

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС,
ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 574.583(28):581

СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА И СОВРЕМЕННОЕ ТРОФИЧЕСКОЕ
СОСТОЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ Р. ВОЛГИ (2019, 2020 ГГ.)

© 2022 г. Н. М. Минеева^{а, *}, И. В. Семадени^а, В. В. Соловьева^а, О. С. Макарова^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 15.03.2021 г.

После доработки 28.09.2021 г.

Принята к публикации 19.01.2022 г.

Приведены данные по содержанию хлорофилла *a* (Хл *a*), определенного стандартным спектрофотометрическим методом в водохранилищах р. Волги летом 2019 и 2020 гг. Содержание Хл *a* было типичным для летнего максимума фитопланктона р. Волги и изменялось от <10 до >100 мкг/л. Локальное увеличение Хл *a* отмечено в приплотинных расширениях, в прибрежных мелководьях, в водах и устьевых участках притоков, максимальное — в Шошинском плесе Иваньковского водохранилища и устьевом участке р. Оки в Чебоксарском водохранилище. Средние концентрации Хл *a* характеризуют Иваньковское, Угличское и Чебоксарское водохранилища как эвтрофные, Рыбинское, Саратовское и Волгоградское — мезотрофные, трофический статус Горьковского и Куйбышевского водохранилищ менялся от мезотрофного до умеренно эвтрофного.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, водохранилища Волги, трофический статус

DOI: 10.31857/S0320965222040210

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая значимость фитопланктона, продуцирующего большую часть автотонного органического вещества в крупных озерах и водохранилищах, определяет необходимость оперативной информации о развитии, состоянии и функционировании сообщества. Для получения этой информации в гидробиологической практике на протяжении последних десятилетий используют фотосинтетические пигменты, в том числе — при исследовании больших рек мира (Duan, Bianchi, 2006; Sabater et al., 2008; Bowes et al., 2012; Lee et al., 2019; Plyaka et al., 2020; Tian et al., 2020; Sarkar et al., 2021). Данные по пигментам волжского фитопланктона, полученные во второй половине XX в. (Пырина, 1966; Минеева, 2004), к настоящему времени дополнены новыми материалами (Минеева, Макарова, 2018; Минеева и др., 2020), представляющими интерес для сравнительного экосистемного анализа.

Цель работы — исследовать содержание и распределение Хл *a* для оценки современного трофического статуса водохранилищ р. Волги в годы с различным водным и температурным режимом.

Сокращения: Хл *a* — хлорофилл *a*; R^2 — коэффициент детерминации; C_v — коэффициент вариации.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материал собран в августе 2019 и 2020 гг., соответственно на 95 и 99 русловых станциях водохранилищ Волги, 35 и 39 станциях притоков, их устьевых участков и изолированных от русла заливов. Содержание Хл *a* определяли в интегральных (0 м—дно) пробах воды стандартным спектрофотометрическим методом (SCOR-UNESCO..., 1966) на спектрофотометре Lambda25 PerkinElmer. Для оценки трофического статуса водохранилищ использовали среднюю концентрацию Хл *a*, принимая величины 3–10, 10–15 и 15–30 мкг/л пограничными соответственно для мезотрофных, умеренно эвтрофных и эвтрофных вод (Минеева, 2000). Распределение фитопланктона по акватории водохранилищ оценивали с помощью коэффициента вариации средней (C_v). При расчетах и статистической обработке данных использовали стандартные программы для персонального компьютера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Волжский каскад, протяженность которого с севера на юг >2500 км, пересекает различные природно-климатические зоны. Входящие в его состав восемь крупных (площадь зеркала 249–

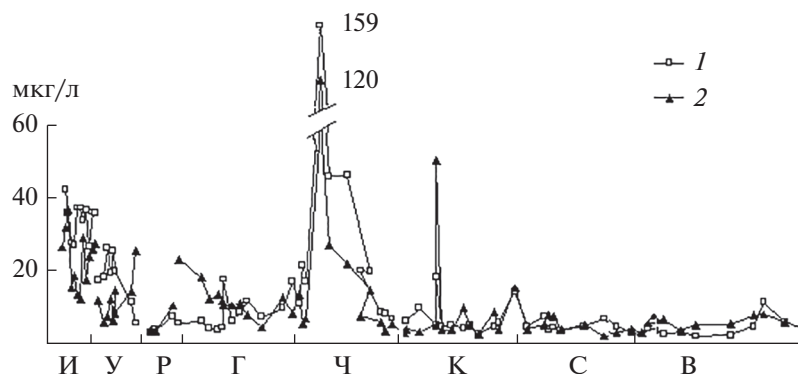


Рис. 1. Содержание Хл *a* (мкг/л) на русловых станциях водохранилищ Волги в 2019 (1) и 2020 (2) гг.: И – Ивановское, У – Угличское, Р – Рыбинское, Г – Горьковское, Ч – Чебоксарское, К – Куйбышевское, С – Саратовское, В – Волгоградское.

6150 км²) относительно мелководных (средняя глубина 3.4–10 м) равнинных водохранилищ различаются морфометрией, площадью водосбора, интенсивностью водообмена, объемом боковой приточности, а также гидрологическими и гидрохимическими характеристиками. От Верхней к Нижней Волге возрастает прозрачность воды и общая сумма ионов (электропроводность); цветность воды снижается; высокое содержание биогенных веществ не лимитирует развитие фитопланктона (Волга..., 1978; Rivers..., 2021).

В период глобального потепления, сопровождающегося увеличением температуры на Европейской территории РФ (Второй..., 2014), годы наблюдения различались погодными условиями (Доклад..., 2020, 2021), были прохладными и многоводными. Температура воздуха не достигала средних для августа показателей на Верхней и Средней Волге в 2019 г., но была близка к ним в 2020 г., а на Нижней Волге – в оба года. Средняя температура воды в 2019 и 2020 гг. была соответственно 16.7–18.6 и 20.7–21.4°C в водохранилищах Верхней Волги, 18.8–20.7 и 20.1–22.1°C на Нижней Волге и в меньшей степени (от 18.4 до 19.9°C) менялась в водохранилищах Средней Волги. Количество осадков, выпавших за вегетационный сезон на Верхней, Средней и Нижней Волге, достигало 95, 110 и 133% нормы в 2019 г. и 125, 84 и 120% нормы в 2020 г. соответственно.

Развитие летних планктонных альгоценозов показательно для оценки состояния водоема, поскольку в условиях наибольшего прогрева в водной экосистеме проявляются негативные тенденции, вызванные эвтрофированием или изменениями климата. В периоды наблюдения содержание Хл *a* было типичным для летнего максимума фитопланктона водохранилищ Волги (Минеева, 2004) и соизмеримо с показателями, полученным в 2015–2018 гг. (Минеева, Макарова, 2018; Минеева и др., 2020). Наименьшие для водохранилищ величины

изменялись от 1.2 до 12.3 мкг/л, наибольшие – от 6.9 до 159 мкг/л (рис. 1). Средние показатели в Ивановском, Угличском и Чебоксарском водохранилищах варьировали от 20.4 до 44.0 мкг/л (2019 г.) и от 17.4 до 25.3 мкг/л (2020 г.), в остальных от 3.6–8.5 до 10.3–12.1 мкг/л соответственно (табл. 1). Коэффициенты вариации средних (50–60% в 2019 г., 25–68% в 2020 г.) в большинстве случаев свидетельствовали об умеренной неоднородности распределения Хл *a* по акватории водохранилищ, которая увеличивалась в 2020 г. в Угличском водохранилище ($C_v = 83\%$). Минимальные и максимальные концентрации Хл *a* в 2019 г. в основном различались в 5–8 раз, в 2020 г. – в 9–14 раз, в Ивановском водохранилище – втрое, а в Чебоксарском водохранилище при высокой пространственной неоднородности (в оба года $C_v > 100\%$) – в 23 и 38 раз.

Концентрации Хл *a* в годы исследования в разной степени менялись в каждом водохранилище. В Ивановском водохранилище в 2019 г. величины были значительно выше, чем 2020 г. Здесь, в отличие от предыдущих лет, в изолированных от русла заливах они сходны с таковыми на русловых станциях, а высокопродуктивный Шошинский залив выделялся максимальным показателем (110 мкг/л) только в 2019 г. В Угличском, а также Горьковском водохранилищах в оба года получены близкие концентрации Хл *a*, которые увеличивались в водах притоков и в мелководном Костромском расширении (2019 г.). В нижней глубоководной части перед плотиной количество Хл *a* в Угличском водохранилище снижалось в 2019 г. и возрастало в 2020 г. В Горьковском водохранилище количество Хл *a* изменялось противоположным образом, и в 2020 г. максимум отмечен на самой верхней станции, принимающей воды Рыбинского водохранилища.

В Чебоксарском водохранилище, как и в Ивановском, содержание Хл *a* в 2019 г. значительно

Таблица 1. Содержание Хл *a* (мкг/л) в водохранилищах Волги в летний период разных лет (2015–2018 гг.)

Водохранилище	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
Иваньковское	24.0 ± 4.0	20.7 ± 3.7	22.5 ± 3.6	41.2 ± 7.3	38.3 ± 5.9	23.8 ± 2.0
Угличское	25.5 ± 2.8	17.7 ± 3.0	16.5 ± 1.9	26.1 ± 4.6	20.4 ± 2.8	17.4 ± 4.1
Рыбинское*	–	–	4.9 ± 1.7	16.4 ± 6.5	7.3 ± 2.4	4.7 ± 1.6
Горьковское	18.4 ± 1.1	7.5 ± 1.3	6.7 ± 0.8	13.1 ± 1.4	10.1 ± 1.5	12.1 ± 1.8
Чебоксарское	29.6 ± 8.1	16.9 ± 6.7	17.8 ± 6.1	25.0 ± 0.8	44.0 ± 15.8	25.3 ± 10.1
Куйбышевское	6.1 ± 0.8	14.8 ± 2.8	8.3 ± 2.0	9.8 ± 2.6	6.1 ± 0.9	11.9 ± 2.5
Саратовское	5.7 ± 1.0	–	4.9 ± 1.5	10.6 ± 2.8	3.6 ± 0.6	8.5 ± 2.4
Волгоградское	–	–	6.7 ± 1.0	9.6 ± 2.2	4.3 ± 0.7	10.1 ± 2.7

Примечание. Приведены средние величины со стандартной ошибкой (по: Минеева, Макарова, 2018; Минеева и др., 2020).

* Речные станции Волжского плеса.

превышало таковое в 2020 г. В верхней части водохранилища оно было таким же, как на нижнем участке Горьковского, увеличивалось до максимального для всего каскада показателя (160 мкг/л) в устьевой области р. Оки и снижалось перед плотиной. Окские воды распространяются на большое расстояние ниже устья реки и постоянно характеризуются повышенным количеством Хл *a*. В Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах концентрация Хл *a* значительно снижалась. За счет более высокого обилия фитопланктона в притоках (реки Свияга, Уса, Малый Иргиз, Курдюм) в каждом из трех водохранилищ средние величины, полученные в 2020 г., в 1.4–2.3 выше, чем в 2019 г., однако для русловых станций межгодовых различий не выявлено (рис. 1). Во всех водохранилищах содержание Хл *a* на русловых станциях в среднем в 1.3–3.8 раз ниже по сравнению с мелководными участками и притоками, которые в большинстве случаев характеризуются как эвтрофные.

Результаты корреляционного анализа показали, что количество Хл *a*, как и в предыдущие годы, не зависело от температуры воды ($R^2 < 0.02$). Фитопланктон, содержащий оптически активное вещество хлорофилл, достоверно и отрицательно связан с прозрачностью воды ($R^2 = 0.26$), иллюстрируя свою заметную роль в формировании подводного светового режима волжских водохранилищ. В наибольшей степени развитие фитопланктона ограничивают условия водности, о чем свидетельствует отрицательная связь средних для водохранилищ концентраций Хл *a*, полученных в 2015–2020 гг., с суммарным объемом притока за май–октябрь (рис. 2). Аналогичным образом в незарегулированных условиях (р. Темза) обилие водорослей снижается в годы с высоким расходом воды, и изменение физических параметров в большей степени влияет на развитие фитопланктона, чем химический режим (Bowes et al., 2012); высокие концентрации Хл *a* в нижнем те-

чении р. Миссисипи отмечены в периоды низкого стока (Duan, Bianchi, 2006).

В волжском каскаде на протяжении последних шести лет (2015–2020 гг.) прослеживается устойчивая, не изменившаяся за четверть века (Минеева, 2004), тенденция к снижению обилия фитопланктона от верхних водохранилищ к нижним. Связано это со спецификой речных акваторий Нижней Волги – их высокой проточностью при уменьшении объема боковых притоков. Суммарная биомасса фитопланктона в водохранилищах р. Волги также снижается с севера на юг (Корнева, 2015). Распределение Хл *a* по акватории водохранилищ в общих чертах повторяется на протяжении многолетнего периода. Неоднородность распределения обусловлена размерами водохранилищ, их сложной морфометрией, наличием водных масс разного генезиса, поступлением вод притоков, изменением режима течений, нагонными явлениями. Повышенные концентрации Хл *a*, как правило, отмечены в изолированных от

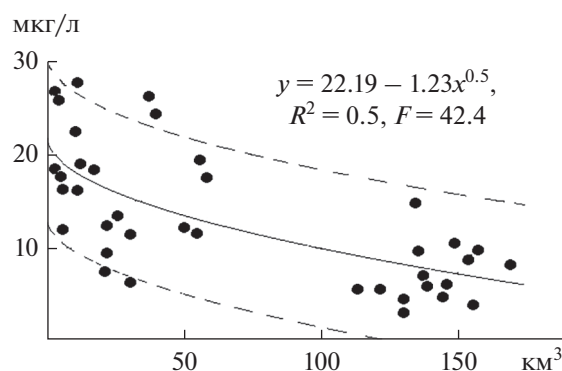


Рис. 2. Зависимость средних концентраций Хл *a* (мкг/л) в водохранилищах Волги от суммарного объема притока (км³) за май–октябрь в 2015–2020 гг. Пунктир – 95%-ный доверительный интервал. Объем притока рассчитан по данным сайта РусГидро <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/?date>

русла Волги участках (Шошинский плес Ивановского вдхр., Костромское расширение Горьковского); в устьевых участках притоков (Медведица, Нерль, Унжа, Ока, Свяга, Малый Иргиз); в прибрежных мелководьях и заливах; в водах самих притоков, фитопланктон которых формируется в специфических условиях (Охалкин и др., 2013). Однако особенности распределения фитопланктона могут быть выражены в разной степени в разные годы или даже не выявлены в силу специфики разовой маршрутной съемки.

При межгодовых изменениях, которые определяются погодными условиями лет наблюдения, водностью и носят циклический характер (Пырина, 2000), средние концентрации Хл *a* на протяжении последних шести лет характеризуют Ивановское, Угличское и Чебоксарское водохранилища как эвтрофные, Саратовское и Волгоградское – мезотрофные. Трофический статус Рыбинского, Горьковского и Куйбышевского водохранилищ меняется от мезотрофного до умеренно эвтрофного и эвтрофного (табл. 1). Речной участок Волжского плеса Рыбинского водохранилища, обследованный при маршрутной съемке каскада, из-за проточных условий характеризуется более низким содержанием Хл *a* (трофическим статусом) по сравнению с основной акваторией водоема. Изолированные от русла р. Волги участки акватории во всех водохранилищах отнесены к эвтрофным. Оценка трофического статуса водохранилищ в ряде случаев отличается от полученной в конце XX в. (Минеева, 2004), что соответствует ходу межгодовой и многолетней сукцессии фитопланктона, а также свидетельствует о высокой динамичности развития экосистем волжских водохранилищ.

Выводы. Концентрации Хл *a* в воде волжских водохранилищ изменялись от минимальных <10 до максимальных >100 мкг/л и в 2019–2020 гг. характеризовались диапазоном величин, типичных для летней фазы сезонного развития фитопланктона. В волжском каскаде устойчиво прослеживается снижение содержания Хл *a* от верхних водохранилищ к нижним при максимальном обилии фитопланктона в Шошинском плесе Ивановского водохранилища и устьевом участке р. Оки в Чебоксарском водохранилище. При выраженных межгодовых флуктуациях, которые определяются погодными условиями лет наблюдения, развитие фитопланктона в наибольшей степени ограничивается условиями водности. Средние концентрации Хл *a* в 2019–2020 гг., как и в 2015–2018 гг., характеризуют Ивановское, Угличское и Чебоксарское водохранилища как эвтрофные, Рыбинское, Саратовское и Волгоградское – мезотрофные. Трофический статус Горьковского и Куйбышевского водохранилищ меняется от мезотрофного до умеренно эвтрофного. Изолированные от русла р. Вол-

ги участки акватории во всех водохранилищах характеризуются как эвтрофные.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках госзадания № 121051100099-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. 2020. Москва: Росгидромет.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. 2021 Москва: Росгидромет.
- Корнева Л.Г. 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом.
- Минеева Н.М. 2000. Растительные пигменты как показатель состояния экосистемы водохранилищ. Пигменты планктона // Современная экологическая ситуация в Рыбинском и Горьковском водохранилищах: состояние биологических сообществ и перспективы рыборазведения. Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т. С. 66.
- Минеева Н.М. 2004. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. Москва: Наука.
- Минеева Н.М., Макарова О.С. 2018. Содержание хлорофилла как показатель современного (2015–2016 гг.) трофического состояния водохранилищ Волги // Биология внутр. вод. № 3. С. 107. <https://doi.org/10.1134/S0320965218030129>
- Минеева Н.М., Семадени И.В., Макарова О.С. 2020. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2017–2018 гг.) // Биология внутр. вод. № 2. С. 205. <https://doi.org/10.31857/S0320965220020102>
- Охалкин А.Г., Шарагина Е.М., Бондарев О.О. 2013. Фитопланктон Чебоксарского водохранилища на современном этапе его существования // Поволжский экологический журнал. № 2. С. 190.
- Пырина И.Л. 1966. Первичная продукция фитопланктона в Ивановском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов // Продуцирование и круговорот органического вещества во внутренних водоемах. Москва: Наука. С. 249.
- Пырина И.Л. 2000. Многолетняя динамика и цикличность межгодовых колебаний содержания хлорофилла в Рыбинском водохранилище // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. Минск: Белорус. гос. ун-т. С. 375.
- Bowes M.J., Gozzard E., Johnson A.C. et al. 2012. Spatial and temporal changes in chlorophyll-a concentrations in the River Thames basin, UK: are phosphorus concen-

- trations beginning to limit phytoplankton biomass? // *Sci. Total Env.* V. 426. P. 45.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.056>
- Duan S., Bianchi T.S. 2006. Seasonal changes in the abundance and composition of plant pigments in particulate organic carbon in the Lower Mississippi and Pearl Rivers // *Estuaries Coasts.* V. 29. № 3. P. 427.
<https://doi.org/www.jstor.org/stable/3809762>
- Lee E., Kim S., Na E., Kim K. 2019. Prewhitened causality analysis for the chlorophyll-a concentration in the Yeongsan River system // *Water Quality Res. J. V.* 54. № 2. P. 161.
<https://doi.org/10.2166/wcc.2018.259>
- Plyaka P., Glushchenko G., Gerasyuk V. et al. 2020. Investigation on the chlorophyll-a content of phytoplankton in the Sea of Azov and the Don River by the fluorescence method // *Fluores. Methods Investigation Living Cells Microorg.*
<https://doi.org/10.5772/intechopen.92996>
- Rivers of Europe. 2021. Amsterdam: Elsevier.
- Sabater S., Artigas J., Durán C. et al. 2008. Longitudinal development of chlorophyll and phytoplankton assemblages in a regulated large river (the Ebro River) // *Sci. Total Env.* V. 404. № 1. P. 196.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.01318675441>
- Sarkar D.S., Sarkar U.K., Naskar M. et al. 2021. Effect of climato-environmental parameters on chlorophyll a concentration in the lower Ganga basin, India // *Revista de Biol. Tropical.* V. 69. № 1. P. 60.
- SCOR-UNESCO Working Group 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments // *Determination of photosynthetic pigments in sea water. Monographs on oceanographic methodology.* Montreux: UNESCO. P. 9.
- Tian Y., Gao L., Deng J., Li M. 2020. Characterization of phytoplankton community in a river ecosystem using pigment composition: a feasibility study // *Env. Sci. Pollut. Res.* V. 27. P. 42210.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-07213-4>

Chlorophyll Content and the Modern Trophic State of the Volga River Reservoirs (2019 and 2020)

N. M. Mineeva¹, *, I. V. Semadeni¹, V. V. Solovyeva¹, and O. S. Makarova¹

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

*e-mail: mineeva@ibiw.ru

The new data on chlorophyll *a* (Chl *a*) content determined by the standard spectrophotometric method in the Volga River reservoirs in summer 2019, 2020 are presented. Chl *a* content was typical of the phytoplankton summer maximum and varied from <10 to >100 µg/L. As in previous years, a local increase in Chl *a* was noted in the near dam areas, in littoral waters, in tributaries and river mouth. The maximum increase was in the Shoshinsky reach of the Ivankovo Reservoir and the estuary section of the Oka River in the Cheboksary Reservoir. The average Chl *a* concentrations during observation period characterize Ivankovo, Uglich, and Cheboksary Reservoirs as eutrophic, Rybinsk, Saratov, and Volgograd Reservoirs as mesotrophic, the trophic status of the Gorky and Kuibyshev reservoirs varied from mesotrophic to moderate eutrophic.

Keywords: chlorophyll *a*, Volga River reservoirs, trophic state