

УДК 574.52

ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ФИТОПЛАНКТОНА р. КАМА (КУЙБЫШЕВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ) В 2017 г.

© 2022 г. Л. Ю. Халиуллина^а, *, И. И. Халиуллин^а

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

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

Поступила в редакцию 06.06.2022 г.

После доработки 07.07.2022 г.

Принята к публикации 15.07.2022 г.

Исследовано влияние абиотических факторов на сезонную динамику фитопланктона. Дана оценка трофического состояния р. Кама (Камский залив Куйбышевского водохранилища) в 2017 г. Проанализированы сезонные значения основных факторов среды, оказывающих влияние на динамику фитопланктона (уровенный режим, интенсивность падающей солнечной радиации, ряд основных гидрохимических и гидрофизических показателей). Воды исследуемого участка р. Кама в течение большей части вегетационного сезона соответствовали мезосапробному типу и умеренно-загрязненной зоне.

Ключевые слова: фитопланктон, структура, биомасса, численность, водоросли, сезонные и межгодовые изменения, река Кама, Куйбышевское водохранилище, уровень воды

DOI: 10.31857/S0320965222060092

ВВЕДЕНИЕ

Река Кама – левый и самый крупный приток р. Волга, имеет важное рыбохозяйственное значение (Водные..., 2006; Куйбышевское..., 2008). Также на реке осуществляется судоходство и активно добываются песчано-гравийные смеси. В настоящее время река сильно загрязняется промышленными сточными водами. Значительный вклад в загрязнение реки привносят также крупные притоки, речной транспорт, локальные промышленные, сельскохозяйственные и коммунально-бытовые стоки и т.п. Все это свидетельствует о необходимости проведения постоянного мониторинга экологического состояния вод реки.

Один из основных показателей, определяющих трофическое состояние и потенциал биологической продуктивности водоемов, – структурная организация планктонных водорослей. Состояние сообществ фитопланктона водохранилищ определяется многими факторами (Даценко, 2007; Корнева, 2015; Джаяни, 2020). К настоящему времени большинство выявленных закономерностей получены в результате непродолжительных экспедиционных наблюдений. Однако, хорошо известно, что количественные и качественные характе-

ристики фитопланктона крупных водохранилищ чрезвычайно лабильны и неоднородны не только в пространственном отношении, а и во времени (Даценко и др., 2017).

Цель работы – исследовать структуру сообществ и особенностей формирования сезонной динамики фитопланктона под действием абиотических факторов, дать оценку трофического состояния р. Кама.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Кама берет свое начало в центральной части Верхнекамской возвышенности, протекает между возвышенностями Высокого Заволжья и впадает в Камский залив Куйбышевского водохранилища. В месте слияния рек Волги и Кама Куйбышевское водохранилище образует озеровидное расширение – Волжско-Камский плес (Куйбышевское..., 2008). Длина реки достигает 1805 км. В реку впадает 73718 притоков, из них 94.5% – мелкие реки длиной <10 км. Правые и частично левые притоки р. Кама представлены равнинными реками, текущими с севера, слева впадают холодные горные реки с Уральских гор. Поскольку уровень воды в Куйбышевском водохранилище имеет годовое, сезонное и суточное регулирование плотиной ГЭС, колебания уровня воды ска-

Сокращения: БС – Балтийская система высот; ITS – индекс трофности; S_B – индекс сапробности по биомассе фитопланктона; W – Критерий Шапиро-Уилка.

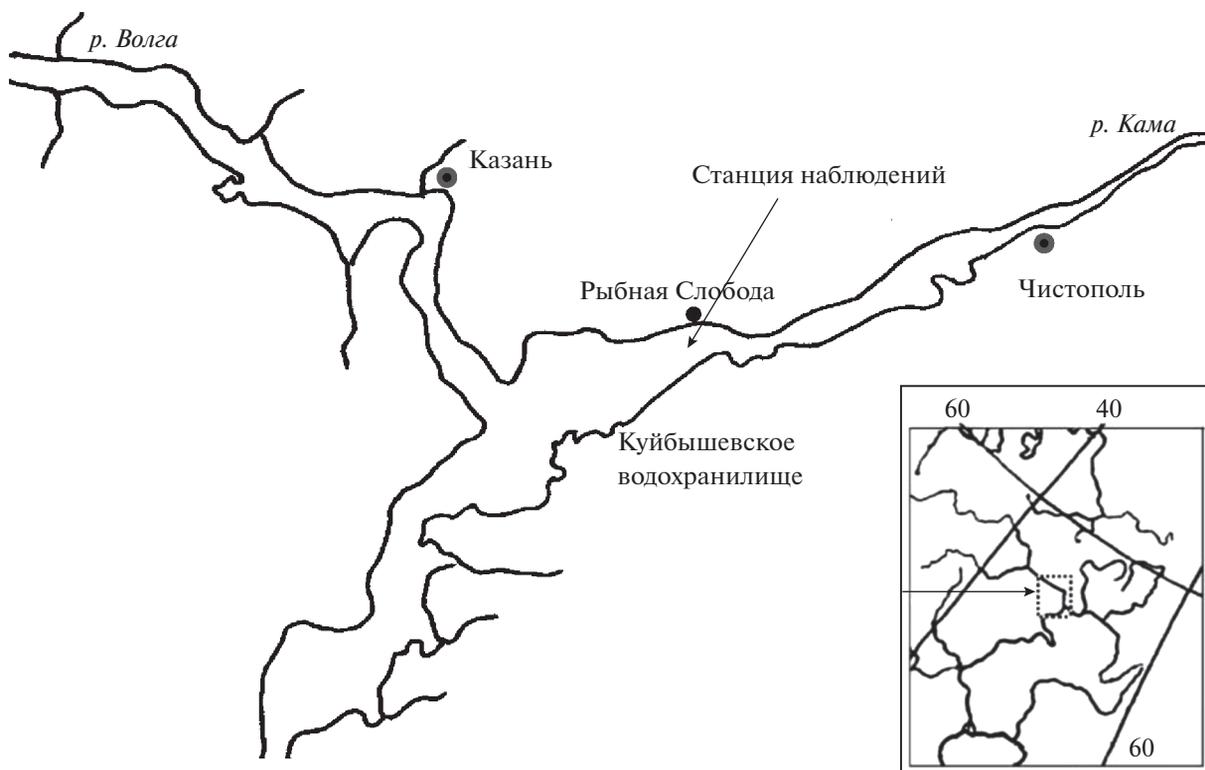


Рис. 1. Карта-схема расположения района исследований на р. Кама в 2017 г.

зываются и на гидрологических особенностях р. Кама, подверженной подпору в нижней части.

Питание реки преимущественно снеговое, также подземное и дождевое; за весеннее половодье (март–июнь) проходит >62.6% годового стока, летом и осенью – 28.3%, зимой – 9.1%. Размах колебаний уровня воды до 8 м в верховьях и 7 м в низовьях. Ледостав с начала ноября в верховьях и конца ноября в низовьях до апреля. В ионном составе камских вод часто преобладают сульфаты, минерализация колеблется от 168 до 674 мг/л (Водные..., 2006; Куйбышевское..., 2008).

Исследования планктонных водорослей проводили с май по октябрь 2017 г. на р. Кама (Камский залив Куйбышевского водохранилища). Станция постоянных наблюдений располагалась у правого берега на русле (фарватер) у населенного пункта Рыбная Слобода (рис. 1). В отличие от левого, берег на этом участке крут, и русло реки прижимается к коренному берегу. Берег изрезан оврагами, заросшими хвойными и лиственными лесами. На месте отбора проб глубина была 15–20 м.

Пробы отбирали один раз в неделю с борта маломерного судна с помощью батометра Молчанова ГР-18 (с объемом 4 л). Исследовали пробы с поверхности и интегрированные (смещение проб воды с поверхности и до 0.5 м, с границы зоны фотосинтеза, определенной с помощью диска Секки, 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; Algae-Base, 2000; Садчиков, 2003). Для количественного и качественного учета монадных и амeboидных форм, разрушающихся или деформирующихся при фиксации, пробы в день отбора фильтровали через мембранный фильтр и просматривали в живом состоянии. При этом, для сгущения фитопланктона применяли прибор вакуумного фильтрования для гидробиологических исследований в воде 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. Также параллельно отбирали пробы объемом 0.5 л, которые фиксировали 4%-ным раствором формалина. 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). Диатомовых водорослей идентифицировали в постоянных препаратах, используя автоэмиссионный микроскоп СЭМ MERLIN (Carl Zeiss). Подсчет организмов проводили по общепринятой методике в камере Горяева. Для определения биомассы использовали счетно-объемный метод. К доминирующим относили

виды с численностью или биомассой $\geq 10\%$ общих показателей.

Для каждой пробы вычисляли индекс трофности (ITS) по блоку Милиуса по формуле (Андронникова, 1993).

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

Для определения степени сапробности рассчитывали индекс сапробности (S_B) Пантле и Букка в модификации Сладечека (Sladecsek, 1973). За весь период исследований ежедневно регистрировали метеоусловия и гидрологические особенности района отбора проб. Также в ходе ежедневных наблюдений фиксировали и анализировали химический состав воды (анализы выполнены сотрудниками гидрохимической лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения «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 использован критерий Шапиро–Уилка (W). При этом было выявлено, что в интегрированных пробах некоторые показатели фитопланктона, такие как общая численность ($W = 0.94, p = 0.32$), численность ($W = 0.95, p = 0.46$) и биомасса ($W = 0.98, p = 0.93$) диатомовых водорослей имеют нормальное распределение. Также нормальное распределение было у следующих химических и физических показателей воды: уровень воды ($W = 0.91, p = 0.07$), прозрачность ($W = 0.98, p = 0.87$) и температура воды ($W = 0.94, p = 0.28$), взвешенные вещества ($W = 0.94, p = 0.28$), водородный показатель ($W = 0.91, p = 0.09$), растворенный кислород ($W = 0.95, p = 0.36$), азот аммонийный ($W = 0.93, p = 0.16$), ХПК ($W = 0.97, p = 0.84$) и общая жесткость ($W = 0.91, p = 0.08$). 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 12 версии системы STATISTICA.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматриваемый 2017 г. выдался холодным и многоводным. Обзор погодных условий приведен по данным Метеорологической обсерватории Казанского федерального университета (Обзор..., 2018). Хотя переход к весне был ранним и стремительным, и сильно опережал климатический график, весенние процессы в апреле замедлились. Май также оказался холодным и дождливым. По-

сле аномально холодного мая наблюдался аномально холодный июнь, который со среднемесячной температурой 16.4°C с самого начала был холодный и дождливый. Июль финишировал очень жаркой погодой, средняя месячная температура воздуха достигала 20.4°C и соответствовала многолетним значениям. Месяц выдался дождливым, выпало 63 мм осадков (92% многолетней месячной суммы). В первой декаде июля дожди разной интенсивности наблюдались ежедневно, сумма осадков превысила половину месячной суммы (55%). Вторая декада за исключением 18 июля выдалась сухой. Третья декада началась и завершилась прохождением через регион холодного фронта, сопровождаемого ливнями и грозами. Август был сухим и теплым, средняя месячная температура воздуха достигала 20.4°C (на 2.6° выше климатической нормы). Осадков выпало 29.5 мм (49% многолетней месячной суммы), основной вклад внесли ливень первого августа и продолжительный дождь 29 августа. Начиная со второй декады августа и почти до конца месяца, сохранялась устойчивая жаркая и сухая погода. В сентябре первые дни также были теплыми, а с четвертого сентября наступила климатическая осень. В регионе произошел устойчивый переход средней температуры через 15°C в сторону более низких значений и установилась осенняя погода. Октябрь выдался несколько теплее обычного, средняя температура воздуха была 5.3°C (на 1° выше климатической нормы).

Гидрологическая обстановка в Куйбышевском водохранилище сложилась таким образом, что весеннее половодье перешло в дождевой. Подъем уровня воды при весеннем наполнении начался 23 марта с отметки 48.92 м БС. Уже в конце апреля уровень воды был ~ 52.5 м, далее, после небольшого снижения в течение мая до 52 м, уровень стал подниматься и с небольшими колебаниями продержался на отметке 53.5 м с середины июня до конца июля. В дальнейшем уровень воды начал постепенно снижаться, и к концу сентября достиг 52.1 м. Затем, опять поднимаясь вплоть до зимних месяцев и начала 2018 г., 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. Кама. Холостой сброс воды осуществляли в течение четырех месяцев – с 21 апреля по 24 августа 2017 г., в результате чего расходы воды в летнюю межень значительно выросли превысили многолетнюю норму на $>50\%$. Таких высоких летних расходов не наблюдали за все время эксплуатации Куйбышевского водохранилища.

Столь существенное изменение водного режима в сочетании с погодными условиями не могло не повлиять на развитие фитопланктона. Увеличение биомассы водорослей лимитируется гидро-

Таблица 1. Физико-химические параметры поверхностных вод р. Кама в 2017 г.

Показатель	$M \pm SE$	min–max	m
Компонентный состав главных ионов			
Гидрокарбонаты, мг/л	126.57 ± 3.18	91.50–314.90	27.76
Общая жесткость, мг-экв/л	2.94 ± 0.19	1.92–16.50	1.69
Физические показатели			
Цветность, градус	68.09 ± 4.55	17.60–206.67	39.66
Взвешенные вещества, мг/л	12.76 ± 0.73	5.00–36.00	6.33
Прозрачность, см	130.00 ± 2.96	85.00–185.00	25.82
Температура воздуха, °С	16.68 ± 1.07	1.00–28.00	9.31
Температура воды, °С	17.93 ± 0.46	8.90–24.00	4.01
Водородный показатель	7.85 ± 0.03	7.00–8.42	0.25
Газовый режим			
Растворенный кислород, мг/л	8.55 ± 0.21	5.40–12.49	1.79
Биогенные и органические вещества			
Азот аммонийный, мг/л	0.58 ± 0.02	0.26–0.92	0.15
БПК 5, мг/л	1.94 ± 0.12	1.00–6.46	1.05
ХПК, мг/л	36.83 ± 1.41	5.30–61.00	12.26
Марганец, мг/л	0.03 ± 0.01	0.00–0.31	0.07
Азот нитратный, мг/л	1.60 ± 0.27	0.20–11.16	2.32
Азот нитритный, мг/л	0.03 ± 0.00	0.02–0.07	0.02
Фосфор общий, мг/л	0.03 ± 0.00	0.02–0.09	0.01

Примечание. Здесь и в табл. 2: M – среднее значение за период отбора проб, SE – стандартная ошибка среднего; m – средне-квадратическое отклонение показателей.

динамическим фактором в том случае, если скорость удвоения биомассы оказывается меньше скорости водообмена в водоеме (Даценко, 2007; Рахуба, 2020). Таким образом, в летний период 2017 г. в результате высокого пропуска воды на Жигулевском гидроузле условия для развития фитопланктона сложились более чем неблагоприятные.

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

В составе флоры р. Кама за период исследований выявлено 224 вида, разновидностей и форм водорослей: *Cyanophyta* – 23, *Chrysoophyta* – 8, *Bacillariophyta* – 75, *Xanthophyta* – 5, *Cryptophyta* – 4, *Dinophyta* – 9, *Euglenophyta* – 14, *Chlorophyta* – 86 (рис. 2). Флористически наиболее богато представлены отделы диатомовых (38% общего списка) и зеленых (34%) водорослей. Такое соотношение в целом характерно флоре планктона Куйбышевского водохранилища (Корнева, 2015), однако р. Кама выделяется несколько большим разнообразием и обилием именно диатомовых водорослей.

Удельное видовое богатство фитопланктона варьировало за период наблюдений от 6 до 28 видовых и внутривидовых таксонов в пробе (рис. 3).

С повышением температуры воды и воздуха флористическое богатство фитопланктона увеличивалось. Поскольку в ходе исследований анализировали, главным образом, планктонные пробы воды в русловой глубоководной части реки, выявленные виды водорослей относятся в большей части к фитопланктону.

Возрастание видового разнообразия происходило каждый раз при значительных колебаниях уровня воды, а также после обильных ливней и гроз. В эти периоды в воде можно было наблюдать не свойственных для русловой части реки бентосных диатомовых водорослей в большом количестве, а также представителей разных групп, которые обычно обитают в мелководных и заросших макрофитами заливах водохранилища (Халиуллина, Яковлев, 2015; Khaliullina, Demina, 2015). В такие моменты в воде становилось много видов жгутиковых водорослей отделов эвгленовых, динофитовых, золотистых и зеленых. По-видимому, их вымывало и приносило в русловые участки реки течением при снижении уровня воды и обильных осадках. В более стабильные периоды уровня воды в воде, в основном, содержались реофильные планктонные виды центрических диатомовых и сфероплеевых зеленых водорослей. Их постоянное присутствие в толще воды не прерывалось даже при самых ин-

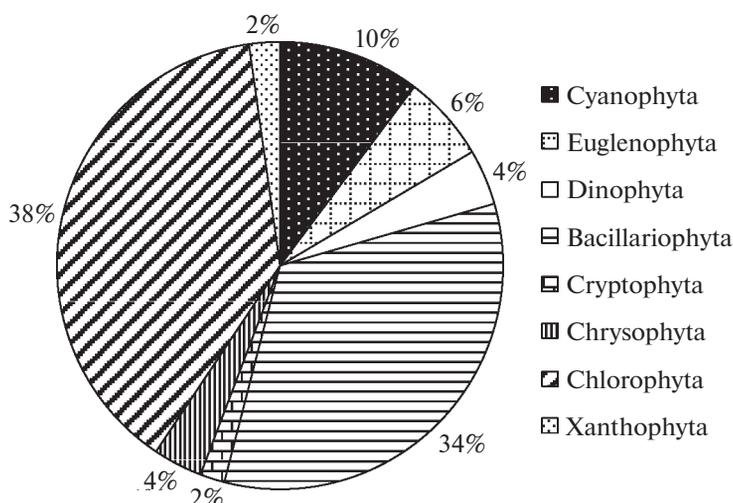


Рис. 2. Количество таксонов (% общего) в отдельных группах фитопланктона р. Кама (Камский залив Куйбышевского водохранилища) в 2017 г.

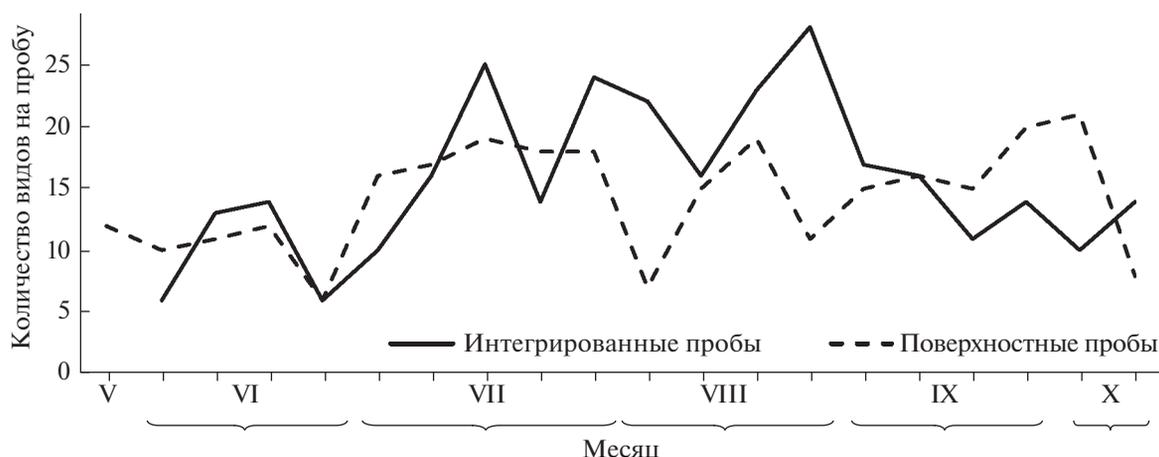


Рис. 3. Сезонная динамика количества таксонов фитопланктона на пробу р. Кама (Камский залив Куйбышевского водохранилища) в 2017 г.

тенсивных проявлениях “цветения” воды цианобактериями. Многие водоросли из всего списка встречались единично и были выявлены лишь в качественных пробах.

Для исследования качественных и количественных характеристик планктонных водорослей более информативны интегрированные пробы. Однако, если рассматривать лишь интегрированные пробы, то можно упустить из виду периоды “цветения” воды цианобактериями. Когда цианобактерии образуют массовые скопления на поверхности воды, в интегрированных пробах их количественные показатели могут оказаться невысокими (табл. 2).

Средняя общая численность фитопланктона в интегрированных пробах за период исследований достигала 1.89 ± 2.65 млн кл./л и варьировала в

пределах 0.22–4.41 млн кл./л. Средняя общая биомасса была 1.49 ± 0.20 мг/л, минимальные и максимальные значения колебались в пределах 0.32–4.25 мг/л (рис. 4). Весь период исследований в количественном отношении также доминировали диатомовые водоросли, уступая цианобактериям лишь в периоды интенсивного цветения воды. В процентном соотношении диатомовые составляли 32.79–98.70% общей численности и 51.18–97.64% общей биомассы. Лидировали типичные для Куйбышевского водохранилища центрические диатомеи *Aulacoseira italica* (Ehrenb.) Simonsen, *A. granulata* (Ehrenb.) Simonsen, *A. islandica* (O. Müll.) Simonsen, *A. distans* (Ehrenb.) Simonsen, *A. ambigua* (Grunow) Simonsen, *A. subarctica* (O. Müll.) E.Y. Haw, *Cyclotella meneghiniana* Kützing., *C. atomus* Hust., *Stephanodiscus astra*

Таблица 2. Средние значения показателей фитопланктона

Показатель	$M \pm SE$	min–max	m
Интегрированные пробы			
$N_{\text{общ}}$, млн кл./л:	1.88 ± 0.27	0.22–4.41	1.16
Cyanophyta	0.41 ± 0.13	0.00–1.70	0.55
Euglenophyta	0.01 ± 0.00	0.00–0.03	0.01
Dinophyta	0.02 ± 0.01	0.00–0.10	0.03
Bacillariophyta	1.07 ± 0.12	0.07–1.77	0.51
Cryptophyta	0.00 ± 0.00	0.00–0.03	0.01
Chrysophyta	0.03 ± 0.02	0.00–0.34	0.08
Chlorophyta	0.34 ± 0.07	0.02–1.06	0.30
$B_{\text{общ}}$, мг/л:	1.49 ± 0.20	0.32–4.25	0.87
Cyanophyta	0.04 ± 0.01	0.00–0.16	0.05
Euglenophyta	0.05 ± 0.02	0.00–0.26	0.09
Dinophyta	0.17 ± 0.07	0.00–1.11	0.29
Bacillariophyta	1.04 ± 0.10	0.22–1.81	0.43
Cryptophyta	0.00 ± 0.00	0.00–0.03	0.01
Chrysophyta	0.01 ± 0.01	0.00–0.14	0.03
Chlorophyta	0.18 ± 0.07	0.00–1.32	0.30
S_B	1.68 ± 0.06	1.21–1.97	0.24
ITS	47.28 ± 1.40	33.50–59.47	6.11
Поверхностные пробы			
$N_{\text{общ}}$, млн кл./л:	12.56 ± 10.80	0.19–206.77	47.07
Cyanophyta	11.42 ± 10.73	0.00–204.53	46.79
Euglenophyta	0.02 ± 0.01	0.00–0.18	0.04
Dinophyta	0.02 ± 0.01	0.00–0.16	0.04
Bacillariophyta	0.76 ± 0.15	0.07–2.93	0.65
Cryptophyta	0.00 ± 0.00	0.00–0.00	0.00
Chrysophyta	0.03 ± 0.01	0.00–0.13	0.04
Chlorophyta	0.32 ± 0.07	0.00–0.99	0.29
$B_{\text{общ}}$, мг/л:	2.07 ± 0.85	0.31–16.50	3.71
Cyanophyta	0.76 ± 0.71	0.00–13.45	3.08
Euglenophyta	0.13 ± 0.08	0.00–1.35	0.33
Dinophyta	0.21 ± 0.10	0.00–1.72	0.45
Bacillariophyta	0.83 ± 0.15	0.22–2.65	0.67
Cryptophyta	0.00 ± 0.00	–	0.00
Chrysophyta	0.01 ± 0.00	0.00–0.06	0.02
Chlorophyta	0.14 ± 0.04	0.00–0.74	0.18
S_B	1.60 ± 0.09	0.55–2.02	0.40
ITS	45.30 ± 2.38	33.18–73.14	10.36

Примечание. S_B – индекс сапробности по биомассе фитопланктона; ITS – индекс трофности по биомассе фитопланктона; $N_{\text{общ}}$ – общая численность; $B_{\text{общ}}$ – общая биомасса.

(Kützing) Grunow, *S. hantzschii* Grunow, *Diatoma tenuis* C. Agardh., *Asterionella formosa* Hassal, *Synedra acus* Kützing, *S. ulna* (Nitzsch) Ehrenberg, *Achnanthes* sp. sp., *Nitzschia acicularis* (Kützing) W. Smith,

N. palea (Kützing) W. Smith. Часто в фитопланктоне в массе находили виды обрастаний *Melosira varians* C. Agardh., *Diatoma vulgare* Bory, *Fragilaria construens* (Ehrenberg) Grunow.

Постоянно присутствовали в воде зеленые сфероплеевые планктонные водоросли *Coelastrum microporum* Nägeli, *Dictyosphaerium pulchellum* Wood, *Monoraphidium arcuatum* (Korschikov) Hindak, *Scenedesmus acuminatus* (Lagerheim) Chodat, *S. denticulatus* Lagerheim, *S. disciformis* (Chodat) Fott et Komárek, *S. quadricauda* (Turpin) Brébisson, *S. brasiliensis* Bohlin, *Crucigeniella rectangularis* (Nägeli) Komárek, *Crucigenia tetrapedia* (Kirchner) W. et G.S. West, *Ankistrodesmus falcatus* (Corda) Ralfs, *Lagerheimia genevensis* (Chodat) Chodat, *L. ciliata* (Lagerheim) Chodat, *Pediastrum boryanum* (Turpin) Meneghini, *P. duplex* Meyen, *P. simplex* Meyen, *Sphaerocystis planctonica* (Korschikov) Bourrelly, *Actinastrum hantzschii* Lagerheim. Также в доминирующий комплекс входили зеленые водоросли рода *Chlamydomonas*.

Цианобактерии в поверхностных пробах начали появляться уже со второй декады июня, однако часто не достигали значений доминирования. В периоды их появления преобладали *Aphanizomenon flos-aquae* (Linnaeus) Ralfs ex Bornet et Flahault, *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, *Anabaena flos-aquae* (Lyngbye) Brébisson, *A. affinis* Lemmermann, *A. planctonica* Brunthaler, *Oscillatoria planctonica* Wołoszyńska, *Gomphosphaeria lacustris* Chodat. Также довольно часто встречались *Gloeocapsa turgida* (Kützing) Hollerbach, *G. limnetica* (Lemmermann) Hollerbach, *Merismopedia elegans* A. Braun in Kützing, *M. glauca* (Ehrenberg) Kützing.

В сезонной динамике фитопланктона максимальные показатели численности и биомассы наблюдали со второй половины июля до сентября. Пока уровень воды в течение июня и июля оставался высоким и стабильным, близким к отметке 53.5 м, содержание водорослей в воде было умеренным. Большая часть суток этих месяцев были с дождями и грозами. В фитопланктоне преобладали вышеперечисленные центрические диатомовые и коккоидные зеленые водоросли. В этот период в воде также содержалось очень много трудно идентифицируемых мелких бесцветных разногугтиковых водорослей, вероятно, представителей желтозеленых водорослей. Также многочисленны были криптономановые *Cryptomonas ovata* Ehrenb., *Cryptomonas* spp. и мелкие *Chlamydomonas* spp., убывающие к середине июня. Встречена золотистая водоросль *Mallomonas* sp. Присутствовали немногочисленные цианобактерии *Microcystis aeruginosa*, *Gomphosphaeria lacustris*, *Gloeocapsa turgida*, *Merismopedia elegans*.

К концу второй декады июня возрастали численность и биомассы диатомовых. В этот период отмечена вспышка размножения зоопланктонных

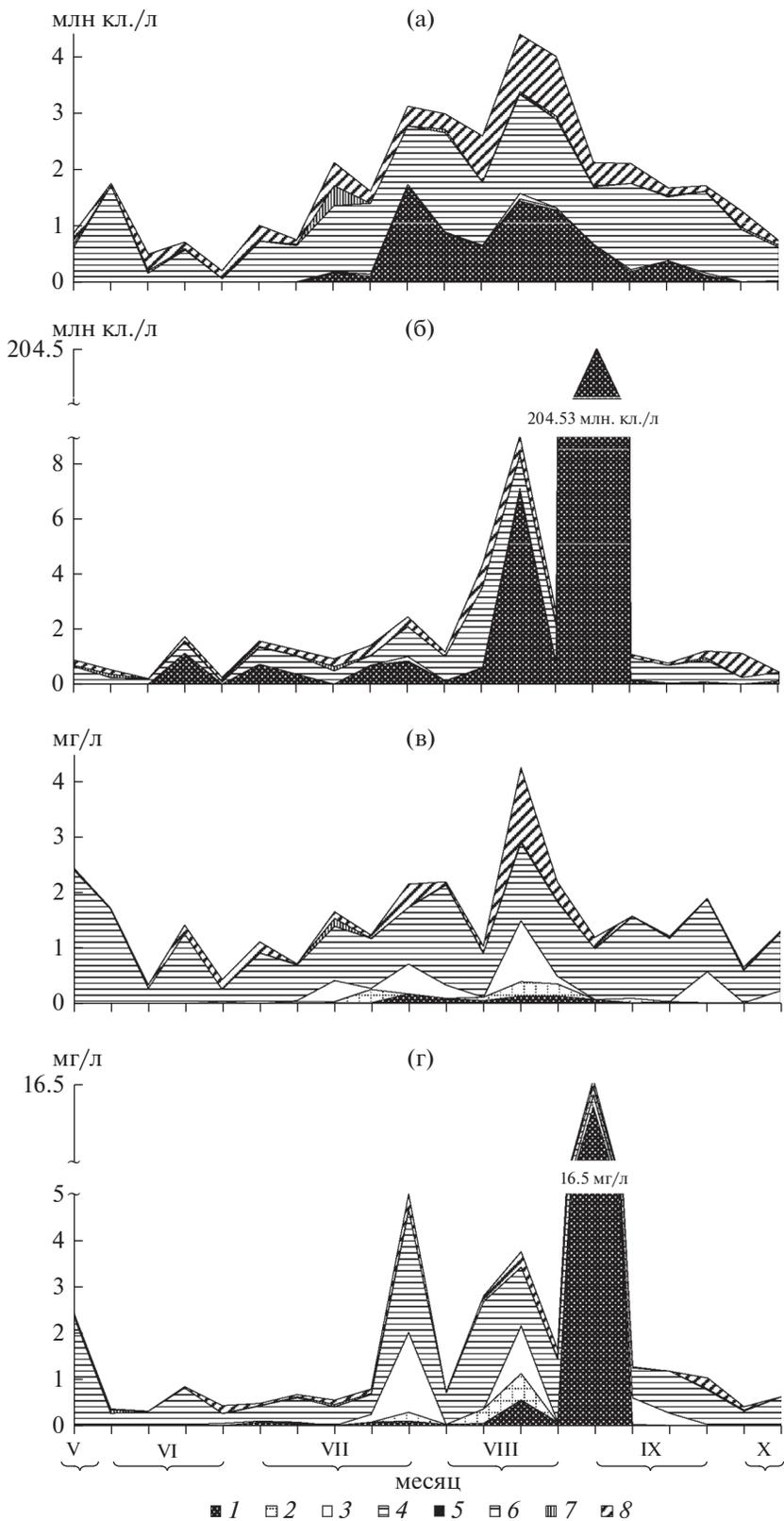


Рис. 4. Сезонная динамика численности (а, б) и биомассы (в, г) фитопланктона р. Кама (Камский залив Куйбышевского водохранилища) в 2017 г.: а, в – интегрированные пробы, б, г – пробы с поверхности. 1 – цианобактерии, 2 – эвгленовые, 3 – динофитовые, 4 – диатомовые, 5 – желтозеленые, 6 – криптофитовые, 7 – золотистые, 8 – зеленые водоросли.

организмов. К концу июня содержание криптонадовых и желтозеленых водорослей резко снизилось, далее их можно было обнаружить лишь единично и редко.

С середины июля началось интенсивное размножение цианобактерий, хотя визуально в толще воды они еще были мало заметны. Стояла жаркая погода, штиль, однако “цветения” воды на р. Кама не наблюдали. В это же время на р. Волга уже интенсивно “цвела” вода. В водах р. Кама цианобактерий, в основном, представляли *Anabaena flos-aquae*, *A. affinis*, *Aphanizomenon flos-aquae*. Эпизодически появлялась *Microcystis aeruginosa*, хотя ее доля была невысокой. Из зеленых преобладали зеленые сфероплеевые, также были многочисленны вольвоксовые крупные виды *Chlamydomonas* spp., *Pandorina morum* (O. Müller) Borgr. Появились золотистые *Dinobryon divergens* Jmhof, стало много криптонада.

В течение последней недели июля уровень воды в водохранилище стал резко падать и к началу августа достиг 53 м БС (снижение 0.5 м за неделю), на р. Кама наблюдали сильное течение. Эта ситуация мгновенно сказалась на развитии планктонных водорослей (был обусловлен первый максимум в сезонной динамике фитопланктона) и привела к существенным и резким изменениям видового состава фитопланктонного сообщества (рис. 5). В воде увеличилось содержание цианобактерий *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena flos-aquae* и *A. planctonica*, которые образовывали до 54.31% общей численности и 25.75% общей биомассы. На воде были видны пятна “цветения” в виде полос, но не повсеместно. По-видимому, скопления цианобактерий приносило течением в русловую часть реки из мелководий и заливов, поскольку в воде плавало много многокоренника обыкновенного (*Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid.) и фрагменты других высших растений. Также стало много динофитовых водорослей родов *Peridinium*, *Gymnodinium*, *Glenodinium* и зеленых вольвоксовых водорослей *Eudorina cylindrica* Korschikov, *E. elegans* Ehrenberg, *E. illinoisensis* (Kofoid) Pascher, *Pandorina morum*, *Chlamydomonas* spp., которые не характерны для глубоководных открытых участков р. Кама с быстрым течением (Халиуллина, Яковлев, 2015). Также увеличилось содержание диатомовых и возросло содержание бентосно-литоральных форм, особенно *Melosira varians*. В воде наблюдали значительное количество эвгленовых водорослей *Euglena acus* Ehrenberg, *E. viridis* Ehrenberg, *Trachelomonas* spp.

В течение следующей недели уровень воды стал подниматься (до 53.2 м БС), вследствие чего содержание водорослей всех групп пошла на убыль.

Очередная вспышка размножения фитопланктона всех представленных групп произошла

в 20-х числах августа. К этому времени уровень воды неуклонно снижался, а также перед этой вспышкой водохранилище претерпело довольно значительные колебания уровня воды. В воде опять появились водоросли обрастаний и в большом количестве обрывки высших водных растений. Судя по изменениям, происходящим в составе фитопланктона, течением принесло содержимое мелководных заливов с макрофитами. Далее на этой неделе (в последнюю неделю августа) наблюдали возрастание количественных показателей водорослей всех отделов. Были многочисленны динофитовые и эвгленовые водоросли. Заметно возросло разнообразие и биомасса зеленых водорослей, отмечено много вольвоксовых жгутиковых зеленых. Из цианобактерий преобладали *Anabaena flos-aquae*, *A. planctonica* и *Aphanizomenon flos-aquae*.

Самые интенсивные проявления размножения цианобактерий, которые привели к “цветению” воды, на р. Кама произошли на последней неделе августа (не охваченных проботором) и в первой неделе сентября. Перед этим “цветением” 29 августа в регионе прошли сильные ливни, также происходили значительные колебания уровня воды. Вода в водохранилище после некоторого подъема резко упала на 30 см, что и привело к такому интенсивному размножению цианобактерий. В это время наблюдали максимальные численность и биомассу цианобактерий, обусловленные размножением *Microcystis aeruginosa*, субдоминантами были *Anabaena flos-aquae* и *A. planctonica*. Численность и биомасса цианобактерий в поверхностных слоях достигали до 204.53 млн кл./л (98.9% общей численности) и 13.45 мг/л (81.56% общей биомассы). Также в воде появились в большом количестве зеленые вольвоксовые *Pandorina morum*, *Chlamydomonas* spp., *Phacotus lenticularis* Ehrenberg, динофитовые *Peridinium* sp. sp., *Gymnodinium* spp., эвгленовые водоросли *Trachelomonas* spp. Отмечено высокое содержание зоопланктонных организмов.

Следующее повышение численности и биомассы фитопланктона, обусловленное размножением диатомовых, динофитовых и зеленых вольвоксовых водорослей, наблюдалось в третьей декаде сентября. Цианобактерий в воде уже было немного, и в основном это были виды *Microcystis aeruginosa*.

Далее умеренное количество цианобактерий в воде наблюдали вплоть до конца октября, хотя значительных проявлений “цветения” больше не происходило. Несмотря на то, что с самого начала сентября наступила довольно холодная климатическая осень, что привело к снижению температуры воды, еще долгое время в толще воды вегетировали *Microcystis aeruginosa* и *Aphanizomenon flos-aquae*. Также в первой декаде октября в водохрани-

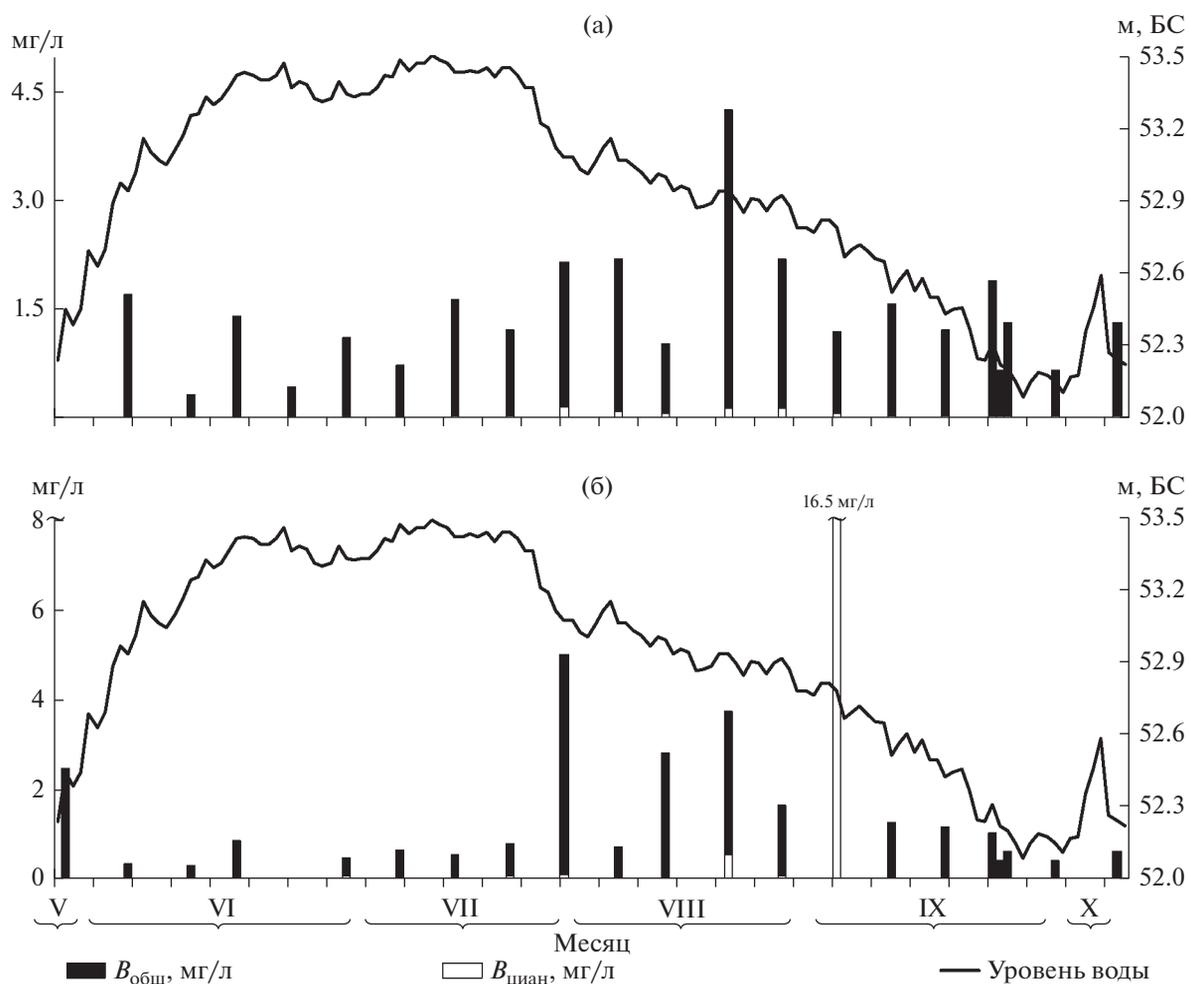


Рис. 5. Изменение биомассы (B) фитопланктона в зависимости от динамики уровня воды (м, БС) р. Кама в 2017 г.: а – интегрированные пробы, б – пробы с поверхности.

лише резко повысился на 40 см уровень воды, который затем резко упал. Несмотря на низкие температурные условия, это событие мгновенно привело к вспышке размножения *Aphanizomenon flos-aquae*. Также до самой глубокой осени в воде продолжали вегетировать и были многочисленны виды *Chlamydomonas*.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным настоящего исследования, истинно камские водоросли – это центрические диатомовые, зеленые сфероплеевые, а также цианобактерии, которые массово развиваясь, вызывают “цветение” воды при определенных условиях, таких как повышение температуры воды и воздуха, интенсивность солнечной радиации, колебания и неуклонное снижение уровня воды. Динофитовые, эвгленовые и жгутиковые колониальные зеленые водоросли привносятся течением в русловые участки при снижении и колебаниях уровня

воды, а также в результате ливней и гроз из мелководных заливов, которые вносят значительный вклад в разнообразие структуры альгоценозов.

В наблюдаемый год в сезонной динамике фитопланктона р. Кама выявлено два пика численности и биомассы – в летний и летне-осенний периоды. Как правило, “цветение” воды обусловлено массовым развитием цианобактерий родов *Microcystis*, *Aphanizomenon* и *Anabaena*, причем представители этих трех родов обычно не встречаются одновременно.

В ходе работы исследован и проанализирован ряд основных гидрохимических и гидрофизических показателей реки, динамика некоторых из них приведена на рис. 6. Также рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена между показателями фитопланктона, гидрохимическими и гидрофизическими показателями воды, и получены некоторые зависимости. В большинстве случаев эти зависимости подтверждены и расчетами коэффициента корреляции Пирсона. С

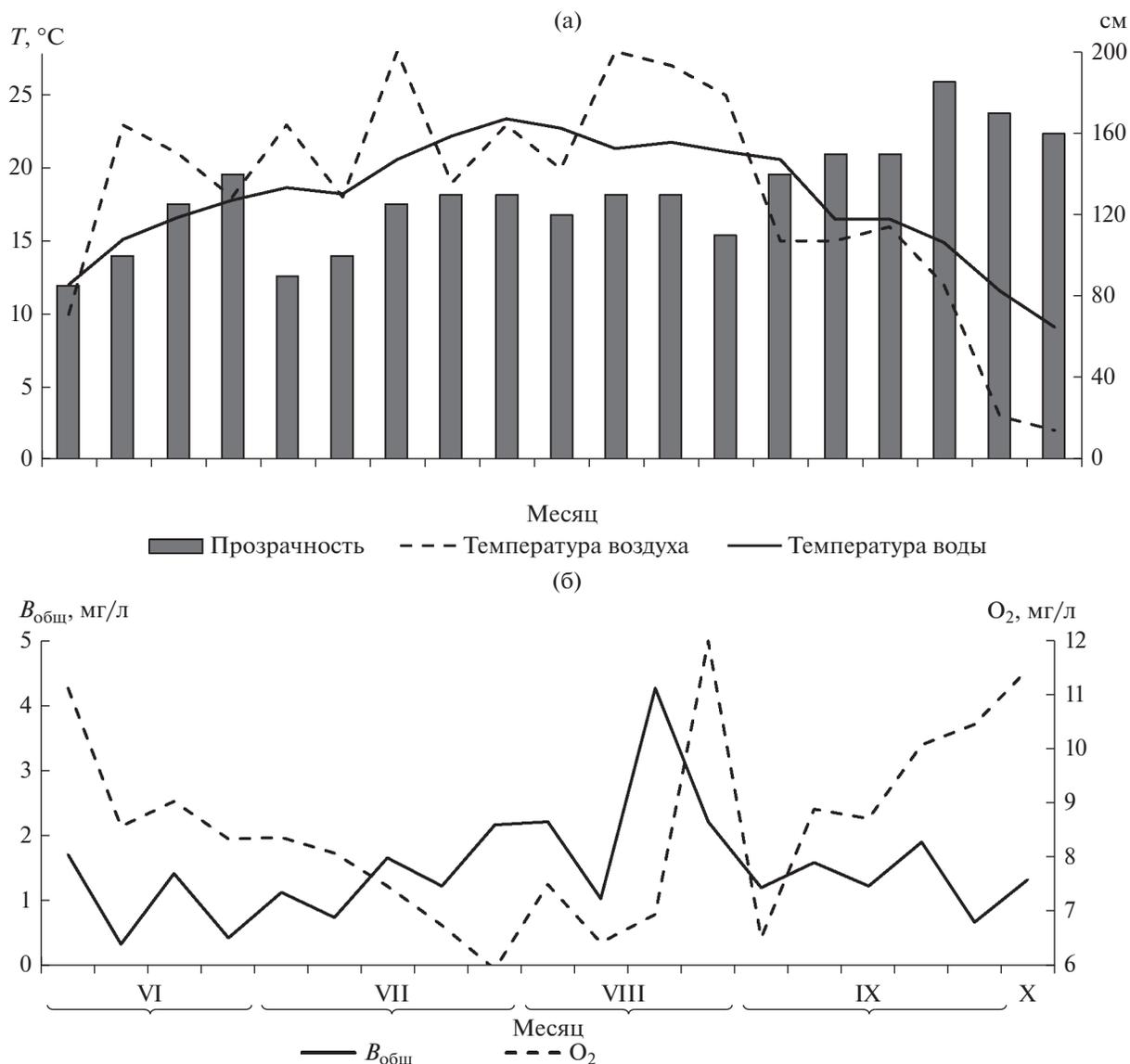


Рис. 6. Динамика основных гидрохимических и гидрофизических показателей р. Кама в 2017 г.: а – температуры воздуха и воды (T), прозрачности воды (см); б – растворенного кислорода в воде (O_2) и биомассы ($B_{\text{общ}}$) фитопланктона в интегрированных пробах р. Кама.

уровнем воды отрицательно взаимосвязаны прозрачность воды ($r = -0.6$), водородный показатель ($r = -0.8$), общая жесткость ($r = -0.9$), азот нитратный ($r = -0.6$) и ХПК ($r = -0.5$). Также уровень воды коррелирует с взвешенными веществами ($r = 0.7$) и аммонийным азотом ($r = 0.8$).

Численность и биомасса водорослей всех отделов растут однозначно с повышением температуры воды ($r = 0.6$) и нитритным азотом ($r = 0.7$), причем, изменения температуры воздуха и содержания водорослей в летне-осенний период напрямую не связаны. Прогревание воздуха ($r = 0.6$) и воды ($r = 0.7$) особенно положительно коррелировали на развитии коккоидных зеленых водорослей. Отрицательную корреляцию ($r = -0.5$)

наблюдали между количественными показателями криптофитовых водорослей и гидрокарбонатами. При увеличении биомассы диатомовых водорослей в воде растет химическое потребление кислорода ($r = 0.5$). Между показателями фитопланктона и общего фосфора прямые корреляционные связи не выявлены.

Влияние гидрофизических и гидрохимических факторов на развитие водорослей в настоящее время довольно хорошо изучено и выявлены основные закономерности, однако, существует ряд мнений, что ключевым моментом начала развития фитопланктона является световой фактор (уровень солнечной радиации, попадающей в толщу водоема) (Корсак и др., 2009). В данной работе

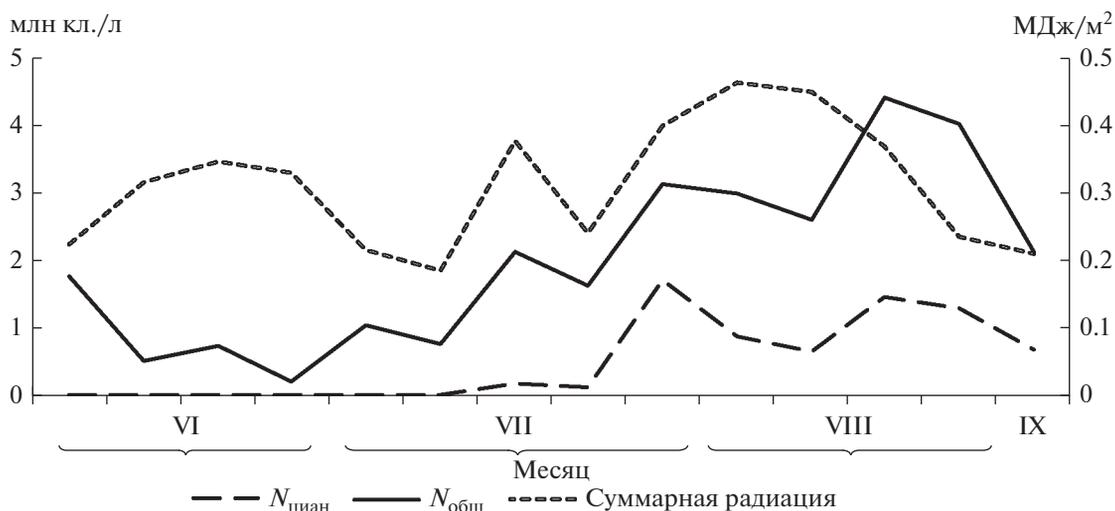


Рис. 7. Динамика суммарной солнечной радиации (МДж/м²), общей численности фитопланктона ($N_{общ}$) и численности цианобактерий ($N_{циан}$) (млн кл./л) в интегрированных пробах р. Кама в 2017 г.

проанализирована динамика посуточных измерений суммарной солнечной радиации (рис. 7). Хотя график, описывающий динамику солнечной радиации, в целом повторяет таковой динамики численности фитопланктона, корреляционный анализ результатов посуточных измерений солнечной радиации, показателей фитопланктона и основных биогенных элементов не обнаружил статистически значимой связи (при $p < 0.05$) между исследуемыми параметрами.

Процессы формирования условий, благоприятных для массового размножения отдельных видов планктонных водорослей, носят комплексный характер и связаны и с биологическими, и с физико-гидрохимическими факторами, при этом значимость этих факторов различна (Сахарова, Корнева, 2018). Полученные в ходе настоящих исследований результаты показывают, что основное регулирующее влияние на развитие фитопланктона Камского залива Куйбышевского водохранилища оказывают уровеньный режим и солнечная радиация. Судя по гидрографу и графикам динамики водорослей, каждый эпизод колебаний уровня воды с последующим снижением, приводит к вспышке размножения планктонных водорослей. Чаще всего это происходит за счет вымывания из мелководных заливов органических соединений и видов водорослей, которые массово развиваются на мелководных участках. При этом, как показывают наблюдения, сами по себе ветра и шторма не сильно влияют на содержание водорослей в воде. В штилевую солнечную погоду цианобактерии массово скапливаются на поверхности, образуя пятна "цветения". Однако после эпизодов колебания уровня воды, если даже будут продолжительные ветра и грозы, содержание цианобактерий не снижается, они лишь

распределяются в толще воды, что наглядно показывают интегрированные пробы.

Хотя в наших исследованиях анализ показателей фитопланктона и значений основных факторов среды, оказывающих влияние на динамику фитопланктона (уровенный режим, интенсивность падающей солнечной радиации и содержание биогенных элементов – азота и фосфора), показал отсутствие статистически значимой связи между величинами этих параметров, графики, построенные по эмпирическим данным, свидетельствуют, что это взаимосвязанные процессы. В природе такого рода причинно-следственные связи 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 крайне сложно установить статистически достоверные зависимости между изучаемыми параметрами такого рода.

По результатам исследований, воды исследуемого участка р. Кама в течение большей части вегетационного сезона соответствовали мезосапробному типу и умеренно-загрязненной зоне (рис. 8). Трофический статус вод, определенный по биомассе фитопланктона, прозрачности воды и по содержанию общего фосфора, большей частью соответствовал мезотрофному, а в периоды максимального развития планктонных водорослей часто и эвтрофному типу.

На сегодня крайне актуально выявление наиболее значимых факторов, влияющих на процессы эвтрофикации и развитие водорослей Куйбы-

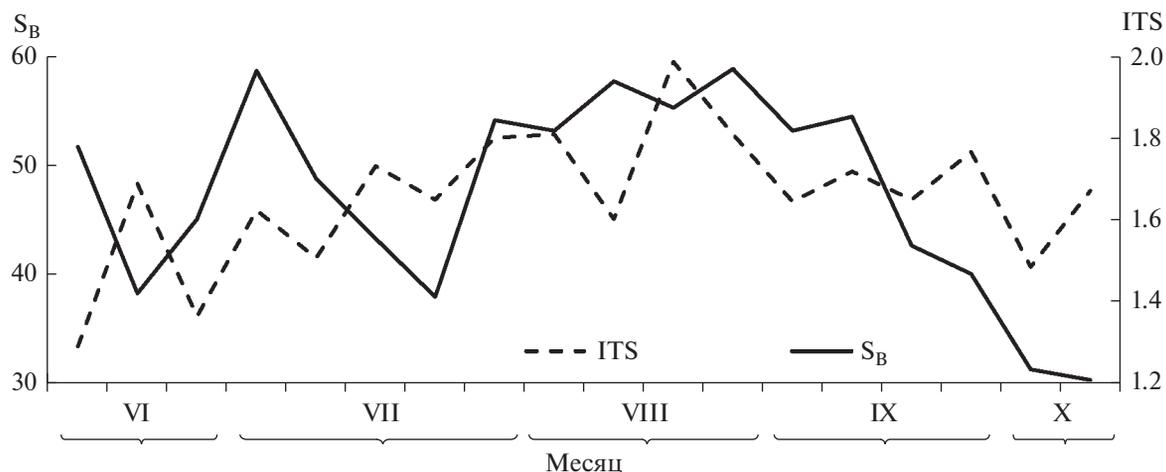


Рис. 8. Динамика индекса трофности (ITS) и сапробности (S_B) по биомассе (B) фитопланктона в интегрированных пробах р. Кама.

шевского водохранилища. Самый же значимый фактор, которым можно управлять и который определяет внутриводоемные процессы водохранилища, – водный режим (режим водного притока и регулирование стока гидроузлом, проточность, а также морфометрические особенности водоема). Чтобы управлять этими факторами, необходимы прогностические расчеты при разных вариантах регулирования речного стока Куйбышевского водохранилища и систем уравнений, связывающих качественный и количественный состав гидробионтов с гидрохимическими, морфометрическими и гидрофизическими параметрами водохранилища, которые отражали бы поведение доминирующих видов гидробионтов и динамику водной экосистемы в целом. При исследованиях таких сложных водных экосистем, как Куйбышевское водохранилище, для получения достоверных и репрезентативных данных, их необходимо собирать в ходе непрерывного мониторинга многолетней динамики. Поэтому мониторинговые исследования фитопланктона Куйбышевского водохранилища на этой же станции р. Кама, а также на реках Волга и Казанка будут продолжены.

Выводы. В фитопланктоне р. Кама (Камский залив Куйбышевского водохранилища) доминируют центрические диатомовые, зеленые сфероплеевые, а также цианобактерии, которые массово развиваясь, вызывают “цветение” воды. В сезонной динамике фитопланктона выявлено два пика численности и биомассы – в летний и летне-осенний периоды. “Цветение” воды обусловлено массовым развитием цианобактерий родов *Microcystis*, *Aphanizomenon* и *Anabaena*. Наиболее значимыми факторами, которые влияют на интенсивность развития фитопланктона, являются повышение температуры воды и воздуха, интенсив-

ность солнечной радиации, колебания и неуклонное снижение уровня воды. Воды исследуемого участка реки соответствуют мезосапробному типу и умеренно-загрязненной зоне. Трофический статус вод соответствует мезотрофному, в периоды максимального развития планктонных водорослей – эвтрофному типу.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам гидрохимической лаборатории ФГБУ “Средволгаводхоз” (г. Казань) за помощь в обработке гидрохимических проб, а также сотрудникам метеорологической обсерватории Казанского федерального университета за представленные данные.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андроникова И.Н. 1993. Теоретические вопросы классификации озер. Санкт-Петербург: Наука.
- Водоросли. 1989. Справочник. Киев: Наукова думка.
- Водные объекты Республики Татарстан // Гидрографический справочник. 2006. Казань: Изд-во “Идел-пресс”. С. 35.
- Вырчалкина 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., Косинская Е.К., Полянский В.И. 1953. Синезеленые водоросли // Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 2. Москва: Сов. наука.

- Даценко Ю.С. 2007. Эвтрофирование водохранилищ: гидролого-гидрохимические аспекты. Москва: 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.
- Джайяни Е.А. 2020. Межгодовые изменения фитопланктона Ириклинского водохранилища // Биология внутр. вод. № 5. С. 450. <https://doi.org/10.31857/S0320965220050022>
- Корнева Л.Г. 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом.
- Корсак М.Н., Мошаров С.А., Скоробогатов А.М. и др. 2009. Влияние суммарной солнечной радиации на весеннее "цветение" фитопланктона в Учинском водохранилище // Вест. Мос. ун-та. Сер. 16. Биология. № 1. С. 41.
- Куйбышевское водохранилище (Научно-информационный справочник). 2008. Тольятти: Ин-т экологии Волжск. бассейна РАН.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. 1975. Москва: Наука.
- Обзор погодных условий в г. Казани по данным метеостанции Казань-университет / Метеорологическая обсерватория КФУ. 2018. Режим доступа: <https://kpfu.ru/ecology/struktura/otdelenie-ecology-yafii-i-turizma/kafedra-meteorologii-klimatologii-i-ekologii/meteorologicheskaya-observatoriya/obzorpogody>. Дата доступа: 08.03.2018.
- Рахуба А.В. 2020. Оценка влияния гидродинамического режима на развитие фитопланктона и качество воды Куйбышевского водохранилища // Уч. зап. Казан. ун-та. Серия Естественные науки. Т. 162. Кн. 3. С. 430.
- Садчиков А.П. 2003. Методы изучения пресноводного фитопланктона. Москва: Университет и школа.
- Сахарова Е.Г., Корнева Л.Г. 2018. Фитопланктон литорали и пелагиали Рыбинского водохранилища в годы с разными температурным и уровнем режимами // Биология внутр. вод. № 1. С. 11. <https://doi.org/10.7868/S0320965218010023>
- Халиуллина Л.Ю., Яковлев В.А. 2015. Фитопланктон мелководий в верховьях Куйбышевского водохранилища. Казань: Изд-во АН РТ.
- AlgaBase is a database of information on algae that includes terrestrial, marine and freshwater organisms. 2000. Режим доступа: <http://algabase.org>. Дата доступа: 16.07.2021.
- 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.
- Sladeczek V. 1973. System of water quality from the biological point of view // Arch. Hydrobiol., Beiheft., Ergebnisse der Limnol. Bd 7.

Features of the Seasonal Dynamics of Phytoplankton in the River Kama (Kuibyshev Reservoir) in 2017

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

¹Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan, Russia
*e-mail: liliya-kh@yandex.ru

The influence of abiotic factors on the seasonal dynamics of phytoplankton has been studied. An assessment of the trophic state of the river is given. Kama (Kama Bay of the Kuibyshev Reservoir). The seasonal values of the main environmental factors influencing the dynamics of phytoplankton (level regime, intensity of incident solar radiation, a number of basic hydrochemical and hydrophysical indicators) are analyzed. The waters of the study area of the river. Kama during most of the growing season corresponded to the mesosaprobic type and moderately polluted zone.

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