Demidov A. B., Simakova U. V. Peculiarities of the primary production process in the Kara Sea at the end of the vegetation season, *Okeanologiya*. 2016. T. 56, No. 1. P. 90–100. DOI: 10.7868/S003015741601010X
- Mulders K. J. M., Lamers P. P., Martens D. E., Wijffels R. H. Phototrophic pigment production with microalgae: biological constraints and opportunities, *J. Phycol.* 2014. Vol. 50. P. 229–242. DOI: 10.1111/jpy.12173
- Odum Yu. *Fundamentals of Ecology*. M.: Mir, 1975. 84 p.
- Oksiyuk O. P., Braginskiy L. P., Linnik P. N., Kuz'menko M. I., Klenus V. P. Complex ecological classification of the quality of land surface waters, *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 1993. T. 29, No. 4. P. 62–76.
- Petrov E. L., Neporozhnyaya I. A., Kalinina D. N. Assessment of the ecological state of bottom sediments of water bodies in the city of Cherepovets, Vologda Oblast, *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik*. 2018. No. 4. P. 584–588. URL: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=18821> (data obrascheniya: 30.10.2020).
- Priyadarshani I., Biswajit R. Commercial and industrial applications of micro algae – a review, *J. Algal Biomass Utln.* 2012. Vol. 3 (4). P. 89–100.
- Sadchikov A. P. *Methods of studying freshwater phytoplankton*. M.: Universitet i shkola, 2003. 159 p.
- Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. *Quantitative hydrology: methods of system identification*. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.
- Sorensen T. A method of establishing groups of equal amplitude in plant ecology, *Biol. Sci.* 1948. Vol. 5. P. 25–39.
- Trofimova V. V., Oleynik A. A., Makarevich P. R. Photosynthetic pigments of phytoplankton in the southern knee of the Kola Bay (Barents Sea) in winter-spring, *Vestnik Murmanskogo GTU*. 2006. T. 9, No. 5. P. 779–784.
- White E. A., Payne G., Pickmore S. Limitation to the usefulness of chlorophyll as a biomass indicator in eutrophication studies, *SIL Proceedings, 1922–2010*. 1988. Vol. 23. P. 598–601. DOI: 10.1080/03680770.1987.11897987