

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПЛАНКТОННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ ВОЛЖСКОГО ПЛЕСА КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В 2017 г.

© 2024 г. Л. Ю. Халиуллина^{a,*}, И. И. Халиуллин^a

^aКазанский (Приволжский) федеральный университет,
Институт фундаментальной медицины и биологии, Казань, Россия

*e-mail: liliya-kh@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.02.2024 г.

После доработки 08.06.2024 г.

Принята к публикации 03.07.2024 г.

Исследована сезонная динамика фитопланктона Волжского плеса Куйбышевского водохранилища (Средняя Волга) в 2017 г. Проанализированы сезонные изменения основных абиотических факторов среды, оказывающих влияние на динамику фитопланктона (уровненного режима, интенсивности падающей солнечной радиации, ряда основных гидрохимических и гидрофизических показателей и др.). Доминирующий комплекс фитопланктона представлен цианобактериями, зелеными вольвоксовыми, центрическими диатомовыми и динофитовыми водорослями. Исследованный участок подвержен чрезвычайно интенсивным процессам “цветения” воды вследствие массового размножения видов цианобактерий из родов *Microcystis*, *Aphanizomenon* и *Anabaena*. Воды Волжского плеса в течение большей части вегетационного сезона соответствовали мезосапротному типу и умеренно-загрязненной зоне.

Ключевые слова: фитопланктон, структура, биомасса, численность, водоросли, сезонные и межгодовые изменения, р. Волга, Куйбышевское водохранилище, Волжский плес, уровень воды

DOI: 10.31857/S0320965224060051, EDN: WYLPDI

ВВЕДЕНИЕ

Куйбышевское водохранилище, крупнейшее по площади в Европе и шестая ступень Волжско-Камского каскада водохранилищ, в настоящее время имеет множество гидрологических и экологических проблем. Поскольку волжские водохранилища – искусственно регулируемые системы, это дает возможность влиять на их состояние. Самыми значимыми факторами, которыми можно управлять и которые определяют внутриводоемные процессы, являются режимы водного притока и регулирования стока гидроузлом. Чтобы управлять этими факторами, необходимы прогностические многовариантные расчеты при разных сценариях регулирования речного стока. Для этого нужны данные ряда параметров, которые можно получить лишь в ходе мониторинга в течение нескольких лет (Даценко, 2007; Рахуба, 2023).

Важнейшим биологическим агентом в экосистеме водохранилищ является фитопланктон.

Сокращения: БС – Балтийская система высот; ITS – индекс трофности; S_B – индекс сапротности по биомассе фитопланктона; W – критерий Шапиро–Уилка (при проверке данных на нормальное распределение).

Массовое размножение некоторых его видов вызывает крайне негативные последствия в виде “цветения” воды. При организации мониторинга планктонных водорослей необходимо ориентироваться на среднюю периодичность смены синоптических циклов погоды. В климатических условиях Средней Волги она составляет примерно одну неделю, поскольку показатели фитопланктона и биогенов водохранилищ очень лабильны. Их качественные и количественные показатели в зависимости от множества факторов, учитывать которые затруднительно технически, могут даже в течение нескольких часов сильно колебаться и быть нерепрезентативны. Исходя из этого, минимальная рекомендуемая частота наблюдений за состоянием экосистем водохранилищ в вегетационный период должна быть не реже одного раза в неделю (Даценко, 2007; Даценко и др., 2017).

Одним из наиболее значимых участков водохранилища является расположенный в верхней части водоема Волжский плес, который сохранил режим р. Волги в большей степени, чем нижние участки водохранилища: это большие скорости течения, песчаные грунты, особенности кислородного режима и биогенных веществ (Водные...,

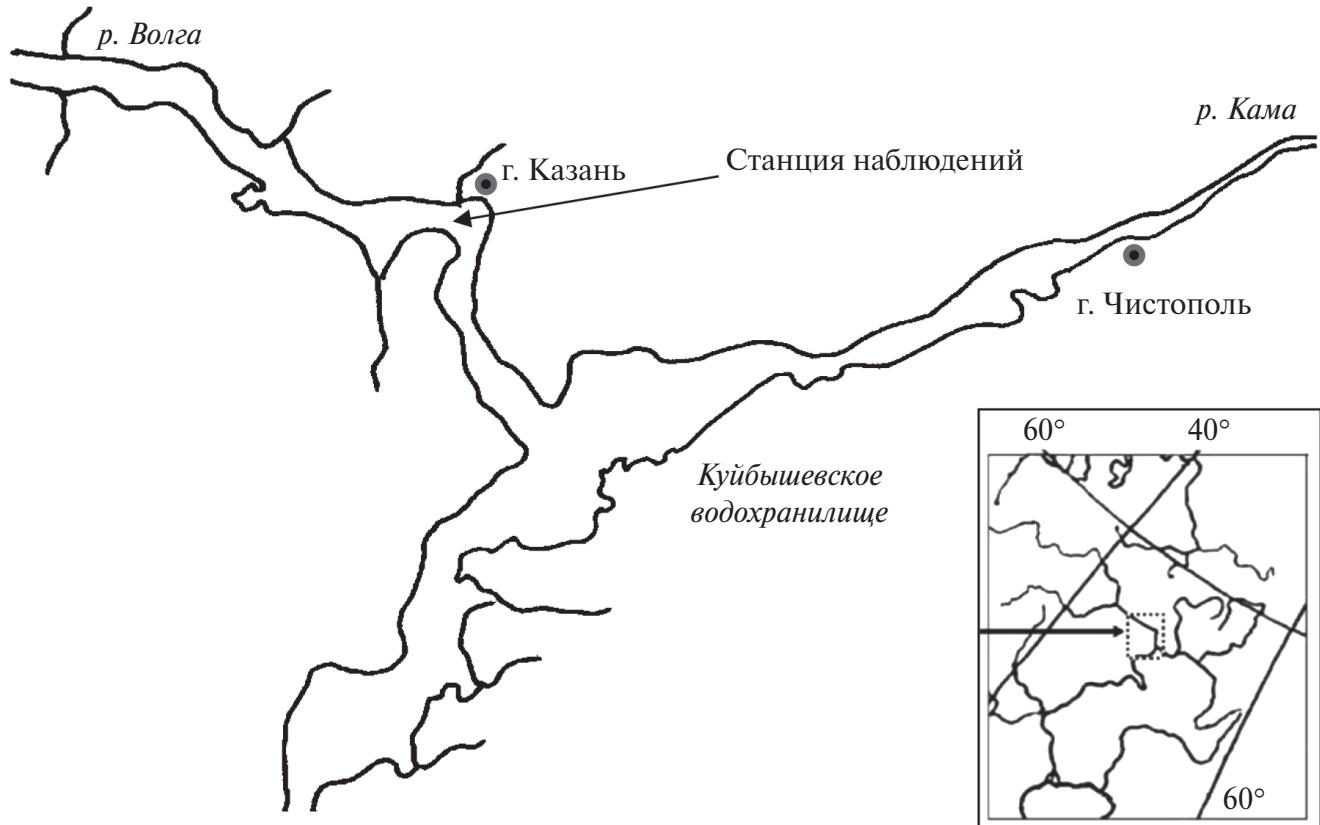


Рис. 1. Карта-схема Волжского плеса Куйбышевского водохранилища, где в 2017 г. находился район исследований (указано стрелкой).

2006; Куйбышевское..., 2008; Хамитова, Калайда, 2017). Имеется довольно много сведений по планктонным водорослям данного участка водохранилища (Экология..., 1989; Паутова, Номоконова, 1994; Фитопланктон..., 2003; Корнева, 2015; Кузьмина, Медянкина, 2019; Минеева и др., 2022 и др.). Чаще всего данные получены в результате крупных экспедиций, исследовавших пространственное распределение гидробионтов и в течение непродолжительного времени в разные годы.

Цель работы — выявить наиболее значимые факторы, которые влияют на процессы эвтрофикации и массовое развитие фитопланктона, приводящие к “цветению” воды цианобактериями в водохранилище.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования планктонных водорослей проводили с мая по октябрь 2017 г. в средней части Волжского плеса Куйбышевского водохранилища. Станция постоянных наблюдений располагалась на русле р. Волге (фарватер) в районе речного порта г. Казани (рис. 1). Основное питание исследованного участка водохранилища осуществляется снеговыми (60% годового стока),

грунтовыми (30) и дождевыми (10) водами. Воды гидрокарбонатные кальциевые, минерализация 120–130 мг/л. Уровень воды в Куйбышевском водохранилище варьирует за счет годового, сезонного и суточного регулирования плотиной ГЭС, колебания уровня воды составляют до 5–6 м (Водные..., 2006; Куйбышевское..., 2008).

Пробы отбирали с интервалом один раз в неделю с борта маломерного судна с помощью батометра Молчанова ГР-18 (с объемом 4 л) на глубине 15–20 м. Исследовали пробы с поверхности и интегрированные — смешивали пробы с поверхности и до 0.5 м, с глубины утроенной прозрачности, измеренной по диску Секки (нижняя граница зоны фотосинтеза), и 0.5 м от дна.

Отбор и обработку проб проводили в соответствии с общепринятыми гидробиологическими методиками (Голлербах и др., 1953; Методика..., 1975; Водоросли..., 1989; Садчиков, 2003).¹ Для количественного и качественного учета монадных и амебоидных форм, разрушающихся или деформирующихся при фиксации, пробы в день отбора фильтровали через мембранный фильтр и

¹ AlgaeBase is a database of information on algae that includes terrestrial, marine and freshwater organisms. 2000. Режим доступа: <http://algaebase.org>. Дата доступа: 16.07.2021.

просматривали в живом состоянии. Для сгущения фитопланктона применяли прибор вакуумного фильтрования ПВФ-35/НБ. Для концентрирования фитопланктона использовали мембранные фильтры Владипор типа МФАС-ОС-2 и МФАС-ОС-3 с размером пор 0.45 и 0.8 мкм соответственно. Также параллельно отбирали пробы объемом 0.5 л, которые фиксировали 4%-ным формалином. Фиксированные пробы концентрировали осадочным методом до 7–10 мл для качественного и количественного учета фитопланктона. Для изучения водорослей применяли микроскоп Axio imager 2 (Carl Zeiss). Диатомовые водоросли идентифицировали в постоянных препаратах, используя автоэмиссионный микроскоп СЭМ MERLIN (Carl Zeiss). Подсчет организмов проводили в камере Горяева. Для определения биомассы использовали счетно-объемный метод. К доминантам относили виды с численностью или биомассой $\geq 10\%$ общих показателей.

Для каждой пробы вычисляли индекс трофности (ITS) по блоку Милиуса по формуле (Исаченко и др., 1993):

$$Ib = 44.87 + 23.22 \log B$$

Для определения степени сапробности рассчитывали индекс сапробности (S_B) Пантле и Букка в модификации Сладечека (Sladecek, 1973).

За весь период исследований ежедневно регистрировали метеоусловия и гидрологические особенности района отбора проб. Также в ходе еженедельных наблюдений фиксировали и анализировали химический состав воды (анализы выполнены сотрудниками гидрохимической лаборатории “Средволгаводхоз”), измеряли уровень освещенности и солнечной радиации (данные получены в метеорологической обсерватории Казанского федерального университета), температуру и прозрачность воды.

В ходе работы проводили статистический анализ первичных данных. Для проверки нормальности полученных данных использовали критерий Шапиро–Уилка (W). Выявлено, что и в поверхностных, и в интегрированных пробах показатели сапробности ($W = 0.96, p = 0.56$) и трофности ($W = 0.96, p = 0.59$), полученные по биомассе фитопланктона, имеют нормальное распределение. Также нормальное распределение было у следующих химических и физических показателей воды: уровень воды ($W = 0.91, p = 0.07$), температура воды ($W = 0.95, p = 0.40$), водородный показатель ($W = 0.96, p = 0.52$), растворенный кислород ($W = 0.98, p = 0.88$), азот аммонийный ($W = 0.96, p = 0.60$), азот нитратный ($W = 0.92, p = 0.05$), гидрокарбонаты ($W = 0.94, p = 0.22$), фосфор общий ($W = 0.96, p = 0.49$), ХПК ($W = 0.97, p = 0.83$) и общая жесткость ($W = 0.97, p = 0.72$).

Поскольку остальные количественные признаки не имели нормального распределения, при исследовании взаимосвязи исследуемых признаков в большинстве случаев использовали непараметрические методы и критерии для статистической обработки результатов. Расчеты проводили с помощью пакета анализа в Microsoft Excel и STATISTICA v. 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности водного режима водохранилища в сочетании с погодными условиями оказывают существенное влияние на развитие фитопланктона. Гидродинамический фактор лимитирует увеличение биомассы водорослей в том случае, если скорость удвоения биомассы оказывается меньше скорости водообмена в водоеме (Даценко, 2007; Рахуба, 2020). В 2017 г., который оказался холодным и многоводным, условия для развития фитопланктона в Куйбышевском водохранилище в летние месяцы из-за высокого пропуска воды на Жигулевском гидроузле были не очень благоприятными (Обзор..., 2018). Подъем уровня воды при весеннем наполнении начался в марте с отметки 48.92 м БС и с небольшими колебаниями находился на отметке 53.5 м до конца июля. В дальнейшем, постепенно снижаясь, к концу сентября достиг 52.1 м. С начала октября уровень воды стал подниматься, и все зимние месяцы оставался высоким. Такой гидрологический режим в течение большей части лета был обусловлен фактическим боковым притоком, причиной которого стали обильные осадки в бассейне Верхней Волги и р. Камы. В результате, в 2017 г. средний расход воды за летнюю межень увеличился и превысил многолетнюю норму на $>50\%$. Холостой сброс воды осуществляли в течение 4 мес. – с 21 апреля по 24 августа, в результате чего расходы воды в летнюю межень значительно выросли (Обзор..., 2018; Халиуллина, Халиуллин, 2022).

Средние значения абиотических параметров и результатов гидрохимического анализа за сезон приведены в табл. 1.

В составе фитопланктона р. Волги за период исследований выявлено 237 видов, разновидностей и форм водорослей: Cyanophyta – 31, Chrysophyta – 8, Bacillariophyta – 67, Xanthophyta – 5, Cryptophyta – 5, Dinophyta – 7, Euglenophyta – 13, Chlorophyta – 100. Больше всего видов было в отделах зеленые (42% общего списка) и диатомовые (28) водоросли. Удельное видовое богатство фитопланктона варьировало от 13 до 37 видовых и внутривидовых таксонов в пробе (рис. 2). Максимальные значения флористического богатства наблюдали в конце июля.

Возрастание видового разнообразия произошло при значительных колебаниях уровня воды,

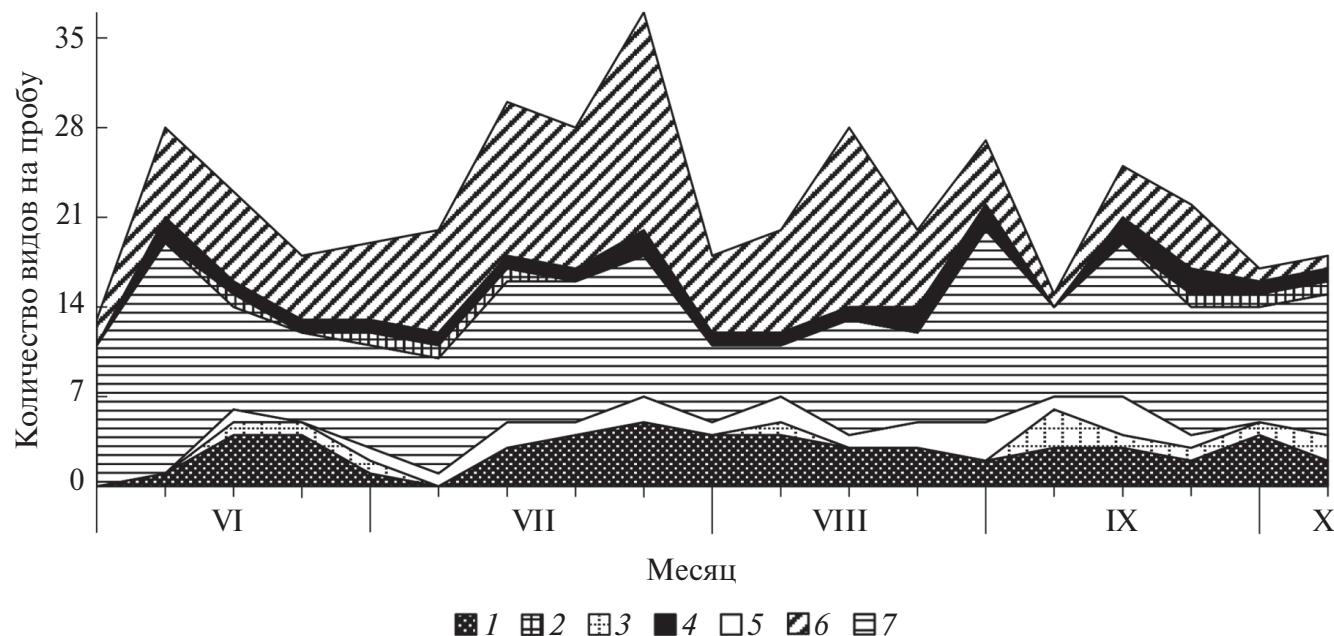


Рис. 2. Сезонная динамика количества таксонов фитопланктона Волжского плеса Куйбышевского водохранилища в 2017 г. 1 – Cyanophyta, 2 – Cryptophyta, 3 – Euglenophyta, 4 – Chrysophyta, 5 – Dinophyta, 6 – Chlorophyta, 7 – Bacillariophyta.

а также после обильных ливней и гроз. В эти периоды в воде появлялись не свойственные для русловой части реки бентосные диатомовые водоросли, а также жгутиковые водоросли из отдельов эвгленовых, динофитовых, золотистых и зеленых, которые обычно обитают в мелководных и заросших макрофитами заливах водохранилища (Халиуллина, Яковлев, 2015; Khaliullina, Demina, 2015).

В периоды, когда уровень воды был более – менее стабилен, в воде, в основном, содержались планктонные виды центрических диатомовых цианобактерий, вольвоксовых и сфероплеевых зеленых водорослей. Многие виды встречались единично и были выявлены лишь в качественных пробах.

Хотя для исследований фитопланктона более информативны интегрированные пробы, одновременно были собраны и проанализированы также и поверхностные пробы воды. При скоплении цианобактерий на поверхности воды, в интегрированных пробах их количественные показатели могут оказаться мало информативными (табл. 2) и можно упустить из виду периоды “цветения” воды ими.

Средняя общая численность фитопланктона за период исследований достигала 4.60 ± 1.54 млн кл./л и варьировала в пределах 0.14–24.01 млн кл./л. Средняя общая биомасса была 1.81 ± 0.44 мг/л, минимальные и максимальные значения колебались в пределах 0.39–7.38 мг/л (рис. 3). В количественном отношении доминировали

цианобактерии, диатомовые, зеленые и динофитовые водоросли.

Цианобактерии в пробах появились с начала июня и доминировали по численности все лето и осень, периодически повсеместно вызывая “цветение” воды из-за массового размножения *Microcystis aeruginosa* Kütz. emend. Elenk. и *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs. Периодически субдоминантами становились в разных соотношениях виды *Anabaena flos-aquae* (Lyngb.) Breb., *A. affinis* Lemm., *A. plantonica* Brunnth. Эпизодически обнаруживали виды *Oscillatoria plantonica* Wołosz., *Gomphosphaeria lacustris* Chodat., *Gloeocapsa turgida* (Kütz.) Hollerbach, *G. limnetica* (Lemm.) Hollerbach, однако содержание этих видов было незначительно.

По биомассе чаще всего преобладали центрические диатомовые и вольвоксовые зеленые водоросли, уступая цианобактериям лишь в периоды интенсивного “цветения” воды. Лидировали типичные для Куйбышевского водохранилища центрические диатомеи *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth, *A. granulata* (Ehr.) Sim., *A. islandica* (O. Müll.) Sim., *A. ambigua* (Grun.) Sim., *Cyclotella meneghiniana* Kütz., *C. atomus* Hust., *Stephanodiscus astraea* (Kütz.) Grun., *S. hantzschii* Grun., *Asterionella formosa* Hass. Часто на колониях цианобактерий *Microcystis aeruginosa* были видны скопления *Achnanthes* sp. Из пеннатных диатомовых в состав субдоминантов вошли *Diatoma tenuis* C. Agardh., *Synedra acus* Kütz., *S. ulna* (Nitzsch.) Ehrenb., *Nitzschia acicularis* (Kütz.) W. Smith, *N. palea* (Kütz.) W. Smith. Также в фитопланктоне

Таблица 1. Физико-химические параметры воды Волжского плеса Куйбышевского водохранилища в 2017 г.

Показатель	$M \pm SE$	min–max	m
Компонентный состав главных ионов			
Гидрокарбонаты, мг/л	147.71 ± 6.45	103.73–195.30	28.10
Общая жесткость, мг-экв/л	2.94 ± 0.11	2.00–3.80	0.50
Физические показатели			
Цветность, градус	54.49 ± 4.79	8.30–88.35	20.88
Взвешенные вещества, мг/л	4.72 ± 0.61	5.00–14.00	2.67
Прозрачность, см	208.68 ± 12.86	150.00–370.00	56.07
Температура воздуха, °С	18.05 ± 2.31	1.00–31.00	10.07
Температура воды, °С	18.68 ± 0.93	10.60–24.10	4.03
Водородный показатель	7.89 ± 0.09	7.10–8.51	0.38
Газовый режим			
Растворенный кислород, мг/л	8.38 ± 0.34	5.56–12.67	1.46
Биогенные и органические вещества			
Азот аммонийный, мг/л	0.65 ± 0.03	0.42–0.88	0.14
БПК 5, мг О ₂ /л	1.72 ± 0.33	1.00–6.65	143
ХПК, мг О ₂ /л	42.93 ± 2.40	21.00–61.40	10.48
Марганец, мг/л	0.05 ± 0.02	0.00–0.31	0.09
Азот нитратный, мг/л	1.76 ± 0.15	0.27–2.60	0.67
Азот нитритный, мг/л	0.05 ± 0.01	0.02–0.13	0.03
Фосфор общий, мг/л	0.07 ± 0.01	0.02–0.12	0.03

Примечание. M – среднее значение за период отбора проб, SE – стандартная ошибка среднего; m – среднеквадратическое отклонение показателей.

встречались виды обрастаний *Melosira varians* C. Agardh., *Diatoma vulgaris* Bory, *Fragilaria constricta* (Ehrenb.) Grun.

Из зеленых водорослей доминировали вольвоксовые *Chlamydomonas* spp., *Phacus lenticularis* (Ehrenb.) Diesing, *Pandorina morum* (Müll.) Bory, довольно часто присутствовали виды *Cartieria* spp., *Pteromonas aculeata* Lemm., *Tetraselmis cordiformis* (Cart.) Stein. Периодически возрастила численность сфероплеевых *Coelastrum microporum* Nág., *Dictyosphaerium pulchellum* Wood, *Monoraphidium arcuatum* (Korsch.) Hind., *Scenedesmus acuminatus* (Lagerh.) Chodat., *S. denticulatus* Lagerh., *S. disciformis* (Chodat.) Fott et Komarek, *S. quadricauda* (Turp.) Breb., *S. brasiliensis* Bohl., *Crucigeniella rectangularis* (Nág.) Komarek, *C. tetrapedia* (Kirch.) Kuntze, *Pediastrum duplex* Meyen, *Oocystis natans* Smith, *Kirchneriella lunaris* (Kirhn.) Moeb.

Из других групп преобладали криптофитовые *Cryptomonas ovata* Ehrenb., *Cryptomonas* spp., динофитовые водоросли родов *Peridinium*, *Gymnodinium*, *Glenodinium*, вид *Ceratium hirundinella* (Müll.) Dujard. и эвгленовые *Euglena viridis* Ehrenb., *Trachelomonas* spp.

Сезонная динамика численности и биомассы фитопланктона в период исследований представлена на рис. 3 и 4. В течение июня и первой

половине июля их содержание в воде было невысоким и состояло в основном из центрических диатомовых и вольвоксовых зеленых водорослей. В самом начале июня были многочисленны трудно идентифицируемые мелкие бесцветные разножгутиковые желто-зеленые и криптофитовые водоросли, количество которых к концу июня резко снизилось. Погода большей частью была дождливая, уровень воды оставался высоким и стабильным, близким к отметке 53.5 м, что не способствовало интенсивному размножению фитопланктона. К концу первой декады июня установился период чистой воды, обусловленный вспышкой размножения зоопланктона организмов, которых можно было увидеть в пробах воды в большом количестве. Фитопланктон состоял из диатомовых и единичных колоний *Microcystis aeruginosa*.

Самые высокие показатели численности и биомассы фитопланктона наблюдали со второй половины июля до сентября. С середины июля началось интенсивное размножение цианобактерий *Microcystis aeruginosa* и *Aphanizomenon flos-aquae*, которые образовывали пятна “цветения” воды.

С середины второй декады июля в водохранилище довольно резко начал снижаться уровень воды и за несколько суток с 53.5 м упал до

Таблица 2. Средние показатели численности и биомассы фитопланктона Волжского плеса Куйбышевского водохранилища в 2017 г.

Показатель	$M \pm SE$	min–max	m
Интегрированные пробы			
$N_{\text{общ}}$, млн кл./л:	4.60 ± 1.54	0.14–24.01	6.69
Cyanophyta	3.53 ± 1.43	0.00–21.99	6.22
Euglenophyta	0.01 ± 0.00	0.00–0.06	0.01
Dinophyta	0.03 ± 0.01	0.00–0.11	0.04
Bacillariophyta	0.54 ± 0.11	0.08–1.68	0.47
Cryptophyta	0.01 ± 0.00	0.00–0.05	0.02
Chrysophyta	0.04 ± 0.01	0.00–0.11	0.03
Chlorophyta	0.45 ± 0.15	0.00–2.01	0.63
$B_{\text{общ}}$, мг/л:	1.81 ± 0.44	0.39–7.38	1.93
Cyanophyta	0.28 ± 0.11	0.00–1.71	0.49
Euglenophyta	0.02 ± 0.02	0.00–0.28	0.07
Dinophyta	0.32 ± 0.10	0.00–1.42	0.45
Bacillariophyta	0.69 ± 0.14	0.13–2.39	0.60
Cryptophyta	0.01 ± 0.00	0.00–0.05	0.02
Chrysophyta	0.02 ± 0.00	0.00–0.06	0.02
Chlorophyta	0.46 ± 0.20	0.00–2.88	0.87
S_B	1.74 ± 0.07	1.07–2.16	0.29
ITS	46.44 ± 2.16	35.31–65.02	9.41
Поверхностные пробы			
$N_{\text{общ}}$, млн кл./л:	7.16 ± 2.61	0.17–36.30	11.40
Cyanophyta	5.51 ± 2.41	0.00–35.10	10.49
Euglenophyta	0.00 ± 0.00	0.00–0.02	0.01
Dinophyta	0.04 ± 0.01	0.00–0.16	0.05
Bacillariophyta	0.60 ± 0.24	0.00–3.55	1.03
Cryptophyta	0.00 ± 0.00	0.00–0.03	0.01
Chrysophyta	0.04 ± 0.01	0.00–0.15	0.04
Chlorophyta	0.96 ± 0.62	0.00–11.79	2.70
$B_{\text{общ}}$, мг/л:	2.38 ± 0.67	0.16–12.10	2.93
Cyanophyta	0.45 ± 0.20	0.00–2.75	0.86
Euglenophyta	0.01 ± 0.01	0.00–0.08	0.02
Dinophyta	0.49 ± 0.15	0.00–2.06	0.66
Bacillariophyta	0.98 ± 0.38	0.00–6.23	1.65
Cryptophyta	0.00 ± 0.00	0.00–0.03	0.01
Chrysophyta	0.02 ± 0.01	0.00–0.08	0.02
Chlorophyta	0.42 ± 0.18	0.00–2.89	0.78
S_B	1.79 ± 0.07	1.17–2.28	0.32
ITS	46.63 ± 2.96	26.24–70.02	12.89

Примечание. S_B – индекс сапробности по биомассе фитопланктона; ITS – индекс трофности по биомассе фитопланктона; $N_{\text{общ}}$ – общая численность; $B_{\text{общ}}$ – общая биомасса; M – среднее значение за период отбора проб, SE – стандартная ошибка среднего; m – среднеквадратическое отклонение показателей.

52.8 м БС, при этом на реке наблюдали сильное течение. При сложившихся обстоятельствах усилились процессы “цветения” воды за счет развития *Aphanizomenon flos-aquae*, из-за скоплений колоний которого в мелководных заливах вода

превратилась в кашицу зеленого цвета. В эти дни у берегов можно было увидеть большое количество всплывшей мертвой рыбы. Также в воде русловой части наряду с цианобактериями резко возросло содержание жгутиковых вольвоксовых

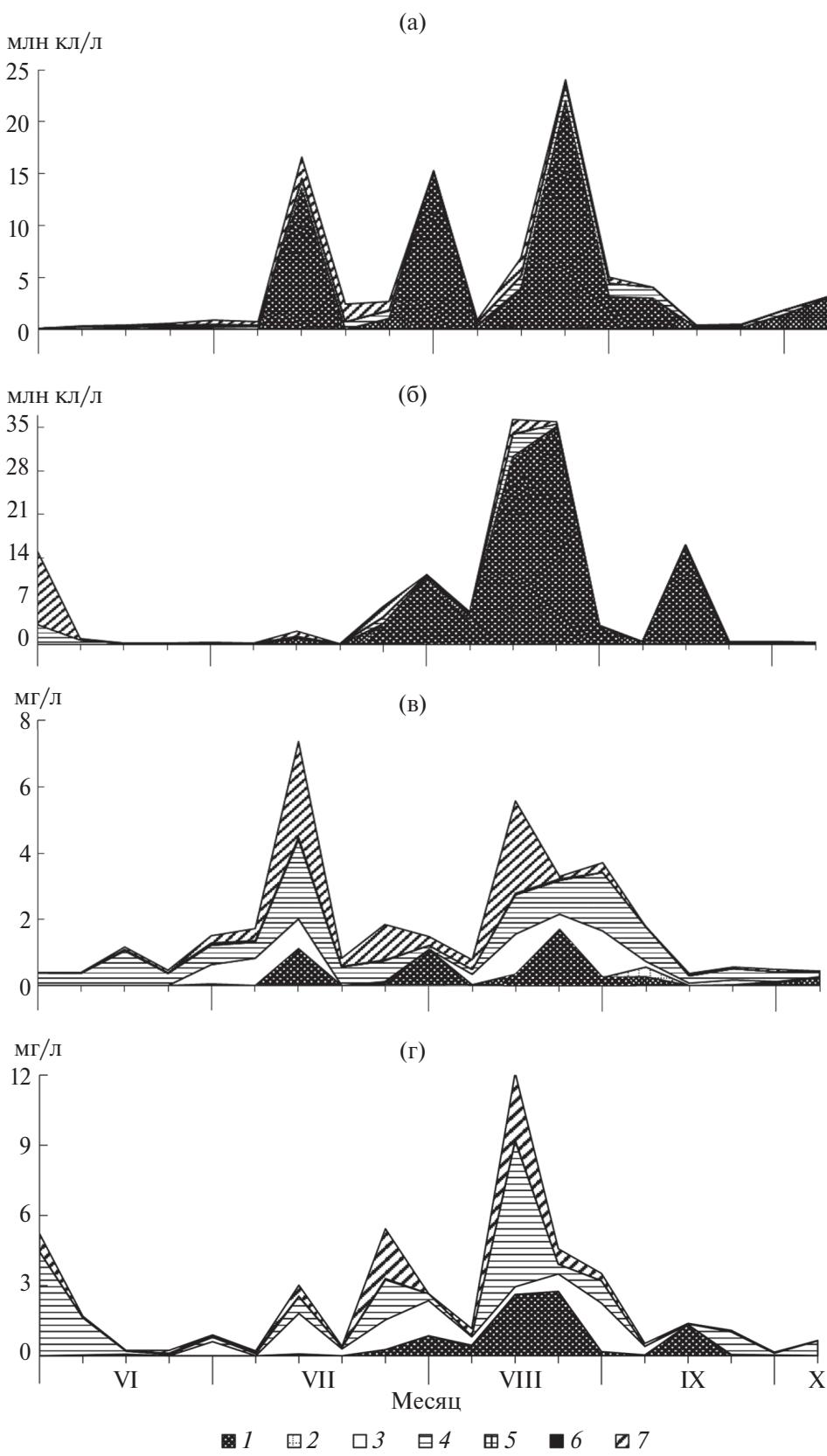


Рис. 3. Сезонная динамика численности (а, б) и биомассы (в, г) фитопланктона Волжского плеса Куйбышевского водохранилища в 2017 г.: а, в – интегрированные пробы, б, г – пробы с поверхности. 1 – цианобактерии, 2 – эвгленовые, 3 – динофильные, 4 – диатомовые, 5 – криптофитовые, 6 – золотистые, 7 – зеленые водоросли.

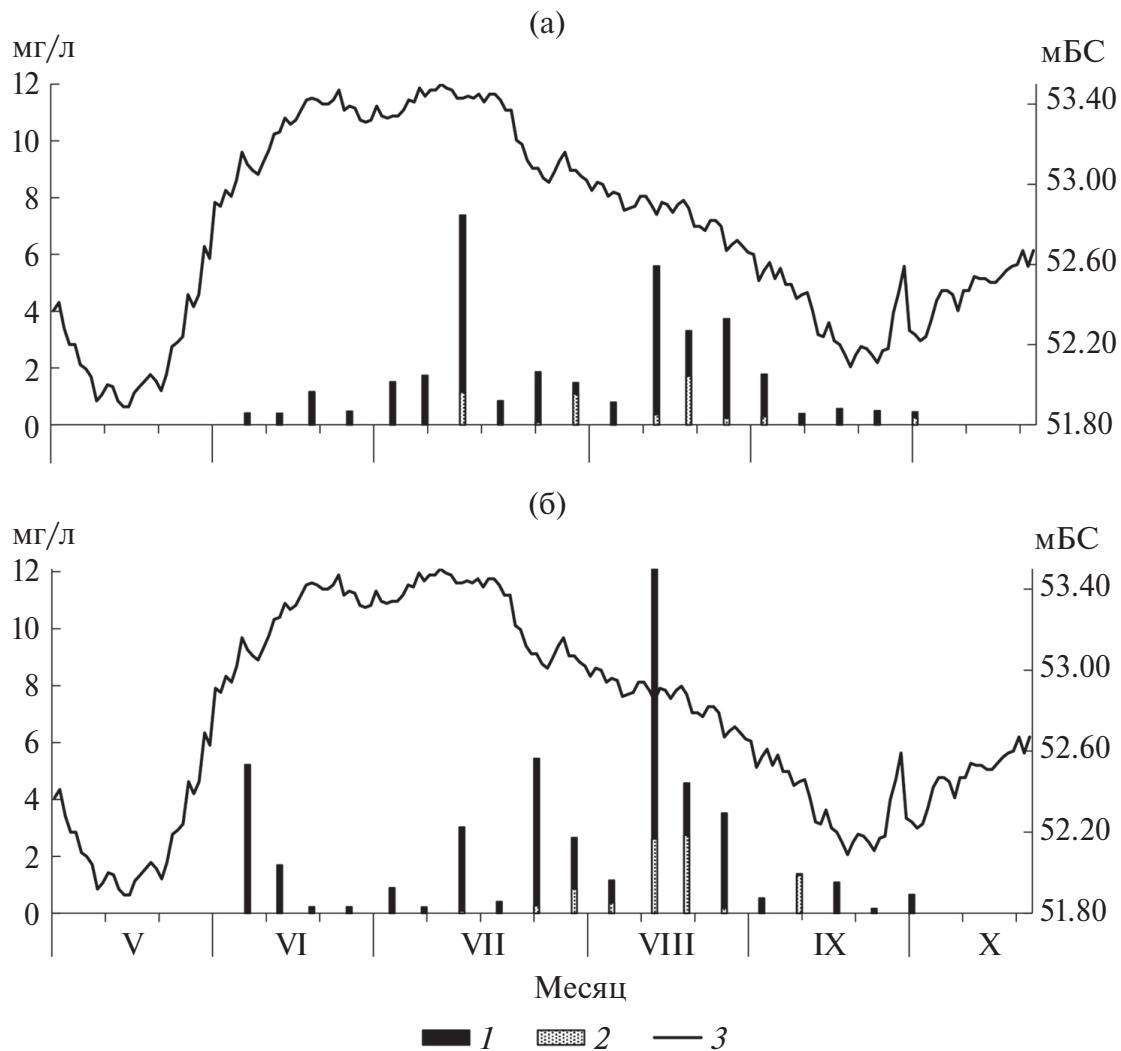


Рис. 4. Динамика биомассы (мг/л) фитопланктона в зависимости от уровня воды (м) Волжского плеса Куйбышевского водохранилища в 2017 г.: а – интегрированные пробы, б – пробы с поверхности воды. 1 – общая биомасса, мг/л, 2 – биомасса цианобактерий, мг/л, 3 – уровень воды, мБС.

зеленых водорослей. За неделю их численность и биомасса увеличились с 0.33 млн кл./л и 0.36 мг/л до 2.01 млн кл./л и 2.88 мг/л соответственно.

На поверхности воды также было много экземпляров многокоренника обыкновенного *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid. и фрагментов других высших растений, что совсем не характерно для открытой акватории водохранилища. Случившиеся 31 июля мощная гроза с ливнем способствовали очищению воды от цианобактерий в русловой части реки на непродолжительное время, что, однако не повлияло на характер “цветения” в заливах.

Установившаяся к началу августа жаркая погода и штиль на воде, а также неуклонное снижение уровня воды снова привели к чрезвычайному “цветению” воды, доминировал *Microcystis aeruginosa*.

К середине августа произошел кратковременный спад численности и биомассы всех групп

фитопланктона, хотя погодные и гидрологические условия не менялись и все сложившиеся обстоятельства продолжали способствовать “цветению” воды. Скопления колоний *Microcystis aeruginosa* образовывали небольшие пятна на поверхности, большей частью находясь в толще воды и у дна. Содержание кислорода в воде снизилось в несколько раз по сравнению с предыдущей неделей, а показатели БПК5 в толще воды, напротив, в четыре раза повысились. В эти дни отмечали массовую гибель рыбы.

Через несколько суток процессы “цветения” возобновились с еще большей интенсивностью и к началу третьей декады августа численность и биомасса цианобактерий достигли своего максимума за сезон. К этому моменту доминирующим видом стал и *Aphanizomenon flos-aquae*. Также появилось очень много зеленых жгутиковых водорослей *Chlamydomonas* spp., *Phacotus*

lenticularis, *Pandorina morum* и *Carteria* spp., в больших количествах динофитовых родов *Peridinium*, *Gymnodinium*, *Glenodinium*, *Ceratium*, эвгленовых родов *Euglena* и *Trachelomonas* и диатомовых водорослей.

Прошедший сильный ливень 29 августа и ветреная погода привели к снижению “цветения” воды цианобактериями, представленными в этот период *Aphanizomenon flos-aquae*. В воде резко возросло содержание диатомовых и динофитовых водорослей (рис. 3). Однако, в дальнейшем, с установлением безветренной погоды и при неуклонном быстром снижении уровня воды к концу первой декады сентября процессы “цветения”, обусловленные массовым размножением *Microcystis aeruginosa* и *Aphanizomenon flos-aquae*, возобновились. Также в воде наблюдали значительное количество эвгленовых и зеленых жгутиковых водорослей.

К концу сентября уровень воды начал резко подниматься, процессы размножения всех видов планктона водорослей пошли на убыль, вода стала очищаться, увеличилась прозрачность, “цветение” воды на какое-то время прекратилось. Спустя несколько суток уровень воды резко упал почти на полметра и установился штиль, что сразу же привело к интенсивному размножению *Microcystis aeruginosa* и *Aphanizomenon flos-aquae*, также было много эвгленовых и вольвоксовых водорослей.

С начала октября уровень воды в водохранилище начал подниматься, содержание водорослей в воде снизилось, однако умеренное количество цианобактерий в воде наблюдали вплоть до конца октября.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 2017 г. сезонная динамика фитопланктона исследуемого участка Волжского плеса характеризовалась двумя пиками численности и биомассы – в летний и летне-осенний периоды. По численности доминировали цианобактерии, периодически вызывая “цветение” воды, которое было обусловлено массовым развитием родов *Microcystis*, *Aphanizomenon* и *Anabaena*, причем представители этих трех родов редко встречаются одновременно. По биомассе доминировали центрические диатомовые, зеленые вольвоксовые и динофитовые водоросли. Также для вод исследуемого участка р. Волги характерно наличие высоких концентраций жгутиковых гетеротрофных видов планктона водорослей.

Волжский плес на участке исследований чрезвычайно подвержен “цветению” воды видами цианобактерий. Хотя климатические условия определяют интенсивность процессов “цветения” воды, эти явления не в последнюю очередь

зависят от изменений гидродинамических процессов, происходящих на акватории водохранилища. В ходе работы были проанализированы основные гидрохимические и гидрофизические показатели вод плеса (рис. 5–7), а также проведены расчеты коэффициента корреляции Спирмена между показателями фитопланктона, гидрохимическими и гидрофизическими показателями воды.

Одним из важнейших факторов, влияющих на структуру фитопланктона и качество воды является уровненный режим водохранилища (Даценко и др., 2017). Это подтверждают полученные коэффициенты корреляций Спирмена. В частности, с уровнем воды отрицательно связаны прозрачность воды ($r = -0.7$), водородный показатель ($r = -0.8$), общая жесткость ($r = -0.8$), азот нитратный ($r = -0.7$), фосфор общий ($r = -0.7$) и положительно – со взвешенными веществами ($r = 0.7$) и гидрокарбонатами ($r = 0.7$). Также с уровнем воды отрицательно коррелируют численность и биомасса цианобактерий, особенно в пробах из поверхностного слоя ($r = -0.5$), и эвгленовых водорослей в интегрированных пробах ($r = -0.6$). Повышение уровня воды не благоприятствует интенсивному размножению этих представителей фитопланктона, предпочитающих мало проточные с высоким содержанием биогенов водоемы.

Численность криптофитовых водорослей, напротив, увеличивалась с повышением уровня воды ($r = 0.6$), при котором снижается прозрачность. По нашим наблюдениям, криптофитовые водоросли предпочитали более низкие температуры ($r = -0.5$) и повышенное содержание в воде гидрокарбонатов ($r = 0.6$), концентрация которых возрастала с повышением уровня воды. Эти организмы предпочитают воды с более высокой цветностью и низкой прозрачностью (Корнева, 2009). По сравнению с другими водорослями, криптофиты также чрезвычайно чувствительны к избыточному освещению и температурам $\sim 20^{\circ}\text{C}$ (Белякова и др., 2006; Wirth et al., 2019).

К основным экологическим факторам, определяющим рост и развитие водорослей, также относятся солнечная радиация, температура воды и концентрация биогенных элементов (Водоросли, 1989; Минеева и др., 2022). По нашим данным, прогревание воздуха и воды особенно положительно влияли на развитие цианобактерий ($r = 0.5$), динофитовых ($r = 0.8$) и зеленых водорослей ($r = 0.8$). Количественные показатели водорослей всех отделов положительно коррелировали с нитритным азотом ($r = 0.5$) и содержанием общего фосфора ($r = 0.5$). При увеличении биомассы цианобактерий в воде растет химическое потребление кислорода ($r = 0.6$) и повышается водородный показатель ($r = 0.5$).

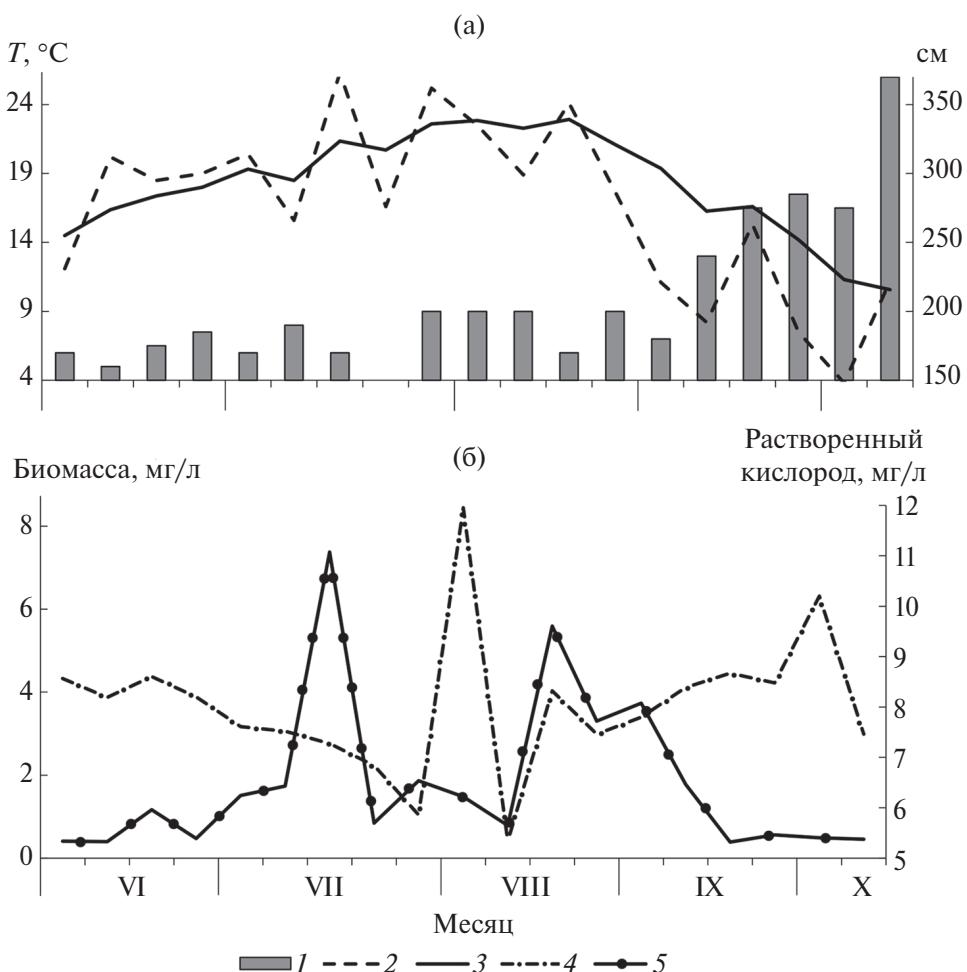


Рис. 5. Динамика основных гидрохимических и гидрофизических показателей Волжского плеса Куйбышевского водохранилища в 2017 г.: а – прозрачность (1), температура воздуха (2) и воды (3); б – растворенный кислород в воде (4) и биомасса фитопланктона (5) в интегрированных пробах.

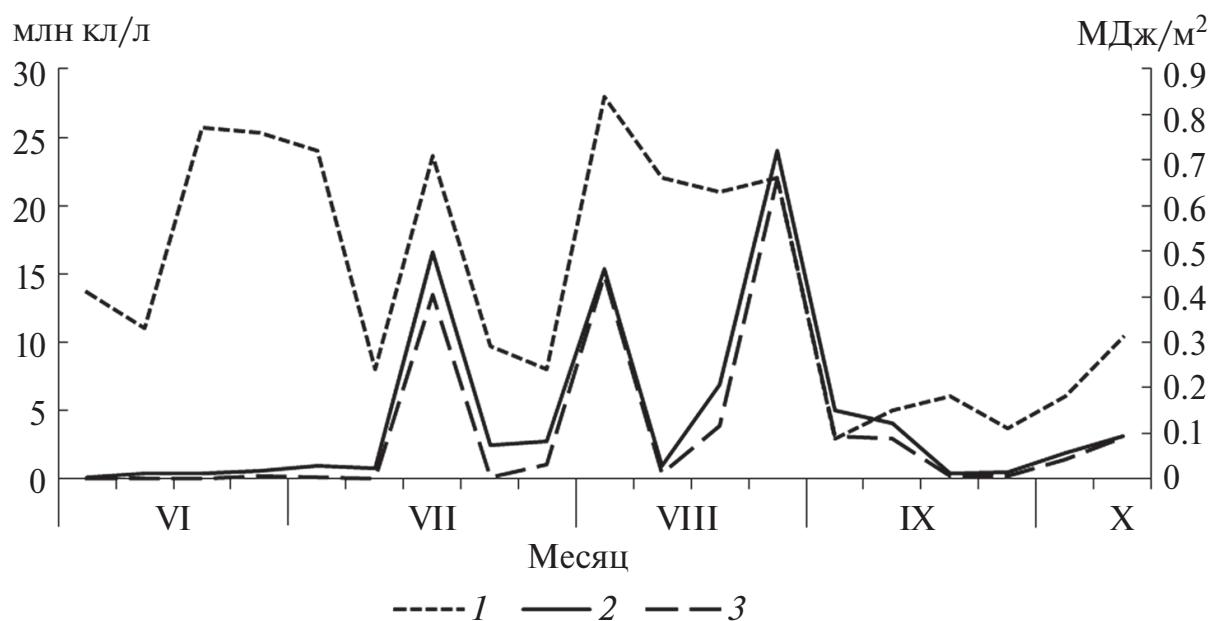


Рис. 6. Динамика суммарной солнечной радиации ($\text{МДж}/\text{м}^2$) (1), общей численности фитопланктона (2) и численности цианобактерий (3) (млн кл./л) в интегрированных пробах Волжского плеса Куйбышевского водохранилища в 2017 г.

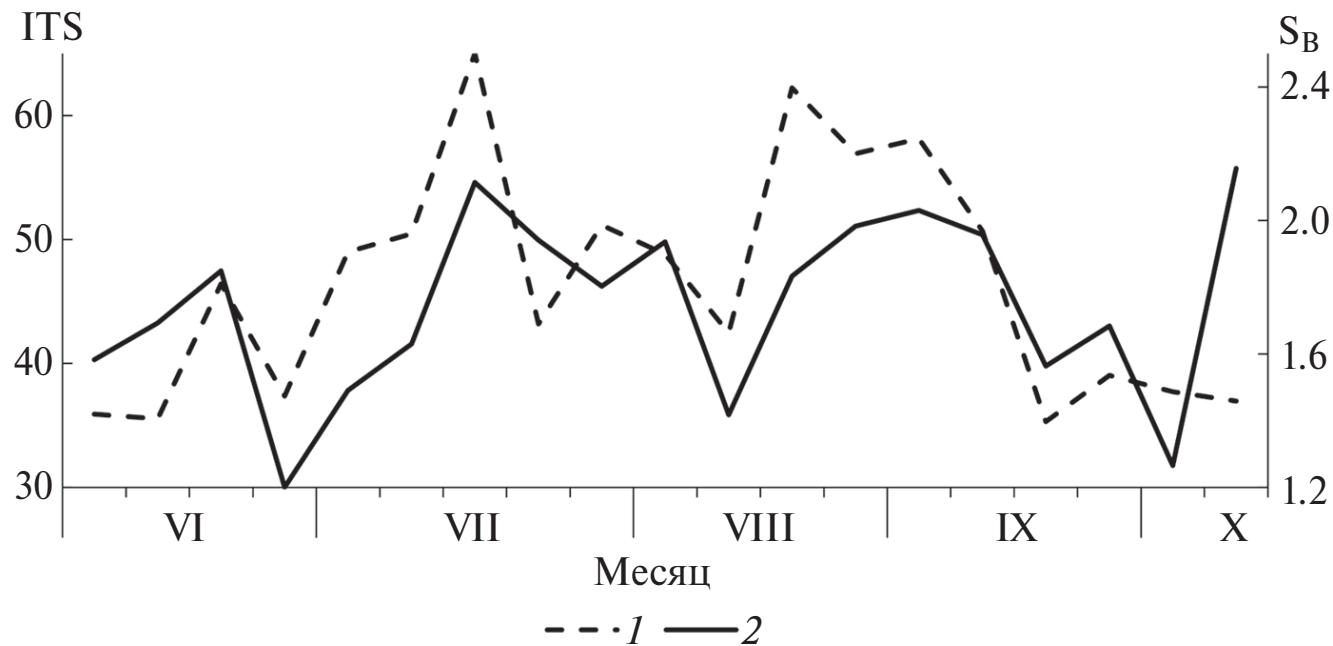


Рис. 7. Динамика индекса трофности (ITS) (1) и индекса сапробности (SB) (2) по биомассе фитогланктона в интегрированных пробах Волжского плеса Куйбышевского водохранилища.

Проанализирована динамика посutoчных измерений суммарной солнечной радиации (рис. 6). График, описывающий динамику численности фитопланктона, в целом повторяет таковую солнечной радиации, однако статистически значимой связи (при $p < 0.05$) между исследуемыми параметрами не выявлено. В природе причинно-следственные связи такого рода бывает трудно отследить на таких малых выборках с широкой вариабельностью как наблюдения одного сезона (Выручалкина и др., 2016). Реакция фитопланктона, как и других гидробионтов, на изменяющиеся условия среды проявляется не сразу, а по прошествии довольно продолжительного периода времени (Корсак и др., 2009), и бывает сложно установить статистически достоверные зависимости между изучаемыми параметрами такого рода.

По результатам исследований, воды исследуемого участка Волжского плеса в течение большей части вегетационного сезона соответствовали мезосапробному типу и умеренно-загрязненной зоне (рис. 7). Трофический статус вод, определенный по биомассе фитопланктона, прозрачности воды и содержанию общего фосфора, большей частью соответствовал мезотрофному типу, в периоды максимального развития планкtonных водорослей – часто эвтрофному.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследованный период структурные и количественные показатели фитопланктона, в целом, соответствуют показателям, полученными

другими исследователями в разные годы для фитопланктона исследуемого участка. Доминирующий комплекс фитопланктона Волжского плеса Куйбышевского водохранилища на современном этапе состоит из цианобактерий, зеленых вольвоксовых, центрических диатомовых и динофитовых водорослей. Исследованный участок подвержен чрезвычайно интенсивным процессам "цветения" воды вследствие массового размножения видов цианобактерий *Microcystis*, *Aphanizomenon* и *Anabaena*. Воды исследуемого участка в течение большей части вегетационного сезона соответствуют мезосапробному типу и умеренно-загрязненной зоне.

Подробные исследования сезонной динамики фитопланктона с небольшими интервалами (не более недели) между отборами проб, позволили с большой достоверностью определить, что основное влияние на развитие планктонных альгоценозов оказывают, в первую очередь, изменения уровенного режима, погодные условия и характер осадков. Также к факторам, определяющим темпы развития ряда групп водорослей, относятся температура воздуха, температура воды, содержание растворенных веществ в воде, причем количество и распределение растворенных веществ в значительной степени зависят, в свою очередь, от динамики уровенного режима.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам гидрохимической лаборатории

“Средволгаводхоз” (г. Казань) за помощь в обработке гидрохимических проб, а также сотрудникам метеорологической обсерватории Казанского федерального университета за представленные данные.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена частично за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белякова Г.А., Дьяков Ю.Т., Тарасов К.Л. 2006. Ботаника. Т. 2. М.: Издат. центр “Академия”.
- Водоросли. 1989. Справочник. Киев: Наук. думка.
- Водные объекты Республики Татарстан // Гидро-графический справочник. 2006. Казань: Изд-во “Идел-пресс”. С. 35.
- Выручалкина Т.Ю., Филатов Н.Н., Дианский Н.А., Гусев А.В. 2016. О прогнозе многолетних изменений уровня воды крупных озер // Тр. Карельск. науч. центра РАН. № 9. С. 3.
- Голлербах М.М., Коссинская Е.К., Полянский В.И. 1953. Синезеленые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2. М.: Сов. наука.
- Даценко Ю.С. 2007. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС.
- Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К. 2017. Анализ влияния абиотических факторов на развитие фитопланктона в малопроточном стратифицированном водохранилище // Тр. Карельск. науч. центра РАН. Вып. 10. С. 73.
- Исаченко А.Г., Бовыкин И.В., Румянцев В.А. и др. 1993. Теоретические вопросы классификации озер. СПб.: Наука.
- Корнева Л.Г. 2009. Формирование фитопланктона водоемов бассейна Волги под влиянием природных и антропогенных факторов: Автореф. дис... на соиск. уч. степ. докт. биол. наук. СПб. 47 с.
- Корнева Л.Г. 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костром. печатный дом.
- Корсак М.Н., Мошаров С.А., Скоробогатов А.М. и др. 2009. Влияние суммарной солнечной радиации на весенне “цветение” фитопланктона в Учинском водохранилище // Вестн. Москов. ун-та. Сер. 16. Биология. № 1. С. 41.
- Куйбышевское водохранилище (Научно-информационный справочник). 2008. Тольятти: Ин-т экологии Волжск. бассейна РАН.
- Кузьмина К.А., Медянкина М.В. 2019. О фитопланктоне Волжского плеса Куйбышевского водохранилища // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Т. 28. № 1. С. 18.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. 1975. М.: Наука.
- Минеева Н.М., Поддубный С.А., Степанова И.Э., Цветков А.И. 2022. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Средней Волги // Биология внутр. вод. № 6. С. 640. (Mineeva N.M., Poddubny S.A., Stepanova I.E., Tsvetkov A.I. 2022. Abiotic factors and their role in the development of phytoplankton in reservoirs of the Middle Volga // Inland Water biol. № 6. P. 640.). <https://doi.org/10.31857/S0320965222060158>
- Обзор погодных условий в г. Казани по данным метеостанции Казань-университет/Метеорологическая обсерватория КФУ. 2018. Режим доступа: <https://kpfu.ru/ecology/struktura/otdelenie-ecology-i-turizma/kafedra-meteorologii-klimatologii-i-ekologii/meteorologicheskaya-observatoriya/obzor-pogody>. Дата доступа: 08.03.2018.
- Паутова В.Н., Номоконова В.И. 1994. Продуктивность фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Тольятти: Изд-во Самарский НЦ РАН.
- Рахуба А.В. 2020. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. естественные науки. Т. 162. Кн. 3. С. 430.
- Рахуба А.В. 2023. Моделирование цветения воды в Куйбышевском водохранилище в годы с различным режимом регулирования стока // Географ. вестн. № 2(65). С. 92.
- Садчиков А.П. 2003. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: Университет и школа.
- Фитопланктон Нижней Волги. Водохранилища и низовые реки. 2003. СПб.: Наука.
- Халиуллина Л.Ю., Яковлев В.А. 2015. Фитопланктон мелководий в верховьях Куйбышевского водохранилища. Казань: Изд-во АН РТ.
- Халиуллина Л.Ю., Халиуллин И.И. 2022. Особенности сезонной динамики фитопланктона р. Кама (Куйбышевское водохранилище) // Биология внутр. вод. № 6. С. 664. <https://doi.org/10.31857/S0320965222060092>
- Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. 1989. Л.: Наука.
- Хамитова М.Ф., Калайда М.Л. 2017. Исследование изменений гидробиологических характеристик в условиях локальных загрязнений в регионе Средней Волги. LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Khaliullina L.Y., Demina G.V. 2015. Seasonal dynamics of phytoplankton communities residing in different types of shallow waters in the Kuibyshev Reservoir (Russia) // Int. Aquat. Res. (IAQR). V. 7. № 4. P. 315.
- Sladecek V. 1973. System of water quality from the biological point of view // Arch. Hydrobiol., Beiheft., Ergebnisse der Limnol. Bd 7.
- Wirth C., Limberger R. 2019. Temperature light interaction and tolerance of high water temperature in the planktonic freshwater flagellates Cryptomonas (Cryptophyceae) and Dinobryon (Chrysophyceae) // J. Phycol. № 55(2). P. 404.

Seasonal Dynamics of Planktonic Algae in the Volzhsky Reach of the Kuibyshev Reservoir in 2017

L. Y. Khaliullina^{1,*}, I. I. Khaliullin¹

¹Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan, Russia

*e-mail: liliya-kh@yandex.ru

Studies were carried out on the seasonal dynamics of phytoplankton in the Volga Reach of the Kuibyshev Reservoir in 2017. At the same time, the seasonal values of the main abiotic environmental factors influencing the dynamics of phytoplankton (level regime, intensity of incident solar radiation, a number of basic hydrochemical and hydrophysical indicators, etc.) were analyzed. The dominant phytoplankton complex consists of blue-green, green volvox, centric diatoms and dinophytes. The studied area is subject to extremely intense processes of "blooming" of water due to the mass reproduction of blue-green algae species *Microcystis*, *Aphanizomenon* and *Anabaena*, and the waters of the studied area during most of the growing season corresponded to the mesosaprobic type and a moderately polluted zone.

Keywords: phytoplankton, structure, biomass, abundance, algae, seasonal and interannual changes, Volga River, Kama River, Kuibyshev Reservoir, water level