

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС,  
ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 574.583(285.2):581

РАСТИТЕЛЬНЫЕ ПИГМЕНТЫ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ  
ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2020 г. Н. М. Минеева<sup>а, \*</sup>, Л. Е. Сигарева<sup>а</sup>, Н. А. Тимофеева<sup>а</sup>, И. В. Семадени<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт 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 01.08.2019 г.

После доработки 23.09.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

В августе маловодного 2018 г. получены первые сопряженные данные о растительных пигментах в воде и донных отложениях Цимлянского водохранилища (Россия). В толще воды хлорофилл представлен в основном активной формой с концентрацией 16.7–415 мкг/л. Пигментный фонд донных отложений (4.6–264 мкг/г с.о.) содержит высокий процент феопигментов. Распределение хлорофилла по акватории водохранилища характеризуется высокой степенью дискретности ( $C_v = 142\%$ ), распределение хлорофилла и феопигментов по площади дна более равномерно ( $C_v = 78.9\%$ ). Концентрации пигментов в воде и донных отложениях не коррелируют между собой ( $r = -0.24$ ), что отражает сложный разнонаправленный характер связи между двумя биотопами. По среднему содержанию хлорофилла в толще воды (66.7 мкг/л) Цимлянское водохранилище – гиперэвтрофное, по содержанию хлорофилла и феопигментов в донных отложениях (93.3 мкг/г с.о.) – эвтрофное.

**Ключевые слова:** пигментный фонд, хлорофилл, феопигменты, водная толща, донные отложения, Цимлянское водохранилище

**DOI:** 10.31857/S0320965220040130

## ВВЕДЕНИЕ

Особенности функционирования биологических сообществ в различных условиях среды служат показателями состояния водных экосистем. Циклы автохтонного ОВ связывают между собой основные ярусы водной экосистемы – пелагиаль и бенталь. Комплексное изучение продуктивности этих биотопов дает целостное представление о формировании и трансформации ОВ в водоеме, но редко проводится синхронно. К показателям, характеризующим взаимодействие пелагиали и бентали, относятся растительные пигменты, которые широко используются в современных гидробиологических исследованиях для получения оперативной информации о состоянии экосистемы. Содержание основного фотосинтетического пигмента Хл *a* в планктоне служит характеристикой продукционных возможностей водорослей, их биомассы, а также трофического статуса водоема и качества воды (Винберг, 1960; Китаев, 2009). Содержание пигментов ДО (осадочных

пигментов) отражает итог продукционно-деструкционных процессов за длительный период времени и позволяет восстанавливать картину продуктивности водоема в прошлом. ДО служат естественным архивом изменения качества воды, связанного с эвтрофированием, а также маркерами потоков углерода и биогенных веществ при оценке их накопления и превращения в пресноводных экосистемах (Carnero-Bravo et al., 2015). Однако связь осадочных пигментов с показателями новообразования ОВ, включая концентрацию Хл в зоне фотосинтеза, как и их роль в оценке трофии разнотипных водоемов, исследованы недостаточно. Несомненный интерес в этом аспекте представляют высокопродуктивные (гиперэвтрофные) водоемы, которые находятся на последней стадии олиготрофно-эвтрофной сукцессии, предшествующей “умиранию” водной экосистемы (Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990). Изучение гиперэвтрофных водоемов имеет теоретическое и практическое значение для анализа механизмов их устойчивого функционирования и факторов, влияющих на продуктивность. Согласно сводке (Guimaraes-Bermejo et al., 2018), гипертрофные водоемы, в основном, небольшие по размеру, расположены в Юго-Восточной Азии, Африке, Латинской Америке – регионах с теплым клима-

**Сокращения:** ДО – донные отложения, ОВ – органическое вещество, с.о. – сухой осадок, Фео – феопигменты, Хл – хлорофилл,  $C_v$  – коэффициент вариации,  $E$  – оптическая плотность ацетонового экстракта пигментов,  $r$  – коэффициент корреляции,  $R^2$  – коэффициент детерминации, SPU – specific pigment unit.

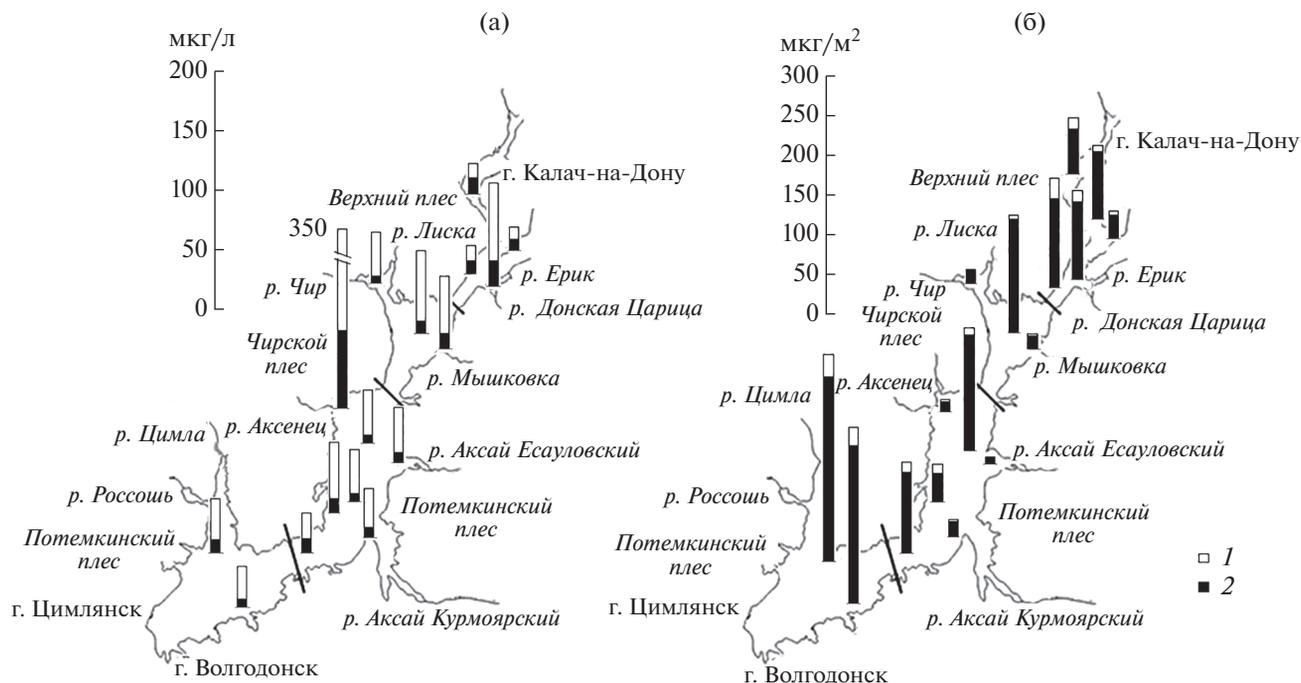


Рис. 1. Распределение пигментов в воде (а) и донных отложениях (б) Цимлянского водохранилища. 1 – Хл, 2 – Фео.

том. Однако высокопродуктивными считаются и крупные водоемы умеренных широт: озера Неро (бассейн Верхней Волги) и Баторин (Нарочанская группа озер), водохранилища рек Днепр и Висла (Лишук, 2007; Сигарева и др., 2017; Состояние..., 2008; Экологическая..., 1985; Sigareva et al., 2011). Также к этой категории относят Цимлянское водохранилище, при обширных сведениях о фитопланктоне которого (Бакаева и др., 2012; Киреева и др., 2018; Лысак, 2002; Сиделев и др., 2015; Цимлянское..., 2011) данные о пигментах в водной толще единичны и разрознены (Бакаева и др., 2012; Матишов, Ковалева, 2010; Kleschenkov et al., 2019), а о пигментах в ДО отсутствуют.

Цель работы – оценить содержание растительных пигментов в воде и ДО Цимлянского водохранилища для получения целостного представления о продукционных свойствах пелагиали и бентали на современном этапе развития экосистемы.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержание пигментов в Цимлянском водохранилище определяли в августе 2018 г. спектрофотометрическим методом (Сигарева, 2012; SCOR-UNESCO, 1966) в интегральных пробах воды, отобранных от поверхности до дна на 11 русловых (глубина 5–16 м) и пяти мелководных (1.5–4.0 м) станциях, а также в поверхностном (0–10 см) слое ДО тех же станций (рис. 1). Подробное описание сбора и обработки материала

приведено в работах Сигаревой, Тимофеевой (2018) и Минеевой (Mineeva, 2018). Содержание Хл в сумме с его дериватами (Хл + Фео) в ДО рассчитано на единицу с.о. Оценка трофии по количеству Хл *a* в планктоне дана согласно (Минеева, 2000), по осадочным пигментам – согласно (Möller, Scharf, 1986). Для расчета средних показателей и их погрешностей, коэффициентов вариации, корреляции и детерминации, уравнений регрессии и построения графиков использованы стандартные статистические программные пакеты.

Цимлянское водохранилище (47°50' с.ш., 42°50' в.д.), созданное в 1952–1953 гг. на р. Дон, относится к водоемам многоцелевого назначения с многолетним регулированием стока. Длина водохранилища 281 км, площадь зеркала при НПУ (36 м БС) 2700 км<sup>2</sup>, общий объем 23.75 км<sup>3</sup>, средняя глубина 8.8 м, коэффициент условного водообмена 1.05 год<sup>-1</sup> (Гидрометеорологический..., 1977). Мелководная (до 1 м) зона занимает при НПУ ~5% площади (Panin et al., 2016). Акваторию водохранилища подразделяют на четыре плеса (Верхний, Чирской, Потемкинский и Приплотинный), которые разграничены сужениями береговой линии и различаются морфометрическими, гидрологическими и биологическими особенностями. Скорость течения снижается от верхнего участка к плотине с 0.5 до 0.1 м/с.

Благодаря фотосинтетической аэрации содержание растворенного кислорода в подповерхностных слоях воды в разгар биологического лета

составляет от ~50 до >100% насыщения, но существенно снижается с глубиной вследствие интенсивных деструкционных процессов, вплоть до нулевых значений в Приплотинном плесе. По ионно-солевому составу вода водохранилища относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы с общей минерализацией от 200 до 500 мг/л и характеризуется высоким содержанием биогенных веществ: 60—>100 мкг/л фосфатов (Кучишкина, 2002), 114—132 мкг/л общего фосфора (Матишов, Ковалева, 2010), 0,27—0,39, 0,14—0,44 и 0,27—0,52 мг/л аммонийного, нитратного и органического азота, соответственно (Хоружая, Флик, 2011). В этих условиях замедленный водообмен и высокая антропогенная нагрузка способствуют развитию фитопланктона, биомасса которого достигает 30 мг/л и в среднем составляет 7,36 мг/л (Лысак, 2002). Летом основу численности и биомассы фитопланктона (67—99%) формируют синезеленые водоросли (цианопрокариоты) (Бакаева, Игнатова, 2013), вызывающие “цветение” воды и синтезирующие токсины (Сиделев и др., 2015), в результате чего качество воды ухудшается до состояния экологического бедствия (Хоружая, Минина, 2017). ДО в водохранилище представлены песками и илами, включающими мелкий песок, илистый песок, песчаный и глинистый ил (Гидрометеорологический..., 1977). На дне водохранилища накапливается большое количество раковин моллюсков, и слой ила с ракушками местами достигает 6 м (Лобойко, Зубов, 2009).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения проводили в условиях маловодья, вызванного сокращением водного стока р. Дон (Киреева и др., 2018) при дефиците осадков в Южном федеральном округе летом 2018 г. (Доклад..., 2019). Температура воды ( $21.9 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ) в период исследований фактически не менялась по акватории водохранилища ( $C_v = 3\%$ ) и была ниже средней многолетней ( $23.2^\circ\text{C}$ ) за август 1953—1972 гг. (Гидрометеорологический..., 1977). Прозрачность воды находилась в обычном диапазоне значений (0,2—1,0 м), снижалась в устьевых участках притоков и увеличивалась перед плотиной.

Содержание растительных пигментов в Цимлянском водохранилище изменялось в широком диапазоне: от 16,7 до 415,0 мкг/л Хл *a* в толще воды, от 4,6 до 264,0 мкг/г с.о. Хл + Фео в ДО при соответствующих средних  $66.6 \pm 25.4$  и  $93.3 \pm 19.6$  мкг/г с.о. Коэффициент вариации средней концентрации Хл *a* в водной толще выше, чем в ДО (142 и 78,9% соответственно).

Повышенным содержанием Хл *a* в sestone выделяются центральная часть водохранилища — Чирской и Потемкинский плесы при максимальном в устьевых участках рек Аксенец и Донская Царица, повышенным содержанием Хл + Фео в

ДО (100—150 мкг/г с.о.) — русловые станции трех верхних плесов, а максимальным (>200 мкг/г с.о.) — станции Приплотинного плеса (рис. 1, табл. 1). Количество Хл *a* в воде мелководных станций в среднем в 3,4 раза выше, чем глубоководных. В отличие от толщи воды, содержание Хл + Фео на мелководных участках бентали водохранилища ниже, чем на глубоководных станциях (табл. 2). Распределение пигментов в обоих ярусах экосистемы более однородно на русловых станциях ( $C_v < 70\%$ ), чем на мелководных ( $C_v > 100\%$ ).

Содержание осадочных пигментов сопряжено с распределением ДО, представленных в Цимлянском водохранилище грунтами разного типа, толщина слоя которых растет с увеличением глубины водоема (Гидрометеорологический..., 1977). Концентрация растительных пигментов снижается от илов к пескам, мкг/г с.о.: глинистый ил  $131 \pm 29$ ; песчаный ил  $87.9 \pm 36$ ; илистый песок  $69.2 \pm 47$  и мелкий песок  $13.4 \pm 4.6$ . Количество осадочных пигментов тесно связано с водно-физическими свойствами ДО степенной зависимостью: прямой — с влажностью грунтов (рис. 2а) и обратной — с их воздушно-сухой объемной массой (рис. 2б).

Концентрация продуктов распада Хл — Фео в водной толще достигает в среднем 10,1—18,3 мкг/л или 18,0—43,8% суммы с чистым Хл *a*, основная часть пигментного фонда бентали (74—97%) состоит из продуктов деградации Хл (рис. 1, табл. 1). Концентрация феопигментов тесно связана с количеством Хл и в ДО, и в толще воды (рис. 3). При исключении из расчетов мелководной станции (устье р. Аксенец) с максимальной концентрацией пигментов в воде вид зависимости меняется, но теснота связи остается высокой (рис. 3б).

В составе зеленых пигментов планктона (Хл *a* + *b* + *c*) преобладает Хл *a*, вклад которого в среднем составляет  $92 \pm 1\%$ . Его количество мало изменяется по акватории водохранилища ( $C_v = 4\%$ ) и лишь в Верхнем плесе незначительно меньше, чем в трех остальных плесах. Относительное содержание Хл *b* и Хл *c* существенно ниже (табл. 1). Содержание растительных каротиноидов изменяется от 13,3 до 373,0  $\mu\text{SPU}/\text{л}$ , средние для плесов значения — от 27,9 до 95,5  $\mu\text{SPU}/\text{л}$ . Как и в других водоемах, концентрация желтых и зеленых пигментов тесно коррелируют между собой ( $R^2 \sim 1$ ). Их отношение (0,75—0,92, в среднем 0,80—0,88), а также его аналог пигментный индекс  $E_{480}/E_{664}$ , который близок к единице, свидетельствуют о преобладании зеленых пигментов в пигментном фонде фитопланктона. В бентали индекс  $E_{480}/E_{665}$  превосходит величины, полученные для функционирующего фитопланктона, и изменяется от 1,18 до 2,69, индекс  $E_{480}/1.7E_{665к}$ , учитывающий влияние феопигментов — от 0,77 до 1,84. Средние для плесов значения первого индекса составляют 1,55—2,38, второго — 1,01—1,50 (табл. 1).

**Таблица 1.** Содержание фотосинтетических пигментов в толще воды и в донных отложениях Цимлянского водохранилища

Показатель	Плеса				Водохранилище
	Верхний	Чирской	Потемкинский	Приплотинный	
Число станций	4	3	7	2	16
Толща воды					
Хл $a + b + c$ , мкг/л	39.2 ± 19.4	61.4 ± 8.7	115 ± 72.8	38.6 ± 4.2	71.7 ± 27.1
Хл $a$ , %	87.3 ± 2.7	92.5 ± 0.8	93.7 ± 0.4	93.0 ± 0.2	91.7 ± 0.9
Хл $b$ , %	3.4 ± 1.2	2.3 ± 0.8	1.9 ± 0.6	1.4 ± 0.3	2.3 ± 0.4
Хл $c$ , %	9.3 ± 1.5	5.2 ± 0.3	4.4 ± 0.6	5.6 ± 0.5	6.0 ± 0.7
Феопигменты, мкг/л	14.2 ± 3.0	10.2 ± 2.0	18.3 ± 10.6	10.1 ± 1.4	14.2 ± 3.8
%	43.8 ± 7.8	17.4 ± 2.2	18.0 ± 1.3	26.9 ± 4.2	26.0 ± 3.5
Каротиноиды, $\mu\text{SPU}/\text{л}$	27.9 ± 14.5	49.9 ± 5.9	95.5 ± 61.7	30.9 ± 3.6	57.9 ± 23.0
$E_{480}/E_{664}$ , отн. ед.	1.03 ± 0.06	1.07 ± 0.05	1.03 ± 0.01	1.04 ± 0.02	1.04 ± 0.05
Каротиноиды/Хл $a$ , отн. ед.	0.80 ± 0.03	0.88 ± 0.02	0.87 ± 0.01	0.86 ± 0.01	0.85 ± 0.01
Донные отложения					
Хл + Фео, мкг/г с.о.	85.3 ± 22.0	94.3 ± 47.8	54.4 ± 22.6	244 ± 28.4	93.3 ± 19.6
Хлорофилл, мкг/г с.о.	13.5 ± 4.9	7.8 ± 4.4	5.9 ± 1.9	25.9 ± 4.1	10.6 ± 2.2
Феопигменты, мкг/г с.о.	71.8 ± 17.9	86.6 ± 46.6	48.5 ± 21.2	218 ± 24.3	82.7 ± 17.9
%	84.8 ± 2.5	88.3 ± 4.6	84.0 ± 3.0	89.4 ± 0.3	85.7 ± 1.6
$E_{480}/E_{665}$ , отн. ед.	1.55 ± 0.14	1.77 ± 0.39	1.85 ± 0.19	2.38 ± 0.22	1.82 ± 0.12
$E_{480}/1.7E_{665к}$ , отн. ед.	1.01 ± 0.10	1.13 ± 0.26	1.20 ± 0.13	1.50 ± 0.14	1.18 ± 0.08

Примечание.  $E_{480}/E_{664}$ ,  $E_{480}/E_{665}$ ,  $E_{480}/1.7E_{665к}$  – пигментные индексы (соотношение оптической плотности ацетонового экстракта при длинах волн 480, 664 и 665 нм; к – после подкисления).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Содержание растительных пигментов в Цимлянском водохранилище представлено широким диапазоном величин. Высокие концентрации

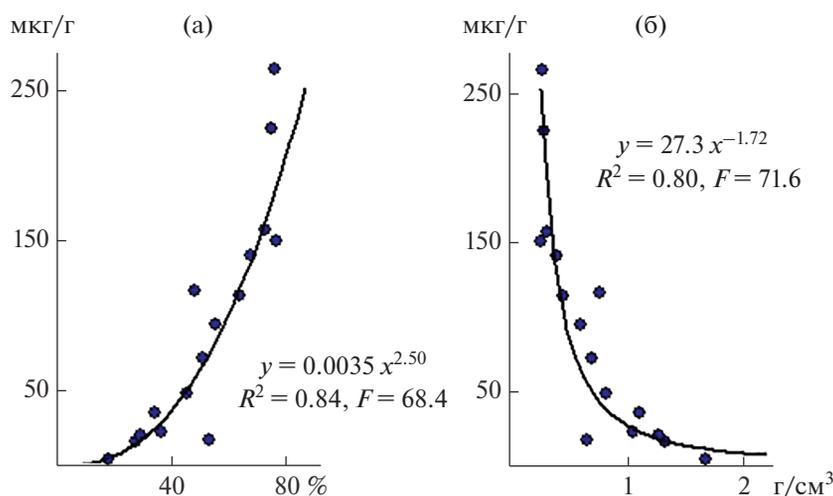
**Таблица 2.** Содержание Хл в воде и донных отложениях глубоководных и мелководных участков Цимлянского водохранилища в августе 2018 г.

Показатель	Участок	
	глубоководный	мелководный
Количество станций	11	5
Глубина, м	5–16	1.5–4.0
Температура, °С	22.1 ± 0.2	21.5 ± 0.4
Прозрачность, м	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1
Хл в воде, мкг/л	16.7–69.4	42.3–415
	38.3 ± 4.9	129 ± 80
$C_v$ Хл в воде, %	42	124
Хл + Фео в донных отложениях, мкг/г с.о.	22.1–264	4.6–113
	120.0 ± 23.3	44.3 ± 21.3
$C_v$ Хл + Фео в донных отложениях, %	64	106

Примечание. Над чертой – min–max, под чертой – среднее со стандартной ошибкой.

Хл  $a$  в толще воды нетипичны для крупных водоемов средней полосы, хотя близкие показатели известны для гиперэвтрофных озер и водохранилищ разных регионов мира (Barone, Naselli-Flores, 1994; Merino-Ibarra et al., 2008; Schelske et al., 2003), в том числе для озер Неро, Баторин (Состояние..., 2008; Экологическая..., 1985) и водохранилищ р. Днепр (Лишук, 2007). Высокий коэффициент вариации концентрации Хл в воде свидетельствует о значительной неоднородности пространственного распределения фитопланктона, характерной для периода его летнего максимума в водоемах со сложной морфометрией (Минеева, 2004). Осадочные пигменты в бентали водохранилища распределены более равномерно, коэффициент вариации их суммарного фонда ниже, чем в пелагиали. Следует отметить, что в водохранилищах рек Волги и Камы получена противоположная картина, и пространственные различия пигментов в ДО выражены сильнее, чем в водной толще (Беляева и др., 2018; Сигарева, 2012). По-видимому, в Цимлянском водохранилище с его слабой проточностью условия формирования ДО и их продукционных свойств более однородны.

Повышенное количество Хл  $a$  в воде мелководных станций и его максимальное количество в устьевых участках малых рек обусловлено харак-



**Рис. 2.** Связь концентрации осадочных пигментов с влажностью (а) и воздушно-сухой объемной массой грунтов (б) в Цимлянском водохранилище. По оси ординат – концентрация Хл + Фео, по оси абсцисс: а – влажность грунтов, б – объемная масса.

терным для литоральной зоны поступлением биогенных веществ с водами притоков. Максимальное содержание пигментов в ДО приплотинного участка типично для водохранилищ и согласуется с уменьшением скорости течения перед плотиной, интенсификацией осадконакопления и заиления (Гидрометеорологический..., 1977).

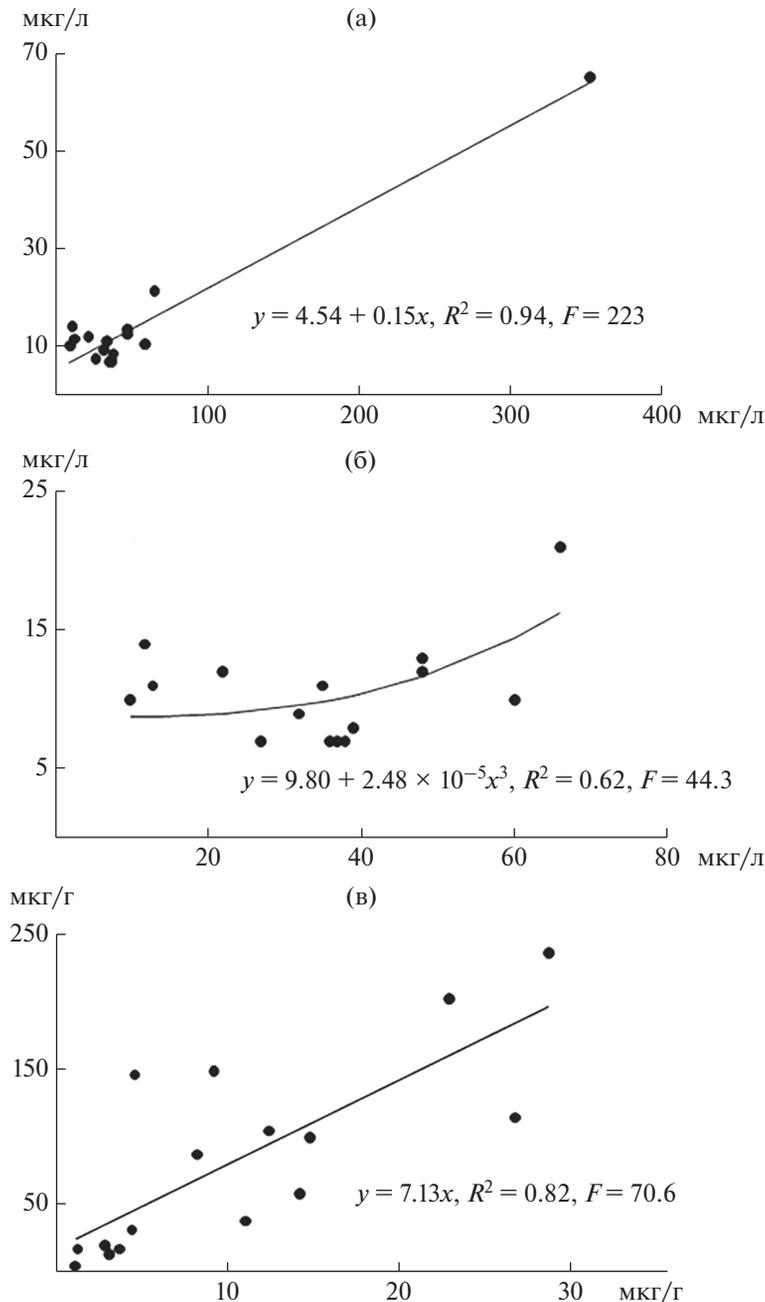
Содержание Хл *a* в воде литоральных станций Цимлянского водохранилища выше, чем в пелагиали. Аналогичное соотношение между показателями развития фитопланктона в глубоководной и мелководной зонах наблюдается в водохранилищах волжско-камского каскада (Беляева и др., 2018; Минеева, 2004). Противоположное соотношение отмечено для содержания Хл + Фео на мелководных и глубоководных участках бентали. Причиной может быть осаждение большего количества сестона на глубоких станциях, а также вымывание илстых частиц, обогащенных органическими остатками, и более интенсивное разрушение растительных пигментов в аэробных условиях литорали по сравнению с пелагиалью, где часто наблюдается дефицит кислорода у дна. Содержание осадочных пигментов, как и в других водоемах (Сигарева, Тимофеева, 2018), сопряжено с распределением ДО по площади дна, зависит от типа грунта, снижаясь от илов к пескам, и связано с водно-физическими свойствами ДО. На верхнем участке водохранилища отложения накапливаются за счет наносов, поступающих с речным стоком р. Дон, на среднем и нижнем – за счет обрушения и переформирования берегов (Гидрометеорологический..., 1977).

Концентрация Фео, продуктов распада Хл, в водной толще и ДО Цимлянского водохранилища типична для большинства пресных водоемов,

включая водохранилища рек Волги и Камы (Беляева и др., 2018; Минеева, 2004; Сигарева Тимофеева, 2018). Большая часть пигментного фонда бентали состоит из продуктов деградации Хл, тогда как в пелагиали преобладает активная форма пигмента. Из тесной связи между Хл и Фео следует, что основной источник последних – клетки водорослей. Наличие свободного члена в уравнениях (рис. 3а, 3б) отражает присутствие в водной толще значительного количества детритного материала. Свободный член в уравнении, полученном для пигментов ДО (рис. 3в), не значим, поскольку пигментный фонд бентали в основном представлен деградированной формой Хл.

Высокий процент Хл *a* в суммарном содержании зеленых пигментов планктона на всей акватории водохранилища при низких концентрациях дополнительных Хл *b* и Хл *c* соответствует массовому развитию и абсолютному доминированию синезеленых водорослей, постоянно отмечаемому в Цимлянском водохранилище в летний период (Бакаева, Игнатова, 2013; Лысак, 2002). Преобладание в пигментном фонде зеленых пигментов (хлорофиллов) над растительными каротиноидами, выполняющими в клетке роль дополнительных светосборщиков и фотопротекторов, отражает физиологическое благополучие планктонных водорослей при высокой обеспеченности биогенным питанием. В бентали аналог соотношения желтых и зеленых пигментов выше величин, полученных для функционирующего фитопланктона, и свидетельствует о неблагоприятных условиях для длительного сохранения новообразованного ОВ.

Концентрации пигментов в сестоне и ДО не коррелируют между собой ( $r = -0.24$ ), что обу-



**Рис. 3.** Связь между содержанием Фео и Хл в водной толще ((а) – все данные, (б) – без ст. в устье р. Аксенец) и в донных отложениях (в) Цимлянского водохранилища. По оси ординат – концентрация Фео, по оси абсцисс – концентрация Хл.

словлено сложным разнонаправленным характером связи между водным и донным биотопами. Низкая проточность должна способствовать осаждению водорослей из толщи воды, однако, в гиперэвтрофных водоемах обилие фитопланктона и интенсивный прогрев стимулируют деструкцию лабильного ОВ, к которому относятся пигменты. В этих условиях первичная продукция ограничена самозатенением водорослей, автохтонное ОВ быстро разлагается в толще воды, и лишь относи-

тельно небольшая его часть осаждается на дно (Guimaraes-Bermejo et al., 2018; Schelske et al., 2003). В то же время за счет разрушения берегов в водохранилище происходит усиленное осадконакопление и, соответственно, разбавление планктонной взвеси терригенным материалом. Содержание осадочных пигментов может снижаться и за счет выедания водорослей зообентосом, что подтверждается сравнением данных для Цимлянского водохранилища и оз. Неро – водоемов с

одинаково высоким содержанием Хл в воде. В Цимлянском водохранилище при интенсивном развитии донной фауны (средняя биомасса “мягкого” бентоса 28 г/м<sup>2</sup>, общего – 615 г/м<sup>2</sup> (Горелов, 2002)), содержание Хл + Фео ниже, чем в оз. Неро с меньшей биомассой бентоса (4.7–10.0 г/м<sup>2</sup> (Баканов, 2000)). Детритный материал из синезеленых водорослей при их массовом развитии в эвтрофных озерах используется в качестве источника углерода в пелагических и бентосных пищевых цепях (Yu et al., 2019).

Пигменты водной толщи и ДО служат показателями трофического статуса водоемов. Первые отражают современное состояние водного объекта, в данном случае – ситуацию, сложившуюся в водоеме в летнюю межень; вторые характеризуют предыдущий, более длительный период функционирования экосистемы. В соответствии со средним содержанием Хл *a* в воде (35.2–56.8 мкг/л) Верхний, Чирской и Приплотинный плесы относятся к политрофной категории, Потемкинский плес (108 мкг/л) – к гиперэвтрофной. Повышенной трофией характеризуются устьевые участки притоков. Среднее для водохранилища содержание Хл *a* в толще воды (66.7 мкг/л) соответствует гиперэвтрофному типу. Такие высокие величины не характерны для крупных водоемов умеренных широт. Однако в аридной зоне, где расположено слабопроточное Цимлянское водохранилище, создаются благоприятные условия для интенсивного развития синезеленых водорослей, которое ухудшает состояние водоема.

Содержание осадочных пигментов (54.4–85.3 мкг/г с.о.) соответствует эвтрофной категории в трех верхних плесах и гиперэвтрофной (244 мкг/г с.о.) в Приплотинном плесе. В целом, согласно средней концентрации пигментов в ДО (93.3 мкг/г с.о.), Цимлянское водохранилище характеризуется как эвтрофное. Близкая величина получена в водохранилищах Верхней и Средней Волги, но более низкая в водохранилищах р. Камы (Беляева и др., 2018) и расположенных в аридной зоне – Куйбышевском и Саратовском водохранилищах (Сигарева, Тимофеева, 2018). Климатические особенности территории влияют на формирование типа грунта (Законнов, Законнова, 2008), что, в свою очередь, считается главным фактором осадконакопления. В водохранилищах, расположенных в зоне с аридным климатом, отмечается повышенная скорость осадконакопления из-за размыва берегов. Для Цимлянского водохранилища, несмотря на сравнительно низкую проточность, также характерно обрушение берегов и интенсивное осадконакопление (Гидрометеорологический..., 1977).

Различие оценок трофического статуса водохранилища по содержанию растительных пигментов в воде и ДО обусловлено особенностями

распределения пигментов в пелагиали и бентали. Низкая водность, замедленный водообмен, избыточное содержание биогенных веществ и стабильный длительный прогрев водной толщи способствуют эвтрофированию и поддержанию высокого трофического статуса водных объектов. В Цимлянском водохранилище это выражается продолжительным массовым развитием синезеленых водорослей, в том числе видов, обладающих токсичностью, избыточным “цветением” воды и ухудшением ее качества на всей акватории водохранилища. В то же время, концентрация пигментов в ДО ниже потенциально возможной, по-видимому, из-за своеобразия грунтового комплекса и условий осадконакопления на разных участках водоема, а также пресса донных животных и интенсивной деструкции ОБ в толще воды.

**Выводы.** В период сезонного максимума продуктивности (август 2018 г.) содержание растительных пигментов в Цимлянском водохранилище представлено широким диапазоном величин 16.7–415 мкг/л Хл в толще воды и 4.6–264 мкг/г с.о. Хл + Фео в ДО при соответствующих средних 66.7 и 93.3 мкг/г с.о. Пигментный состав фитопланктона согласуется с массовым развитием синезеленых водорослей (цианопрокариот) и отражает физиологическое благополучие сообщества. Распределение Хл *a* по акватории водохранилища характеризуется значительной неоднородностью ( $C_v = 142\%$ ). Пигментный фонд ДО содержит высокий процент феопигментов ( $85.7 \pm 1.6$ ) и распределен по площади дна более равномерно ( $C_v = 78.9\%$ ). Содержание осадочных пигментов сопряжено с составом ДО, их водно-физическими свойствами и снижается от илов к пескам. Отсутствие корреляции между количеством пигментов в планктоне и ДО отражает сложные разнонаправленные связи между водным и донным биотопами. Средняя концентрация Хл *a* в воде характеризует Цимлянское водохранилище как гиперэвтрофное, средняя концентрация осадочных пигментов – как эвтрофное. Различие оценок трофического статуса водохранилища по растительным пигментам сестона и ДО обусловлено спецификой распределения пигментов в пелагиали и бентали, гидрологическими и гидрохимическими особенностями высокопродуктивного Цимлянского водохранилища.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках Госзадания АААА-А18-118012690096-1.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. 2013. Качество вод приплотинной части Цимлянского водохранилища в

- условиях цветения синезеленых микроводорослей // Глобал. ядер. безопас. № 1(6). С. 23.
- Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А., Черникова Г.Г.* 2012. Эко-токсичность вод приплотинного участка Цимлян-ского водохранилища // Глобал. я дер. безопас. № 3 (спецвыпуск). С. 5.
- Баканов А.И.* 2000. Бентос открытой части оз. Неро // Биол. внутр. вод. № 3. С. 79.
- Беляева П.Г., Минеева Н.М., Сigareва Л.Е. и др.* 2018. Содержание растительных пигментов в воде и дон-ных отложениях водохранилищ р. Камы // Тр. Ин-ститута биологии внутренних вод им. И.Д. Папа-нина РАН. Вып. 81(84). С. 97.
- Винберг Г.Г.* 1960. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР.
- Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. 1977. Цимлянское, водораздельные и Ма-нычские водохранилища. Ленинград: Гидрометео-издат.
- Горелов В.П.* 2002. Состояние донных кормовых ресур-сов Цимлянского водохранилища (по данным 1998–1999 гг.) // Рыбохозяйственные исследова-ния в бассейне Волго-Донского междуречья на со-временном этапе (к 50-летию Волгоградского от-деления ГосНИОРХ). Санкт-Петербург: Квинта Северо-Запад. С. 53.
- Доклад об особенностях климата на территории Рос-сийской Федерации за 2018 год. 2019. Москва: Росгидромет.
- Законнов В.В., Законнова А.В.* 2008. Географическая зо-нальность осадконакопления в системе водохра-нилищ Волги // Известия РАН. Серия географиче-ская. № 2. С. 105.
- Киреева М.Б., Илич В.П., Гончаров А.В. и др.* 2018. Влия-ние маловодья 2007–2015 гг. в бассейне р. Дон на состояние водных экосистем // Вестник Москов-ского университета. Сер. 5. География. № 5. С. 3.
- Китаев С.П.* 2007. Основы лимнологии для гидробио-логов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский на-уч. центр РАН.
- Кушишкина Н.В.* 2002. Химический состав воды Цим-лянского водохранилища на современном этапе // Рыбохозяйственные исследования в бассейне Вол-го-Донского междуречья на современном этапе (к 50-летию Волгоградского отделения ГосНИОРХ). Санкт-Петербург: Квинта Северо-Запад. С. 16.
- Лишук А.В.* 2007. Эколого-физиологические основы формирования фитопланктона пресноводных экосистем: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Киев: Институт гидробиологии НАН Украины.
- Лобойко В.Ф., Зубов И.А.* 2009. Роль факторов среды и антропогенного воздействия в формировании со-временной экосистемы Цимлянского водохрани-лища // Изв. Нижневолж. агроунивер. компл.: На-ука и высшее профессиональное образование. № 2(14). С. 26.
- Лысак Т.Б.* 2002. Современная структурно-функцио-нальная характеристика летнего фитопланктона Цимлянского водохранилища // Рыбохозяйствен-ные исследования в бассейне Волго-Донского междуречья на современном этапе (к 50-летию Волгоградского отд. ГосНИОРХ). Санкт-Петер-бург: Квинта Северо-Запад. С. 29.
- Матишов Г.Г., Ковалева Г.В.* 2010. “Цветение” воды в водоемах юга России и сбои в водоснабжении (на примере г. Волгодонска) // Вестник Южного науч-ного центра РАН. Т. 6. № 1. С. 71.
- Минеева Н.М.* 2000. Растительные пигменты как пока-затель состояния экосистемы водохранилищ. Пиг-менты планктона // Современная экологическая ситуация в Рыбинском и Горьковском водохрани-лищах: состояние биологических сообществ и пер-спективы рыбохозяйствования. Ярославль: Яросла-вос.-техн. ун-т. С. 66.
- Минеева Н.М.* 2004. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. Москва: Наука.
- Сigareва Л.Е.* 2012. Хлорофилл в донных отложениях волжских водоемов. Москва: Тов-во науч. изд. КМК.
- Сigareва Л.Е., Тимофеева Н.А.* 2018. Содержание рас-тительных пигментов в донных отложениях водо-хранилищ Волги // Гидрология, гидрохимия и рас-тительные пигменты водохранилищ Волжского каскада. Труды ИБВВ РАН. Вып. 81(84). Яро-славль: Филигрань. С. 105.
- Сigareва Л.Е., Тимофеева Н.А., Законнов В.В., Гершев-ский П.* 2017. Оценка вариабельности трофическо-го состояния Влоцлавского водохранилища по осадочным пигментам // Вода: химия и экология. № 2. С. 3.
- Сиделев С.И., Голоколенина Т.Б., Чернова Е.Н., Русских Я.В.* 2015. Анализ фитопланктона Цимлянского водо-хранилища (Россия) на наличие цианобактериаль-ных гепато- и нейротоксинов // Микробиология. Т. 84. № 6. С. 732.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1893.2563>
- Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века. 2008. Москва: Наука.
- Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х.Р.* 1990. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эв-трофирования. Ленинград: Гидрометеоиздат.
- Хоружая Т.А., Минина Л.И.* 2017. Оценка экологиче-ского состояния Цимлянского, Пролетарского и Веселовского водохранилищ // Метеорол. гидрол. № 5. С. 116.
- Хоружая Т.А., Флик Е.А.* 2011. Пространственно-вре-менные характеристики распределения соедине-ний азота в Цимлянском водохранилище // Вода: химия и экология. № 10. С. 9.
- Цимлянское водохранилище: состояние водных и прибрежных экосистем, проблемы и пути их реше-ния. 2011. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного науч-ного центра РАН.
- Экологическая система Нарочанских озер. 1985. Минск: Университетское. 303 с.
- Barone R., Naselli-Flores L.* 1994. Phytoplankton dynamics in a shallow, hypertrophic reservoir (Lake Arancio, Sic-ily) // Hydrobiologia. V. 289. P. 199.  
<https://doi.org/10.1007/BF00007421>
- Carnero-Bravo V., Merino-Ibarra M., Ruiz-Fernández A.C. et al.* 2015. Sedimentary record of water column trophic con-ditions and sediment carbon fluxes in a tropical water reservoir (Valle de Bravo, Mexico) // Environ. Sci. Pol-

- lut. Res. V. 22. № 6. P. 4680.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3703-0>
- Guimaraes-Bermejo M.O., Merino-Ibarra M., Valdespino-Castillo P.M. et al. 2018. Metabolism in a deep hypertrophic aquatic ecosystem with high water-level fluctuations: a decade of records confirms sustained net heterotrophy // PeerJ6:e5205.  
<https://doi.org/10.7717/peerj.5205>
- Kleschenkov A.V., Filatova T.B., Gerasyuk V.S. 2019. Hydrochemical situation in the Tsimlyansk Reservoir according to the results of observations in 2011–2018 // Научный альманах стран Причерноморья. Т. 19. № 3. С. 52.  
<https://doi.org/10.23947/2414-1143-2019-19-3-52-60>
- Merino-Ibarra M., Monroy-Ríos E., Vilaclara G. et al. 2008. Physical and chemical limnology of a wind-swept tropical highland reservoir // Aquat. Ecol. V. 42. № 3. P. 335.  
<https://doi.org/10.1007/s10452-007-9111-5>
- Mineeva N.M. 2018. Composition and content of photosynthetic pigments in plankton of the Volga River reservoirs (2015–2016) // Тр. Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. Вып. 81(84). С. 85.
- 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. P. 327.  
<https://doi.org/10.1007/BF00007421>
- Panin G.N., Vyruchalkina T.Yu., Grechushnikova M.G., Solomonova I.V. 2016. Specific Features of the Hydrological Regime of the Tsimlyansk Reservoir under Climate Changes in the Don Basin // Water Resources. V. 43. № 2. P. 249.  
<https://doi.org/10.1134/S0097807816020123>
- Schelske C.L., Aldridge F.J., Carrick H.J., Coveney M.F. 2003. Phytoplankton community photosynthesis and primary production in a hypereutrophic lake, Lake Apopka, Florida // Archiv Hydrobiol. V. 157. № 2. P. 145.  
<https://doi.org/10.1127/0003-9136/2003/0157-0145>
- Sigareva L.E., Zakonov V.V., Gerszhevskiy P. 2011. Content and distribution of the plant pigments in the bottom sediments of the eutrophic Wloclawek Reservoir // Hydrobiol. J. V. 47. № 3. P. 57.  
<https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v47.i3.70>
- 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.
- Yu J., He H., Liu Z., Jeppesen E. et al. 2019. Carbon Transfer from Cyanobacteria to Pelagic and Benthic Consumers in a Subtropical Lake: Evidence from a <sup>13</sup>C Labelling // Water. V. 11. № 8.  
<https://doi.org/10.3390/w11081536>

## Plant Pigments in Water and Bottom Sediments of the Tsimlyansk Reservoir

N. M. Mineeva<sup>1</sup>\*, L. E. Sigareva<sup>1</sup>, N. A. Timofeeva<sup>1</sup>, and I. V. Semadeny<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

In August of the low-water year, 2018, the first related data on plant pigments in water column and bottom sediments (BS) in the Tsimlyansk reservoir (Russia) were obtained. In the water column, chlorophyll (Chl) is represented mainly by the active form, its concentrations (16.7–415 µg/L) are characterized by a discrete distribution over the reservoir water area ( $C_v = 142\%$ ). The pigment fund of bottom sediments (4.6–264.0 µg/g of dry weight) contains a high percentage of pheopigments (Pheo) and is distributed over the bottom area more evenly ( $C_v = 78.9\%$ ). The concentrations of the pigments of two biotopes are weakly correlated with each other ( $r = -0.24$ ), which reflects the complex multidirectional nature of the relationship between them. The average content of Chl in the water column (66.7 µg/L) characterizes the Tsimlyansk reservoir as hypereutrophic, the average content of Chl + Pheo in BS (93.3 µg/g of dry weight) as eutrophic.

**Keywords:** pigment fund, chlorophyll, pheopigments, water column, bottom sediments, Tsimlyansk reservoir