

КРАТКИЕ
СООБЩЕНИЯ

УДК 556.555.6:581.132

МНОГОЛЕТНИЕ ТРЕНДЫ СОДЕРЖАНИЯ ОСАДОЧНЫХ ПИГМЕНТОВ
В ГОРЬКОВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

© 2022 г. Н. А. Тимофеева^а *, Л. Е. Сигарева^а, В. В. Законнов^а

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

*e-mail: timof@ibiw.ru

Поступила в редакцию 29.10.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 08.12.2021 г.

Представлены первые данные по вертикальному распределению растительных пигментов в илах, накопленных за время существования Горьковского водохранилища (1955–2010 гг.). Исследованы керны в местах накопления серого глинистого ила в верхнем (г. Юрьевец) и нижнем (г. Чкаловск) участках озеровидной акватории водохранилища. Содержание органического вещества варьировало в пределах 7–30%, концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами – 23–213 мкг/г сухого грунта или 0.3–1.3 мг/г органического вещества. Концентрации пигментов увеличивались от основания к поверхности кернов от мезотрофных до эвтрофных значений в верхнем участке и до гипер-трофных в нижнем. Тенденции изменений концентраций растительных пигментов по вертикали илистых отложений согласуются с возрастанием продуктивности фитопланктона.

Ключевые слова: хлорофилл, феопигменты, керны илов, Горьковское водохранилище

DOI: 10.31857/S0320965222040283

Растительные пигменты используются как индикаторы при изучении первичного продуцирования и трансформации органических веществ (ОВ) в пелагиали и донных отложений (ДО) – нижнем ярусе экосистемы водоемов. Осадочные пигменты относятся к показателям исторических изменений структуры и продуктивности альгоценозов (Jiménez et al., 2015; Tse et al., 2015; Vurge et al., 2018; Elchyshyn et al., 2018). В водохранилищах исследования стратиграфии пигментов немногочисленны, а непрерывные многолетние наблюдения за развитием первичных продуцентов в большинстве случаев отсутствуют.

Особый интерес представляет Горьковское водохранилище как техногенный водоем многоцелевого назначения на территории густонаселенных, промышленно-развитых областей РФ: Ярославской, Костромской, Ивановской и Нижегородской.

Горьковское водохранилище (создано в 1955–1957 гг.), крупный водоем долинного типа (объем 8.7 км³, площадь 1591 км², средняя глубина 5.5 м), характеризуется сложной гидрологической структурой, обусловленной сезонными изменениями соотношения водных масс р. Волги и крупных притоков (Елпать, Немда и Унжа), которые формируют

собственно водные массы озеровидного расширения (Эдельштейн, 1968; Экологические..., 2001). По продольной оси от речного участка (г. Рыбинск–г. Решма) и далее к предплотинному меняются ширина и глубина водоема, снижается скорость течения, что сопровождается увеличением темпов накопления илов и ареалов их распределения (Экологические..., 2001; Законнов и др., 2017). Продуктивность первичного звена зависит от градиента абиотических факторов. Несмотря на интенсивное изучение фитопланктона (Охапкин и др., 1997; Минеева, 2004; Корнева, 2015) как основного продуцента ОВ, сведения о многолетней динамике планктонных водорослей Горьковского водохранилища недостаточно полные.

Керны взяты в августе 2010 г. на бывшем русле р. Волга в озерном участке Горьковского водохранилища, где формируются илы значительной мощности и благоприятны условия для сохранения осадочных пигментов. Керн 1 отобран против г. Юрьевца (глубина 17 м) в зоне слияния крупных притоков (Елпать, Немда и Унжа) с р. Волга, керн 2 – ниже г. Чкаловск (глубина 15 м) в предплотинной части водохранилища, которая в течение безледного периода преимущественно занята озерной водной массой. Тип ДО на станциях – серый глинистый ил. Керны с ненарушенной структурой извлекали из гравитационной

Сокращения: Хл – хлорофилл *a*, Ф – феопигменты, ОВ – органическое вещество, ДО – донные отложения.

трубки ГОИН-1 длиной 1 м. Сегменты грунта толщиной 0.5–0.6 см отбирали от маркирующего первичного горизонта илистого песка. Длина керна 1 – 33, керн 2 – 30 см. Возраст отложений соответствует 55 годам (1955–2010 гг.). Средняя скорость осадконакопления для керна 1 достигала 6.0 (пределы во времени от 10 до 5), керн 2 – 5.5 (пределы от 8 до 5) мм/год (Законнов и др., 2017). Содержание ОВ, гранулометрический состав ДО, концентрации Хл и Ф определяли по методике в работе (Сигарева и др., 2019). Категорию трофии по концентрации Хл + Ф оценивали согласно (Möller, Scharf, 1986). Статистический анализ проводили с помощью пакетов программ MS Excel и Statistica 6.0. Для выявления количественной связи между содержанием Хл + Ф и характеристиками ДО использовали коэффициенты множественной корреляции. Достоверность различий средних значений оценивали по *t*-критерию Стьюдента ($p < 0.01$) (Лакин, 1980).

Результаты показали, что в пробах илов преобладала фракция мелкого алеврита и пелита (<0.05 мм), доля которых в верхнем горизонте (0–5 см) была 79–91%. В подстилающем слое илистого песка доминировали (81–84%) песчаные частицы (>0.1 мм). В слоях керна 1 влажность варьировала в пределах 46–82%, воздушно-сухая объемная масса – 0.20–0.81 г/см³, в слоях керна 2 – 54–90% и 0.10–0.64 г/см³ соответственно. Содержание ОВ в толще илов верхнего озерного участка (7.0–19.4, среднее $13.6 \pm 0.4\%$) было достоверно меньше, чем нижнего (7.9–30.0, среднее $15.7 \pm 0.4\%$) (рис. 1а).

В пигментном фонде ДО преобладали продукты деградации – Ф (79–100% суммы с Хл). Дериваты Хл более устойчивы и сохраняются длительное время, поэтому они используются как показатели развития растительных сообществ. Вертикальное распределение пигментов характеризовалось временным трендом увеличения концентраций от нижних горизонтов кернов к верхним (рис. 1б, 1в). Содержание Хл + Ф в керне 1 (пределы 22.9–120, среднее 73.5 ± 3.5 мкг/г сухого грунта) меньше, чем в керне 2 (29.3–213, среднее 89.3 ± 4.3 мкг/г). Минимальные концентрации выявлены в основании кернов, максимальные – ближе к поверхности. Линейные аппроксимации трендов Хл + Ф (мкг/г сухого грунта) подтверждались высокими коэффициентами детерминации R^2 (0.75–0.84). Немного слабее выражен вертикальный тренд удельной концентрации Хл + Ф в ОВ (R^2 0.39–0.45) (рис. 1в). Низкие величины (0.28–0.4 мг/г ОВ) отмечены в отложениях глубже 25 см, высокие значения в керне 1 (0.75–0.9 мг/г ОВ) – в средних слоях, в керне 2 (1.0–1.3 мг/г ОВ) – в поверхностном горизонте. Концентрации пигментов изменялись соответственно характеристикам ДО, что свойственно разнотипным водоемам.

Так, коэффициенты множественной корреляции содержания Хл + Ф (мкг/г сухого грунта) с концентрацией ОВ, влажностью и воздушно-сухой объемной массой илов были 0.93–0.94, а содержания Хл + Ф (мг/г ОВ) с этими показателями – 0.87–0.93.

В зоне слияния рек Елпать, Немда и Унжа с р. Волга в толще серых глинистых илов концентрации ОВ и Хл + Ф меньше по сравнению с нижней частью водохранилища. Концентрации Хл + Ф в слоях керна 1 варьировали в пределах мезотрофной (29%) и эвтрофной (71%) категорий, в керне 2 – мезотрофной (16%), эвтрофной (63%) и гипертрофной (21%). Выявленные различия согласуются с данными о повышенных значениях биомассы и Хл фитопланктона в приплотинном районе (Минеева, 2004; Корнева, 2015).

Тренды увеличения концентраций Хл + Ф и ОВ от нижних слоев кернов к верхним (рис. 1) можно объяснить повышением трофии на фоне глобального потепления и сменой седиментационного материала от илистых песков к песчаным и глинистым илам. Результаты позволяют полагать, что эвтрофирование в нижнем озерном участке более интенсивное, чем в верхнем. Вертикальное распределение пигментов в кернах в целом согласуется с многолетними тенденциями развития фитопланктона в Горьковском водохранилище. Так, в сукцессии фитопланктона выделяют периоды низкого разнообразия и обилия (1956–1957 гг.), повышенной продуктивности (начало 1970-х годов), медленного эвтрофирования (1980-е–начало 1990-х гг.) (Охупкин и др., 1997). Средняя за вегетационный период биомасса фитопланктона в первый год существования водохранилища (1956 г.) относилась к олиготрофной категории (0.72 г/м³), в последующие годы изменялась в пределах мезотрофных и эвтрофных значений (в 1972 г. – 11.7 г/м³, в 1980–1992 гг. от 1.4 до 7.05 г/м³) (Охупкин и др., 1997). Концентрации Хл в планктоне в мае–октябре 1989–1991 гг. были типичными для водоемов эвтрофного типа (3–88 мкг/л при наиболее часто встречаемых 10–20 мкг/л) (Минеева, 2004). В 2001–2015 гг. водохранилище оценивали как мезотрофный водоем по биомассе фитопланктона (2.06 ± 0.18 г/м³) (Корнева и др., 2016).

Полученные результаты по вертикальному распределению осадочных пигментов в Горьковском водохранилище согласуются с представлениями об эвтрофировании волжских водохранилищ по показателям развития фитопланктона, зоопланктона, бактериопланктона (Экологические проблемы..., 2001; Лазарева, Соколова, 2015; Сигарева и др., 2016; Копылов и др., 2020).

Выводы. Многолетние тренды концентрации Хл + Ф в кернах дают основание полагать, что продуктивность планктонных альгоценозов в на-

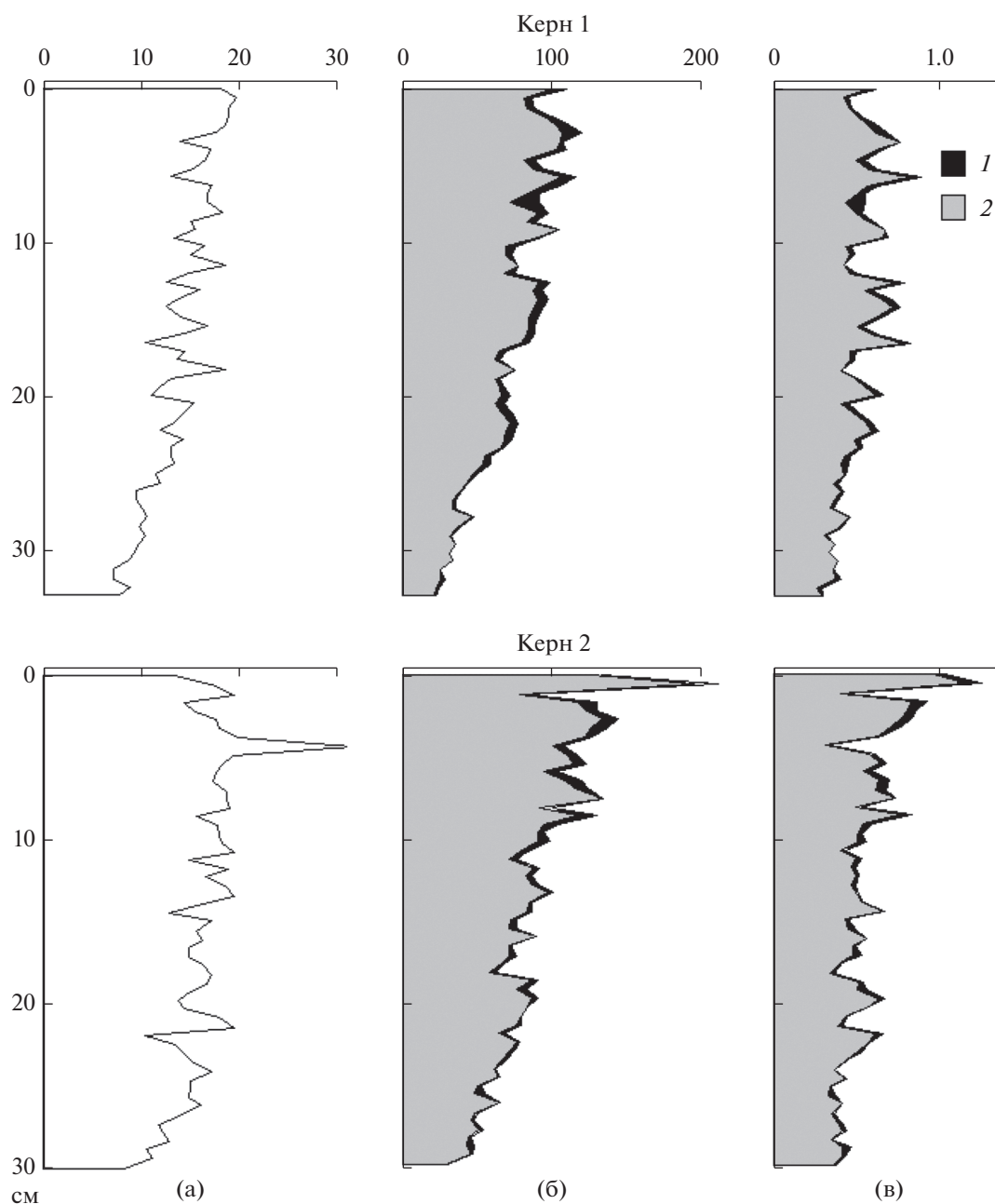


Рис. 1. Вертикальное распределение ОВ и растительных пигментов в ядрах илов Горьковского водохранилища. По шкале абсцисс: а – концентрация ОВ, % сухой массы; б – концентрация Хл + Ф, мкг/г сухого грунта; в – концентрация Хл + Ф, мг/г ОВ. По шкале ординат – толщина ядер, см. 1 – Хл, 2 – Ф.

ачальный период существования Горьковского водохранилища относилась к мезотрофной категории и в дальнейшем возрастала до эвтрофных, а в предплотинном районе до гипертрофных значений. Использование осадочных пигментов в качестве интегральных продукционных характеристик дополняет информацию о продуктивности фитопланктона по Хл и биомассе, получаемую в эпизодических наблюдениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121051100099-5 и 121051100104-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Законнов В.В., Костров А.В., Законнова А.В. 2017. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 4.

- Роль берегозащиты в формировании донных отложений Горьковского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 4. С. 60.
- Корнева Л.Г. 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом.
- Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Макарова О.С. 2016. Разнообразии и динамика планктонных альгоценозов водохранилищ Верхней и Средней Волги (Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское) в условиях эвтрофирования и изменения климата // Тр. Ин-та биологии внутр. вод РАН. № 76(79). С. 35.
- Копылов А.И., Косолапов Д.Б., Микрякова И.С. 2020. Многолетняя динамика гетеротрофного бактериопланктона в крупном эвтрофном водохранилище // Биология внутр. вод. № 5. С. 469. <https://doi.org/10.31857/S0320965220050046>
- Лазарева В.И., Соколова Е.А. 2015. Метазоопланктон равнинного водохранилища в период потепления климата: биомасса и продукция // Биология внутр. вод. № 3. С. 30.
- Лакин Г.Ф. 1980. Биометрия. Москва: Высшая школа.
- Минеева Н.М. 2004. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. Москва: Наука.
- Охапкин А.Г., Микучик И.А., Корнева Л.Г., Минеева Н.М. 1997. Фитопланктон Горьковского водохранилища. Самара: СамВен.
- Сigareва Л.Е., Пырина И.Л., Тимофеева Н.А. 2016. Межгодовая динамика хлорофилла в планктоне и донных отложениях Рыбинского водохранилища // Тр. Ин-та биологии внутр. вод РАН. Вып. 76(79). С. 119.
- Сigareва Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В. и др. 2019. Признаки естественного эвтрофирования мелководного озера Неро по осадочным пигментам // Биология внутр. вод. № 4. Вып. 2. С. 27. <https://doi.org/10.1134/S0320965219060147>
- Эдельштейн К.К. 1968. Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища // Тр. Ин-та биологии внутр. вод АН СССР. № 18(21). С. 3.
- Экологические проблемы Верхней Волги. 2001. Ярославль: Изд-во Ярослав. гос. техн. ун-та.
- Burge D.R.L., Edlund M.B., Frisch D. 2018. Paleolimnology and resurrection ecology: The future of reconstructing the past // *Evol. Appl.* V. 11. № 1. P. 42. <https://doi.org/10.1111/eva.12556>
- Elchyshyn L., Goyette J.-O., Saulnier-Talbot É. et al. 2018. Quantifying the effects of hydrological changes on long-term water quality trends in temperate reservoirs: insights from a multi-scale, paleolimnological study // *J. Paleolimnol.* V. 60. № 3. P. 361. <https://doi.org/10.1007/s10933-018-0027-y>
- Jiménez L., Romero-Viana L., Conde-Porcuna J.M., Pérez-Martínez C. 2015. Sedimentary photosynthetic pigments as indicators of climate and watershed perturbations in an alpine lake in southern Spain // *Limnetica.* V. 34. № 2. P. 439. <https://doi.org/10.23818/limn.34.33>
- Möller W.A.A., Scharf B.W. 1986. The content of chlorophyll in the sediment of the volcanic maar lakes in the Eifel region (Germany) as an indicator for eutrophication // *Hydrobiologia.* V. 143. № 1. P. 327. <https://doi.org/10.1007/BF00026678>
- Tse T.J., Doig L.E., Leavitt P.R. et al. 2015. Long-term spatial trends in sedimentary algal pigments in a narrow river-valley reservoir, Lake Diefenbaker, Canada // *J. Great Lakes Res.* V. 41. Suppl. 2. P. 56. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.08.002>

Long-Term Trends in Content of Sedimentary Pigments in the Gorky Reservoir

N. A. Timofeeva¹*, L. E. Sigareva¹, and V. V. Zakonnov¹

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

*e-mail: timof@ibiw.ru

The paper presents the first data on the vertical distribution of plant pigments in silts accumulated in the Gorky Reservoir since its filling in 1955 up to 2010. The cores of gray clayey silts in the upper (Yuryevets) and lower (Chkalovsk) zones of the lake-like part of the reservoir are analyzed. The content of organic matter varied within 7–30% and the total content of chlorophyll *a* and pheopigments within 23–213 µg/g dry sediment or 0.3–1.3 mg/g organic matter. The content of pigments increased from the base to the surface in cores from mesotrophic to eutrophic values in the upper zone and up to hypertrophic values in the lower zone. The trends in the vertical distribution of plant pigments in silts are consistent with an increase in phytoplankton productivity.

Keywords: chlorophyll, pheopigments, silt cores, Gorky Reservoir