

**СЕЗОННЫЕ И МЕЖГОДОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ
ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА
В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ:
ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ¹**

© 2019 г. А. И. Копылов^{1,*}, Т. С. Масленникова¹, Д. Б. Косолапов¹

¹Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН,
Россия 152742 пос. Борок Ярославской области

*e-mail: kopylov@ibiw.ru

Поступила в редакцию 12.06.2016 г.

После доработки 15.03.2017 г.

Принята к публикации 29.06.2017 г.

В Рыбинском водохранилище (Верхняя Волга) в 2005–2014 гг. исследована сезонная и многолетняя динамика первичной продукции фитопланктона. Между средними за вегетационный период величинами первичной продукции планктона и абиотическими факторами водной среды (температурой, солнечной радиацией, концентрацией биогенных элементов), а также, если исключить данные аномально жаркого лета 2010 г., между первичной продукцией и индексом Северо-Атлантического колебания обнаружены положительные связи. Повышение температуры воды (до 27.9°C) летом 2010 г. вызвало значительное увеличение продукции фитопланктона. За анализируемый период в Рыбинском водохранилище отмечено существенное увеличение первичной продукции фитопланктона.

Ключевые слова: первичная продукция планктона, сезонная и многолетняя динамика, Рыбинское водохранилище, индекс Северо-Атлантического колебания.

DOI: 10.31857/S0321-0596463270-277

Изучение влияния потепления климата и повышения температуры на продуктивность и эвтрофирование водных экосистем — одно из приоритетных направлений современной гидроэкологии [19, 22]. В неглубоких озерах и водохранилищах умеренного пояса потепление часто приводит к ускорению эвтрофирования и ухудшению качества их вод [14].

В России после 1975 г. во всех физико-географических регионах наблюдается рост температуры приземного воздуха [2]. В последние 30 лет увеличение температуры воздуха за каждое десятилетие составляет 0.49–0.53°C, вследствие чего возрастает температура поверхностных вод [3]. В Рыбинском водохранилище (Верхняя Волга) температура воды с 1976 по 2003 г. повысилась на 1.8°C [8].

Впечатляющей картиной того, к чему может привести дальнейшее повышение температуры

воды в волжских водохранилищах, — реакция фитопланктона эвтрофных Горьковского (озерная часть) и Чебоксарского водохранилищ на резкое повышение температуры воды (до 33°C) в аномально жаркое лето 2010 г., когда в июле концентрация в воде хлорофилла “а” и первичная продукция фитопланктона (ПФП) достигали рекордных значений, характерных для гипертрофных водоемов [5]. Более того, высокая температура в сочетании с высоким содержанием биогенных элементов вызвала массовое развитие токсичных видов цианобактерий, в результате чего в воде Чебоксарского водохранилища содержание цианотоксинов достигало 8 мкг/л, а концентрация токсичного микроцистиса превышала нормы ВОЗ [6].

Цель работы — оценить влияние повышения температуры воды в Рыбинском водохранилище на ПФП, выявить особенности сезонной динамики ПФП и установить связи ее межгодовых колебаний с климатическими погодными изменениями в начале XXI в.

¹ Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема АААА-А18-118012690098-5).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Рыбинское водохранилище имеет площадь зеркала при нормальном подпорном уровне (НПУ = 102 м) 4550 км², объем – 25.4 км³, среднюю глубину – 5.6 м, коэффициент водообмена – 1.9 год⁻¹. Оно замыкает бассейн Верхней Волги [13].

Исследования проводили в 2005–2014 гг. на шести стандартных глубоководных (глубина 6–14 м) станциях Рыбинского водохранилища, две из которых расположены в Волжском плесе (Коприно (58°04' с.ш., 38°18' в.д.) и Молога (58°13' с.ш., 38°27' в.д.)), принимающем воды р. Волги, а четыре – в Центральном плесе (Наволоки (58°22' с.ш., 38°23' в.д.), Средний Двор (58°31' с.ш., 38°19' в.д.), Измайлово (58°27' с.ш., 38°30' в.д.) и Брейтово (58°19' с.ш., 37°57' в.д.)), занимающем центральную часть водоема. В 2005–2013 гг. ПФП определяли с мая по октябрь, в 2014 г. определения ограничились июнем–сентябрем, поэтому для расчета средней за вегетационный период ПФП использовали данные, полученные в мае и октябре 2013 г.

ПФП определяли радиоуглеродным методом [11] в интегрированных пробах воды от поверхности до глубины тройной прозрачности по диску Секки. Расчет интенсивности фотосинтеза под единицей площади поверхности водоема (ΣP_{PH} , мг С/(м²сут)) проводили по формуле: $\Sigma P_{PH} = P_{PH} \cdot 0.7 \cdot L$, где P_{PH} – скорость фотосинтеза в фотическом слое (тройной прозрачности воды), мг С/(м³сут); 0.7 – коэффициент, характеризующий влияние ослабления света с глубиной на скорость фотосинтеза; L – глубина фотического слоя, м [10, 11]. Время инкубации проб составляло 4–6 ч.

Трансформированные для пользователей ряды значений индекса Северо-Атлантического колебания (САК) доступны на сайте [18].

При установлении корреляционных зависимостей между параметрами использовали ранговый коэффициент корреляции Спирмена для уровня значимости 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характер сезонной динамики ПФП в Рыбинском водохранилище различался в разные годы наблюдений. В 2007 г. сезонная динамика ПФП

характеризовалась следующими фазами, обычно наблюдаемыми в водохранилище: возрастание в течение мая, небольшой весенний пик, снижение в июне (фаза “чистой воды”), летний максимум во второй половине июля, последующее существенное уменьшение, увеличение ранней осенью и резкое снижение в конце сентября – октябре (рис. 1).

В 2011 г., по-видимому вследствие аномально жаркого лета предыдущего года, с середины мая по июль ПФП непрерывно росла и достигала максимального значения в конце июля. Последующее снижение ПФП было не так существенно, как в 2007 г. (рис. 1).

В 2013 г. сезонный ход ПФП восстановился, но летний максимум сместился на первую половину августа и раннеосенний пик ПФП был лишь в 1.3 раза ниже летнего (рис. 1). Весенний пик развития фитопланктона, как и в 2007 г., был значительно ниже летнего.

Между температурой воды и ПФП в единице объема воды (P_{PH}) и под единицей площади поверхности (ΣP_{PH}) выявлены положительные корреляционные зависимости: в 2007 г. $r = 0.61$;

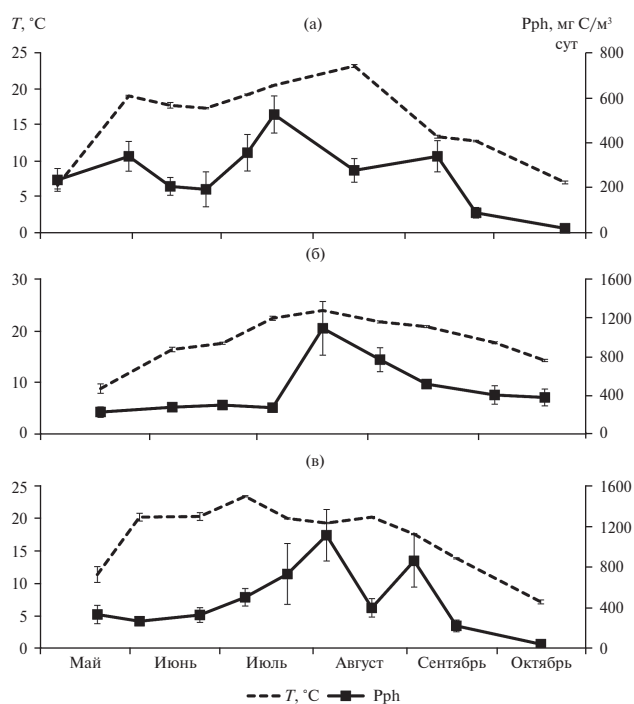


Рис. 1. Сезонные изменения температуры воды (T , °C), и первичной продукции фитопланктона (P_{PH} , мг С/(м³сут)), в Рыбинском водохранилище в 2007 г. (а), 2011 г. (б) и 2013 г. (в).

Таблица 1. Многолетние изменения первичной продукции фитопланктона в единице объема воды (P_{PH}) и под единицей площади поверхности (ΣP_{PH}) Рыбинского водохранилища в вегетационный период в 2005–2014 гг.

Годы	P_{PH} , мг С/(м ³ сут)		ΣP_{PH} , мг С/(м ² сут)	
	минимум–максимум	среднее \pm ошибка	минимум–максимум	среднее \pm ошибка
2005	13–955	225 \pm 38	59–2005	588 \pm 100
2006	1–832	192 \pm 28	4–2095	564 \pm 82
2007	2–736	256 \pm 46	5–2205	808 \pm 160
2008	2–559	122 \pm 10	11–1762	408 \pm 122
2009	1–763	207 \pm 51	4–1911	554 \pm 118
2010	9–1667	360 \pm 97	10–5249	859 \pm 242
2011	49–2056	495 \pm 95	93–3058	936 \pm 170
2012	14–1476	419 \pm 84	45–2789	883 \pm 84
2013	14–2208	485 \pm 61	24–3246	834 \pm 88
2014	14–1093	397 \pm 44	24–2834	803 \pm 102

0.65, в 2011 г. $r = 0.66$; 0.69; в 2013 г. $r = 0.48$; 0.55 соответственно ($p < 0.05$).

В вегетационный сезон в 2007 г. фитопланктон синтезировал 43 689, в 2013 г. – 79 972 мг С/м³. При этом доли ПФП в мае, июне, июле, августе, сентябре и октябре 2007 г. составили 20, 14, 31, 20, 14 и 1%, а в 2013 г. – 13, 11, 24, 30, 20 и 2% соответственно. Необходимо отметить, что, несмотря на различия сезонной динамики в эти два года наблюдений, более половины (51–54%) годовой (с мая по октябрь) ПФП приходилось на июль и август. В сезонной динамике ПФП произошли следующие изменения: в современный период весенний пик развития фитопланктона может отсутствовать или быть значительно меньше летнего, и по сравнению с прошлыми годами гораздо чаще регистрируются высокие значения ПФП в начале осени.

Средние за вегетационный сезон величины ПФП в 2005–2014 гг. существенно колебались (табл. 1). Минимальные и максимальные значения P_{PH} и ΣP_{PH} различались соответственно в 4.0 и 2.3 раза.

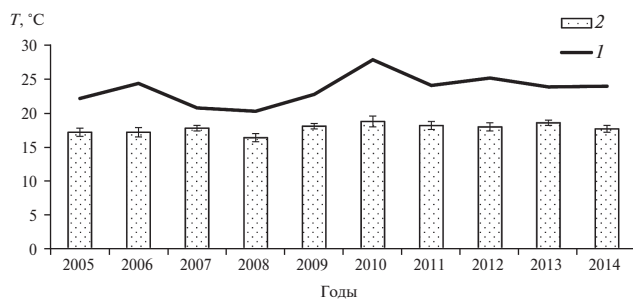


Рис. 2. Максимальная (I) и средняя за период со второй половины мая по первую половину сентября (2) температура воды (T , °C) на поверхности водохранилища в 2005–2014 гг.

Значительное влияние на характер многолетней динамики и уровень ПФП оказала высокая температура воды в аномально жаркое лето 2010 г., достигавшая в открытой части водохранилища 27.9°C (рис. 2). Высокая солнечная активность и температура воды в этот период способствовали более интенсивному фотосинтезу планктона. Летом 2010 г. ΣP_{PH} достигла максимального за весь период наблюдений значения (табл. 1). Это аномальное климатическое явление, по видимому, повлияло на развитие фитопланктона в последующие годы: в 2011 г. отмечено раннее (уже с июня) “цветение” воды цианобактериями. Существенный прирост биомассы фитопланктона, в том числе цианобактерий, в 2010 г. был одной из причин увеличения ПФП в 2011–2012 гг. (табл. 1). После 2010 г. наблюдалось снижение прозрачности воды, что, в частности, связано с развитием фитопланктона (рис. 3).

Сравнение значений ΣP_{PH} , полученных в периоды высокой температуры воды в 2009 (18.9–22.8°C, в среднем 20.5 \pm 0.3°C) и 2010 гг. (19.2–27.9°C, в среднем 24.5 \pm 0.7°C), показало,

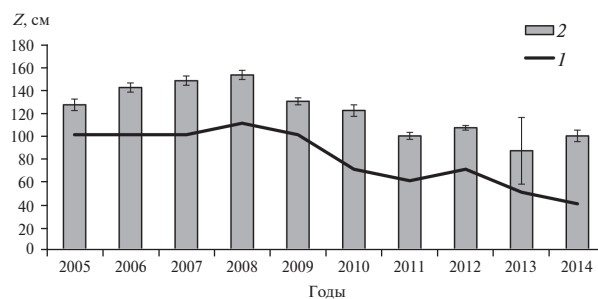


Рис. 3. Минимальная (I) и средняя за период со второй половины мая по первую половину сентября (2) прозрачность воды (Z , см) в водохранилище в 2005–2014 гг.

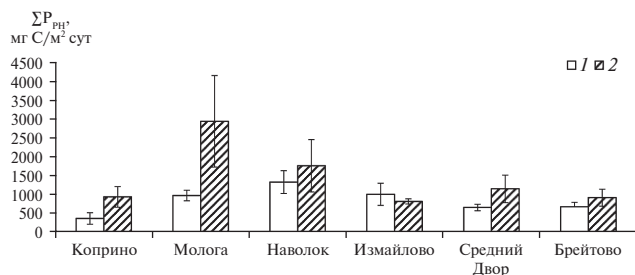


Рис. 4. Средние значения интегральной первичной продукции фитопланктона (ΣP_{PH} , мг С/(м² сут)), на стандартных станциях водохранилища для периодов высокой температуры воды в 2009 (1) и 2010 (2) гг.

что в разных частях водохранилища отклик фитопланктона на резкое повышение температуры воды (в среднем на 4.0°C) существенно различался (рис. 4). Если в Волжском плесе значения ΣP_{PH} в 2010 г. превышали таковые в 2009 г. в 2.5–3.0 раза, то в Центральном плесе превышение было заметно ниже (в 1.4–1.7 раз) или не наблюдалось вовсе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Определения ППФ в Рыбинском водохранилище непрерывно проводились с 1964 по 1995 г. с использованием как радиоуглеродного, так и кислородного методов [4, 9, 10]. В результате этих исследований установлено, в частности, что ПФП в Волжском плесе водохранилища выше, чем в Центральном, в сезонной динамике ПФП выделяются два хорошо выраженных пика – весенний, связанный с развитием диатомовых водорослей, и летний, обусловленный развитием цианобактерий. Кроме того, анализ рядов данных многолетних наблюдений за 1965–1995 гг. выявил тенденцию роста ПФП в водоеме при существенных колебаниях средних за вегетационный период значений ПФП. Согласно трофической классификации водоемов, основанной на интенсивности ПФП [1], Рыбинское водохранилище в конце XX в. классифицировалось как мезоэвтрофный водоем.

В современный период величины ПФП в Волжском плесе, как и раньше, превышают таковые в Центральном плесе, но в сезонной динамике ПФП произошло изменение – весенний пик развития фитопланктона либо отсутствует, либо значительно меньше летнего.

Межгодовые колебания биомассы и продукции фитопланктона зависят как от абиотических

факторов (солнечной активности, температуры воды, содержания биогенных элементов), так и от интенсивности выедания фитопланктона простейшими и многоклеточным зоопланктоном, а также его лизиса вирусами.

В Рыбинском водохранилище в рассматриваемый период средние за вегетационный сезон значения температуры поверхностного слоя воды колебались в пределах 16.4–18.8°C (2005–2014 гг.), суммарная интегральная солнечная радиация (RS), поступающая на поверхность водохранилища с мая по сентябрь (за пять месяцев), – в пределах 2288–2718 МДж/м² (2005–2010 гг.) (данные метеорологической станции г. Костромы), содержание в воде общего азота – в пределах 0.70–1.32 мг/л (2005–2013 гг.), содержание в воде общего фосфора – 40–76 мкг/л (2005–2013 гг.) [12]. Между ПФП и температурой воды обнаружена высокая положительная зависимость, а между ПФП и RS и концентрацией в воде биогенных элементов – умеренные положительные корреляции (табл. 2).

В 2005–2011 гг. средняя концентрация хлорофилла “а” в поверхностном 2-метровом слое воды колебалась от 7.78 ± 0.82 (2008 г.) до 24.25 ± 2.45 мкг/л (2011 г.) [7]. В этот период P_{PH} положительно коррелировала с содержанием хлорофилла “а” ($r = 0.94$).

Резкое повышение температуры воды по-разному влияло на ПФП в Волжском и Центральном плесах Рыбинского водохранилища, что, возможно, связано с разной представленностью в фитопланктоне этих плесов видов, имеющих разные температурные оптимумы развития: у теплолюбивых видов повышение температуры

Таблица 2. Коэффициенты корреляции ($P < 0.05$) между первичной продукцией планктона в единице объема воды (P_{PH}) и под единицей площади поверхности (ΣP_{PH}) и абиотическими параметрами (T – температура воды на поверхности, RS – суммарная солнечная радиация за май–сентябрь, $N_{общ}$ – концентрация в воде общего азота, $P_{общ}$ – концентрация в воде общего фосфора)

Параметры	P_{PH} , мг С/(м ³ сут)	ΣP_{PH} , мг С/(м ² сут)
T , °С	0.74	0.78
RS, МДж/м ²	0.54	0.52
$N_{общ}$, мг/л	0.41	0.58
$P_{общ}$, мкг/л	0.40	0.49

позитивно влияет на скорость роста, у холодолюбивых, напротив, может вызвать температурный шок. Известно, что для колониальных цианобактерий оптимальная температура для роста и фотосинтеза $\geq 25^{\circ}\text{C}$ [19, 20]. На примере водоемов разного трофического статуса с разным уровнем загрязнения показано, что повышение температуры воды в большей степени вызывает увеличение скорости роста цианобактерий и “цветение” воды в загрязненных водоемах, богатых биогенными элементами и органическими веществами, и в меньшей степени сказывается на росте цианобактерий в относительно чистых водоемах [17]. Это может быть объяснением того, что большее увеличение ПФП происходило в Волжском плесе Рыбинского водохранилища, содержащем больше биогенных элементов по сравнению с Главным и другими плесами [12]. В среднем для шести стандартных станций водохранилища P_{PH} и ΣP_{PH} в период наибольшего прогрева воды в 2010 г. превышали таковые в 2009 г. в 1.7 раза.

Однако влияние резкого повышения температуры воды на ПФП (и уровень “цветения” воды) в Рыбинском водохранилище было менее значительным, чем в более загрязненных эвтрофных Горьковском (озерная часть) и Чебоксарском водохранилищах. В июле 2010 г. в Горьковском (температура воды достигала 33.0°C) и Чебоксарском (29.0°C) водохранилищах средние P_{PH} и ΣP_{PH} были выше таковых в Рыбинском в 3 и 2 раза соответственно [5].

При анализе связей многолетней изменчивости климатических и погодных условий и динамики структурно-функциональных характеристик биологических сообществ, в том числе фитопланктона, водных экосистем северной части Европы, широко используется индекс САК [22, 23]. При положительных величинах САК преобладают сильные западные ветры, несущие теплый и влажный атлантический воздух в северную часть Европы. В результате зимы становятся мягче, а количество осадков увеличивается. Напротив, в периоды с отрицательными значениями САК наблюдаются похолодание и уменьшение количества осадков. Чередование фаз положительных и отрицательных значений САК определяет температуру воды, интенсивность конвективного перемешивания воды, ледовый режим водоемов и их термическую

структуру в летний период. Считается, что величины зимнего САК позволяют прогнозировать долговременные тренды биотических характеристик водных экосистем, поскольку влияют на погодные условия в северных регионах зимой и ранней весной, когда формируются стартовые условия развития короткоциклового популяций пресноводного планктона. Положительная корреляция биомассы планктона и бентоса с САК характерна для большого количества европейских озер [14, 22]. Потепление климата в северной Евразии хорошо согласуется с динамикой индекса САК.

Зависимость продукции, разнообразия, структуры сообщества и характера сезонной сукцессии фитопланктона от САК выявлена при исследовании многих морских и пресноводных экосистем; причем установлено, что эта зависимость в большей степени определяется типом водной экосистемы. Климат оказывает на фитопланктон прямое влияние, воздействуя на его физиологию, и опосредованное, изменяя стратификацию водной толщи, освещенность и доступность биогенных элементов, а также интенсифицируя его выедание консументами [24].

Определение первичной продукции планктона, содержания хлорофилла “а” и количества токсичных видов фитопланктона во фьорде на западном побережье Швеции (Gullmar Fjord) установило связь этих параметров с колебаниями фаз САК, а также с температурой и соленостью [16].

Многолетние исследования, проведенные в 17-ти озерах, расположенных в различных регионах Европы, установили зависимость развития фитопланктона от САК и экстремальных погодных явлений [23]. Оказалось, что высокие величины зимнего САК (теплая зима) связаны с более ранним весенним пиком фитопланктона, в котором доминируют диатомовые водоросли, с более ранним наступлением фазы “чистой воды” и более ранним летним пиком фитопланктона, в котором доминируют цианобактерии. Даже если колебания погодных условий не влияли на среднегодовую биомассу фитопланктона, структура его сообщества претерпевала существенные изменения. Преимущественное развитие получают виды, лучше адаптированные к условиям, связанным с изменениями климата, что, безусловно, имеет

важные последствия для структуры и функционирования водных экосистем.

Многолетние исследования (1990–2009 гг.) планктона маленького неглубокого темноводного озера в Финляндии зарегистрировали уменьшение в нем ПФП и, как следствие, уменьшение седиментации органических веществ. ПФП и дыхание планктона (деструкция) были сбалансированы, за исключением пяти последних лет, когда наблюдалось превышение деструкции органических веществ над его продукцией. Факторами, лимитирующими ПФП, были свет и иногда фосфор, азот и/или РОВ. Погодные и гидрологические условия играли главную роль в происходящих в озере изменениях [15].

В Рыбинском водохранилище скорость фотосинтеза фитопланктона в XX в. (1965–1995 гг.) была положительно связана с САК. Коэффициент корреляции между P_{PH} и средним за январь–апрель индексом САК ($r = 0.27$) был ниже, чем между P_{PH} и годовым индексом САК (в среднем за 12 мес.) ($r = 0.39$).

Анализ результатов 10-летних определений ПФП в Рыбинском водохранилище в XXI в. (2005–2014 гг.) не выявил ее связи с САК. Причиной, нарушившей положительную связь между этими параметрами, оказалось аномально жаркое лето 2010 г. С одной стороны, в 2010 г. годовой индекс САК достиг рекордно низкой величины (–13.8) (рис. 5), с другой стороны, в летний период благодаря африканскому антициклону, который в течение двух месяцев находился над ЕЧР, наблюдалась аномально жаркая и солнечная погода, хотя в соответствии с отрицательными величинами индекса САК должна была стоять холодная погода. Жара вызвала интенсивное развитие фитопланктона. Если не

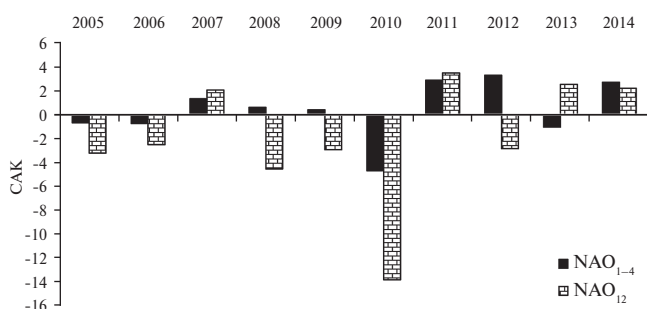


Рис. 5. Величины САК за январь–апрель (NAO₁₋₄) и за год (NAO₁₂) в 2005–2014 гг.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции ($P < 0.05$) между первичной продукцией планктона (P_{PH} и ΣP_{PH}) и САК в 2005–2014 гг. (без 2010 г.) (САК₁₋₄ – среднее за январь–апрель, САК₁₂ – среднее за год)

САК	P_{PH} , мг С/(м ³ сут)	ΣP_{PH} , мг С/(м ² сут)
САК ₁₋₄	0.46	0.58
САК ₁₂	0.75	0.79

Таблица 4. Первичная продукция планктона (P_{PH} , мг С/(м³ сут)) в Рыбинском водохранилище в 1965–1995 и 2005–2014 гг.

Годы	Минимум–максимум	Среднее ± ошибка
1964–1973	104–498	216 ± 38
1974–1981	74–264	125 ± 21
1982–1989	98–301	188 ± 29
1990–1995	161–327	260 ± 23
2005–2010	122–360	227 ± 32
2011–2014	397–495	444 ± 24

использовать в расчетах данные 2010 г., то между средневегетационными значениями P_{PH} и ΣP_{PH} и САК – положительная корреляция (табл. 3). Причем, более сильной была связь между ПФП и годовым САК.

За все годы исследования ПФП в Рыбинском водохранилище (1965–1995 и 2005–2014 гг.) P_{PH} колебалась от 74 мг (в 1980 г.) до 495–498 мг С/(м³сут) (в 1973 и 2011 гг.) (табл. 4). В ряду многолетних данных выделены периоды, заканчивающиеся годами, когда по сравнению с предыдущими годами, ПФП резко (в 1.7–3.9 раза) возрастала. За исключением 2010 г., величины САК в эти годы были положительными. За 49-летний период (1965–2014 гг.) при существующих колебаниях ПФП средняя за вегетационный сезон P_{PH} увеличилась в 2 раза. Анализ результатов многолетних исследований ПФП свидетельствует о том, что в начале XXI в. эвтрофирование Рыбинского водохранилища происходило более быстрыми темпами, чем в XX в. В настоящее время водохранилище по интенсивности ПФП соответствует эвтрофным водоемам [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Рыбинском водохранилище в начале XXI в., по сравнению со второй половиной XX в. в сезонной динамике ПФП произошли следующие изменения: ее весенний пик стал

значительно меньше летнего; кроме того, существенное увеличение ПФП регистрируется в начале осени. ПФП в большей степени коррелирует с температурой воды, чем с интенсивностью солнечной радиации и содержанием биогенных элементов. Аномально жаркое лето 2010 г., вызвавшее резкое повышение температуры воды в водохранилище, оказало большое влияние на скорость фотосинтеза и многолетнюю динамику ПФП, нарушив положительную связь между средними за вегетационный период значениями ПФП и САК. Полученные результаты свидетельствуют о более высоких темпах эвтрофирования Рыбинского водохранилища в современный период, чем во второй половине XX в.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульон В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. СПб.: Наука, 1994. 222.
2. Груза Г.В., Мещерская А.В., Алексеев Г.В. и др. Изменения климата России за период инструментальных наблюдений // Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. С. 31–87.
3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2011 г. М.: Росгидромет, 2012. URL: <http://www.meteorf.ru/file.pdf> (Апрель 2012 г.).
4. Копылов А.И., Косолапов Д.Б. Бактериопланктон Верхней и Средней Волги. М.: Изд-во СГУ, 2008. 377 с.
5. Копылов А.И., Лазарева В.И., Минеева Н.М. и др. Влияние аномально высокой температуры воды на развитие планктонного сообщества водохранилищ Средней Волги летом 2010 г. // ДАН. 2012. Т. 442. № 1. С. 133–135.
6. Корнева Л.Г., Соловьева В.В., Русских Я.В., Чернова Е.Н. Состояние фитопланктона и содержание цианотоксинов в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах в период аномально жаркого лета 2010 г. // “Бассейн Волги в XXI веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ”. Матер. докл. Всерос. конф. Ижевск: Издатель Пермьяков, 2012. С. 138–141.
7. Лазарева В.И., Копылов А.И., Пырина И.Л. и др. Отклик планктона Рыбинского водохранилища на динамику Северо-Атлантического Колебания (North Atlantic Oscillation, САК) // “Современные проблемы водохранилищ и их водосборов”. Тр. Межд. науч. практич. конф. Пермь, 2013. Т. 3. С. 145–150.
8. Литвинов А.С., Законнова А.В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 91–96.
9. Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2009. 279 с.
10. Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Л.: Наука, 1985. 295 с.
11. Романенко В.И., Кузнецов С.И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л.: Наука, 1974. 194 с.
12. Степанова И.Э., Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М. Закономерности динамики содержания биогенных элементов в водах Рыбинского водохранилища за годы его существования // Вода: химия и экология. 2013. № 1. С. 15–27.
13. Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль: ЯГТУ, 2001. 427 с.
14. Adrian R., O'Reilly C.M., Zagarese H. et al. Lakes as sentinels of climate change // Limnol. Oceanogr. 2009. V. 54. № 6. Pt 2. P. 2283–2297.
15. Arvola L., Salonen K., Keskitalo J. et al. Plankton metabolism and sedimentation in a small boreal lake – a long-term perspective // Boreal Env. Res. 2014. V. 19. (Suppl. A). P. 83–96.
16. Belgrano A., Lindahl O., Hernroth B. North Atlantic Oscillation primary productivity and toxic phytoplankton in the Gullmar Fjord, Sweden (1985–1996) // Proc. R. Soc. Lond. B. 1999. V. 266. P. 425–430.
17. Brookes J.D., Carey C.C. Resilience to blooms // Sci. 2011. V. 334. № 6052. P. 46–47.
18. National Weather Service, Climate Prediction Center, USA, URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/CAK.shtml>
19. Paerl H.W., Paul V.J. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria // Water. Res. 2012. V. 46. P. 1349–1363.
20. Reynolds C.S. The Ecology of Phytoplankton. Cambridge: Univ. Press, 2006. 536 p.
21. Sigee D.C. Freshwater microbiology: biodiversity and dynamics interactions of microorganisms in the freshwater environment. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005. 524 p.
22. Straile D., Adrian R. The North Atlantic Oscillation and plankton dynamics in two European lakes – two variations on a general theme // Global Change Biol. 2000. V. 6. P. 663–670.
23. Weyhenmeyer G.A., Adrian R., Gaedke U. et al. Response of phytoplankton in European lakes to a change in the North Atlantic Oscillation // Verh. Int. Verein. Limnol. 2002. V. 28. P. 1436–1439.
24. Winder M., Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate // Hydrobiologia. 2012. V. 698. P. 5–16.

**SEASONAL AND INTERANNUAL FLUCTUATIONS
OF PHYTOPLANKTON PRIMARY PRODUCTION
IN THE RYBINSK WATER RESERVOIR:
EFFECT OF THE WEATHER AND CLIMATIC CHANGES**

© 2019 A. I. Kopylov^{1,*}, T. S. Maslennikova¹, D. B. Kosolapov¹

¹*Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences
Russia 152742 Borok Yaroslavskaya oblast*

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

Received: 12.06.2016

Received version received: 15.03.2017

Accepted: 29.06.2017

Seasonal and multi-annual dynamics of phytoplankton primary production were examined in the Rybinsk water reservoir (Upper Volga) in 2005–2014. Positive links were detected between the average values of plankton primary production during the vegetation period and abiotic factors of the water environment (temperature, solar irradiation, and concentration of biogenic elements), as well as between the primary production and the index of the North Atlantic Oscillation, excluding the data for the abnormally hot summer in 2010. Water temperature increase (up to 27.9°C) in summer 2010 caused a significant increase in phytoplankton production. Significant increase of phytoplankton primary production was noted in the Rybinsk water reservoir during the analysis period.

Keywords: phytoplankton primary production, seasonal and multi-annual dynamics, Rybinsk water reservoir, index of the North Atlantic Oscillation.

DOI: 10.31857/S0321-0596463270-277