

УДК 574.583(285.2):581+581.132.1:556.114.7

АНАЛИЗ СВЯЗИ СТЕПЕНИ РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА, ОЦЕНЕННОЙ ПО ХЛОРОФИЛЛУ “а”, С СОДЕРЖАНИЕМ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

© 2021 г. И. Э. Степанова[®]

Институт биологии внутренних вод РАН, пос. Борок, 105, Некоузский р-н, Ярославская обл., 152742 Россия
[®]*E-mail: iris@ibiw.ru*

Поступила в редакцию 06.03.2018 г.

После доработки 15.01.2020 г.

Принята к публикации 15.01.2020 г.

Проведен анализ связи хлорофилла “а” (хл “а”) с соединениями азота и фосфора в Рыбинском водохранилище. В отдельные периоды исследования обнаружена значимая корреляция между хл “а” и неорганическими соединениями азота и фосфора. Рассчитаны отклики фитопланктона на общий азот и фосфор.

DOI: 10.31857/S0002332921020119

Физиологические показатели роста водорослей могут служить критериями при определении лимитирующего элемента их питания. Наиболее простой и распространенный метод определения такого элемента – установление количественного соотношения азота и фосфора в воде. Лимитирование также может быть выявлено и при изучении зависимости развития фитопланктона от концентраций азота и фосфора. Для различных регионов и водоемов ранее были получены статистически значимые оценки связей концентраций биогенных элементов с хл “а” как показателем развития фитопланктона, биомассой и продуктивностью озер. Связь хлорофилл–общий фосфор (хл “а”–ТР) была обнаружена Диллоном и Риглером (Dillon, Rigler, 1974) для 46 озер мира:

$$\text{хл “а”} = 0.073\text{ТР}^{1.45},$$

где концентрация хлорофилла среднелетняя, общего фосфора средневесенняя. Аналогичное уравнение также предложено Джонсом и Бахманом (Jones, Bachman, 1986):

$$\text{хл “а”} = 0.08\text{ТР}^{1.46},$$

где оба показателя среднелетние.

Смит (Smith, 1982) в результате обобщения данных о 228 озерах обнаружил множественную регрессионную зависимость содержания хлорофилла как функции концентраций общего азота (TN) и ТР, тем самым подтвердив влияние соотношения этих элементов на развитие фитопланктона:

$$\log \text{хл “а”} = 0.653 \log \text{ТР} + 0.548 \log \text{TN} - 1.517.$$

Необходимо отметить, что зависимости показателей развития фитопланктона, в том числе от содержания хл “а” и биогенных элементов, установлены в основном для небольших озер с устойчивым гидрологическим режимом. Для крупных озер и водохранилищ из-за сложности гидродинамических условий и разнородности водных масс эти зависимости часто недостаточно определены. Некоторые связи были отмечены для волжских водохранилищ (Минеева, Разгулин, 1995; Минеева, 2004; Минеева и др., 2008), водохранилищ днепровского каскада (Курейшевич, Журавлева, 1997; Курейшевич, Медведь, 2006), однако они очень неустойчивы и зависят от совокупности множества факторов, влияние которых учесть довольно трудно. Изучение таких зависимостей в водохранилище весьма актуально.

Цель исследования – оценка и анализ связей хлорофилл–биогенные элементы на современном этапе развития экосистемы Рыбинского водохранилища.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Нитриты определяли колориметрическим методом после реакции с сульфаниламидом и альфа-нафтиламином, нитраты – колориметрическим методом после их восстановления до нитритов омыленным кадмием, ионы аммония – после микродиффузионной отгонки и последующей реакции с реактивом Несслера, содержание фосфатов – колориметрическим методом с молибдатом аммония и оловом (Семенов, 1977), TN – после окис-



Рис. 1. Схема отбора проб на станциях водохранилища. 1 – Коприно, 2 – Молога, 3 – Наволок, 4 – Измайлово, 5 – Средний Двор, 6 – Брейтово.

ления органических фракций персульфатом калия до нитратов (Гапеева и др., 1984), а ТР – до ортофосфатов (Бикбулатов, 1974). Хл “а” определяли спектрофотометрическим методом по Лоренцену. Пробы были отобраны 2 раза в месяц с поверхностного слоя воды на шести стандартных станциях Рыбинского водохранилища (Коприно, Молога, Наволок, Измайлово, Средний Двор и Брейтово) за весь период открытой воды (май–октябрь) в 2007–2010 гг. Схема отбора проб представлена на рис. 1.

Данные по хлорофиллу были любезно предоставлены И.Л. Пыриной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В целом Рыбинское водохранилище по содержанию элементов азота и фосфора в настоящее время относится к мезотрофным водоемам, однако в некоторые периоды (весной) Волжский плес, к которому принадлежат станции Коприно и Молога, – к эвтрофным. Опираясь на средние концентрации хлорофилла, Рыбинское водохранилище можно классифицировать как умеренно-эвтрофное (Корнева, 2015).

В исследуемые годы для Рыбинского водохранилища были характерны сезонные закономерности изменения содержания ряда форм биогенных элементов и некоторых их соотношений, выражающиеся в уменьшении неорганических форм и повышении доли органических летом. Наиболее высокое содержание всех неорганических форм азота и фосфора отмечалось в мае за счет распавшегося в процессе аммонификации и нитрификации за подледный период органического вещества. Отношение содержания азота к фосфору снижалось при переходе от весны к лету. Концентрации всех исследованных соединений азота и фосфора, а также хл “а” колебались в довольно широких пределах, хлорофилла – от 0.39 до 55.4 мкг/л, что в среднем за весь исследованный период составило 12.4 мкг/л. Среднемесячные данные представлены в табл. 1, частоты встречаемости различных концентраций хл “а” – на рис. 2а. Наиболее часто были отмечены концентрации до 10 мкг/л (116 случаев из всего массива данных). Максимумы развития фитопланктона пришлись на конец лета–начало осени. Содержание TN и ТР изменялось от 0.34 до 2.01 и от 0.019 до 0.115 мг/л соответственно. Чаще всего наблюдались концентрации ТР и TN 0.04–0.06 и 0.5–1.0 мг/л (рис. 2б, 2в).

За исследуемый период для всего массива данных не было выявлено значимой связи содержания хл “а” ни с одним соединением азота и фосфора (табл. 2) (ионами аммония, нитритами, нитратами, неорганическим и органическим азотом, TN, фосфатами, органическим и ТР). Макси-

Таблица 1. Содержание хлорофилла “а”, мкг/л, и биогенных элементов (среднее за 2007–2010 гг.), мг N/л или мг P/л

Месяц	хл “а”	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	TN	$\text{N}_{\text{мин}}$	$\text{N}_{\text{орг}}$	$\text{P}_{\text{мин}}$	ТР	$\text{P}_{\text{орг}}$	N/P
Май	7.28	0.06	0.005	0.270	0.82	0.360	0.49	0.026	0.042	0.016	22
Июнь	7.95	0.07	0.005	0.220	0.74	0.290	0.47	0.025	0.053	0.027	16
Июль	12.1	0.07	0.004	0.100	0.93	0.17	0.63	0.017	0.058	0.041	15
Август	16.4	0.06	0.002	0.037	0.86	0.100	0.76	0.023	0.062	0.039	15
Сентябрь	16.8	0.04	0.004	0.044	0.91	0.106	0.68	0.023	0.064	0.040	13
Октябрь	8.79	0.03	0.004	0.057	1.00	0.113	0.75	0.027	0.070	0.050	13
Среднее	12.4	0.05	0.004	0.121	0.88	0.189	0.63	0.023	0.058	0.035	15

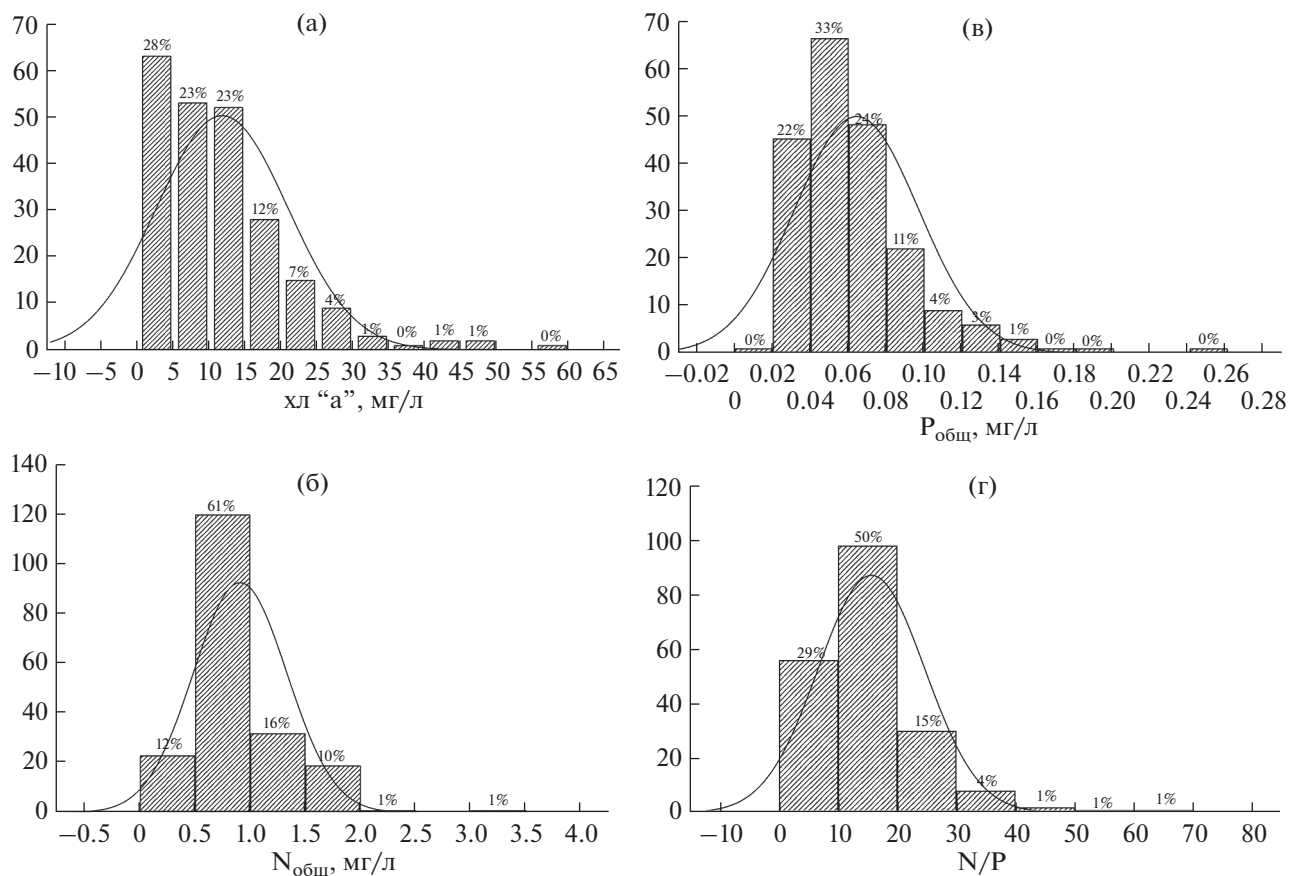


Рис. 2. Частота встречаемости различных концентраций хлорофилла "а" (а), общего фосфора (б), общего азота (в); N/P (г); ось ординат – число случаев и доля (%) общего числа наблюдений ($n = 231$).

мальная связь отмечалась с органическим фосфором (табл. 2). Отмечена высокая корреляционная связь между общим и органическим азотом, ми-

неральным азотом и нитратами ($r = 0.94$). Менее тесная связь была обнаружена между органическим и общим фосфором ($r = 0.71$), умеренная

Таблица 2. Коэффициенты парной корреляции между различными формами биогенных элементов и концентрацией хлорофилла (весь массив данных)

	хл "а"	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	TN	$N_{\text{мин}}$	$N_{\text{орг}}$	$P_{\text{мин}}$	TP	$P_{\text{орг}}$	N/P
хл "а"	1.00	-0.08	-0.17	-0.23	0.12	-0.24	0.20	-0.15	0.28	0.47	-0.11
NH_4^+	-0.08	1.00	0.19	0.13	0.16	0.45	0.00	0.11	0.03	-0.06	0.25
NO_2^-	-0.17	0.19	1.00	0.45	-0.20	0.50	-0.35	0.28	0.10	-0.12	-0.23
NO_3^-	-0.23	0.13	0.45	1.00	0.00	0.94	-0.31	0.29	0.05	-0.19	-0.05
TN	0.12	0.16	-0.20	0.00	1.00	0.05	0.94	0.17	0.29	0.20	0.63
$N_{\text{мин}}$	-0.24	0.45	0.50	0.94	0.05	1.00	-0.29	0.30	0.06	-0.20	0.04
$N_{\text{орг}}$	0.20	0.00	-0.35	-0.31	0.94	-0.29	1.00	0.06	0.26	0.25	0.59
$P_{\text{мин}}$	-0.15	0.11	0.28	0.29	0.17	0.30	0.06	1.00	0.57	-0.18	-0.24
TP	0.28	0.03	0.10	0.05	0.29	0.06	0.26	0.57	1.00	0.71	-0.45
$P_{\text{орг}}$	0.47	-0.06	-0.12	-0.19	0.20	-0.20	0.25	-0.18	0.71	1.00	-0.33
N/P	-0.11	0.25	-0.23	-0.05	0.63	0.04	0.59	-0.24	-0.45	-0.33	1.00

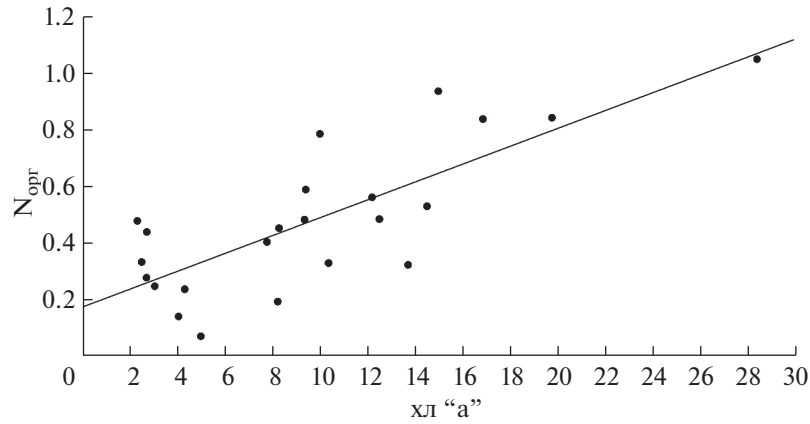


Рис. 3. График корреляции между хлорофиллом “а” (мкг/л) и органическим азотом (мг/л) в июне.

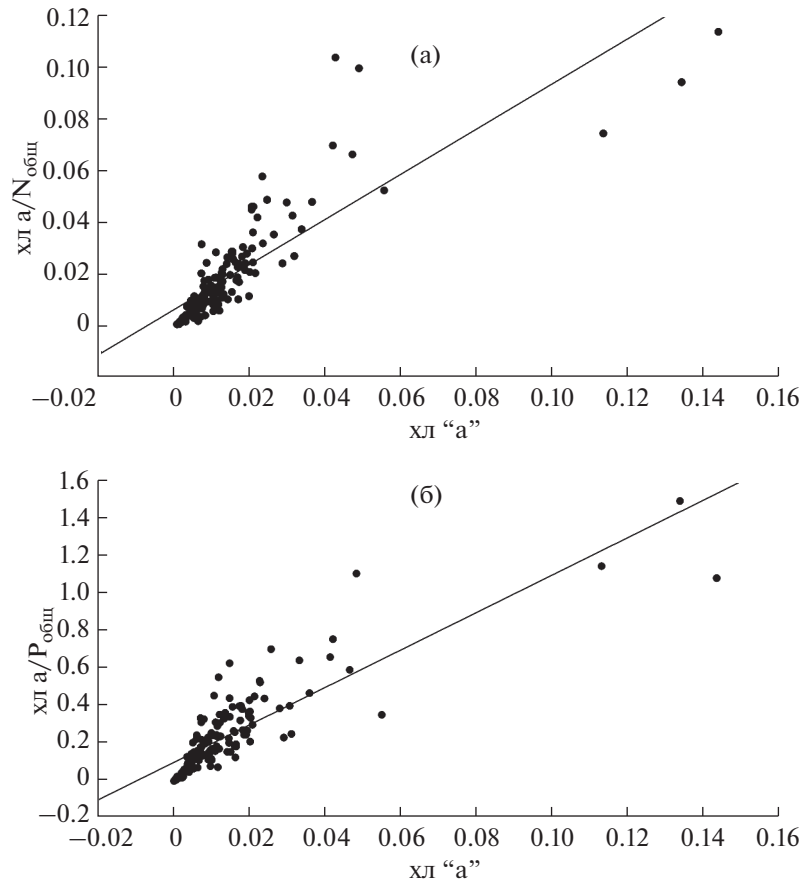


Рис. 4. Связь между откликами и хлорофиллом “а” (мкг/л). а – отклик на TN, б – отклик на TP.

связь также наблюдалась между парами TP и $P_{\text{мин}}$ ($r = 0.57$), $N_{\text{орг}}$ и N/P ($r = 0.59$) и TN и N/P ($r = 0.63$).

Зависимость между биогенными элементами и хлорофиллом была установлена лишь в отдельные месяцы. Наиболее тесная связь биогенных элементов с содержанием хл “а” отмечалась в период открытой воды. Так, в мае (табл. 3) между

концентрациями хлорофилла, нитратов, фосфатов наблюдалась отрицательная корреляционная связь ($r = -0.56$ и -0.72 соответственно), что свидетельствует об их интенсивном потреблении фитопланктоном.

В июне отмечалась и достоверная корреляция между концентрациями хл “а” и нитратами

Таблица 3. Коэффициенты парной корреляции между различными формами биогенных элементов и концентрацией хлорофилла в период открытой воды

Месяц	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	TN	N _{мин}	N _{орг}	P _{мин}	TP	P _{орг}
Май	0.54	0.24	-0.56	-0.09	-0.25	0.12	-0.72	-0.66	-0.23
Июнь	-0.18	-0.41	-0.66	0.59	-0.63	0.78	0.28	0.35	0.11
Сентябрь	-0.26	-0.41	-0.28	0.59	-0.33	0.64	-0.35	0.49	0.82

($r = -0.66$), а также N_{мин} ($r = -0.63$), N_{общ} и N_{орг} ($r = 0.57$ и 0.76). Связь между этими компонентами была выражена следующей формулой:

$$N_{\text{орг}} = 0.1744 + 0.0316 \text{ хл "а"} \text{ (рис. 3).}$$

Содержание хлорофилла положительно коррелировало с концентрациями N_{общ} и N_{орг}, P_{общ} и P_{орг} в сентябре ($r = 0.59, 0.64, 0.49$ и 0.82 соответственно) (табл. 3). Указанные выше коэффициенты отражают или умеренную (от 0.56 до 0.71), или заметную ($0.72-0.84$) связь по шкале Чеддока. В июле, августе и октябре корреляционный анализ не выявил значимых связей между биогенными элементами и хлорофиллом.

При рассмотрении среднемесячных значений уровней исследуемых элементов были отмечены высокие значения коэффициентов корреляции в парах хл "а"—нитраты ($r = -0.78$), хл "а"—неорганический азот ($r = -0.75$), хл "а"—N_{орг} ($r = 0.65$), связи содержания хлорофилла с содержанием общего, органического фосфора и фосфатов были слабыми.

Такая корреляция между концентрациями хл "а", соединениями азота и фосфора в водохранилищах отмечается довольно часто и не может быть однозначно объяснена, так как развитие водорослей зависит не только от обеспеченности клеток минеральными веществами. Реакция фитопланктона на биогенные элементы в основном определяется значениями отношений концентраций общего азота и фосфора. Считается, что развитие водорослей лимитировано азотом при TN/TP < 10, фосфором при TN/TP > 15–17, а в диапазоне TN/TP = 10–15, близком к соотношению элементов в клетке, биогенное лимитирование отсутствует.

В годы проведения исследований в Рыбинском водохранилище в вегетационный период отношение TN/TP варьировало в широких пределах (от 4.1 до 66.6), составляя в среднем 15.6, что скорее всего свидетельствует об отсутствии лимитирования развития фитопланктона в водоеме обоими элементами. Именно это и является одной из причин слабых попарных корреляцион-

ных связей между элементами азота, фосфора и хл "а". Развитие фитопланктона в водоеме в большой степени зависит не только от обеспеченности клеток минеральными веществами, но и от световых условий, пресса зоопланктона, динамики водных масс (особенно в условиях хорошо перемешиваемого мелководного Рыбинского водохранилища) и различия в потребности отдельных групп водорослей в биогенных веществах. В водоеме чаще всего отмечалось отсутствие лимитирования развития фитопланктона (42% случаев), лимитирование по фосфору и азоту составляло 30 и 28% соответственно.

При TN/TP < 10 зависимость между хл "а" и TP, а также между хл "а" и TN в водохранилище можно выразить уравнениями

$$\text{хл "а"} = -0.007 + 0.2492\text{TP},$$

$$\text{хл "а"} = -0.0178 + 0.0584\text{TN}.$$

При TN/TP = 10–15 отсутствовали какие-либо связи между этими элементами, а при TN/TP > 15 связи были слабыми.

Так как общая непосредственная связь содержания биогенных элементов с концентрацией хл "а" довольно слабая, можно определить их влияние с помощью косвенной оценки этой связи, с помощью так называемого отклика фитопланктона ("response" или "efficiency") на азот и фосфор, который выражается через соотношение хл "а"/TP или хл "а"/TN (Kalff, Knoechel, 1978; Hern *et al.*, 1981). Хен с соавт. после исследования 757 озер США сделали заключение, что более трети озер не подчиняются уравнению Джонса—Бахмана и ввели понятие "коэффициент отклика". Эти отношения — угловые коэффициенты в уравнениях зависимости содержания хлорофилла от TN и TP, которые отображают обеспеченность фитопланктона элементами азота и фосфора, а также эффективность их потребления. В Рыбинском водохранилище в исследованный период оба отклика изменялись в довольно широких диапазонах:

$$\text{хл "а"}/\text{TP} \text{ от } 0.003 \text{ до } 1.49 \text{ (среднее } 0.24),$$

$$\text{хл "а"}/\text{TN} \text{ от } 0.001 \text{ до } 0.114 \text{ (среднее } 0.019).$$

Полученные средние значения откликов в настоящее время были сходны с таковыми для Рыбинского водохранилища в 1981 и 1982 гг. (Минеева, 1995) и для озерных водохранилищ днепровского каскада (Курейшевич, Медведь, 2006), в которых были изучены только отклики на фосфор в 1980–1990-е гг. При сравнении средних значений откликов хлорофилла на ТР в водохранилищах Днепра и Волги можно отметить, что они довольно близки, несмотря на то что содержание ТР в водах днепровских водохранилищ почти в 2 раза выше, чем в волжских, а коэффициенты водообмена существенно не различаются. Причиной этого может быть меньшая эффективность использования фитопланктоном соединений фосфора и большая антропогенная нагрузка на водохранилища днепровского каскада. Для обоих показателей прослеживаются сезонные изменения с максимумами в июне и октябре.

Отклики фитопланктона на биогенные вещества тесно связаны с содержанием хлорофилла:

$$\text{хл "а"}/\text{TN} = 0.0066 + 0.8678 \text{ хл "а"} \\ (n = 148, r = 0.86) \text{ (рис. 4а)},$$

$$\text{хл "а"}/\text{TP} = 0.0985 + 9.9541 \text{ хл "а"} \\ (n = 148, r = 0.84) \text{ (рис. 4б)}.$$

Средние значения откликов при различном TN/P:

$$\text{TN}/\text{TP} < 10; \text{ хл "а"}/\text{TN} = 0.029, \\ \text{ хл "а"}/\text{TP} = 0.24,$$

$$\text{TN}/\text{TP} = 10\text{--}15; \text{ хл "а"}/\text{TN} = 0.018, \\ \text{ хл "а"}/\text{TP} = 0.23,$$

$$\text{TN}/\text{TP} > 15; \text{ CHL}/\text{N} = 0.013, \\ \text{ хл "а"}/\text{TP} = 0.27.$$

Отклики хл “а”/TN уменьшались с возрастанием отношения TN/TP:

$$\text{хл "а"}/\text{TN} = 0.0285 - 0.006 \text{ TN}/\text{TP}.$$

Для откликов на фосфор таких закономерностей отмечено не было.

Рассматриваемые отклики не зависели от отношения TN/TP, однако для обоих получены высокие коэффициенты множественной корреляции с хл “а”, TN и TP. Количественно эта зависимость выражается уравнениями

$$\text{хл "а"}/\text{TN} = 0.920301 \text{ хл "а"} - 0.014276\text{TN} - \\ - 0.043191\text{TP} + 0.020501 \text{ (R} = 0.94),$$

$$\text{хл "а"}/\text{TP} = 11.25791 \text{ хл "а"} - 0.02970\text{TN} - \\ - 3.15679\text{TP} + 0.30221 \text{ (R} = 0.89).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При анализе парных корреляций между всеми изученными формами азота и фосфора и хл “а” в Рыбинском водохранилище для всего массива данных не было выявлено значимых связей. Средняя степень связи была отмечена лишь между хлорофиллом и органическим фосфором ($r = 0.47$). Показано, что между хлорофиллом “а” и неорганическими соединениями азота и фосфора существует значимая корреляция в отдельные периоды исследования. Рассчитаны отклики фитопланктона на TN и TP, а также установлена количественная зависимость между откликами, хлорофиллом, TN и TP.

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А18-118012690104-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бикбулатов Э.С.* О методе определения общего фосфора в природных водах // Гидрохим. материалы. 1974. Т. 60. С. 167–173.
- Ганеева М.В., Разгулин С.М., Скопинцев Б.А.* Ампульный персульфатный метод определения общего азота в природных водах // Гидрохим. материалы. 1984. Т. 87. С. 67–74.
- Корнева Л.Г.* Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Кострома: Костромской печатный дом, 2015. 284 с.
- Курейшевич А.В., Журавлева Л.В.* Связь между содержанием хлорофилла “а” и концентрацией биогенных веществ в воде Днепровских водохранилищ // Гидробиол. журн. 1997. Т. 33. № 1. С. 75–82.
- Курейшевич А.В., Медведь В.А.* Оценка соотношения между содержанием хлорофилла А и фосфора в воде днепровских водохранилищ // Гидробиол. журн. 2006. Т. 42. № 1. С. 35–46.
- Минеева Н.М.* Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 155 с.
- Минеева Н.М., Разгулин С.М.* О влиянии биогенных элементов на содержание хлорофилла в Рыбинском водохранилище // Вод. ресурсы. 1995. Т. 22. № 6. С. 218–223.
- Минеева Н.М., Литвинов А.С., Степанова И.Э., Кочеткова М.Ю.* Содержание хлорофилла и факторы его пространственного распределения в водохранилищах // Биология внутр. вод. 2008. № 1. С. 68–78.
- Семенов А.Д.* Практическое руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 540 с.
- Dillon P.J., Rigler P.H.* The phosphorous – chlorofyll relationship in lakes // Limnol. Oceanogr. 1974. V. 19. № 5. P. 767–770.

Jones R.A., Bachman R.W. Prediction of phosphorous and chlorophyll levels in lakes // *Wat. Poll. Cont. Feder.* 1986. V. 48. № 9. P. 2176–2182.

Hern S., Lambou V.W., Williams L.R., Taylor W.D. Modification of models predicting trophic state of Lakes. Las Vegas: US EPA, 1981. P. 38.

Kalff J., Knoechel R. Phytoplankton and their dynamics in oligotrophic and eutrophic lakes // *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 1978. V 9. P. 475–495.

Smith V.H. The nitrogen and phosphorous dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis // *Limnol. Oceanogr.* 1982. V. 23. P. 1248–1255.

A Correlation Analysis Between the Phytoplankton Development Level, Assessed by Chlorophyll “a”, and Nutrient Concentrations in the Rybinsk Reservoir

I. E. Stepanova[#]

Institute for Biology of Inland Waters RAS, pos. Borok 105, Nekouzsky district, Yaroslavl region, 152742 Russia
[#]*e-mail: iris@ibiw.ru*

A correlation analysis between chlorophyll “a”, nitrogen and phosphorus compounds in the Rybinsk Reservoir is carried out. During certain periods of the study, a significant correlation between chlorophyll “a” and inorganic nitrogen and phosphorus compounds is shown. Phytoplankton response to total nitrogen and phosphorus concentrations is evaluated.