

**ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТРОФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**

© 2016 А.В. Рахуба, Л.Г. Тихонова

Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти

Статья поступила в редакцию 24.11.2016

Рассмотрены особенности пространственной и временной изменчивости первичной продукции и потоков фосфора на границе вода-донные отложения. Приводятся результаты наблюдений за продукцией и деструкцией органического вещества, содержанием минерального фосфора и хлорофилла «а». Оценивается баланс органического вещества и фосфора в Куйбышевском водохранилище.

Ключевые слова: эвтрофирование, первичная продукция, деструкция органического вещества, потоки фосфора, биомасса фитопланктона.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных и значимых факторов антропогенного эвтрофирования водохранилищ является накопление соединений биогенных элементов. Этот процесс приводит к ухудшению качества воды и опасности возникновения токсических эффектов вследствие массового развития синезеленых водорослей. Известно, что фитопланктон быстро реагирует на изменения экологических условий, его продукция определяет трофический уровень водоемов, а состав и обилие характеризуют санитарное состояние [6]. Установлено, что лимитирующим биогенным элементом, определяющим интенсивность развития фитопланктона на водохранилищах Волги в летний период, являются фосфаты. Более половины всего поступления минерального фосфора, приносимого в водохранилища, приходится на распределенные источники, остальное на коммунально-промышленные стоки и на регенерацию из донных отложений. До сих пор остается дискуссионным вопрос о роли донных отложений в эвтрофировании водохранилищ. Следует отметить, что ранее проведенная оценка количества поступающего фосфора из донных отложений [1, 3] не в полной мере отражает особенности пространственного распределения этого показателя в целом на всей акватории Куйбышевского водохранилища. В этой связи, в летний период 2015 года нами были организованы экспедиционные исследования на Куйбышевском водохранилище, которые были направлены на изучение развития фитопланктонного сообщества, оценку пространственного распределения первичной продукции и интенсивность выделения фосфатов из донных отложений.

Рахуба Александр Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: rahavut@mail.ru

Тихонова Людмила Геннадьевна, инженер-исследователь.

E-mail: ludmila_g_t@mail.ru

Наблюдения проводились с 20 августа по 9 сентября 2015 года на исследовательском судне «Биолог» по 21 вертикалям. Расположение вертикалей в Куйбышевском водохранилище представлено на рис. 1. В состав наблюдений входило измерение гидрохимических и гидробиологических характеристик. Отбор проб воды осуществлялся с поверхностного и донного горизонта батометром. Пробы донных отложений отбирались стратометром. Продукцию и деструкцию органического вещества определяли кислородной модификацией скляночного метода [2], вынос фосфора со дна – методом стеклянных трубок [4]. Экспозиция проб осуществлялась в течение 24 часов.

**ПРОДУКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ФИТОПЛАНКТОНА**

В Куйбышевском водохранилище с его сложной морфометрией можно выделить участки, воды которых различаются по: биомассе (хлорофилл «а») и продукции фотосинтеза фитопланктона (А), деструкции органического вещества (R), потока минерального фосфора со дна (P). Наибольшие значения первичной продукции и биомассы фитопланктона (хлорофилл «а») отмечались в верхней и нижней частях водохранилища (Волжский и Приплотинный плесы), тогда как в средней части эти показатели были ниже (табл. 1 и рис. 2). На наш взгляд это связано с тем, что в Волжском плесе сосредоточены основные крупные притоки, поставляющие фитопланктон в водохранилище, а в центральной части, за счет смешения волжских вод с менее насыщенными фитопланктоном Камскими водами, биомасса фитопланктона снижается. В нижней части водохранилища большая масса фитопланктона поступает из обширного Черемшанского залива и выносится в приплотинный плес, где создаются благоприятные гидродинамические условия для его развития.

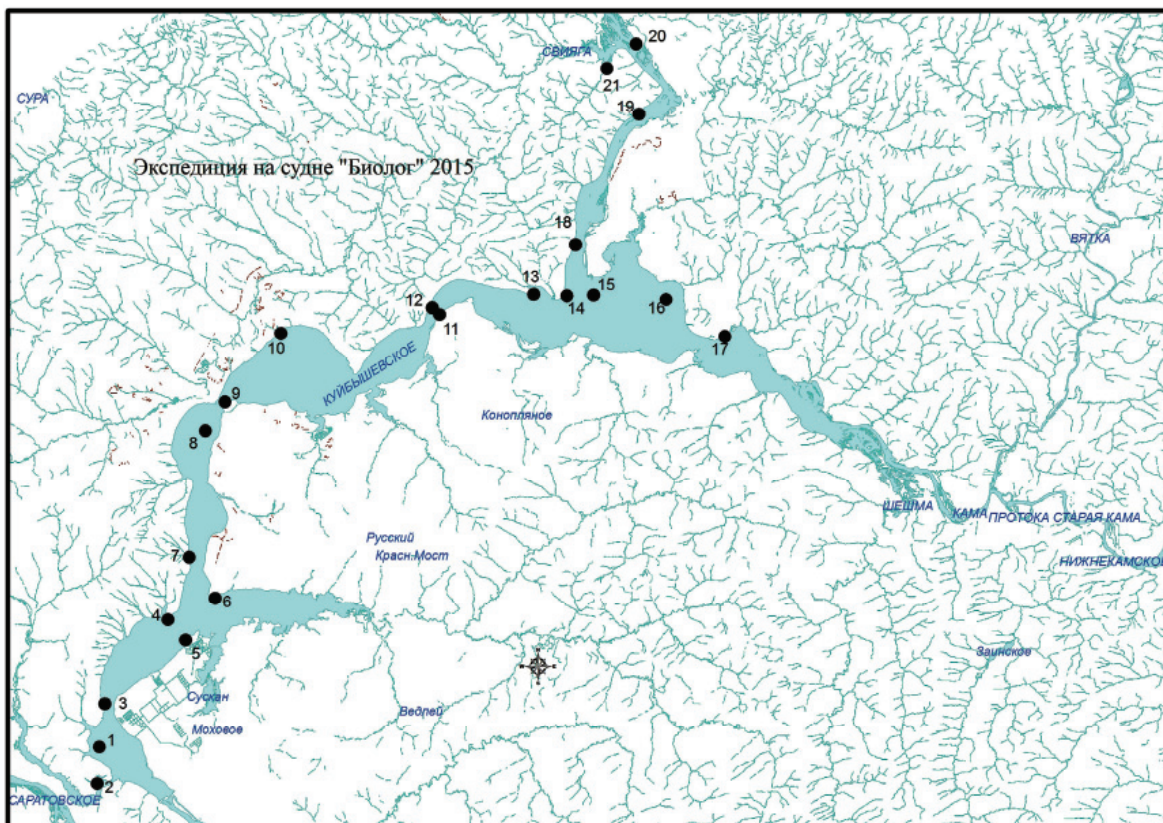


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдения на Куйбышевском водохранилище 2015 г.

Таблица 1. Гидрохимические и гидробиологические характеристики Куйбышевского водохранилища в период экспедиционных исследований 2015 год

Номер вертикали	Поверхность		ΣA , гO ₂ /м ² ·сут	ΣR , гO ₂ /м ² ·сут	$\Sigma A/\Sigma R$	Хлорофилл "а", мкг/л		Поток фосфатов со дна, мг/м ² · сут	Фосфаты, мг/л	
	A, мг/л	R, мг/л				пов-ть	дно		пов-ть	дно
т.1	1,28	0,09	2,56	1,80	1,42	2,76	1,81	-5,21	0,066	0,063
т.2	1,77	1,56	3,89	14,04	0,28	6,94	0,58	-5,58	0,061	0,065
т.3	1,34	0,34	3,48	10,20	0,34	3,88	2,08	0,78	0,065	0,074
т.4	0,98	0,58	2,25	11,60	0,19	7,70	1,24	-7,35	0,067	0,063
т.5	0,89	0,73	2,49	7,30	0,34	7,17	2,06	-7,40	0,060	0,061
т.6	0,64	-	1,73	-	-	3,53	1,80	-5,26	0,050	0,058
т.7	0,94	-	1,97	-	-	7,94	1,58	-3,75	0,050	0,053
т.8	0,43	0,09	0,82	1,80	0,45	1,54	0,77	-3,46	0,053	0,057
т.9	1,89	0,41	3,31	2,87	1,15	12,65	8,55	-2,38	0,040	0,041
т.10	0,28	1,19	0,36	26,18	0,01	0,00	1,22	0,27	0,055	0,058
т.11	0,27	0,09	0,53	0,63	0,84	2,21	2,04	-1,30	0,052	0,050
т.12	0,28	0,25	0,39	3,75	0,10	1,39	1,82	-3,71	0,058	0,057
т.13	0,88	0,55	1,32	12,10	0,11	3,44	2,74	-1,98	0,066	0,070
т.14	2,16	0,52	4,10	13,00	0,32	6,20	2,28	-	0,079	0,084
т.15	1,71	0,74	3,42	14,06	0,24	5,52	0,83	-1,72	0,040	0,042
т.16	0,67	0,71	0,74	7,10	0,10	3,90	1,29	-	0,034	0,035
т.17	2,01	0,46	2,41	3,68	0,66	4,18	1,10	13,12	0,034	0,042
т.18	1,89	0,67	3,69	10,05	0,37	7,54	1,93	11,46	0,083	0,083
т.19	0,85	0,52	1,62	3,64	0,45	9,74	2,92	4,69	0,085	0,088
т.20	3,20	1,13	6,40	20,34	0,31	10,40	6,37	1,61	0,093	0,094
т.21	2,66	0,98	2,39	3,14	0,76	28,46	28,46	9,05	0,069	0,069
сред	1,31	0,55	2,30	7,97	0,42	6,53	3,50	-0,43	0,060	0,060

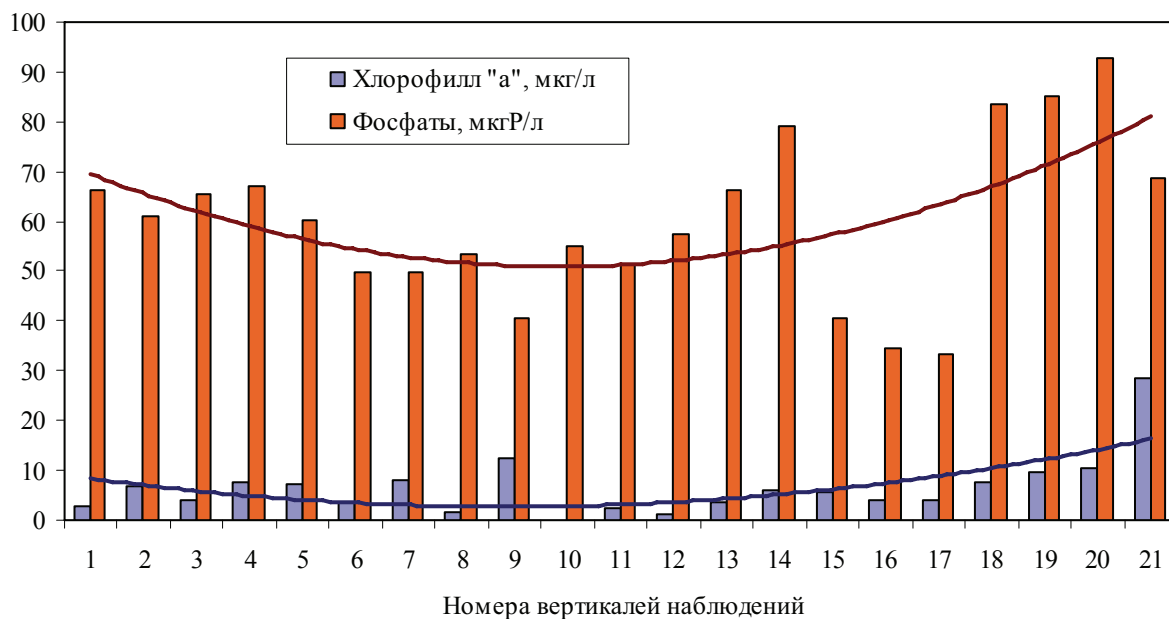


Рис. 2. Пространственное распределение хлорофилла «а» и фосфатов в поверхностном слое воды Куйбышевского водохранилища 20.08 – 09.09.2015г.

Следует отметить, что по данным экспедиционной съемки 2015 года, пространственное распределение концентрации фосфатов в Куйбышевском водохранилище имеет положительную корреляцию с хлорофиллом «а» (рис. 2), тогда как сезонные изменения всегда носят явно выраженный противофазный характер. На рис. 3 показаны ежемесячные наблюдения минерального фосфора и хлорофилла «а» в приплотинном плесе водохранилища, проведенные в том же 2015 году. На рисунке видно, что всплеск биомассы фитопланктона вызывает снижение минерального фосфора и далее его недостаток в воде начинает сдерживать рост водорослей.

Расчеты осредненных значений интеграль-

ной первичной продукции и деструкции под 1 м² (ΣA и ΣR) дают неоднородную картину распределения величин в глубоководной и мелководной частях Куйбышевского водохранилища. На мелководьях величины первичной продукции изменялись 0,53 – 3,31 гО₂/м²·сут, в тоже время в глубоководных районах они достигали 0,36 – 6,40 гО₂/м²·сут. Деструкция в этих районах была соответственно 0,63 – 3,68 гО₂/м²·сут и 1,80 – 20,34 гО₂/м²·сут (табл. 1). В результате первичная продукция в глубоководной зоне выше, чем на мелководьях примерно в 1,9 раза, деструкция – в 5 раз. Такая разница в первичной продукции глубоководной и мелководной зон существенно зависит от глубины фотосинтезирующего слоя

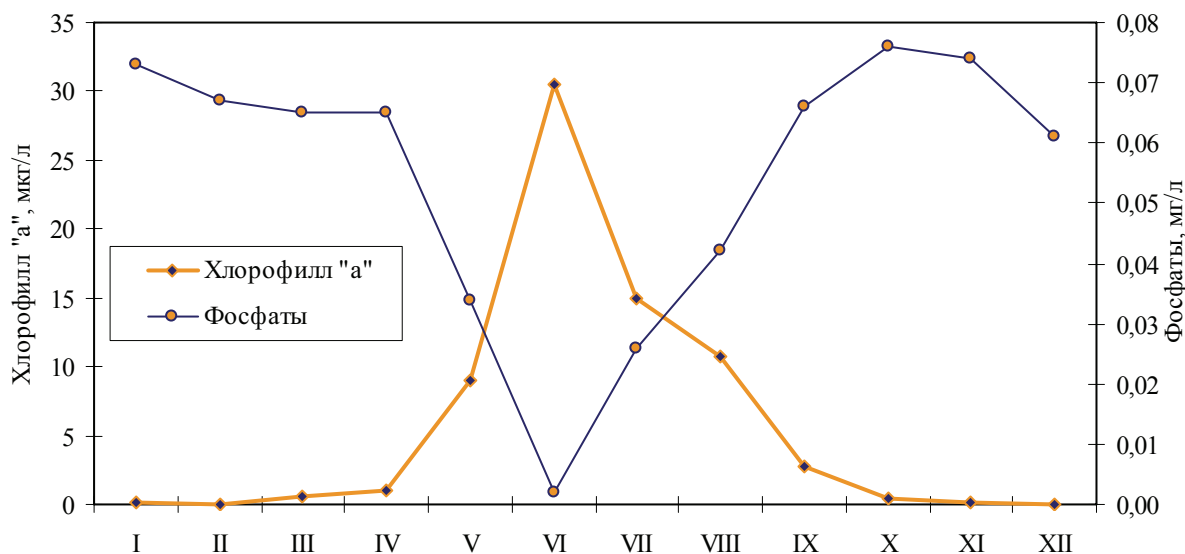


Рис. 3. Сезонное распределение хлорофилла «а» и фосфатов в поверхностном слое воды в районе приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища 2015 г.

воды, который обычно больше в глубоководных районах водохранилища. Деструкция так же, как и первичная продукция зависит от глубины станции и от верховья к плотине водохранилища увеличивается. При этом, если сравнивать слой воды глубоководной зоны, равный слою мелководья, то деструкция на мелководье окажется выше и будет в немалой степени зависеть от наличия и вида прибрежной растительности.

Наблюдения показывают, что первичная продукция в поверхностном слое воды водохранилища имеет положительную связь ($r=0,7$) с концентрацией хлорофилла «а». Однако, в период интенсивного «цветения» воды, при высокой концентрации синезеленых водорослей (100-190 мкг/л по Хл «а»), за счет эффекта самозатенения могут наблюдаться низкие значения первичной продукции. На рис. 4 котангенс угла наклона линии связи представляет собой среднее ассимиляционное число (САЧ), которое для Куйбышевского водохранилища равно $226 \text{ мгО}_2/\text{мгХл«а»}\cdot\text{сут}$.

Для оценки современного состояния экосистемы Куйбышевского водохранилища важно

показать многолетнюю динамику первичной продукции фитопланктона (табл. 2 и рис. 5). Многолетние данные предыдущих лет были взяты из монографии [5]. В результате, с 1957 года по 2015 год наблюдается снижение продукционного потенциала водохранилища. За весь период существования Куйбышевского водохранилища (58 лет) уровень первичной продукции снизился почти в 2,4 раза.

Еще одним важным показателем состояния экосистемы водохранилища является соотношение $\Sigma A/\Sigma R$, характеризующее кислородный баланс и баланс органического вещества (ОВ) в водной толще. Эта величина по отдельным участкам водохранилища колеблется от 0,01 до 1,42. В глубоководных районах водохранилища баланс ОВ ниже, чем на мелководьях и равен 0,3. В мелководных районах водохранилища баланс ОВ приближается к единице и в среднем равен 0,8, что указывает на автотрофный характер внутриводоемных процессов. В среднем по Куйбышевскому водохранилищу в период наблюдений соотношение $\Sigma A/\Sigma R$ составило 0,42.

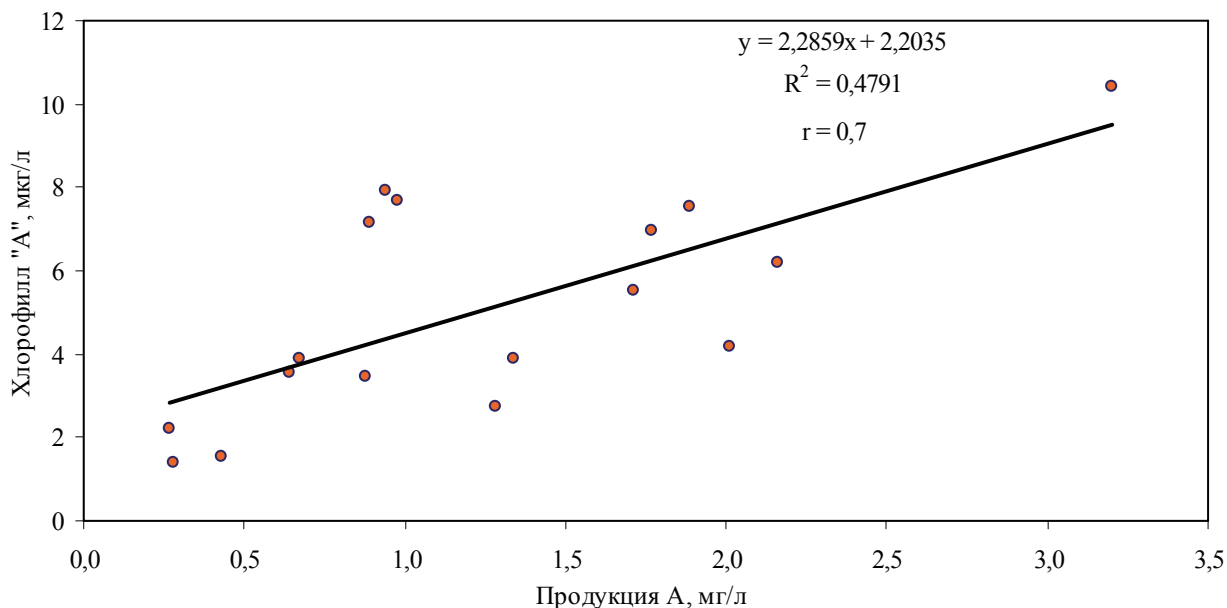


Рис. 4. Соотношение между хлорофиллом «А» и первичной продукцией фитопланктона (А) в поверхностном слое Куйбышевского водохранилища

Таблица 2. Многолетние изменения первичной продукции в Куйбышевском водохранилище

Годы	ΣA , гО ₂ /м ² ·сут	Источник сведений
1957-1959	0,10-15,1	Сорокин, 1961; Салманов, Сорокин, 1962; Пырина, 1966
1965-1970	0,10-12,0	Романенко, 1967; Иватин, 1968, 1970; Кудрявцев, 1974
1971-1974	0,10-3,71	Иватин, 1974; Ковалевская, Карабанович, 1975; Лаврентьева, 1977
1989-1991	0,51-9,93	Минеева, 2007
2015	0,36-6,40	Рахуба, Тихонова, 2016

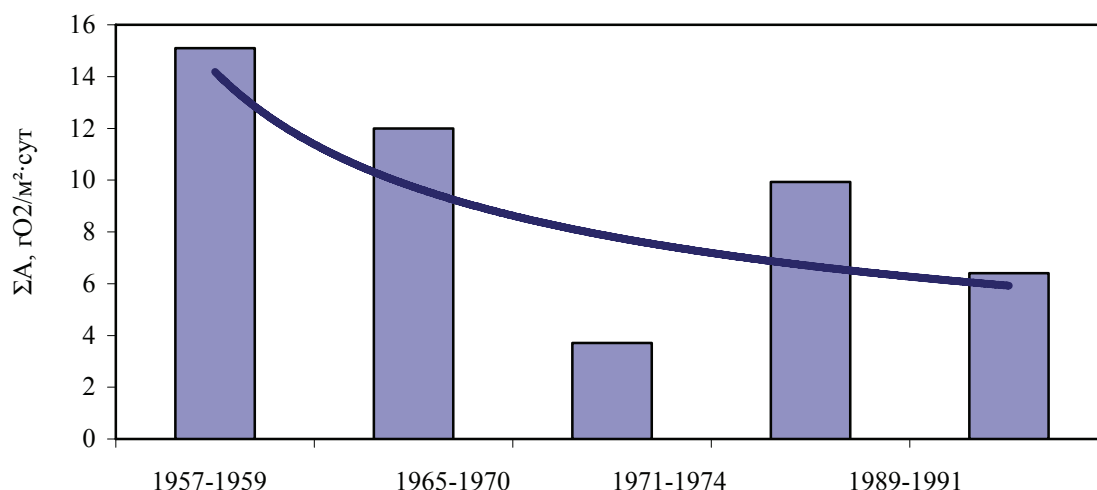


Рис. 5. Многолетние изменения первичной продукции планктона в Куйбышевском водохранилище

Это показывает, что в Куйбышевском водохранилище интенсивность деструкционных процессов выше, чем продукционных ($\Sigma A/\Sigma R < 1$) и пока еще свидетельствует о хорошей самоочищающей способности волжских вод.

Важное экологическое значение имеет оценка трофического статуса водных экосистем, где уровень биологической продуктивности лежит в основе трофической типизации водоемов. По нашим оценкам, в ряду выбранных показателей трофности, Куйбышевское водохранилище можно отнести к мезотрофному типу. В таблице 3 представлены значения трофических характеристик для всех водохранилищ волжского каскада [5] и данных полученных отдельно по Куйбышевскому водохранилищу в 2015 году.

ОЦЕНКА ПОСТУПЛЕНИЯ ФОСФАТОВ В КУЙБЫШЕВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Процесс эвтрофирования водохранилища в известной мере связан с поступлением мине-

рального фосфора из донных отложений. Результаты измерений таких потоков показывают, что в верхней части (Волжская ветка) Куйбышевского водохранилища наблюдается десорбция фосфатов в водную толщу в пределах 1,61 – 13,12 мгPO₄/м²·сут, а в средней и приплотинной части водохранилища происходит сорбция из водной толщи в пределах 1,30 – 7,40 мгPO₄/м²·сут. На рис. 6 положительные значения потоков фосфора в донных отложениях соответствуют процессам десорбции, а отрицательные – процессам сорбции. В результате, на Куйбышевском водохранилище отмечается пространственная неоднородность поступления минерального фосфора из донных отложений.

По нашим оценкам, для Куйбышевского водохранилища при обычной, сложившейся внешней фосфатной нагрузке 4,1 г/м²·год (поступление из Чебоксарского, Нижнекамского водохранилищ и притоков, атмосферные осадки, абразия берегов, поступление со сбросом сточных вод), вклад потока фосфатов выделяемых донными

Таблица 3. Средние для мезотрофных и эвтрофных вод величины продукционно-деструкционных показателей водохранилищ Волги

Характеристика	Все водохранилища Волги (с 1976 по 2007 гг.) Минеева Н.М. ИБВВ РАН [5]				Куйбышевское водохранилище 2015 г. ИЭВВ РАН	
	Мезотрофные воды		Эвтрофные воды		величина	Cv%
	величина	Cv%	величина	Cv%		
Прозрачность, м	1,31	25,3	1,15	26,1	1,88	26,4
Хлорофилл "а", мкг/л	5,4	43,1	21	77,2	6,55	88,2
Продукция (A), мгO ₂ /л·сут	1,25	40	2,81	54,2	1,31	61,8
Деструкция (R), мгO ₂ /л·сут	0,39	128,2	0,93	71,3	0,55	73,5
САЧ, мгO ₂ /мгХл·сут	223	34,4	140	40,5	226	42,8
R/Хл, мгO ₂ /мг·сут	55,7	58,6	40,8	57	103	52,9

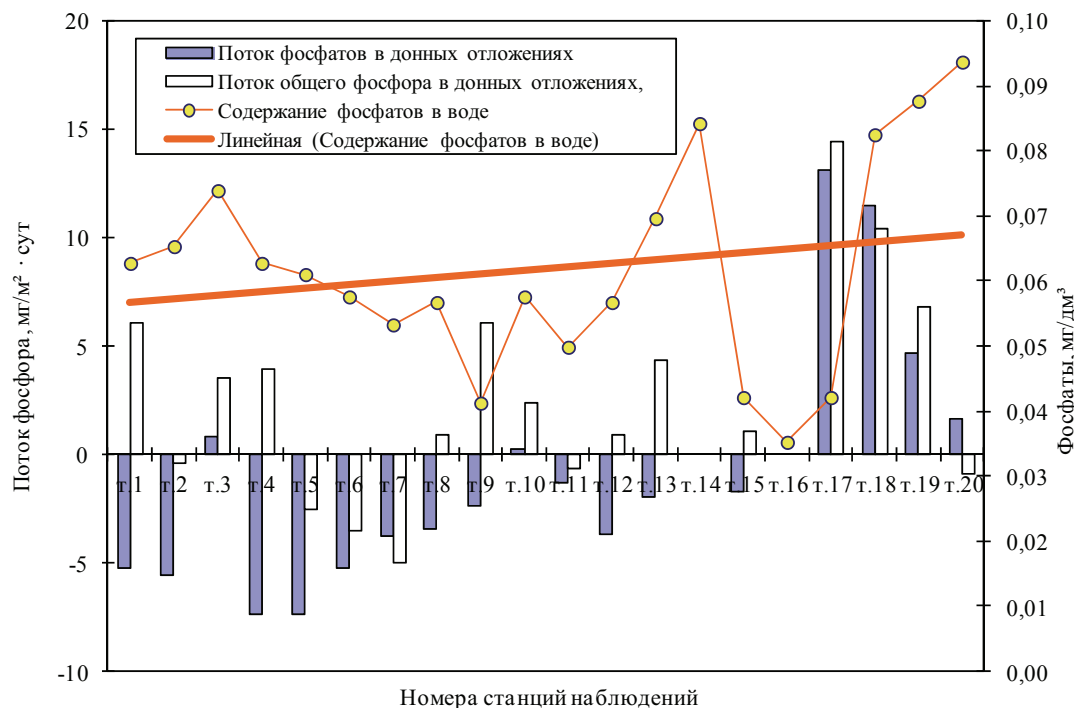


Рис. 6. Пространственное распределение фосфатов в водной толще и поток фосфора на границе вода-днные отложения

Таблица 4. Среднегодовой баланс потоков фосфора в Куйбышевском водохранилище

ПРИХОД					РАСХОД							
Составляющие	Рмин		Робщ		Составляющие	Рмин		Робщ				
	мгР/м² сут	%	мгР/м² сут	%		мгР/м² сут	%	мгР/м² сут	%			
Входные створы	7,22	54,9	10,79	54,6	Сброс через замыкающий гидроузел	6,12	55,0	9,13	55			
Боковые притоки	0,55	4,2	0,85	4,3	Аккумуляция	Выедание фитопланктоном	2,29	20,6	7,48	45		
Распределенные источники	Атмосферные осадки		0,13	1,0							0,21	1,1
	Склоновый сток и абразия берегов		3,27	24,8							4,88	24,7
	Регенерация и поступление из донных отложений		1,91	14,5							2,89	14,6
	Сточные воды сбрасываемые непосредственно в водохранилище		0,08	0,6							0,13	0,7
ВСЕГО	13,16	100	19,75	100	ВСЕГО	11,13	100	16,61	100			
Невязка баланса Рмин	2,03	мгР/м² сут	(16,5%)		Невязка баланса Робщ	3,14	мгР/м² сут	(18,1%)				

отложениями составляет 17% (0,69 г/м²-год). Величина поглощенных фосфатов донными отложениями, рассчитанная относительно внешней нагрузки составляет 24% (0,98 г/м²-год), поглощенных фитопланктоном – 21% (0,86 г/м²-год), а остальная часть – 55% (2,26 г/м²-год) в балансе фосфатов в водохранилище приходится на сброс через Жигулевский гидроузел. В таблице 4 представлен среднегодовой баланс потоков фосфора в Куйбышевском водохранилище, полученный с использованием результатов пространственной съемки в 2015 году.

Поступление фосфатов из донных отложений в основном осуществляется в Волжском и Волго-Камском плесах водохранилища с площади 2150 км² в количестве 4522 т/год, а сорбция фосфатов донными илами происходит в озеровидных расширениях (песах) с площади 4300 км² в количестве 6435 т/год. В результате, на всей акватории Куйбышевского водохранилища, количество поглощенного минерального фосфора превышает его выделение в водную толщу на 1913 т/год, а суммарная аккумуляция в водохранилище с учетом потребления его фитопланктоном составляет 11800 т/год.

ВЫВОДЫ

В условиях сложного гидрологического режима Куйбышевского водохранилища формируются зоны с различной биологической продуктивностью. Интегральные по глубине значения первичной продукции и деструкции органического вещества в глубоководной зоне выше, чем на мелководье, что указывает на активное развитие фитопланктона в озеровидных плесах водохранилища. Наибольшие значения трофических характеристик наблюдаются в верхнем и нижнем районах водохранилища, тогда как центральная часть водохранилища характеризуется более

низким фотосинтезом. С момента создания Куйбышевского водохранилища, за многолетний период (1957-2015 гг.) наблюдается тенденция снижения первичной продукции фитопланктона. Отрицательная направленность баланса органического вещества ($\Sigma A/\Sigma R < 1$) свидетельствует о хорошей самоочищающей способности вод Куйбышевского водохранилища.

В распределении потоков минерального фосфора на границе вода-дно так же наблюдается неоднородность. В верхней части водохранилища отмечается поступление, тогда как в средней и приплотинной части водохранилища прослеживается поглощение фосфатов илами из водной толщи, причем количество поглощаемого минерального фосфора в целом для всего водохранилища в 1,4 раза выше, чем его выделение в водоем. В этой связи, можно обоснованно утверждать, что влияние вторичного загрязнения вод фосфатами на процессы эвтрофирования водохранилища носит сугубо локальный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламова О.Е. Роль донных отложений в эвтрофировании Куйбышевского водохранилища // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. Т. 3. № 2. С. 351-357.
2. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 328 с.
3. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) / Г.С. Розенберг, Л.А. Выхристюк. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.
4. Мартынова М.В., Козлова Е.И. Фосфор в отложениях двух высокотрофных озер // Водные ресурсы. 1987. №2. С. 103-112.
5. Минеева Н.М. Первичная продукция планктона в Водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2009. 279 с..
6. Приймаченко А.Д. Фитопланктон и первичная продукция Днепра и днепровских водохранилищ. Киев: Наук. думка, 1981. 278 с.

ASSESSMENT OF SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF TROPHIC CHARACTERISTICS KUIBYSHEV RESERVOIR

© 2016 A.V. Rakhuba, L.G. Tihonova

Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, Toliatti

The features of the spatial and temporal variability of primary production and flows phosphorus at the boundary water-bottom sediments are also under consideration. The results of observations of the production and destruction of organic matter, content of mineral phosphorus and chlorophyll "a". The estimation of balance of organic matter and phosphorus in the Kuibyshev reservoir was performed.

Keywords: eutrophication, primary production, destruction of organic matter, flows phosphorus, phytoplankton biomass.

Alexsandr Rakhuba, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow. E-mail: rahavum@mail.ru
Ludmila Tihonova, Research Engineer.
E-mail: ludmila_g_t@mail.ru