

ФИТОПЛАНКТОН,
ФИТОБЕНТОС, ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 556.551+574.583(28):581

АБИОТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ИХ РОЛЬ В РАЗВИТИИ
ФИТОПЛАНКТОНА НИЖНЕЙ ВОЛГИ

© 2023 г. Н. М. Минеева^а, *, С. А. Поддубный^а, И. Э. Степанова^а, А. И. Цветков^а

^аИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

*e-mail: mineeva@ibiw.ru

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 22.04.2022 г.

Принята к публикации 28.06.2022 г.

По данным полевых наблюдений в период летней межени в годы с разными термическими условиями и водностью (2015–2020 гг.) рассмотрена межгодовая изменчивость абiotических характеристик и содержания хлорофилла Нижней Волги. Температура, прозрачность, цветность и электропроводность воды характеризуются небольшой вариабельностью и демонстрируют изменения с севера на юг согласно зональным особенностям волжского каскада. Среднее содержание биогенных веществ (0.81–0.99 мг/л N_{общ} и 101–134 мкг/л P_{общ}) незначительно меняется в Саратовском и Волгоградском водохранилищах, но снижается на незарегулированном нижнем участке р. Волги. Содержание N-NO₃⁻ и P-PO₄³⁻ в общем фонде азота и фосфора достигает 4–9 и 69–74% соответственно, отношение N_{общ}/P_{общ} < 10 указывает на возможное азотное лимитирование фитопланктона. Содержание Хл *a* соответствует мезотрофной категории в Саратовском и Волгоградском водохранилищах (5.3 ± 0.6 и 7.2 ± 0.9 мкг/л) и эвтрофной на нижнем участке (13.9 ± 1.5 мкг/л). Трофический статус Нижней Волги не изменился по сравнению с последним десятилетием XX в. Установлено, что абiotические факторы оказывают слабое влияние на содержание Хл *a* в Саратовском водохранилище, умеренное в Волгоградском и почти полностью контролирует развитие фитопланктона незарегулированного нижнего участка р. Волги (R² = 0.21, 0.59 и 0.91 соответственно). Полученные данные дополняют наблюдения предыдущих лет и составляют основу многолетнего мониторинга экосистем крупных искусственных водоемов.

Ключевые слова: хлорофилл, фитопланктон, гидрологические и гидрохимические факторы, Нижняя Волга

DOI: 10.31857/S0320965223010114, **EDN:** KSSTUE

ВВЕДЕНИЕ

Развитие биологических сообществ тесно связано с условиями внешней среды, влияние которой по-разному проявляется в водоемах разного типа. Для анализа состояния водоемов, формирования их биологической продуктивности и изменения трофического статуса необходимо изучение взаимосвязи биотических и абiotических факторов, которое становится особенно актуальным при климатических изменениях, затронувших водные экосистемы мира (Adrian et al., 2009; Bertani et al., 2016; Özkan et al., 2016). Повышение

температуры воды установлено и для водохранилищ р. Волги. Средняя температура воды в Рыбинском водохранилище в период 1976–2010 гг. увеличивалась со скоростью 0.74°C за 10 лет (Структура..., 2018), летняя температура воды в Волгоградском водохранилище за 40-летний период стала выше на 1°C (Шашуловский, Мосияш, 2010). В условиях глобального потепления (Второй..., 2014) происходит изменение структуры сообществ и скорости метаболизма планктона, режима стратификации и потока питательных веществ, расширяется бескислородная зона (Hallstan et al., 2013; Lewandowska et al., 2014; Структура..., 2018; Xiao et al., 2018). В водохранилищах р. Волги, как и в других крупных водоемах, основной фонд автохтонного органического вещества создается при фотосинтезе фитопланктона (Романенко, 1985; Минеева, 2009). Универсальным показателем развития и функционирования водорослей, а также экологического

Сокращения: БЭ – биогенные элементы; Хл *a* – хлорофилл *a*; C_v – коэффициент вариации, F – критерий

Фишера, N_{общ} – общий азот; N-NO₃⁻ – азот нитратов; *p* – уровень значимости, P_{общ} – общий фосфор; P-PO₄³⁻ – фосфор фосфатов; *r* – коэффициент корреляции Пирсона; r_s – коэффициент корреляции Спирмена, R² – коэффициент детерминации.

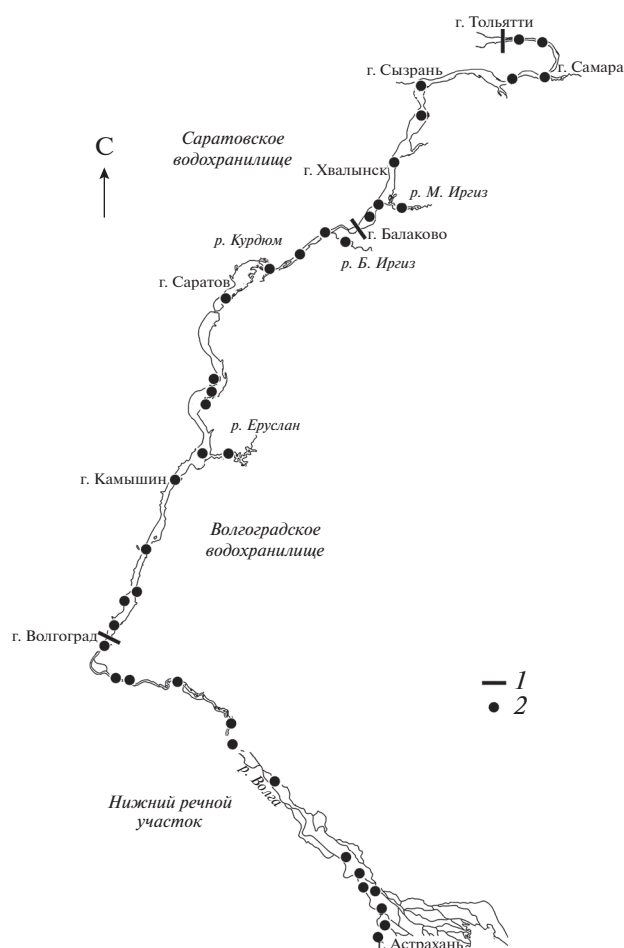


Рис. 1. Карта-схема Нижней Волги. 1 – границы водохранилищ, 2 – станции наблюдения.

состояния водной экосистемы служит содержание основного пигмента зеленых растений Хл *a*.

На водохранилищах Нижней Волги ведутся многолетние исследования гидрологического и гидрохимического режима (Шашуловская и др., 2016а, 2016б, 2019, 2021; Беспалова, 2019; Селезнева, 2019; Селезнева и др., 2020), развития фитопланктона (Герасимова, 1996; Попченко, 2001; Фитопланктон..., 2003; Далечина и др., 2012; Далечина, Джаяни, 2012; Корнева, 2015; Зеленевская, 2016, 2018–2020), содержания растительных пигментов и связи продуктивности фитопланктона этих водоемов с абиотическими факторами (Паутова, Номоконова, 1994; Минеева, 2004; Номоконова, 2012; Номоконова, Паутова, 2013; Беспалова, 2018; Шашуловская и др., 2021). В последние годы в ходе комплексных волжских экспедиций Института биологии внутренних вод РАН получены новые данные, которые дополняют наблюдения предыдущих лет и составляют основу многолетнего мониторинга экосистем крупных искусственных водоемов. Результаты исследова-

ний водохранилищ Верхней и Средней Волги с анализом влияния факторов среды на продуктивность фитопланктона представлены в наших предыдущих публикациях (Минеева и др., 2021, 2022а).

Цель работы – проанализировать связь содержания Хл *a* с факторами среды в водоемах Нижней Волги в современных условиях глобальных климатических изменений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал собирали в августе на 8–11 станциях Саратовского водохранилища (2015, 2017–2020 гг.), 10–16 станциях Волгоградского водохранилища (2017–2020 гг.), 18 станциях незарегулированного участка р. Волги от плотины Волжской ГЭС до г. Астрахань (2019, 2020 гг.), а также на всех станциях в июне 2016 г. (рис. 1). Хл *a* определяли стандартным спектрофотометрическим методом (SCOR-UNESCO, 1966; Jeffrey, Humphrey, 1975) на спектрофотометре Lambda25 PerkinElmer 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 многопараметрическим зондом YSI ProPlus (YSI Inc., USA, 2016) по всей водной толще с дискретностью 1 м. Содержание БЭ определяли в пробах воды из верхнего 0.5-метрового слоя, согласно методикам, описанным ранее (Минеева и др., 2021, 2022а). Данные по притоку взяты с сайта РусГидро <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/?date>; данные по температуре воздуха и количеству осадков – из архива погоды <https://rp5.ru/>. Средние многолетние климатические, гидрофизические и гидрохимические характеристики водохранилищ приведены по материалам монографий (Гидрометеорологический..., 1978; Герасимова, 1996; Попченко, 2001). Для статистической обработки данных, корреляционного и регрессионного анализа, построения графиков использовали стандартные компьютерные программы MS Excel 2007 и Statistica 12. Вариабельность признаков оценивали с помощью коэффициента вариации (C_v), значения которого <0.3 , $0.3–0.7$ и >0.7 отражали соответственно слабую, умеренную или сильную степень изменчивости.

Исследованный участок протяженностью ~1350 км (от $53^{\circ}28'$ с.ш., $49^{\circ}42'$ в.д. до $46^{\circ}23'$ с.ш., $48^{\circ}02'$ в.д.) расположен в умеренно-континентальной и континентальной климатических зонах: Саратовское водохранилище – в юго-восточной подобласти атлантико-континентальной лесной области, Волгоградское – в восточной подобласти атлантико-континентальной степной области (Алисов, 1956). Правый берег Саратовского водохранилища относится к лесостепной, левый берег и

большая часть Волгоградского водохранилища – к степной зоне, а в левобережной части последнего ниже впадения р. Еруслан начинается полупустыня. Оба водохранилища очень крупные (площадь зеркала 1831 и 3117 км² соответственно, полный объем 12.87 и 31.45 км³), неглубокие (средняя глубина 7 и 10 м), проточные (коэффициент условного водообмена 19.1 и 8.0 год⁻¹) (Авакян и др., 1987; Эдельштейн, 1998). Основу приходной части водного баланса составляет сток р. Волги, лишь 2.3% поступления в Саратовском водохранилище (Гидрометеорологический..., 1978) и <1% в Волгоградском (Государственный..., 1985) приходится на долю боковых притоков, <0.5% – на долю атмосферных осадков (Литвинов, 2000). По морфометрическим признакам и гидрологическому режиму водохранилища подразделяют на верхний, средний и нижний участки, выделяя русло и поймы, расположенные в основном в левобережье. Площади зарастания макрофитами достигают ~6% в Саратовском и 7.5% в Волгоградском. Незарегулированный участок р. Волги ниже плотины Волжской ГЭС характеризуется меньшей глубиной и высокой скоростью течения. Вода Нижней Волги относится к гидрокарбонатному типу кальциевой группы со сходным соотношением основных компонентов ионного состава (Волга..., 1978; Rivers..., 2021). Оба водохранилища, замыкающие Волжский каскад, расположены в индустриально развитом регионе и служат аккумуляторами широкого спектра химических веществ природного и антропогенного происхождения (Шашуловская и др., 2016а).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Годы наблюдения различались региональными погодными условиями, что обусловило различия климатических характеристик, а также гидрологических и гидрохимических показателей водохранилищ. Средняя за вегетационный сезон (май–октябрь) температура воздуха, которая определяет прогрев водной массы, в 2017 и 2019 гг. была ниже многолетнего для исследованного региона показателя (16.9°C) и выше нормы или близка к ней в остальные периоды. Количество осадков превышало норму на 30% в районе водохранилищ в 2017 и 2019 гг., на 50% – в низовье р. Волги в 2016 г. и не достигало среднего значения в остальные годы. Средний за май–октябрь объем притока оценивается в 138.97 км³ для Саратовского и 146.33 км³ для Волгоградского водохранилища, в период исследований он достигал 85–94% нормы в 2015 и 2019 гг., был близок к ней в 2016 г. и на 4–16% выше в остальные годы. На период половодья (май) приходилось в основном 25–32% притока, поступившего за май–октябрь, а в 2016 и 2018 гг. этот показатель увеличился до 36–41%.

Средняя температура воды в Саратовском и Волгоградском водохранилищах в августе колебалась в пределах 18.8–22.5 и 19.3–23.1°C, в июне 2016 г. была ниже (16.9 и 18.1°C). Максимальный прогрев в обоих водохранилищах отмечен в 2017 и 2018 гг., минимальный – в 2019 г. Во все сроки наблюдения температура увеличивалась вниз по течению р. Волги ($R^2 = 0.69$) (рис. 2а). Прозрачность (в среднем 1.7–2.4 м) и цветность воды (25–40 град) в обоих водохранилищах изменялись в близких пределах. Прозрачность >2 м при цветности <30 град отмечена в 2015 и 2020 гг. в Саратовском и в 2019 г. в обоих водохранилищах. В каждый период наблюдения эти показатели снижались вниз по течению ($R^2 = 0.70–0.74$) и характеризовались минимальными значениями на нижнем незарегулированном участке (рис. 2б, 2в). Средняя электропроводность в трех водных объектах в годы исследования была 287–446, 318–621, 300–381 мСм/см соответственно и изменялась немонокотонно ($R^2 = 0.18$). В Волгоградском водохранилище она увеличивалась, по сравнению с Саратовским, а ниже плотины Волжской ГЭС снижалась (рис. 2г). Максимальная величина зарегистрирована в 2020 г. в Волгоградском водохранилище.

Основные БЭ по-разному распределены на Нижней Волге. Содержание $N_{\text{общ}}$ на станциях изменялось от 0.40 до 2.30 мг/л, средние для водохранилищ в отдельные периоды – от 0.71 до 1.33 мг/л; более высокие величины (1.10–1.33 мг/л) наблюдали в 2016 и 2018 гг., более низкие (0.84 и 0.91 мг/л) – в 2019 и 2020 гг. (рис. 3а). При этом среднее количество $N_{\text{общ}}$ сохранялось на относительно стабильном уровне в Саратовском и Волгоградском водохранилищах, но снижалось на незарегулированном нижнем участке ($R^2 = 0.14$) (табл. 1).

Количество $N-NO_3^-$, изменявшееся от аналитического нуля до 0.19 мг/л, составляло небольшую часть общего фонда азота в разгар лета (в среднем от 13 до 19%) и было значительно выше в июне 2016 г. (30–40% $N_{\text{общ}}$).

Концентрация $P_{\text{общ}}$ (38–275 мкг/л) существенно менялась в отдельные годы, достигая максимальной в 2018 г. Средние для сроков наблюдения величины в Саратовском водохранилище (86–209 мкг/л) различались в 2.4 раза, в Волгоградском водохранилище (95–155 мкг/л) и на нижнем участке (88–124 мкг/л) – в меньшей степени. Осредненный за период наблюдения показатель незначительно менялся в двух водохранилищах и снижался ниже плотины Волжской ГЭС (табл. 1, рис. 3б). В пуле $P_{\text{общ}}$ преобладали $P-PO_4^{3-}$ – в среднем 90–97% $P_{\text{общ}}$ в водохранилищах и 74% на нижнем участке. Отношение $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$ характеризовалось сходным диапазоном и близкими средними величинами (7–12), свидетельствующими

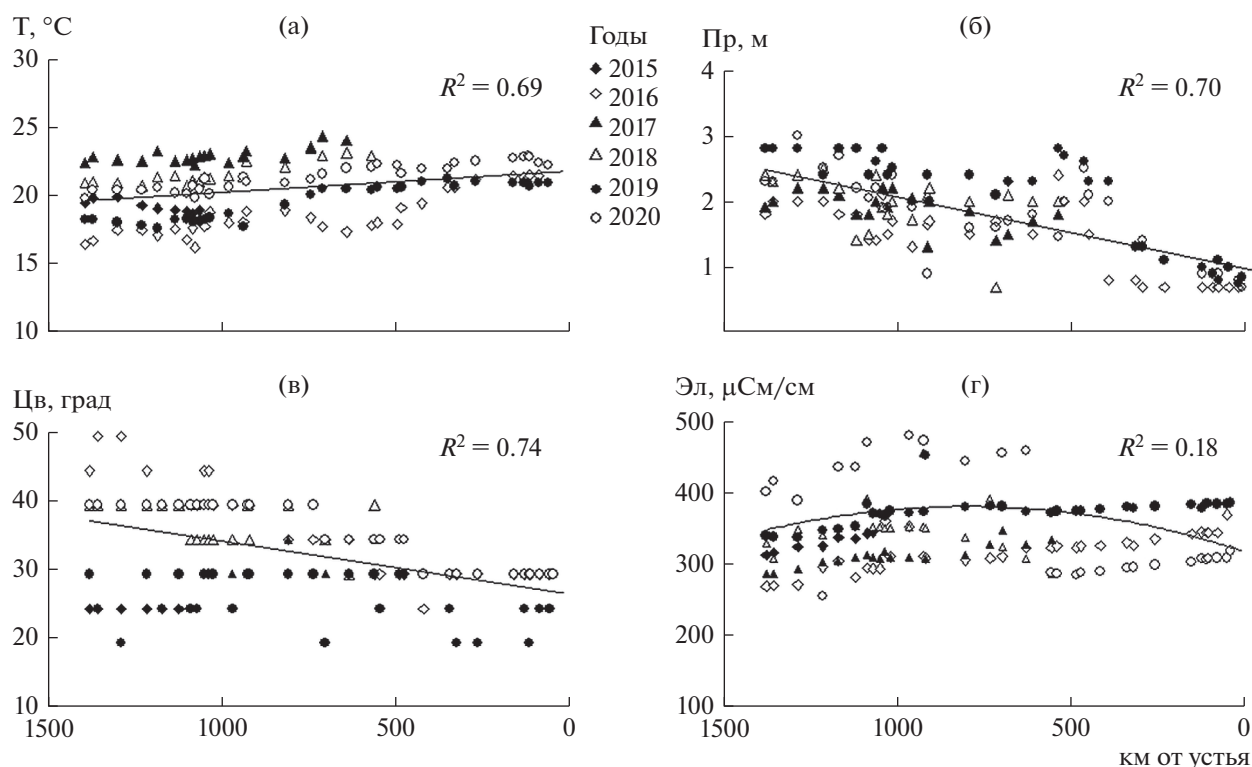


Рис. 2. Изменение температуры воды (а), прозрачности (б), цветности (в) и электропроводности (г) в водоемах Нижней Волги в годы исследования. Сплошная линия – линия тренда для усредненного за 2015–2020 гг. показателя.

щими о возможном азотном лимитировании фитопланктона Нижней Волги.

Вариабельность гидрологических характеристик на всем участке невелика, коэффициенты вариации в основном меняются в пределах 10–22%, лишь для электропроводности в Волгоград-

ском водохранилище и прозрачности на нижнем участке C_v увеличиваются до 38 и 47% соответственно. Коэффициенты вариации БЭ (22–66%) в основном соответствуют низкой и умеренной степени их изменчивости, при этом содержание общих форм, а также $P-PO_4^{3-}$ более стабильно, а

Таблица 1. Содержание хлорофилла и абиотические характеристики водохранилищ Нижней Волги в период исследований

Показатель	Саратовское водохранилище			Волгоградское водохранилище			Незарегулированный нижний участок Волги		
	пределы	среднее	C_v	пределы	среднее	C_v	пределы	среднее	C_v
Хлорофилл, мкг/л	0.9–25.5	5.3 ± 0.6	75	2.0–36.9	7.2 ± 0.9	83	3.0–29.5	13.9 ± 1.5	56
Температура, °С	16.1–23.1	19.7 ± 0.3	10	17.6–24.2	21.2 ± 0.3	8	20.3–22.8	21.5 ± 0.2	4
Прозрачность, м	1.4–3.0	2.2 ± 0.1	18	0.7–2.8	2.0 ± 0.1	22	0.7–2.7	1.4 ± 0.1	47
Цветность, град	20–50	36 ± 1	20	20–40	34 ± 1	14	20–35	29 ± 1	14
Электропроводность, мкСм/см	255–754	345 ± 11	22	286–770	424 ± 25	38	284–386	340 ± 8	12
$N-NO_3^-$, мг/л	0.02–0.19	0.09 ± 0.01	50	0.00–0.14	0.06 ± 0.01	65	0.00–0.07	0.03 ± 0.00	66
$N_{\text{общ}}$, мг/л	0.40–2.20	0.99 ± 0.07	45	0.68–2.31	0.98 ± 0.04	28	0.40–1.22	0.81 ± 0.03	22
$P-PO_4^{3-}$, мкг/л	29–172	88 ± 5	37	7–206	100 ± 7	43	35–119	71 ± 5	36
$P_{\text{общ}}$, мкг/л	38–274	127 ± 9	43	71–275	134 ± 7	35	60–149	101 ± 5	26
$N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$	3–21	8 ± 1	42	4–20	8 ± 1	44	4–16	9 ± 1	40

$N-NO_3^-$ — наиболее изменчиво (табл. 1). Согласно результатам дисперсионного анализа, в Саратовском водохранилище выявлены значимые межгодовые различия абиотических характеристик, в Волгоградском водохранилище они отсутствуют для $N_{общ}$ и отношения $N_{общ}/P_{общ}$, на Нижней Волге — для прозрачности (табл. 2).

Содержание Хл *a* на всем участке изменялось от 1–3 до 25.5–36.9 мкг/л при коэффициентах вариации 75 и 83% в Саратовском и Волгоградском водохранилищах, 56% — ниже плотины Волжской ГЭС (табл. 1). Предельные концентрации Хл *a* в Саратовском водохранилище различались в 3–4 раза в 2015, 2018, 2020 гг., в 5–9 раз в 2016, 2017, 2019 гг.; в Волгоградском водохранилище — в 2–5 раз в 2017, 2018 и 2020 гг., в 6–9 раз в 2016 и 2019 гг.; на нижнем участке разница была пятикратной во все периоды наблюдения. Количество Хл *a* в Саратовском водохранилище снижалось вниз по течению в 2015, 2016 гг., незначительно менялось на всем его протяжении в 2019 и 2020 гг. и характеризовалось локальными подъемами в 2017 и 2018 гг. В Волгоградском водохранилище оно оставалось неизменным на всей акватории в 2017 и 2020 гг., локально увеличивалось в его нижней части в 2016 и 2019 гг. и было повышенным в верхней части в 2018 г. Увеличение Хл *a* отмечено в притоках — реках Еруслан, Малый Иргиз, Курдюм. В обоих водохранилищах получены близкие средние концентрации Хл *a*, лишь в 2020 г. в Волгоградском водохранилище они выросли в 1.5 раза по сравнению с Саратовским. Ниже плотины Волжской ГЭС содержание Хл *a* в 2.3–4.2 раза выше, чем в Волгоградском водохранилище, и существенно возрастало вниз по течению, начиная с расстояния 120 км (2019 г.) или 300–400 км (2016, 2020 гг.) от устья р. Волги. Распределение Хл *a* на всем исследованном участке оставалось сходным и в отдельные годы, и при осреднении данных за весь период наблюдения ($R^2 = 0.77$) (рис. 3в).

Наиболее часто встречаемые концентрации Хл *a* в Саратовском и Волгоградском водохранилищах (5–10 мкг/л) служат показателем мезотрофных вод, достигают 80 и 68% общей выборки соответственно. На нижнем участке по концентрации Хл *a* преобладают показатели умеренно эвтрофных и эвтрофных вод (10–15 мкг/л в 2019 г., 15–20 мкг/л в 2016 и 2020 гг.). Такой трофический статус отражают и средние для сроков наблюдения величины (рис. 4). По результатам дисперсионного анализа межгодовые различия средних концентраций Хл *a* в водохранилищах не значимы, лишь на нижнем участке в августе 2019 и 2020 гг. они достоверны (табл. 2).

Теснота связи содержания Хл *a* с факторами среды, меняющаяся в разные годы, в большинстве случаев умеренная и только с прозрачностью

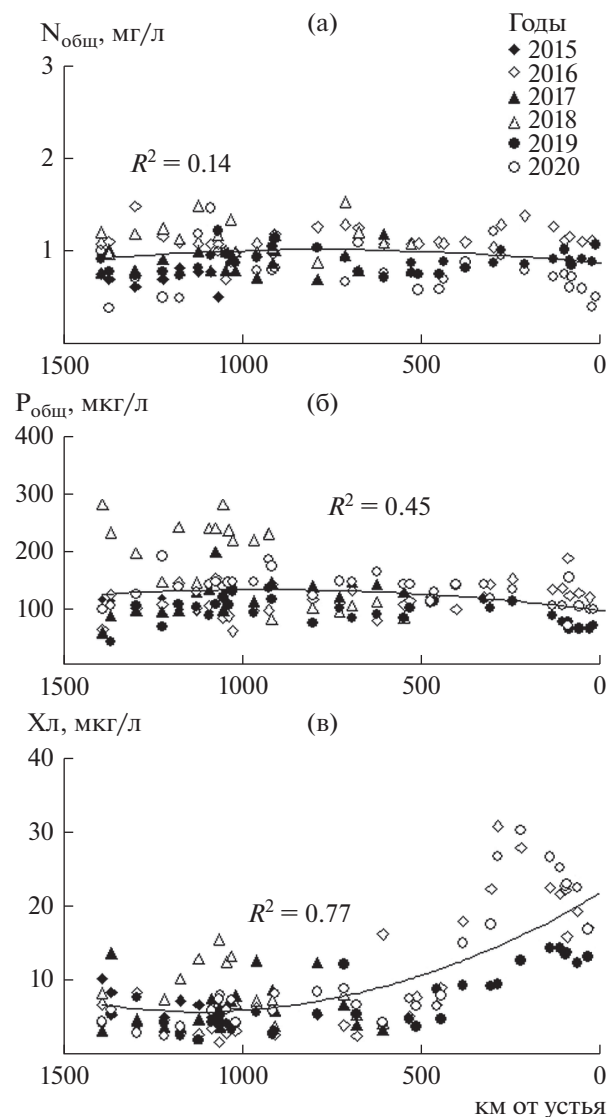


Рис. 3. Содержание $N_{общ}$ (а), $P_{общ}$ (б) и хлорофилла (в) в водоемах Нижней Волги в годы исследования. Сплошная линия — линия тренда для осредненного за 2015–2020 гг. показателя.

воды — высокая (рис. 5а–5е). Парный корреляционный анализ показал, что самое большое число достоверных коэффициентов корреляции Хл *a* с абиотическими параметрами получено в 2016, 2019 и 2020 гг. В четырех случаях из пяти Хл *a* отрицательно связан с прозрачностью воды, в трех случаях — отрицательно с цветностью, положительно — с температурой и электропроводностью. Для всех лет наблюдения выявлена зависимость Хл *a* от $N-NO_3^-$, для двух лет — от $P-PO_4^{3-}$. В 2016 г. Хл *a* положительно коррелировал с $N_{общ}$ и $P_{общ}$; в 2019 и 2020 гг. — отрицательно с $P_{общ}$. По совокупности пятилетних данных сопряженность Хл *a* с абиотическими факторами в основном сла-

Таблица 2. Оценка межгодовых различий содержания хлорофилла и абиотических характеристик Нижней Волги с помощью однофакторного дисперсионного анализа ANOVA

Показатель	Саратовское водохранилище ($F_{кр} = 2.65$)		Волгоградское водохранилище ($F_{кр} = 3.32$)		Незарегулированный нижний участок р. Волги ($F_{кр} = 3.24$)	
	F	p	F	p	F	p
Хлорофилл	0.83	0.52	2.12	0.11	5.25	0.01
Температура	10.3	0.00	5.15	0.01	22.6	0.00
Прозрачность	7.38	0.00	52.1	0.00	1.19	0.31
Цветность	104	0.00	20.6	0.00	5.30	0.01
Электропроводность	4.97	0.01	16.7	0.00	262	0.00
N-NO ₃ ⁻	13.4	0.00	3.49	0.04	1117	0.00
N _{общ}	6.83	0.00	1.21	0.31	30.1	0.00
P-PO ₄ ³⁻	28.2	0.00	11.5	0.00	16.6	0.00
P _{общ}	24.6	0.00	4.87	0.01	9.36	0.00
N _{общ} /P _{общ}	3.85	0.02	1.52	0.23	14.9	0.00

бая или умеренная ($r < 0.70$) (рис. 5ж, рис. 5з). В обоих водохранилищах развитие фитопланктона положительно связано с N_{общ}, в Волгоградском водохранилище отрицательно с прозрачностью. Самое большое количество достоверных зависимостей получено для нижнего незарегулированного участка, где Хл a отрицательно коррелирует с прозрачностью, электропроводностью, содержанием N-NO₃⁻ и положительно с температурой воды.

Результаты множественного регрессионного анализа и пошаговой регрессии выявили слабое влияние рассмотренных абиотических показателей на фитопланктон в Саратовском водохранилище ($R^2 = 0.21$), умеренное в Волгоградском ($R^2 = 0.59$) и наиболее сильное на нижнем участке ($R^2 = 0.91$). В число приоритетных факторов в Волгоградском водохранилище входят прозрачность, N-NO₃⁻ и P_{общ}, на незарегулированном участке – прозрачность, N-NO₃⁻ и температура воды.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По климатическим условиям и гидрографии Нижнее Поволжье значительно отличается от северо-запада волжского бассейна. Регион расположен в южной части Приволжской возвышенности, переходящей в Прикаспийскую низменность, относится к аридной области. В пределах протяженного исследованного участка во все сроки наблюдения температура воды монотонно увеличивается вниз по течению с севера на юг, несмотря на межгодовые температурные различия, обусловленные региональными погодными особенностями. В водохранилищах Средней Вол-

ги, относящихся к разным природным зонам и различающихся характеристиками водосборной территории, плавного изменения температуры не наблюдали (Минеева и др., 2022а). Показатели подводного светового режима – прозрачность и цветности воды – в двух водохранилищах характеризуются близкими величинами. В масштабах волжского каскада прозрачность увеличивается от Верхней к Нижней Волге с ростом глубины водохранилищ, что препятствует взмучиванию седиментов, ухудшающему оптические свойства водной среды. Обратная связь прозрачности и хлорофилла указывает на значительное влияние водорослевой взвеси на подводные световые условия. Прозрачность заметно снижается ниже плотины Волжской ГЭС – на неглубоком участке с транзитным стоком и скоростью течения 1.0–1.7 м/с (Кривошей, 2015).

Ряд абиотических характеристик Нижней Волги связан с объемом водного стока, а также с гидрологическими и метеорологическими условиями бассейна. Это относится к ионному стоку рек и изменениям общей минерализации (Волга..., 1978; Rivers..., 2021), цветности воды, содержанию органического вещества и БЭ (Герасимова, 1996; Головатых, Галушкина, 2014; Шашуловская и др., 2016а). Цветность воды в каскаде в целом снижается по направлению с севера на юг с уменьшением объема боковой приточности и с изменением условий водосборного бассейна, высокая заболоченность которого и присутствие окрашенных вод характерны для Верхней Волги. Более низкие величины цветности отмечены в годы с пониженным объемом притока в половодье (май) и за сезон (май–октябрь). На Средней Волге цветность увеличилась в дождливом 2017 г. (Минеева и др.,

2022а) за счет выноса с водосборной площади окрашенных органических веществ, что подтверждает связь ее межгодовых изменений с климатическими условиями (Pace, Cole, 2002). Электропроводность воды исследованного участка меняется немонотонно, хотя компоненты солевого состава, определяемого особенностями геохимии водосборного бассейна, характеризуются стабильностью и равномерным распределением по продольной оси водохранилищ (Шашуловская и др., 2019). Электропроводность увеличивается в годы с повышенной водностью, ее рост в Волгоградском водохранилище, по сравнению с Саратовским, связан с локальными условиями. Максимальная электропроводность в 2020 г. получена за счет учета вод притоков, высокую минерализацию которых отмечали и предыдущие исследователи (Селезнев и др., 1999; Горохова, 2018).

Содержание БЭ относится к азональным факторам. Как и в других водохранилищах каскада (Минеева и др., 2021, 2022а), $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ характеризуются высокими величинами, типичными для эвтрофных водоемов (Китаев, 2007). Несмотря на межгодовые колебания, среднее количество $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ сохраняется на относительно стабильном уровне в Саратовском и Волгоградском водохранилищах, но снижается на незарегулированном нижнем участке. По сравнению с началом 1990-х годов (Минеева, 2004), в обоих водохранилищах отмечено увеличение среднего содержания $P_{\text{общ}}$ и сохранение на прежнем уровне содержания $N_{\text{общ}}$. БЭ более вариабельны, чем гидрологические показатели, особенно – $N\text{-NO}_3^-$, потребляемый водорослями. На $N\text{-NO}_3^-$ приходится небольшая доля $N_{\text{общ}}$ (в среднем 13–19%), но она выше, чем в водохранилищах Верхней и Средней Волги (2–8%) (Минеева и др., 2021, 2022а). Повышенное содержание $N\text{-NO}_3^-$, отмечаемое в начале вегетационного сезона, сохраняется в июне, когда еще не полностью использован их запас в трансформированных зимних водах и терригенном паводковом стоке. В разгар лета в августе содержание всех форм азота снижается за счет потребления гидробионтами. По многолетним данным, средняя концентрация $N\text{-NO}_3^-$ в Саратовском водохранилище изменяется незначительно, а ее колебания в двух водохранилищах происходят синхронно (Шашуловская и др., 2016а, 2019, 2021).

Содержание $P_{\text{общ}}$ и высокий (~70%) вклад в его фонд $P\text{-PO}_4^{3-}$ на Нижней Волге выше, чем на Верхней Волге, и сопоставим с таковыми в Чебоксарском и Куйбышевском водохранилищах (Минеева и др., 2021, 2022а). Концентрация $P\text{-PO}_4^{3-}$ в Саратовском и Волгоградском водохранилищах колеблется в близких пределах. При этом размах

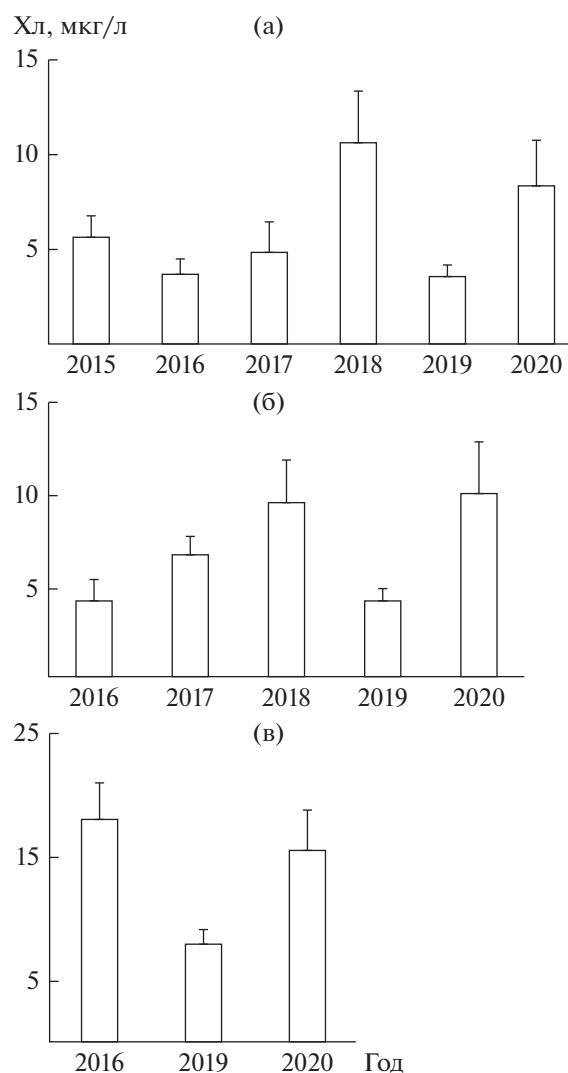


Рис. 4. Содержание хлорофилла в Саратовском (а), Волгоградском (б) водохранилищах и на незарегулированном нижнем участке р. Волги (в) в годы исследования. Даны средние величины со стандартной ошибкой.

величин шире, чем приводится в публикациях, в которых отмечен отрицательный тренд в многолетней динамике $P\text{-PO}_4^{3-}$ (Шашуловская и др., 2016а, 2021). Содержание $P\text{-PO}_4^{3-}$ снижается в годы с высокой водностью и возрастает при уменьшении водного стока, что позволяет считать основным фактором генезиса фосфора в двух водохранилищах внутриводоемные процессы (Шашуловская и др., 2016а).

Для нормального функционирования водных экосистем важны не только концентрации азота и фосфора, но и их соотношение, которое служит показателем биогенного лимитирования фитопланктона, а также самостоятельным фактором, регулирующим развитие водорослей (Булгаков,

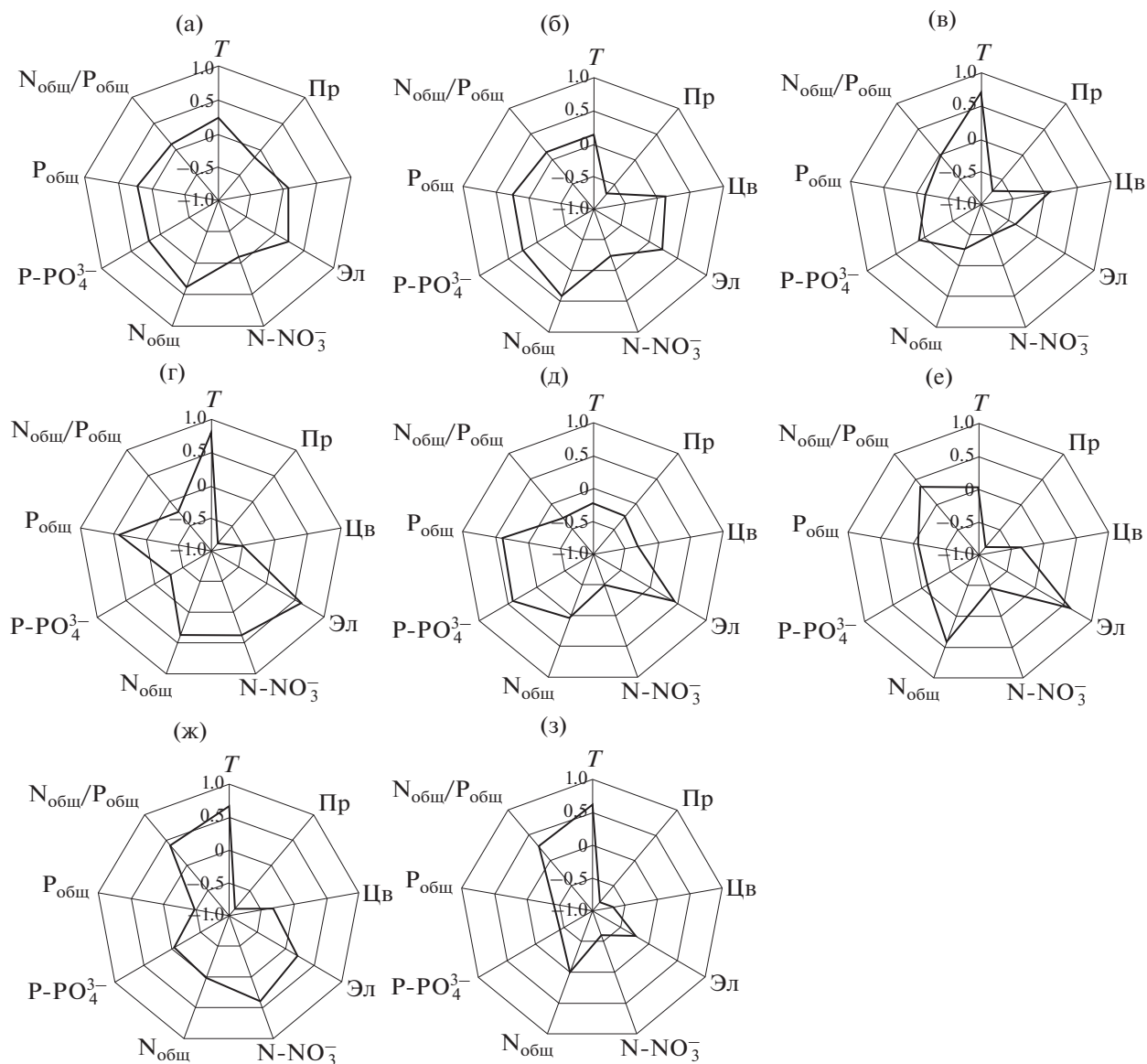


Рис. 5. Коэффициенты корреляции содержания хлорофилла с факторами среды в водоемах Нижней Волги: а – Саратовское водохранилище, б – Волгоградское, в – незарегулированный нижний участок за весь период исследования, г–з – все водные объекты в отдельные годы (2016–2020 гг. соответственно). *T* – температура, Пр – прозрачность, Цв – цветность, Эл – электропроводность.

Левич, 1995; Claesson, 1978). Величины $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}} < 10$ соответствуют дефициту азота, > 15 – дефициту фосфора, промежуточные, близкие к соотношению элементов в клетках, – отсутствию биогенного лимитирования (Sakamoto, 1966). На всем исследованном участке, как и в сопредельном Куйбышевском водохранилище, средние величины $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}} < 10$ указывают на возможный дефицит азота. В эти же годы нами отмечено отсутствие биогенного лимитирования фитопланктона в эвтрофных Иваньковском, Угличском, Чебоксарском водохранилищах и смена лимитирующего элемента в умеренно эвтрофных Рыбинском и

Горьковском водохранилищах (Минеева и др., 2021, 2022а).

Для характеристики состояния водных экосистем показательно развитие летних планктонных сообществ. В Саратовском и Волгоградском водохранилищах содержание $Xл\ a$, отражающее развитие фитопланктона, в период исследования было таким же, как в начале 70-х, а также 90-х гг. XX в., – с самыми низкими для каскада значениями (Минеева, 2004). В настоящее время в обоих водохранилищах по-прежнему преобладают концентрации $Xл\ a$, типичные для мезотрофных вод и отмеченные даже в аномально жарком и мало-

водном 2010 г. (Номоконова, 2012; Селезнева, 2019). Такому трофическому типу соответствуют и средние для периодов наблюдения концентрации Хл *a*. Средние для двух водохранилищ величины, полученные в 1989, 1990, 2016–2020 гг., меняются синхронно ($r_s = 0.86$, $p < 0.05$), но связь становится незначимой с учетом данных многоводных 1988 и 1991 гг., когда содержание Хл *a* превышало границу мезотрофии в одном из водохранилищ. На этом основании сделан вывод о неустойчивом состоянии экосистем водохранилищ, замыкающих каскад и зависимых от стока р. Волги (Паутова, Номоконова, 1994). Однако развитие фитопланктона за весь период существования обоих водохранилищ, включая годы наших исследований, остается типичным для мезотрофных водоемов (Герасимова, 1996; Попченко, 2001; Далечина, Джаяни, 2012; Корнева, 2015; Зеленевская, 2016, 2018–2020), а в отдельные годы в Саратовском – для олиготрофных (Шашуловская и др., 2021). В многолетней динамике фитопланктона Волгоградского водохранилища выявлены периодические изменения, связанные с колебаниями водности и циклами солнечной активности (Шашуловский, Мосияш, 2010), отмеченные также для альгоценозов Рыбинского водохранилища (Структура..., 2018).

Учитывая морфометрические особенности Саратовского и Волгоградского водохранилищ, сохраняющих речной характер на всем своем протяжении, можно было бы ожидать, что фитопланктон равномерно распределяется по их акватории. Распределение Хл *a* чаще характеризуется умеренной неоднородностью (C_v 40–60%), но в отдельные годы (Саратовское в 2017, 2020; Волгоградское в 2016, 2018) степень дискретности возрастает, что может быть связано с локальными условиями. Так, для верхнего участка Саратовского водохранилища выявлены изменения естественного динамического режима за счет взаимодействия попусков ГЭС и вод притоков, что обуславливает краткосрочные изменения водных характеристик и их пространственную неоднородность (Рахуба, 2009). Содержание Хл *a* незначительно варьирует на русловых станциях, но, как и в других водохранилищах каскада, увеличивается в устьевых участках рек, прибрежных мелководьях и заливах (Минеева, 2004; Номоконова, 2012). Для этих же акваторий характерны высокие величины биомассы фитопланктона (Герасимова, 1996; Попченко, 2001).

Результаты регрессионного анализа показали, что в разгар лета фитопланктон двух сопредельных замыкающих каскад водохранилищ, которые имеют много общих черт, по-разному реагирует на внешнее воздействие. В обоих водоемах формируются устойчивые автотрофные сообщества с близкими показателями обилия, но рассмотрен-

ные абиотические факторы оказывают умеренное влияние на содержание Хл *a* в Волгоградском водохранилище и слабое в Саратовском. Это водохранилище с высоким коэффициентом условного водообмена предназначено для недельного регулирования стока, не накапливает запаса воды и по своей конфигурации напоминает медленно текущую реку (Волга..., 1978). По-видимому, его высокая проточность – основной фактор, регулирующий развитие фитопланктона, что показано для волжского каскада в целом (Минеева и др., 2022б).

К особенностям незарегулированного нижнего участка р. Волги относится неоднородность химического состава воды (Шашуловская и др., 2016б). Снижение содержания БЭ вниз по течению обусловлено их потреблением фитопланктоном, об увеличении обилия которого свидетельствует рост Хл *a*. Содержание Хл *a* характеризуется невысокой изменчивостью, распределение мало меняется год от года, на всем участке, как и ранее, преобладают показатели умеренно эвтрофных и эвтрофных вод. При этом содержание Хл *a* нижнего участка р. Волги в значительной мере зависит от рассматриваемых абиотических факторов, совместное действие которых почти полностью контролирует развитие фитопланктона.

Выводы. В водохранилищах Нижней Волги, относящихся к умеренно-континентальной и континентальной аридной области, в годы с разными термическими условиями и водностью температура, прозрачность, цветность и электропроводность воды характеризуются небольшой вариабельностью и демонстрируют изменения с севера на юг, согласно зональным особенностям волжского каскада. Содержание $N_{\text{общ}}$ и $P_{\text{общ}}$ незначительно меняется в Саратовском и Волгоградском водохранилищах, но снижается на незарегулированном нижнем участке. БЭ более вариабельны, чем гидрологические показатели, особенно – $N-NO_3^-$, потребляемый водорослями. Доля минеральных форм в фонде общего азота и фосфора выше, чем в водохранилищах Верхней и Средней Волги. Отношение $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}} < 10$ указывает на возможный дефицит азота для фитопланктона Нижней Волги. Межгодовые изменения гидрологических и гидрохимических показателей связаны с объемом водного стока и метеорологическими условиями бассейна. Содержание Хл *a*, которое не изменилось по сравнению с 70-ми и 90-ми гг. ХХ в., соответствует мезотрофной категории в Саратовском и Волгоградском водохранилищах и эвтрофной категории на нижнем участке р. Волги. Распределение Хл *a* по акватории водохранилищ чаще характеризуется умеренной неоднородностью, незначительно варьирует на русловых станциях, но, как и во всем каскаде, увеличивается в устьевых участках рек, в прибрежных мелководьях и заливах. Фитопланктон двух сопредельных

водохранилищ, замыкающих каскад, по-разному реагирует на внешнее воздействие. Рассмотренные абиотические факторы оказывают слабое влияние на содержание Хл *a* в Саратовском водохранилище, умеренное в Волгоградском и почти полностью контролируют развитие фитопланктона незарегулированного нижнего участка р. Волги.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян А.Б., Салтанкини В.П., Шаранов В.А. 1987. Водохранилища. Москва: Мысль.
- Алисов Б.П. 1956. Климат СССР. Москва: Наука.
- Беспалова К.В. 2018. Анализ экологического состояния Саратовского и Куйбышевского водохранилищ // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Матер. XV Межд. науч.-практ. конф. Т. 1. Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева. С. 150.
- Беспалова К.В. 2019. Сезонная изменчивость качества воды Саратовского водохранилища // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Т. 28. № 2. С. 258.
- Булгаков Н.Г., Левич А.П. 1995. Биогенные элементы в среде и фитопланктон: соотношение азота и фосфора как самостоятельный фактор регулирования структуры альгоценоза // Успехи соврем. биологии. 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.
- Герасимова Н.А. 1996. Фитопланктон Саратовского и Волгоградского водохранилищ. Тольятти: Ин-т экологии Волжск. бассейна РАН.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. 1978. Ленинград: Гидрометеоздат.
- Головатых Н.Н., Галушкина Н.В. 2014. Сток биогенных веществ Волги в 2000–2012 гг. // Вестник рыбохозяйственной науки. Т. 1. № 2 (2). С. 27.
- Горохова О.Г. 2018. Показатели альгофлоры планктона для характеристики равнинных рек бассейна Средней и Нижней Волги // Экологические проблемы бассейнов крупных рек-6: Матер. междунар. конф., приуроченной к 35-летию Института экологии Волжского бассейна РАН и 65-летию Куйбышевской биостанции. Тольятти: Анна. С. 83.
- Государственный водный кадастр. 1985. Т. 1. Поверхностные воды. Сер. 3. Многолетние данные. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 2. Озера и водохранилища. Т. 1. РСФСР. Вып. 24. Бассейны рек Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. Ленинград: Гидрометеоздат.
- Далечина И.Н., Джаяни Е.А. 2012. Фитопланктон Саратовского водохранилища в 2000–2008 гг. // Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ: Сб. матер. докл. участников Всерос. конф. Ин-т биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок. Ижевск: Издатель Пермьяков С.А. С. 57.
- Далечина И.Н., Мосияш С.А., Филимонова И.Г. 2012. Фитопланктон и биогены Волгоградского водохранилища // Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ: Сб. матер. докл. участников Всерос. конф. Ин-т биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок. Ижевск: Издатель Пермьяков С.А. С. 54.
- Зеленевская Н.А. 2016. Сезонная динамика фитопланктона Саратовского водохранилища в 2015 году // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Матер. XIII Междунар. науч.-практ. конф. Т. 2. Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева. С. 44.
- Зеленевская Н.А. 2018. Фитопланктон Волгоградского водохранилища в 2017 году // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Матер. XV Междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева. С. 133.
- Зеленевская Н.А. 2019. Динамика развития фитопланктона Волгоградского водохранилища в 2018 году // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Матер. XVI Междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева. С. 214.
- Зеленевская Н.А. 2020. Особенности развития фитопланктона Саратовского водохранилища в 2019 году // Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики: Матер. XVII Междунар. науч.-практ. конф. Т. 2. Тольятти: Волжский ун-т им. В.Н. Татищева. С. 230.
- Китаев С.П. 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельск. науч. центр РАН.
- Корнева Л.Г. 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом.
- Кривошей В.А. 2015. Река Волга (проблемы и решения). Москва: ООО “Журнал РТ”.
- Литвинов А.С. 2000. Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада. Ярославль: Ярослав. гос.-техн. ун-т.
- 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., 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., Поддубный С.А., Степанова И.Э., Цветков А.И. 2022а. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона Волги. Водохранилища средней Волги // Биология внутр. вод. № 6. С. 640. <http://doi.org/10.31857/S0320965222060158>

- Минеева Н.М., Семадени И.В., Соловьева В.В., Макарова О.С. 2022б. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ Волги (2019–2020 гг.) // Биология внутр. вод. № 4. С. 357.
<https://doi.org/10.31857/S0320965222040210>
- Номоконова В.И. 2012. Динамика содержания хлорофилла *a* в водных массах и донных отложениях нижеволжских водохранилищ // Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ: Сб. матер. докл. участников Всерос. конф. Институт биологии внутр. вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок. Ижевск: Изд. Пермиков С.А. С. 197.
- Номоконова В.И., Паутова В.Н. 2013. Первичная продукция фитопланктона в Куйбышевском и Саратовском водохранилищах в летние сезоны 2009–2011 гг. // Изв. Самарск. науч. центра РАН. Т. 15. № 3. С. 185.
- Паутова В.Н., Номоконова В.И. 1994. Продуктивность фитопланктона Куйбышевского водохранилища. Тольятти: Ин-т экологии Волжск. бассейна РАН.
- Фитопланктон Нижней Волги. Водохранилища и низовье реки. 2003. Санкт-Петербург: Наука.
- Попченко И.И. 2001. Видовой состав и динамика фитопланктона Саратовского водохранилища. Тольятти: Ин-т экологии Волжск. бассейна РАН.
- Рахуба А.В. 2009. Суточная изменчивость качества вод водохранилища в зоне неустановившегося динамического режима // Водн. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. № 2. С. 15.
- Романенко В.И. 1985. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Ленинград: Наука.
- Селезнев В.А., Рубцов М.Г., Купер В.Я., Розенберг Г.С. 1999. Оценка пространственной неоднородности качества вод Саратовского водохранилища // Изв. Самарск. науч. центра РАН. Т. 1. № 2. С. 204.
- Селезнева А.В. 2019. Концентрация фосфатов в волжской воде в условиях антропогенного эвтрофирования водохранилищ // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Т. 28. № 2. С. 262.
- Селезнева А.В., Беспалова К.В., Селезнев В.А. 2020. Формирование качества воды крупных водохранилищ Волги в условиях роста биогенной нагрузки // Теоретические проблемы экологии и эволюции. Качество воды и водные биоресурсы. VII Любимцевские чтения: Мат. межд. науч. чтений. Тольятти: Анна. С. 167.
- Структура и функционированием экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. 2018. Москва: РАН.
- Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Филимонова И.Г. и др. 2016а. Гидрохимические основы биологической продуктивности в замыкающих водохранилищах Волжского каскада // Тр. Зоол. ин-та РАН. Т. 320. № 3. С. 367.
- Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Орлов А.А., Фокина Л.Н. 2016б. Многолетние изменения качества воды участков Нижней Волги, различающихся по гидрологическому режиму // Изв. Самарск. науч. центра РАН. Т. 18. № 5–2. С. 382.
- Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Филимонова И.Г. и др. 2019. Особенности многолетней динамики гидрохимических показателей водохранилищ Нижней Волги и реки Урал (на примере Саратовского, Волгоградского и Ириклинского водохранилищ) // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. № 3. С. 72.
- Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Джаяни Е.А. 2021. Биогенные элементы и фитопланктон Саратовского водохранилища в современных условиях // Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции. Ярославль: Филигрань. С. 198.
- Шашуловский В.А., Мосияш С.С. 2010. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. Москва: Тов-во науч. изданий КМК.
- Эдельштейн К.К. 1998. Водохранилища России: экологические проблемы и пути их решения. Москва: ГЕОС.
- 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.
- 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>
- Claesson A. 1978. Research on recovery of polluted lakes. Algal growth potential and the availability of limiting nutrients // *Acta University Uppsala*. № 461. P. 1.
- Hallstan S., Trigal C., Johansson K.S.L., Johnson R.K. 2013. The impact of climate on the geographical distribution of phytoplankton species in boreal lakes // *Oecologia*. V. 173. № 4. P. 1625.
<https://doi.org/10.1007/s00442-013-2708-6>
- Jeffrey S.W., Humphrey G.F. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochem. Physiol. Pflanz*. Bd 167. P. 191.
- Lewandowska A.M., Boyce D.J., Hofmann M. et al. 2014. Effect of sea surface warming on marine plankton // *Ecology Letters*. V. 17. № 5. P. 614.
<https://doi.org/10.1111/ele.12265>
- 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. Amsterdam: Elsevier.
- 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. Determination of photosynthetic pigments in sea water // *Monographs on Oceanographic Methodology*. 1966. Montreux: UNESCO. P. 9.
- Xiao W., Liu X., Irwin A.J. et al. 2018. Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates // *Water Res.* V. 128. № 1. P. 206.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.051>

Abiotic Factors and Their Role in the Development of Phytoplankton in the Lower Volga

N. M. Mineeva¹, *, S. A. Poddubny¹, I. E. Stepanova¹, and A. I. Tsvetkov¹

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

**e-mail: mineeva@ibiw.ru*

Based on field observations carried out during the 2015–2020 summer low water period, the interannual variability of abiotic characteristics and chlorophyll content in the Lower Volga is considered. In years with different thermal conditions and water content, the temperature, transparency, color and electrical conductivity of water are characterized by small variability and demonstrate changes from north to south, according to the zonal features of the Volga cascade. The average nutrient content (0.81–0.99 mg/L N_{tot} and 101–134 $\mu\text{g/L}$ P_{tot}) changes insignificantly in the Saratov and Volgograd reservoirs, but decreases in the unregulated lower part of the Volga. The content of $N\text{-NO}_3^-$ and $P\text{-PO}_4^{3-}$ in the total nitrogen and phosphorus pool respectively, is 4–9 and 69–74%, the ratio $N_{\text{tot}}/P_{\text{tot}} < 10$ indicates a possible nitrogen limitation of phytoplankton. The Chl *a* content corresponds to the mesotrophic category in the Saratov and Volgograd reservoirs (5.3 ± 0.6 and 7.2 ± 0.9 $\mu\text{g/L}$), and eutrophic in the lower section (13.9 ± 1.5 $\mu\text{g/L}$). The trophic status of the Lower Volga has not changed in comparison with the last decade of the 20th century. It was found that abiotic factors have a weak effect on the Chl *a* content in the Saratov reservoir, moderate in the Volgograd reservoir and almost completely control the development of phytoplankton in the unregulated lower part of the Volga ($R^2 = 0.21$, 0.59, and 0.91). The data obtained supplement the observations of previous years and form the basis for long-term monitoring of ecosystems of large artificial reservoirs.

Keywords: chlorophyll, phytoplankton, hydrological and hydrochemical factors, Lower Volga