

## АБИОТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ ФИТОПЛАНКТОНА ВОДОХРАНИЛИЩ СРЕДНЕЙ ВОЛГИ

© 2022 г. Н. М. Минеева<sup>а</sup>, \*, С. А. Поддубный<sup>а</sup>, И. Э. Степанова<sup>а</sup>, А. И. Цветков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук, пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, Россия

\*e-mail: mineeva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 22.08.2021 г.

После доработки 19.04.2022 г.

Принята к публикации 21.04.2022 г.

По данным полевых наблюдений в летний период 2015–2020 гг. рассмотрена межгодовая и многолетняя изменчивость абиотических характеристик и содержания хлорофилла в водохранилищах Средней Волги. Выявлено увеличение прозрачности воды от  $1.2 \pm 0.1$  м в Горьковском водохранилище до  $1.5 \pm 0.1$  м в Куйбышевском, электропроводности – с  $206 \pm 2$  до  $315 \pm 7$  мкСм/см и снижение цветности с  $53 \pm 1$  до  $38 \pm 1$  град, отражающие зональные особенности волжского каскада. Температура воды зависит от локальных погодных условий. Концентрация  $P_{\text{общ}}$  увеличивается с  $68 \pm 3$  мкг/л в Горьковском водохранилище до  $145 \pm 7$  мкг/л в Куйбышевском, концентрация  $N_{\text{общ}}$  ( $1.08 \pm 0.05$ – $1.14 \pm 0.06$  мг/л) изменяется незначительно. Содержание Хл *a* в Горьковском, Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах достигает в среднем  $10.9 \pm 0.7$ ,  $26.7 \pm 3.9$  и  $9.2 \pm 1.0$  мкг/л соответственно, характеризуется широким диапазоном величин и их межгодовой изменчивостью. Трофический статус Горьковского и Куйбышевского водохранилищ в разные годы меняется от мезотрофного до умеренно эвтрофного и эвтрофного, Чебоксарское водохранилище на протяжении всего шестилетнего периода характеризуется как эвтрофное. Невысокие коэффициенты корреляции между содержанием Хл *a* и абиотическими характеристиками свидетельствуют о сложном и многокомпонентном влиянии внешних условий на развитие фитопланктона.

**Ключевые слова:** водохранилища Средней Волги, гидрологические и гидрохимические факторы, хлорофилл, фитопланктон

**DOI:** 10.31857/S0320965222060158

### ВВЕДЕНИЕ

Пространственно-временная динамика биологических сообществ находится в тесной связи с условиями внешней среды, влияние которой по-разному проявляется в водоемах разного типа. Изучение взаимосвязи биотических и абиотических факторов, необходимое для характеристики состояния водоемов, формирования их биологической продуктивности и изменения трофического статуса, становится особенно актуальным в период климатических изменений (Второй..., 2014), затронувших водные экосистемы мира (Adrian et al., 2009; Vertani et al., 2016; Özkan et al., 2016).

В комплексную оценку состояния водных экосистем входит обязательное изучение автотроф-

ного звена. В крупных озерах и водохранилищах, в том числе и водохранилищах р. Волги, водоросли планктона продуцируют основной фонд автотрофного органического вещества, выполняя индикаторную и средообразующую функции (Романенко, 1985; Минеева, 2009). К приоритетным показателям развития и функционирования фитопланктона относится содержание основного пигмента зеленых растений Хл *a* – универсального эколого-функционального маркера, позволяющего оценивать также трофический статус водоема и качество воды (Китаев, 2007).

Для анализа и прогноза изменений, происходящих в биологических сообществах, необходимы регулярные наблюдения, которыми охвачены многие водоемы мира (Ruggiu et al., 1998; Kangur et al., 2002; Chen et al., 2003; Babanazarova, Lyashenko, 2007; Canfield et al., 2018; Lamont et al., 2019; Gao et al., 2020 и др.). На водохранилищах Средней Волги ведутся многолетние экологические исследования гидрологического и гидрохимического режима, а также продуктивности фитопланктона, в том

**Сокращения:** БЭ – биогенные элементы; Хл *a* – хлорофилл *a*; *F* – критерий Фишера, *n* – число наблюдений;  $N_{\text{общ}}$  – общий азот;  $N-NO_3^-$  – азот нитратов; *p* – уровень значимости,  $P_{\text{общ}}$  – общий фосфор;  $P-PO_4^{3-}$  – фосфор фосфатов; *r* – коэффициент корреляции Пирсона;  $r_s$  – коэффициент ранговой корреляции Спирмена,  $R^2$  – коэффициент детерминации;  $C_v$  – коэффициент вариации.



Рис. 1. Карта-схема водохранилищ Средней Волги. 1 – станции наблюдения, 2 – границы водохранилищ.

числе – фотосинтетических пигментов (Охупкин, 1994; Паутова, Номоконова, 1994; Охупкин и др., 1997; Экология..., 1989; Минеева, 2004; Куйбышевское..., 2008). Полученные материалы дают представление о состоянии и развитии экосистем, демонстрируя стабильный трофический статус Чебоксарского водохранилища и его межгодовые изменения в Горьковском и Куйбышевском. Однако исследования связи продуктивности фитопланктона водохранилищ с абиотическими факторами единичны (Минеева, 2004; Минеева, и др., 2008; Копылов и др., 2020). В последние годы в ходе комплексных волжских экспедиций Института биологии внутренних вод РАН получены новые данные, которые дополняют наблюдения предыдущих лет и лежат в основе многолетнего мониторинга экосистем крупных искусственных водоемов.

Цель работы – анализ связи содержания Хл *a* с факторами среды в водохранилищах Средней Волги в современных условиях глобальных климатических изменений.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал собирали в августе 2015–2020 гг. на 13 станциях Горьковского, 9 станциях Чебоксарского и 14 станциях Куйбышевского водохранилищ,

большинство которых расположено по руслу р. Волги (рис. 1). Хл *a* определяли стандартным спектрофотометрическим методом (SCOR-UNESCO, 1966) в пробах воды, отобранных батометром длиной 1 м интегрировано от поверхности до дна. Прозрачность воды измеряли диском Секки, цветность – по стандартной хром-кобальтовой шкале. Температуру и электропроводность определяли с помощью многопараметрического зонда YSI ProPlus (YSI Inc., USA, 2016) по всей водной толще от поверхности до дна с шагом 1 м. Содержание БЭ определяли в пробах воды из верхнего 0.5-метрового слоя, согласно методикам в работе (Минеева и др., 2021). Данные по притоку в водохранилища взяты с сайта<sup>1</sup>, по температуре воздуха и количеству осадков – из архива погоды <https://rp5.ru/>. Средние многолетние климатические, гидрофизические и гидрохимические характеристики водохранилищ приведены по материалам работ (Охупкин, 1994; Охупкин и др., 1997; Куйбышевское..., 2008).

Для статистической обработки данных (дисперсионного, регрессионного, парного и множественного корреляционного анализов), а также построения графиков использовали стандартные компьютерные программы. Вариабельность при-

<sup>1</sup> <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/?date>

знаков оценивали с помощью  $C_v$ , значения которого  $<0.3$ ,  $0.3-0.7$  и  $>0.7$  отражали соответственно слабую, умеренную или сильную степень изменчивости. При сравнении малых выборок ( $n < 30$ ) использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Горьковское, Чебоксарское и Куйбышевское водохранилища, общая протяженность которых  $\sim 1280$  км (от  $58^{\circ}03'$  с.ш.,  $38^{\circ}50'$  в.д. до  $53^{\circ}31'$  с.ш.,  $49^{\circ}25'$  в.д), занимают внутрикаскадное положение, относятся к очень крупным неглубоким проточным водоёмам (площадь зеркала соответственно 1591, 1270 и 6150 км<sup>2</sup>, объем 8.70, 12.60 и 57.30 км<sup>3</sup>, средняя глубина 5.5, 4.7, 9.3 м, коэффициент условного водообмена 6.1, 20.9 и 4.2 год<sup>-1</sup>) (Авакян и др., 1987). Горьковское водохранилище и левый берег Чебоксарского расположены в подзоне южной тайги в условиях избыточной увлажненности, правый берег Чебоксарского и верхняя часть Куйбышевского водохранилища – в подзоне смешанных хвойных и широколиственных лесов, основная акватории последнего южнее г. Казань – в лесостепной зоне (Гидрометеорологический..., 1975, 1978; Волга..., 1978).

Среднегодовой объем притока в Горьковском водохранилище равен 55.4 км<sup>3</sup> и на 70–90% сформирован волжскими водами, поступающими из вышележащего Рыбинского водохранилища. В Чебоксарском водохранилище  $\sim 44\%$  притока, общий объем которого 119 км<sup>3</sup>, приходится на сток р. Волги, 40% – р. Оки и 13.5% – рек Ветлуга и Сура. Более минерализованный окский поток, не смешивающийся с волжским, прижат к правому берегу и прослеживается на большом протяжении ниже устья р. Оки. В Куйбышевском водохранилище при среднем объеме притока 254 км<sup>3</sup> сток р. Камы составляет 41.2% и близок к волжскому (45.5%). Средняя за многолетний период температура воды в июле–августе в Горьковском, Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах достигает соответственно 19.7, 18.5–19.5 и 20.6°C (Гидрометеорологический..., 1978; Литвинов, Законнова, 1994; Охупкин, 1994; Охупкин и др., 1997; Куйбышевское..., 2008). Водоохранилища расположены в густонаселенных промышленных регионах Европейской России и испытывают значительную антропогенную нагрузку (Rivers..., 2021).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шестилетний период наблюдения в многолетнем ряду в целом характеризовался как теплый, однако региональные климатические условия определили межгодовые погодные различия. В бассейне Средней Волги температура воздуха летом была выше средней многолетней в 2016 и 2018 гг. и ниже этого показателя в 2019 г. для всего региона, а в 2017 г. – для района Горьковского водохра-

нилища (пункт г. Кострома). Локальное количество осадков за летние месяцы и вегетационный сезон (май–октябрь) в 2015–2017, 2019, 2020 гг. превышало норму в 1.2–1.9 раза и составляло 62–85% нормы в 2018 г. Годы исследования характеризовались различной водностью. Объем притока в мае–октябре был ниже среднего многолетнего (65–84% нормы) для Горьковского водохранилища в 2015 г., Чебоксарского в 2015 и 2019 гг., Куйбышевского – в 2019 г., на 25–30% превышал норму в 2017 и 2020 гг. в Горьковском водохранилище, в 2017 г. – в Куйбышевском и был близок к средним показателям в остальные сроки.

В годы с различными погодными условиями в водохранилищах выявлены различия гидрологических и гидрохимических характеристик. Средняя температура воды в августе 2015, 2019 и 2020 гг. ( $18.3-18.6^{\circ}\text{C}$ ) была ниже многолетних показателей и существенно ниже, чем в 2016–2018 гг. ( $21.2-23.2^{\circ}\text{C}$ ). При близких предельных значениях и невысокой изменчивости в каждом водохранилище (табл. 1) ход температуры на всем исследованном участке в годы наблюдения различен. В 2015 и 2018 гг. температура мало менялась в трех водохранилищах; в 2016, 2017 гг. возрасла, а в 2020 г. снижалась вниз по течению; в 2019 г. увеличивалась от Горьковского водохранилища к Чебоксарскому и снижалась в Куйбышевском. Межгодовые различия нарушают осредненный температурный ход, для которого получен невысокий  $R^2$  (рис. 2а).

Прозрачность воды увеличивалась от 1.2 м в Горьковском водохранилище до 1.5 м в Куйбышевском. Четкий линейный тренд прозрачности выявлен для отдельных лет и при осреднении данных за весь период исследования. Цветность воды монотонно снижалась от Горьковского водохранилища к Куйбышевскому, изменяясь в среднем от  $<40$  град в 2015, 2016 и 2019 гг. до  $>50$  град в 2017 и 2020 гг. Электропроводность, средние величины которой достигали 250–290 мкСм/см, резко возрасла в Чебоксарском водохранилище за счет поступления высокоминерализованных окских вод и незначительно снижалась в Куйбышевском, куда поступает второй крупнейший волжский приток – р. Кама (рис. 2б–2г). Величины  $C_v$  были 10–12% для температуры воды, не превышали 34% для прозрачности и цветности, а в Горьковском и Куйбышевском водохранилищах – для электропроводности, более изменчивой в Чебоксарском (табл. 1).

Основные биогенные элементы по-разному распределялись в водохранилищах Средней Волги. Количество  $N_{\text{общ}}$  сохранялось на относительно стабильном уровне – в среднем для всего участка 1.1–1.3 мг/л. При близких средних показателях верхний предел  $N_{\text{общ}}$  увеличивался в Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах.

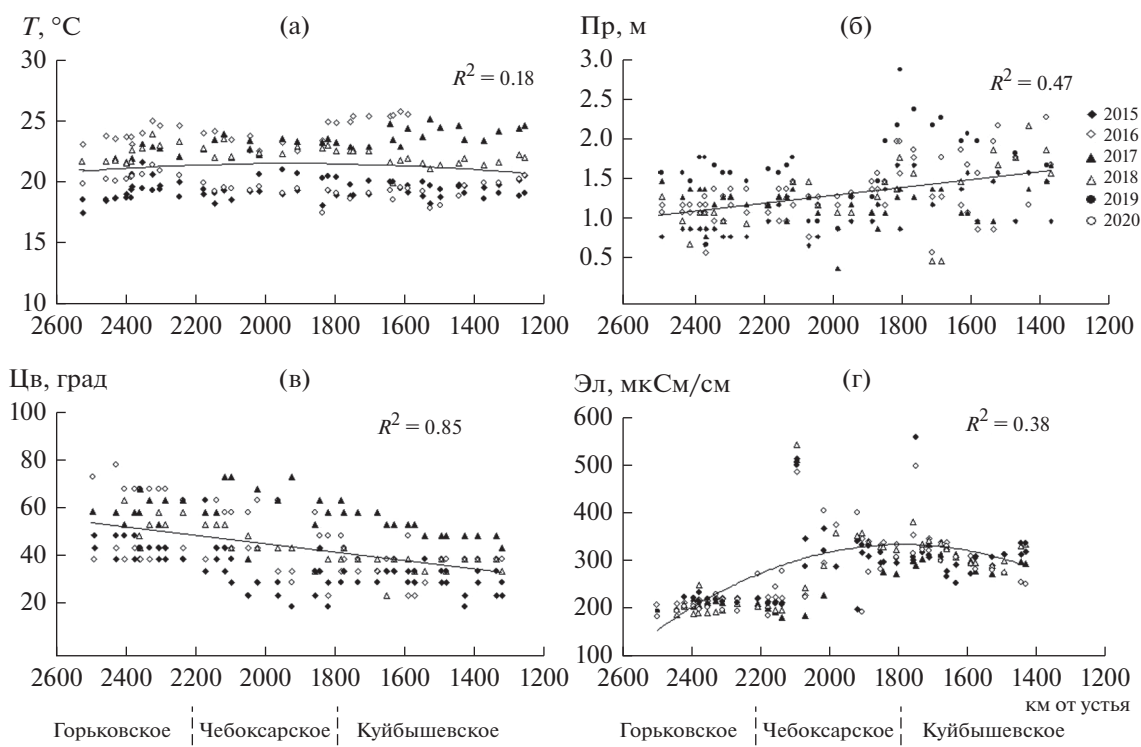
**Таблица 1.** Содержание хлорофилла и абиотические характеристики водохранилищ Средней Волги за шестилетний период исследований

Показатель	Горьковское (n = 78)			Чебоксарское (n = 61)			Куйбышевское (n = 82)		
	min–max	$M \pm SE$	$C_v$	min–max	$M \pm SE$	$C_v$	min–max	$M \pm SE$	$C_v$
Хлорофилл, мкг/л	3.2–25.8	10.9 ± 0.7	53	3.2–155	26.7 ± 3.9	113	2.1–59.0	9.2 ± 1.0	101
Температура, °С	16.5–24.0	20.3 ± 0.2	10	16.5–24.4	20.5 ± 0.3	10	16.9–25.4	20.5 ± 0.3	12
Прозрачность, м	0.2–1.8	1.2 ± 0.1	25	0.4–2.2	1.2 ± 0.1	32	0.5–3.0	1.5 ± 0.1	30
Цветность, град	35–80	53 ± 1.0	22	20–75	42 ± 2.0	34	20–60	38 ± 1.0	23
Электропроводность, мкСм/см	181–269	206 ± 2.0	7	177–930	355 ± 25.0	53	247–736	315 ± 7.0	20
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	0.00–0.20	0.06 ± 0.01	68	0.00–0.17	0.08 ± 0.01	56	0.01–0.24	0.09 ± 0.01	64
N <sub>общ</sub> , мг/л	0.20–2.99	1.09 ± 0.05	40	0.62–3.35	1.14 ± 0.06	35	0.40–3.28	1.08 ± 0.05	38
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мкг/л	12–71	35 ± 1.0	34	24–176	87 ± 5.0	38	30–342	107 ± 5.0	38
P <sub>общ</sub> , мкг/л	26–195	68 ± 3.0	39	47–270	124 ± 6.0	36	54–460	145 ± 7.0	38
N <sub>общ</sub> /P <sub>общ</sub>	4–43	17 ± 1.0	40	3–24	10 ± 1.0	47	3–35	8 ± 1.0	52

Примечание:  $M$  – среднее значение за период отбора проб,  $SE$  – стандартная ошибка среднего;  $n$  – число наблюдений (выборка).

Единичные подъемы  $N_{общ} > 2$  мг/л отмечены в Горьковском водохранилище (табл. 1, рис. 3а). Среднее для всего участка содержание  $P_{общ}$  менялось от 80 мкг/л в 2016 и 2019 гг. до ~120 мкг/л в

2015, 2017 и 2018 гг. В Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах оно в 1.8 и 2.1 раза превышало таковое в Горьковском (табл. 1). В 2018 и 2019 гг. содержание  $P_{общ}$  линейно от Горьковско-



**Рис. 2.** Изменение температуры воды ( $T$ ) (а), прозрачности (Пр) (б), цветности (Цв) (в) и электропроводности (Эл) (г) в водохранилищах Средней Волги в годы исследования. Сплошная линия – линия тренда для осредненного за 2015–2020 гг. показателя.

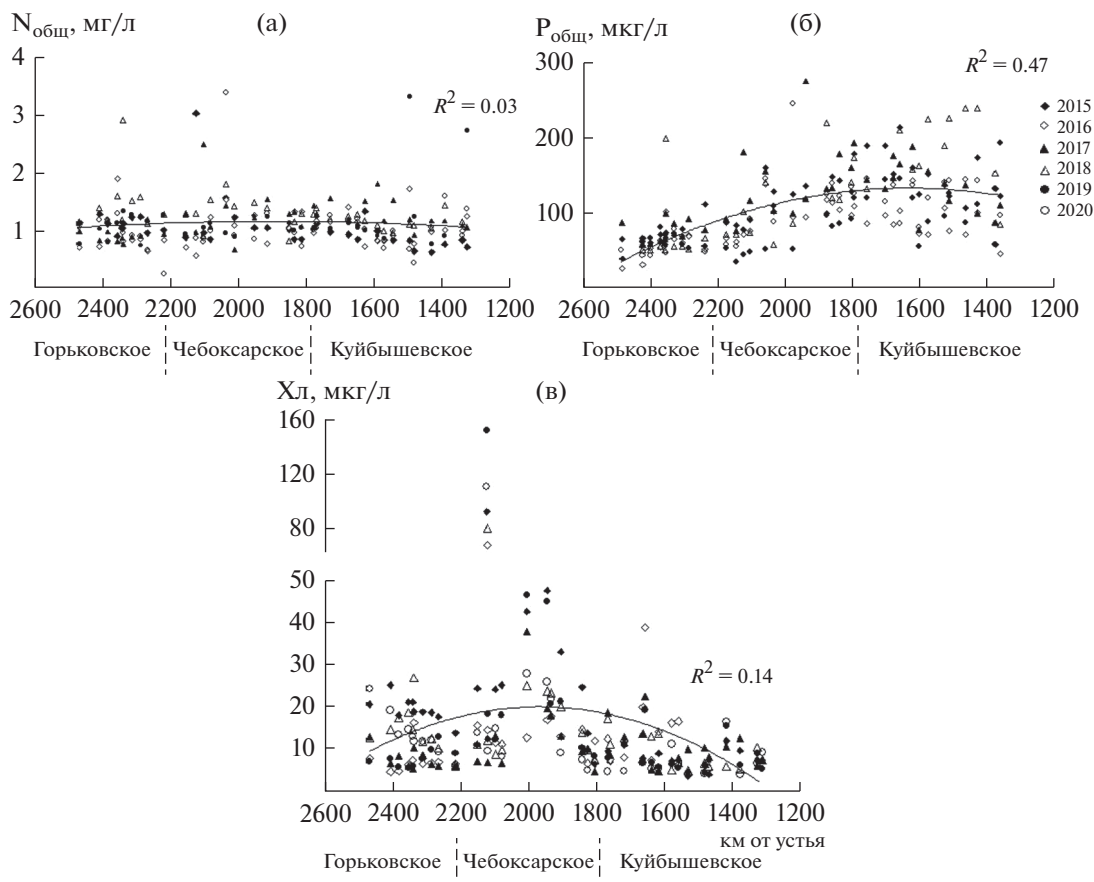


Рис. 3. Содержание  $N_{\text{общ}}$  (а),  $P_{\text{общ}}$  (б) и хлорофилла (в) в водохранилищах Средней Волги в годы исследования. Сплошная линия – линия тренда для осредненного за 2015–2020 гг. показателя.

го водохранилища увеличивалось к Куйбышевскому, в остальные годы отмечен его значительный рост в Чебоксарском водохранилище по сравнению с Горьковским, и затем небольшое снижение в Куйбышевском (рис. 3б). Локальный подъем  $P_{\text{общ}}$  зафиксирован ниже впадения крупных и средних притоков – рек Ока, Кама, Ветлуга, Сура, Свияга. Отношение  $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$  (по массе) во всех водохранилищах характеризовалось широким диапазоном, но средние для отдельных лет величины снижались от 12–23 в Горьковском водохранилище до 8–13 в Чебоксарском и 6–11 в Куйбышевском. Вклад  $N-NO_3^-$  в фонд  $N_{\text{общ}}$  не превышал 6–8%, средняя доля  $P-PO_4^{3-}$  достигала ~50%  $P_{\text{общ}}$  в Горьковском водохранилище и 70–74% в Чебоксарском и Куйбышевском. Судя по величинам  $C_v$  (34–68%), содержание общих и минеральных форм биогенов во всех водохранилищах характеризуется умеренной изменчивостью (табл. 1).

Результаты дисперсионного анализа свидетельствуют о значимых различиях температуры, а также цветности, содержания  $N-NO_3^-$  и  $P_{\text{общ}}$  в го-

ды наблюдения в каждом из трех водохранилищ ( $F > F_{кр}$ ). Межгодовые изменения прозрачности и содержания  $N_{\text{общ}}$  не выявлены в Чебоксарском водохранилище, электропроводности – в Чебоксарском и Куйбышевском, содержания  $P-PO_4^{3-}$  – в Куйбышевском ( $F < F_{кр}$ ) (табл. 2).

Концентрация Хл *a* в каждом водохранилище изменялась в широком диапазоне (табл. 1). При этом, судя по величинам  $C_v$ , изменчивость Хл *a* была умеренной в Горьковском водохранилище и высокой в двух других ( $C_v$  53% и >100%, соответственно). В каждом водохранилище выявлены межгодовые различия Хл *a*, однако по результатам дисперсионного анализа (табл. 2) они значимы в Горьковском водохранилище, но не существенны в Чебоксарском и Куйбышевском. Самая высокая средняя величина в Горьковском водохранилище (18.4 мкг/л) получена в 2015 г., в Чебоксарском – в 2019 г. (44.0 мкг/л), в Куйбышевском – в 2016 г. (14.8 мкг/л) (рис. 4).

Распределение фитопланктона по акватории каждого водохранилища в годы наблюдения не менялось. Подъем Хл *a*, как правило, отмечен в

**Таблица 2.** Межгодовые различия содержания хлорофилла и абиотических характеристик в водохранилищах Средней Волги с помощью однофакторного дисперсионного анализа ANOVA

Показатель	Горьковское		Чебоксарское		Куйбышевское	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Хлорофилл	13.5	0.00	0.59	0.71	1.41	0.23
Температура	52.10	0.00	111.00	0.00	202.00	0.00
Прозрачность	13.40	0.00	1.52	0.20	8.58	0.00
Цветность	80.30	0.00	28.50	0.00	38.00	0.00
Электропроводность	2.96	0.02	1.01	0.42	1.75	0.13
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7.44	0.00	7.92	0.00	17.10	0.00
N <sub>общ</sub>	2.71	0.04	0.55	0.70	2.43	0.06
P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	4.05	0.01	7.75	0.00	1.68	0.16
P <sub>общ</sub>	2.86	0.03	3.61	0.01	5.20	0.00
N <sub>общ</sub> /P <sub>общ</sub>	5.27	0.00	3.06	0.03	4.14	0.00

Примечание. *F* – критерий Фишера; *F* критическое > 2.40.

мелководном Костромском расширении Горьковского водохранилища и повсеместно – ниже впадения притоков. Максимум Хл *a* постоянно фиксируется в устьевом участке р. Оки и в окской водной массе Чебоксарского водохранилища. В целом, на протяжении всего периода исследований наблюдали увеличение Хл *a* в Чебоксарском водохранилище по сравнению с Горьковским, и снижение в Куйбышевском (рис. 3в). Трофический статус Горьковского водохранилища, оцененный по среднему содержанию Хл *a*, варьировал от эвтрофного в 2015 г. до мезотрофного в 2016, 2017 гг. и умеренно эвтрофного в 2018–2020 гг.; Куйбышевского – от умеренно эвтрофного в 2016, 2020 гг. до мезотрофного в остальные годы; Чебоксарское водохранилище оставалось эвтрофным на протяжении всего шестилетнего периода (рис. 4).

Теснота и направленность связи содержания Хл *a* с факторами среды изменялись в разные годы (рис. 5а–5е). Парный корреляционный анализ показал, что Хл *a* постоянно коррелирует с прозрачностью воды, в пяти случаях из шести – с электропроводностью, в двух случаях – с N<sub>общ</sub> (2018 и 2020 гг.) и P<sub>общ</sub> (2016 и 2018 гг.), в 2015 г. – с N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, в 2016 г. – с P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, в 2020 г. – с отношением N<sub>общ</sub>/P<sub>общ</sub>. Теснота связи в основном умеренная (абсолютные значения *r* = 0.38–0.68) и только для N<sub>общ</sub> в 2020 г. – сильная (*r* = 0.75).

По совокупности шестилетних данных, связь содержания Хл *a* с абиотическими факторами в каждом водохранилище слабая или умеренная (*r* < 0.70), лишь в Куйбышевском водохранилище отмечена более тесная сопряженность Хл *a* с

электропроводностью (*r* = 0.75). Во всех водохранилищах развитие фитопланктона (содержание Хл *a*) отрицательно связано с прозрачностью воды, в Горьковском водохранилище – отрицательно с температурой, содержанием N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, положительно – с N<sub>общ</sub>. В Чебоксарском водохранилище выявлено самое большое количество достоверных связей: обратных с цветностью, содержанием N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, прямых – с электропроводностью, N<sub>общ</sub> и N<sub>общ</sub>/P<sub>общ</sub>. В Куйбышевском водохранилище содержание Хл *a* положительно связано с электропроводностью, P<sub>общ</sub> и P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (рис. 5ж–5и).

Результаты множественного корреляционного анализа показывали, что совокупность рассмотренных абиотических параметров обуславливает высокую долю вариации Хл *a* в водохранилищах Средней Волги (*R*<sup>2</sup> = 0.71–0.75). Из результатов пошаговой регрессии следует, что в число приоритетных факторов развития фитопланктона во всех водохранилищах входит прозрачность, в Горьковском водохранилище – также температура и содержание N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, в Чебоксарском – электропроводность, минеральные формы N и P, соотношение их общих форм; в Куйбышевском – цветность и электропроводность (табл. 3).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Бассейн Средней Волги расположен в разных географических зонах, что определяет специфику климатических условий, водосборной площади водохранилищ и возможность проследить влияние зональных, а зональных и региональных фак-



торов на формирование их режима и элементы экосистемы. При большой протяженности и сложной морфометрии водохранилищ абиотические характеристики, от которых зависит развитие и распределение гидробионтов, изменчивы во времени и пространстве. Региональные погодные особенности лет наблюдения обуславливают межгодовые температурные различия и нарушают общий температурный ход, который можно было бы ожидать при географической зональности в каскаде по мере продвижения с севера на юг. Температура в данном случае выступает аazonальным фактором и определяется локальными условиями.

Прозрачность, цветность и электропроводность представлены типичными для водохранилищ величинами. Их динамика отражает зональные особенности волжского каскада, наглядно проявляющиеся при сравнении с аналогичными показателями на Верхней Волге (Минеева и др., 2021). Четкий линейный тренд прослеживается для прозрачности воды, растущей с увеличением глубины водохранилищ, и для цветности, уменьшающейся со снижением заболоченности водосборного бассейна (Гидрометеорологический..., 1975, 1978). Зависимость межгодовых изменений цветности от климатических условий (Рассе, Cole, 2002) объясняет ее увеличение в дождливом 2017 г. за счет выноса с водосборной площади окрашенных органических веществ.

Сток р. Волги в основном формируется в лесной зоне при избыточной увлажненности и содержит относительно низкое количество солей. Рост электропроводности в Чебоксарском водохранилище обусловлен поступлением высокоминерализованных вод р. Оки, водосбор которой характеризуется залеганием карбонатных пород и наличием карста. Повышенная электропроводность присуща и другим правобережным притокам р. Волги (в частности, рекам Сура, Свияга). Верхняя часть Куйбышевского водохранилища принимает воды Чебоксарского водохранилища, а далее – р. Камы, сток которой формируется на Урале и тоже более минерализован, чем волжские воды. Колебания ионного стока в зависимости от водности года, а также от гидрологических и метеорологических условий на разных реках бас-

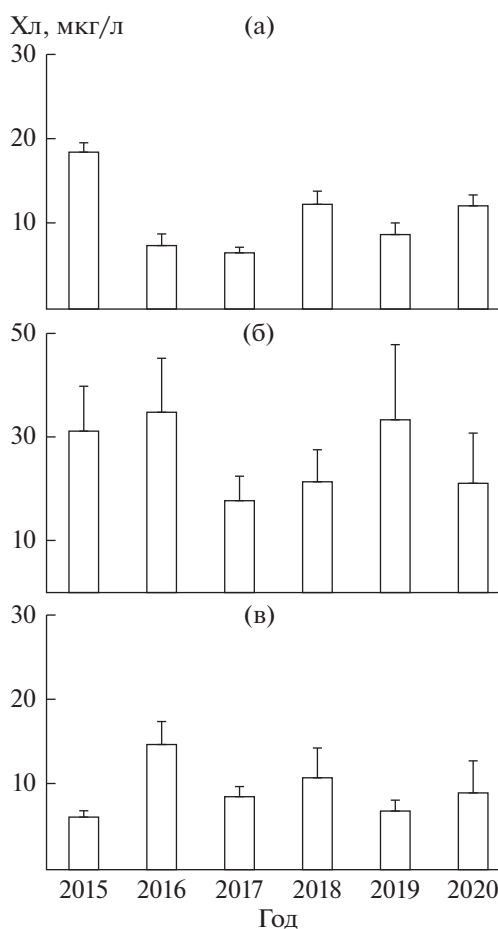


Рис. 4. Содержание хлорофилла (мкг/л) в Горьковском (а), Чебоксарском (б) и Куйбышевском (в) водохранилище в годы исследования. Даны средние величины со стандартной ошибкой.

сейна обуславливает межгодовые изменения электропроводности (Волга..., 1978).

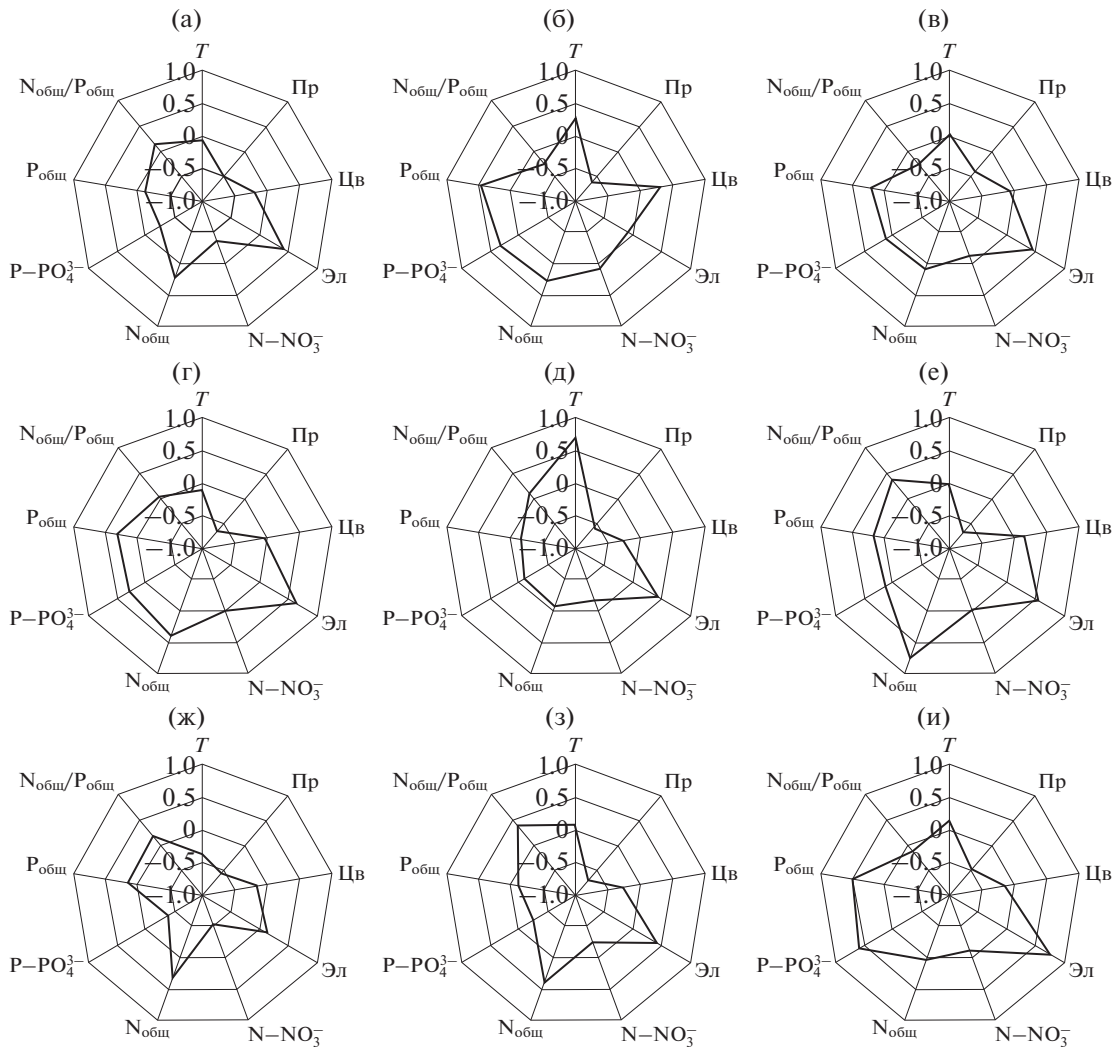
Содержание биогенных веществ, которое относят к аazonальным факторам, в водохранилищах Средней Волги характеризуется высокими величинами, типичными для эвтрофных водоемов (Китаев, 2007). Оно более вариабельно, чем гидрологические показатели (табл. 1), особенно –

Таблица 3. Связь хлорофилла с абиотическими факторами в водохранилищах Средней Волги

Водохранилище	$R^{2*}$	Приоритетные факторы **
Горьковское	0.72	Прозрачность (–0.59), N-NO <sub>3</sub> <sup>–</sup> (–0.32), температура (–0.26)
Чебоксарское	0.75	Прозрачность (–0.72), N <sub>общ</sub> /P <sub>общ</sub> (0.46), электропроводность (0.46), P-PO <sub>4</sub> <sup>3–</sup> (–0.35), N-NO <sub>3</sub> <sup>–</sup> (0.35)
Куйбышевское	0.71	Электропроводность (0.72), прозрачность (–0.29)

\* Для совокупности факторов, приведенных в табл. 1.

\*\* По данным пошаговой регрессии, в скобках – частный коэффициент корреляции.



**Рис. 5.** Коэффициенты корреляции Пирсона между содержанием хлорофилла и факторами среды для трех водохранилищ Средней Волги в годы исследования (2015–2020 гг. а–е соответственно) и для каждого водохранилища (ж – Горьковское, з – Чебоксарское, и – Куйбышевское) за указанный период, ( $r_{0,05} < 0.21$ ). Факторы среды: Т – температура, Пр – прозрачность; Цв – цветность; Эл – электропроводность.

содержание  $N-NO_3^-$ , потребляемого водорослями. Среднее количество  $N_{общ}$  в Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах сопоставимо с полученным во второй половине XX в., а в Горьковском оно повысилось. Среднее количество  $P_{общ}$  осталось на прежнем уровне в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах, но стало выше в Куйбышевском (Охупкин, 1994; Охупкин и др., 1997; Минеева, 2004; Куйбышевское, 2008). Содержание  $N_{общ}$  в водохранилищах Средней Волги мало меняется по сравнению с водохранилищами Верхней Волги (Минеева и др., 2021), а количество  $P_{общ}$  становится выше в Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах. Доля минеральных форм в общем фонде БЭ также увеличивается: незначительно для  $N-NO_3^-$  (от 4 до 8%) и

существенно для  $P-PO_4^{3-}$  (48–70%). Увеличение содержания биогенных веществ обусловлено высокой антропогенной нагрузкой на экосистему водохранилищ, расположенных в густонаселенных промышленных регионах Европейской России (Rivers..., 2021). Отношение  $N_{общ}/P_{общ}$  служит не только показателем биогенного лимитирования фитопланктона (Sakamoto, 1966; Claesson, 1978), но и самостоятельным фактором, регулирующим развитие водорослей (Булгаков, Левич, 1995). Средняя величина  $N_{общ}/P_{общ}$  указывает на возможный дефицит фосфора в Горьковском водохранилище, дефицит азота в Куйбышевском и сбалансированное для развития фитопланктона соотношение этих элементов в Чебоксарском.

Развитие летних планктонных сообществ отражает состояние водоема, поскольку в условиях



наибольшего прогрева проявляются негативные тенденции, вызванные эвтрофированием или изменениями климата. В период исследования содержание Хл *a* было типичным для летнего максимума фитопланктона Средней Волги. Оно характеризовалось широким диапазоном величин и их межгодовой изменчивостью, сохраняя особенности пространственного распределения по акватории отдельных водоемов, а также в масштабах всего каскада. На фоне незначительной изменчивости гидрологических условий в каждый период наблюдений и достаточной обеспеченности клеток минеральным питанием, неоднородность распределения фитопланктона по акватории водохранилищ (высокие величины  $C_v$ ) обусловлена их морфометрическими особенностями и наличием разнородных водных масс. Повышенные концентрации Хл *a*, как и в других водохранилищах каскада (Минеева, 2004), отмечены на мелководных участках (Костромское расширение в Горьковском водохранилище), в устьях рек (Сура, Ветлуга, Свияга), в водах самих притоков, фитопланктон которых формируется в специфических условиях (Охапкин и др., 2013). Максимальным количеством Хл *a*, как и в предыдущие годы (Минеева, 2004; Минеева и др., 2008), характеризуется акватория в черте г. Нижний Новгород ниже впадения р. Оки. Согласно многолетним данным (Минеева, 2004), количество Хл *a* увеличивается в Чебоксарском водохранилище, по сравнению с Горьковским, и снижается в Куйбышевском. Развитие фитопланктона в трех водохранилищах, каждое из которых представляет собой уникальный водный объект со своими условиями, контролирующими биоту, чаще происходит независимо. Лишь в 2015 и 2018 гг., при близкой температуре воды содержание Хл *a* скоррелировано в сопредельных Горьковском и Чебоксарском, Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах ( $r_s = 0.54-0.88$ ,  $p < 0.05$ ).

Межгодовые изменения условий формирования биологических сообществ определяют различия в развитии и состоянии альгоценозов, а также вариации трофического статуса водохранилищах. Последний меняется от мезотрофного до умеренно эвтрофного и эвтрофного в Горьковском и Куйбышевском водохранилищах, в Чебоксарском остается эвтрофным на протяжении не только последних шести лет, но и всего периода его существования (Минеева, 2004; Минеева и др., 2008). Межгодовые колебания трофии в зависимости от глобальных и региональных гидроклиматических факторов выявлены для водоемов разных регионов (Ruggiu et al., 1998; Kangur et al., 2002; Babanazarova, Lyashenko, 2007 и др.) и особенно наглядны на фоне многолетних наблюдений (Жукова, 2013; Минеева, 2016; Структура..., 2018).

Биота водохранилищ, водный режим которых регулируется не только погодными условиями и климатом, но и работой гидросооружений, испытывает комплексное внешнее воздействие, в том числе – неконтролируемое или неучтенное. Поэтому в водохранилищах Средней Волги отмечена лишь умеренная теснота связи Хл *a* с факторами среды, которая меняется в разные годы, а высокую долю вариации Хл *a* обуславливает разный набор абиотических показателей. Для фитопланктона основными факторами могут быть водность, гидроклиматический режим, внутриводоемные процессы, биогенные элементы, температура, подводный световой режим (Chen et al., 2003; Reynolds, 2006; Yang et al., 2016). Многокомпонентное и комплексное внешнее влияние зависит от морфометрии водоема, гидрологической структуры, биотопического разнообразия. Самое большое число достоверных связей Хл *a* с факторами среды получено для фитопланктона Чебоксарского водохранилища, в котором присутствуют водные массы с контрастными характеристиками, обусловленными пространственными изменениями физико-химических условий на водосборе. Повидимому, при максимальных для волжского каскада проточности и степени антропогенной нагрузки (Минеева, 2004) здесь формируется автотрофное сообщество, в значительной степени зависящее от внешнего влияния.

Современный период характеризуется продолжающимся повышением приземной температуры воздуха и температуры воды (Второй ..., 2014). Повышение температуры влияет на доступность питательных веществ, способствует росту внутренней фосфорной нагрузки, эвтрофированию и развитию цианопрокариот, меняет конкурентные отношения между видами этого отдела (Jeppesen et al., 2005; Chu et al., 2007; Winder, Hunter, 2008). Увеличение обилия цианопрокариот и продолжительности их вегетации в настоящее время наблюдается и в волжских водохранилищах (Корнева, 2015; Минеева, 2016; Минеева и др., 2021). Из трех исследованных водохранилищ только в Горьковском выявлена связь Хл *a* с температурой, которая, как и в водохранилищах Верхней Волги, оказывает лишь умеренное влияние на фитопланктон, хотя и входит в число приоритетных факторов его развития. Водосбор Верхней Волги, водохранилища которой характеризуются высокой степенью сходства планктонных альгоценозов (Корнева, 2015), расположен в пределах лесной зоны с избыточной увлажненностью и относительно низким содержанием солей в воде водоемов. При изменении условий водосборного бассейна, для которого на Средней Волге характерно наличие горных пород, актуальным фактором развития фитопланктона становится электропроводность. Это наблюдается в более минерализованных Чебоксарском и Куйбышев-

ском водохранилищах, фитопланктон которых имеет высокое флористическое сходство (Корнева, 2015).

Во всех водохранилищах содержание хлорофилла достоверно и отрицательно связано с прозрачностью воды. Это подтверждает заметную роль водорослевой взвеси в формировании подводного светового режима (Минеева, 2009), а также служит полезным инструментом при анализе спутниковых данных (Bohn et al., 2018). Поскольку хлорофилл относится к оптически активным компонентам водной среды, прозрачность снижается при избыточном развитии водорослей.

Волжские водохранилища характеризуются высоким содержанием БЭ, типичным для эвтрофных вод. Концентрации минеральных форм N и P превосходят порог, необходимый для развития водорослей (Reynolds, 2012). При небольшой вариативности общих и минеральных форм БЭ в отдельные сроки наблюдения, фитопланктон на всей акватории водохранилищ в достаточной степени должен быть обеспечен минеральным питанием. Однако, в зависимости от наличия доступных форм N и P, световых условий (Torgemorell et al., 2018), гидрологической фазы водности (Cardoso et al., 2017), связь Хл а с БЭ прослеживается не всегда и при невысоких значениях коэффициента корреляции. Обратная связь Хл а с минеральными формами N и P в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах свидетельствует об их активном потреблении клетками водорослей, а прямая зависимость от  $P-PO_4^{3-}$  в Куйбышевском водохранилище — о нехватке этого элемента, несмотря на соответствие величин  $N_{общ}/P_{общ}$  дефициту азота. Однако, это отношение не всегда точно отражает биогенное лимитирование, особенно при концентрациях  $P_{общ}$  до 200 мкг/л (Seip et al., 2000), характерных для водохранилищ р. Волги. Тот факт, что по совокупности шестилетних данных в каждом водохранилище выявлена лишь умеренная связь содержания Хл а с абиотическими показателями, включая БЭ, свидетельствует о существенном влиянии на развитие фитопланктона других факторов: климата, гидрологических условий, динамики вод, интенсивности водообмена, особенностей водосборной территории.

**Выводы.** Бассейн Средней Волги представляет интерес как регион с меняющимися условиями водосборной территории при смене природных зон и характеризуется высокой антропогенной нагрузкой на экосистемы водохранилищ. Изменение прозрачности, цветности и электропроводности воды от Горьковского водохранилища к Куйбышевскому отражает зональные особенности волжского каскада. Температура воды и содержание биогенных веществ относятся к азональным факторам. Величины  $N_{общ}/P_{общ}$  указы-

вают на возможный дефицит фосфора в Горьковском водохранилище, дефицит азота в Куйбышевском и сбалансированное для развития фитопланктона соотношение этих элементов в Чебоксарском. Содержание Хл а типично для летнего максимума фитопланктона Средней Волги, характеризуется широким диапазоном величин и их межгодовой изменчивостью. Трофический статус Горьковского и Куйбышевского водохранилищ, оцененный по среднему содержанию Хл а, в разные годы меняется от мезотрофного до умеренно эвтрофного и эвтрофного, а Чебоксарское водохранилище на протяжении всего периода существования относится к эвтрофному типу. Невысокие коэффициенты корреляции между содержанием Хл а и абиотическими характеристиками свидетельствуют о сложном и многокомпонентном влиянии внешних условий на развитие фитопланктона.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственных заданий № 121051100099-5 и 121051100104-6.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян А.Б., Салтанкини В.П., Шаповов В.А. 1987. Водохранилища. Москва: Мысль.
- Булгаков Н.Г., Левич А.П. 1995. Биогенные элементы в среде и фитопланктон: соотношение азота и фосфора как самостоятельный фактор регулирования структуры альгоценоза // Успехи совр. биол. Т. 115. № 1. С. 13.
- Волга и ее жизнь. 1978. Ленинград: Наука.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. 2014. Москва: Росгидромет.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги. 1975. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. 1978. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Жукова Т.В. 2013. Многолетняя динамика фосфора в Нарочанских озерах и факторы, ее определяющие // Водные ресурсы. Т. 40. № 5. С. 468. <https://doi.org/10.7868/S0321059613050088>
- Китаев С.П. 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН.
- Копылов А.И., Лазарева В.И., Минеева Н.М., Зоботкина Е.А. 2020. Планктонное сообщество крупного эвтрофного водохранилища в период аномально высокой температуры воды // Биология внутр. вод. № 4. С. 315. <https://doi.org/10.31857/S0320965220040099>
- Корнева Л.Г. 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом.

- Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). 2008. Тольятти: Ин-т экологии волжск. бассейна РАН.
- Литвинов А.С., Законнова А.В. 1994. Характеристика гидрологических условий в Чебоксарском водохранилище в первые годы заполнения // Водные ресурсы. Т. 21. № 3. С. 365.
- Минеева Н.М., Литвинов А.С., Степанова И.Э., Кочеткова М.Ю. 2008. Содержание хлорофилла и факторы его пространственного распределения в водохранилищах Средней Волги // Биология внутр. вод. № 1. С. 68.
- Минеева Н.М., Степанова И.Э., Семадени И.В. 2021. Биогенные элементы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Верхней Волги // Биология внутр. вод. № 1. С. 24. <https://doi.org/10.31857/S0320965221010095>
- Минеева Н.М. 2004. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. Москва: Наука.
- Минеева Н.М. 2009. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус.
- Минеева Н.М. 2016. Сезонная и межгодовая динамика хлорофилла в планктоне Рыбинского водохранилища по данным флуоресцентной диагностики // Систематика, морфология и экология водных растений. Тр. Ин-та биол. внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН. Вып. 76(79). Ярославль: Филигрань. С. 75.
- Охапкин А.Г. 1994. Фитопланктон Волги. Фитопланктон Чебоксарского водохранилища. Тольятти: Ин-т экологии волжск. бассейна РАН.
- Охапкин А.Г., Микучик И.А., Корнева Л.Г., Минеева Н.М. 1997. Фитопланктон Волги. Фитопланктон Горьковского водохранилища. Тольятти: Ин-т экологии волжск. бассейна РАН.
- Охапкин А.Г., Шарagina Е.М., Бондарев О.О. 2013. Фитопланктон Чебоксарского водохранилища на современном этапе его существования // Поволжский экол. журн. № 2. С. 190.
- Паутова В.Н., Номоконова В.И. 1994. Продуктивность фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Тольятти: Ин-т экологии волжск. бассейна РАН.
- Романенко В.И. 1985. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Ленинград: Наука.
- Структура и функционированием экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. 2018. Москва: РАН.
- Экология фитопланктона Куйбышевского водохранилища. 1989. Ленинград: Наука.
- Adrian R., O'Reilly C.M., Zagareze H. et al. 2009. Lakes as sentinels of climate change // *Limnol., Oceanogr.* V. 54. № 6. Pt 2. P. 2283.
- Babanzarova O.V., Lyashenko O.A. 2007. Inferring long-term changes in the physical-chemical environment of the shallow, enriched Lake Nero from statistical and functional analyses of its phytoplankton // *J. Plankton Research.* V. 29. № 9. P. 747. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbm055>
- Bertani I., Primicerio R., Rossetti G. 2016. Extreme climatic event triggers a lake regime shift that propagates across multiple trophic levels // *Ecosystems.* V. 19. Is 1. P. 16. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9914-5>
- Bohn V.Y., Carmona F., Rivas R. et al. 2018. Development of an empirical model for chlorophyll-a and Secchi disk depth estimation for a Pampean shallow lake (Argentina) // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences.* V. 21. P. 183. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.04.005>
- Canfield D.E., Bachmann R.W., Hoyer M.V. 2018. Long-term chlorophyll trends in Florida lakes // *J. Aquat. Plant Manage.* V. 56. P. 47.
- Cardoso S.J., Nabout J.C., Farjalla V.F. et al. 2017. Environmental factors driving phytoplankton taxonomic and functional diversity in Amazonian floodplain lakes // *Hydrobiologia.* V. 802. P. 115. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3244-x>
- Chen Y., Qin B., Teubner K., Dokulil M.T. 2003. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis* domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China // *J. Plankton Research.* V. 25. № 1. P. 445.
- Chu Z., Jin X., Iwami N., Inamori Y. 2007. The effect of temperature on growth characteristics and competitions of *Microcystis aeruginosa* and *Oscillatoria mougeotii* in a shallow, eutrophic lake simulator system // *Hydrobiologia.* V. 581. P. 217. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0506-4>
- Claesson A. 1978. Research on recovery of polluted lakes. Algal growth potential and the availability of limiting nutrients // *Acta University Uppsala.* № 461. P. 1.
- Gao N., Ma Y., Zhao M. et al. 2020. Quantile analysis of long-term trends of near-surface chlorophyll-a in the Pearl River Plume // *Water.* V. 12. P. 1662. <https://doi.org/10.3390/w12061662>
- Jeppesen E., Sondergaard M., Jensen J.P. et al. 2005. Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies // *Freshwater Biol.* V. 50. № 9. P. 1747. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01415.x>
- Kangur K., Milius A., Mols T. et al. 2002. Lake Peipsi: Changes in nutrient elements and plankton communities in the last decade // *Aquatic Ecosystem Health & Management.* V. 5. № 3. P. 363. <https://doi.org/10.1080/14634980290001913>
- Lamont T., Barlow R.G., Brewin R.J.W. 2019. Long-term trends in phytoplankton chlorophyll-a and size structure in the Benguela upwelling system // *JGR Oceans.* V. 124. № 2. P. 1170. <https://doi.org/10.1029/2018JC014334>
- Özkan K., Jeppesen E., Davidson T.A. et al. 2016. Long-term trends and temporal synchrony in plankton richness, diversity and biomass driven by re-oligotrophication and climate across 17 Danish Lakes // *Water.* V. 8. № 10. P. 427. <https://doi.org/10.3390/w8100427>
- Pace M.L., Cole J.J. 2002. Synchronous variation of dissolved organic carbon and color in lakes // *Limnol., Oceanogr.* V. 47. № 2. P. 333.
- Rivers of Europe. 2021. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier.
- Reynolds C.S. 2006. *The Ecology of Phytoplankton.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Reynolds C.S. 2012. Environmental requirements and habitat preferences of phytoplankton: chance and certainty in species selection // *Botanica Marina.* V. 55. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1515/bot.2011.121>
- Ruggiu D., Morabito G., Panzani P., Puggnetti A. 1998. Trends and relations among basic phytoplankton characteristics

- in the course of the long-term oligotrophication of Lake Maggiore (Italy) // *Hydrobiologia*. V. 369/370. P. 243.
- Sakamoto M.* 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth // *Arch. Hydrobiol.* V. 62. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095757>
- SCOR-UNESCO Working Group № 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments in sea water // *Mono-graphs on Oceanographic Methodology*. Montreux: UNESCO. P. 9.
- Seip K.L., Jeppesen E., Jensen J.P., Faafeng B.* 2000. Is trophic state or regional location the strongest determinant for Chl-*a*/TP relationships in lakes? // *Aquat. Sci.* V. 62. P. 195. <https://doi.org/10.1007/PL00001331>
- Torremorell A.M., Dieguez C., Queimalinos C. et al.* 2018. Phytoplankton limitation in Patagonian and Pampean shallow lakes: effect of phosphorus and light // *Hydrobiologia*. V. 816. P. 91. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3181-8>
- Winder M., Hunter D.A.* 2008. Temporal organization of phytoplankton communities linked to physical forcing // *Oecologia*. V. 156. P. 179. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-0964-7>
- Yang Y., Pettersson K., Padisák J.* 2016. Repetitive baselines of phytoplankton succession in an unstably stratified temperate lake (Lake Erken, Sweden): a long-term analysis // *Hydrobiologia*. V. 764. Is 1. P. 211. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2314-1>

## Abiotic Factors and Their Role in the Development of Phytoplankton in Reservoirs of the Middle Volga

N. M. Mineeva<sup>1</sup>, \*, S. A. Poddubny<sup>1</sup>, I. E. Stepanova<sup>1</sup>, and A. I. Tsvetkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia*

\*e-mail: mineeva@ibiw.ru

According to field observations during the summer 2015–2020, the interannual and long-term variability of abiotic characteristics and chlorophyll content in the reservoirs of the Middle Volga is considered. An increase in water transparency from  $1.2 \pm 0.1$  m in the Gorky reservoir to  $1.5 \pm 0.1$  m in the Kuibyshev reservoir, increase in electrical conductivity from  $206 \pm 2$  to  $315 \pm 7$   $\mu\text{S}/\text{cm}$  and decrease in water color from  $53 \pm 1$  to  $38 \pm 1$  deg was revealed reflecting the zonal features of the Volga cascade. The water temperature depends on local weather conditions. The  $P_{\text{tot}}$  concentration increases from  $68 \pm 3$   $\mu\text{g}/\text{L}$  in the Gorky reservoir to  $145 \pm 7$   $\mu\text{g}/\text{L}$  in the Kuibyshev reservoir, the  $N_{\text{tot}}$  concentration ( $1.08 \pm 0.05$ – $1.14 \pm 0.06$   $\text{mg}/\text{L}$ ) changes insignificantly. Chl *a* content is characterized by a wide range of values and their interannual variability, while retaining the features of the spatial distribution over the water area of individual water bodies and on the scale of the entire cascade. It averages  $10.9 \pm 0.7$ ,  $26.7 \pm 3.9$ , and  $9.2 \pm 1.0$   $\mu\text{g}/\text{L}$  in the Gorky, Cheboksary, and Kuibyshev reservoirs respectively. The trophic state of the Gorky and Kuibyshev reservoirs in different years varies from mesotrophic to moderately eutrophic and eutrophic, the Cheboksary reservoir is characterized as eutrophic throughout the six-year period. The low correlation coefficients between Chl *a* content and abiotic parameters indicate a complex and multicomponent influence of external conditions on the development of phytoplankton.

**Keywords:** chlorophyll, phytoplankton, hydrological and hydrochemical factors, reservoirs of the Middle Volga