

ФИТОПЛАНКТОН, ФИТОБЕНТОС,
ФИТОПЕРИФИТОН

УДК 574.583(285.2):581:551.468.3

УСТОЙЧИВОСТЬ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ К РОСТУ ТРОФИИ
КАК РЕЗУЛЬТАТ ПРОЦЕССОВ В ИХ ЭКОТОННЫХ УЧАСТКАХ
(ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ФИТОПЛАНКТОНА)

© 2023 г. Е. Г. Сахарова^а, *, Л. Г. Корнева^а

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

*e-mail: katya.sah@mail.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023 г.

После доработки 24.05.2023 г.

Принята к публикации 07.06.2023 г.

Степень органического загрязнения экотонных участков (устья р. Ильдь и литорали Волжского плеса Рыбинского водохранилища) определена с помощью показателя сапробности, оцененного по биомассе фитопланктона. Индекс сапробности на защищенном мелководье и в пелагиали был 1.83 и 2.14 в 2009 г., 2.07 и 2.13 – в 2010 г. соответственно. В системе река – водохранилище минимальные средние значения индекса сапробности были отмечены в устьевой области р. Ильдь – 1.94 в 2009 г., 1.87 в 2010 г., 1.88 в 2011 г. В реке и водохранилище его величины были выше и достигали 2.05 и 2.07 в 2009 г., 1.96 и 2.08 в 2010 г., 1.97 и 1.99 в 2011 г. соответственно. Снижение сапробности на мелководьях и в устье реки по сравнению с граничащими водными участками свидетельствует о более высокой интенсивности процессов самоочищения, что может обеспечить за счет экотонных зон устойчивость экосистемы водоема в целом. Аномальные погодные явления, в частности высокие значения летней температуры воды, приводят к дестабилизации особенностей экотонных альгоценозов и, как следствие, к нарушению процесса самоочищения водного объекта.

Ключевые слова: фитопланктон, сапробность, Рыбинское водохранилище, экотонные зоны, устьевые участки, мелководья

DOI: 10.31857/S0320965223060281, **EDN:** LURYXN

ВВЕДЕНИЕ

Экотонные (переходные) участки – мелководья и устья рек – относятся к зонам максимального видового разнообразия. Этому способствует высокая изменчивость факторов среды и активное биогенное обогащение подобных переходных зон. Они являются источниками видового богатства водоема в целом (Болотов и др., 2012; Прокин и др., 2013; Гидроэкология..., 2015). Экотонные участки выступают в качестве буфера, ослабляя поток биогенных веществ (азота и фосфора) и седиментов в водоем, и играют существенную роль в формировании общей продуктивности вод (Гидроэкология..., 2015). Мелководные участки водохранилищ могут депонировать ~10–20% тяжелых металлов и 40–70% биогенных элементов от их общего накопления в водоеме (Шашуловская, 2009). Будучи первичным продуцентом, фитопланктон одним из первых способен реагировать на изменение гидрологических и гидрохимических условий. Оценка сапробности (как степени загрязнения легкоусвояемым органическим веществом) экотонов и граничащих с ними зон по показателям фитопланктона

может информативно отображать качество поверхностных вод и необходима для понимания роли этих участков в функционировании водоема в целом.

Рыбинское водохранилище (59° с.ш., 38° в.д.) – третье по расположению и второе по величине в каскаде волжских водохранилищ. Оно представляет собой полимиктический мелководный мезотрофно-эвтрофный водоем со средней глубиной при НПУ ~5.6 м, с площадью акватории 4550 км², объемом водной массы 25 км³ (Экологические..., 2001). Мелководные участки Рыбинского водохранилища при НПУ составляют 30–44% его площади в речных плесах. Прибрежье служит зоной, в которой формируются богатые и специфические сообщества фитопланктона (Соловьева, Корнева, 2012; Сахарова, Корнева, 2018). Речной сток в водохранилище высокий – 94% поступления всей воды. На малые и средние реки (61 водоток) приходится до 1/3 общего притока (Рыбинское..., 1972). Река Ильдь – малая река, впадающая в Волжский плес Рыбинского водохранилища. Ее длина 46 км, площадь водосбора 240 км², средний расход

Таблица 1. Число видов-индикаторов сапробности и их доля (%) в общем количестве индикаторов сапробности на мелководье, в устьевой области р. Ильдь и в граничащих с ними реке и пелагиали Рыбинского водохранилища

Группа	Река	УО		П	М	
		ФЗ	ПЗ		З	О
Олигосапробы	4, 4	9, 8	14, 10	9, 8	15, 9	8, 7
Олиго-β-мезосапробы	26, 24	27, 2	33, 24	23, 22	36, 22	18, 16
β-мезосапробы	60, 56	61, 51	70, 50	59, 56	88, 54	64, 58
β-α-мезосапробы	10, 9	14, 12	14, 10	8, 8	18, 11	14, 13
α-мезосапробы	6, 5	6, 5	6, 4	5, 5	5, 3	4, 4
α-мезо-полисапробы	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1	1, 0.5	1, 1
Полисапробы	1, 1	1, 1	1, 1	1, 1	1, 0.5	1, 1
Всего	108, 59	119, 58	139, 58	106, 62	164, 52	110, 55

Примечание. УО – устьевая область реки; ФЗ – фронтальная зона; ПЗ – переходная зона приемника на мелководье; П – пелагиаль; М – мелководье; З – защищенное, О – открытое мелководье.

1.59 м³/с, общая протяженность устьевой области реки в среднем достигает 8.8 км (Гидроэкология..., 2015). На основании значений электропроводности воды, которая наиболее полно отражает происхождение водных масс, в устьевой области р. Ильдь выделены три зоны, которые достоверно различаются по этому показателю между собой и с граничащими с ними участками (Крылов и др., 2010; Гидроэкология..., 2015): переходная зона притока, фронтальная зона и переходная зона приемника.

Цель работы – оценить роль мелководий и устьевого участка реки в процессах самоочищения водоема на основе сравнения сапробности, рассчитанной по биомассе фитопланктона, переходных пространств и граничащих с ними зон крупного равнинного Рыбинского водохранилища.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки сапробности экотонных водохранилища анализировали таксономический состав и биомассу фитопланктона. Материал собирали с мая по сентябрь 1 раз в месяц. Пробы водорослей отбирали на мелководных участках Волжского плеса Рыбинского водохранилища в 2009–2010 гг.: на защищенной литорали, заросшей высшей водной растительностью, и на открытой литорали. В устьевой области р. Ильдь пробы отбирали в переходной зоне притока в 2011 г., во фронтальной и переходной зоне приемника в 2009–2011 гг. Материалом для сравнения послужили пробы, собранные в 2009–2011 гг. на глубоководной станции Волжского плеса Рыбинского водохранилища (в пелагиали) и на участке свободного течения р. Ильдь.

Отбор, концентрирование и обработку проб фитопланктона осуществляли по стандартной методике (Методика..., 1975). Соотнесение видов

к зонам сапробности проводили согласно спискам индикаторных организмов Р. Вегла (Wegl., 1983). Сапробность вод оценивали с помощью индекса Пантле–Букк (Pantle, Buck, 1955) в модификации Сладечека (Sládeček, 1973), рассчитанного по биомассе фитопланктона. Корреляционный анализ проводили с помощью параметрического коэффициента Пирсона для уровня значимости (*p*) 0.05. Для выявления различий в сезонной динамике сапробности использовали однофакторный дисперсионный анализ (*p* < 0.05, one-way ANOVA). Статистическую обработку полученных результатов выполняли в программе Past 3.20.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сапробность изученных экотонных зон Рыбинского водохранилища изменялась в пределах от верхней границы олиго-β-мезосапробной до нижней границы β-α-мезосапробной зоны и в среднем соответствовала величинам, характерным для β-мезосапробных вод (Wegl, 1983). Фитопланктон переходных участков отличался более высоким таксономическим богатством (413 таксона в литоральной зоне и 262 – в устьевой области притока) по сравнению с таковым граничащих участков (в пелагиали водохранилища и реке 171 и 178 таксонов соответственно). Основная часть видов фитопланктона на рассматриваемых участках относилась к β-мезосапробам (табл. 1). Второе место занимали олиго-β-мезосапробные организмы. Число олигосапробов (показателей чистых вод), а также доля α-мезосапробов, α-мезо-полисапробов и полисапробов (индикаторов высокого органического загрязнения) было от 1 до 10%. В устье реки и пелагиали водохранилища относительное число видов – показателей чистых вод (олигоса-

пробов) возрастало в 2–2.5 раза по сравнению с зоной свободного течения реки (табл. 1).

Средневегетационная биомасса и численность фитопланктона в устьевой зоне реки и на мелководных участках достигала больших величин относительно таковых, расположенных в реке и открытой части водохранилища (Сахарова, Корнева, 2018; 2019). Все это позволило рассматривать данные экотонные участки как области наибольшей потенциальной продуктивности. Однако и защищенное мелководье, и устьевая зона реки характеризовались пониженными значениями сапробности по сравнению с граничащими участками. В 2009 г. минимальные средние величины индекса сапробности (1.83) наблюдались на защищенном мелководье, максимальные (2.14) – в пелагиали водохранилища. Сезонный ход индекса сапробности защищенного побережья был достоверно ниже таковых открытой литорали и глубоководного участка водохранилища ($F = 6.91$, $p < 0.03$ и $F = 8.34$, $p < 0.02$ соответственно) (рис. 1а). Все летние месяцы на участках, заросших высшей водной растительностью, сапробность соответствовала олиго- β -мезосапробной зоне, в пелагиали – β -мезосапробной. В период экстремально высоких летних температур 2010 г. показатели органического загрязнения мелководий были выше, чем в 2009 г., однако также характеризовали водоем как β -мезосапробный. Минимальные величины индекса (2.07) зарегистрированы на защищенном побережье. В открытой литорали и пелагиали его значения достигали 2.14 и 2.13 соответственно. С мая по июль сапробность зарастающего мелководья была ниже, чем пелагиали ($F = 8.65$, $p < 0.042$) (рис. 1б). Открытое мелководье занимало промежуточное положение по этому показателю.

В 2009–2011 гг. в системе река–водохранилище минимальные средние значения индекса сапробности были отмечены в устьевой области р. Ильдъ: 1.94 и 1.87 – в переходной зоне приемника в 2009 г. и 2010 г. соответственно, 1.88 – в переходной зоне притока и на фронтальном участке в 2011 г. В реке и водохранилище его величины были выше: 2.05 и 2.07 в 2009 г., 1.96 и 2.08 в 2010 г., 1.97 и 1.99 в 2011 г. соответственно. В летние месяцы 2009 г. значение сапробности устьевых участков реки было на уровне верхней границы олиго- β -мезосапробной зоны, в реке и пелагиали – β -мезосапробной (рис. 2а). В 2010 г. на рассматриваемых станциях прослеживалась тенденция снижения показателя органического загрязнения от весны к осени (рис. 2б). Сезонный ход индекса сапробности реки и фронтального участка, а также пелагиали водохранилища и переходной зоны приемника устьевой области достоверно положительно коррелировали друг с другом ($r = 0.84$, $p < 0.05$ и $r = 0.96$, $p < 0.05$ соответственно). Минимальные значения сапробности в летне-осенний период

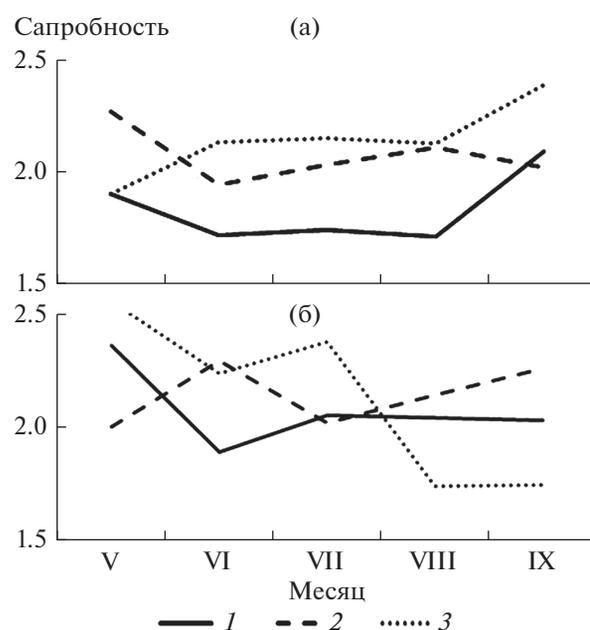


Рис. 1. Сезонная динамика сапробности разнотипных мелководий и пелагиали Волжского плеса Рыбинского водохранилища в 2009 (а) и 2010 (б) гг. 1 – защищенное мелководье, 2 – открытое мелководье, 3 – пелагиаль.

были характерны для переходной зоны приемника устьевой области реки. В 2011 г. сезонный ход индикатора органического загрязнения реки и прилегающей к ней переходной зоны притока ($r = 0.93$, $p < 0.05$), а также реки и фронтального участка ($r = 0.91$, $p < 0.05$) почти повторяли друг друга (рис. 2в).

Находясь на границе пересечения двух зон: реки и водохранилища, суши и водохранилища, в экотонных участках формировались своеобразные планктонные альгоценозы, характеризующиеся более высоким разнообразием, биомассой и числом доминирующих видов (Сахарова, Корнева, 2018; 2019). Когда в зоне свободного течения реки и пелагиали водохранилища наблюдали доминирование цианопрокариот или диатомовых водорослей, на мелководье и в устьевой области складывалось особое полидоминантное сообщество водорослей. Однако следует отметить, что в период более высоких летних температур и снижения уровня воды в 2010–2011 гг. происходило снижение ценотического своеобразия фитопланктона устьевых областей и увеличение его сходства с граничащими зонами (Сахарова, Корнева, 2019). В результате этого сезонная динамика сапробности рассматриваемого экотонного участка в этот период имела высокую степень сходства с таковой граничащих зон.

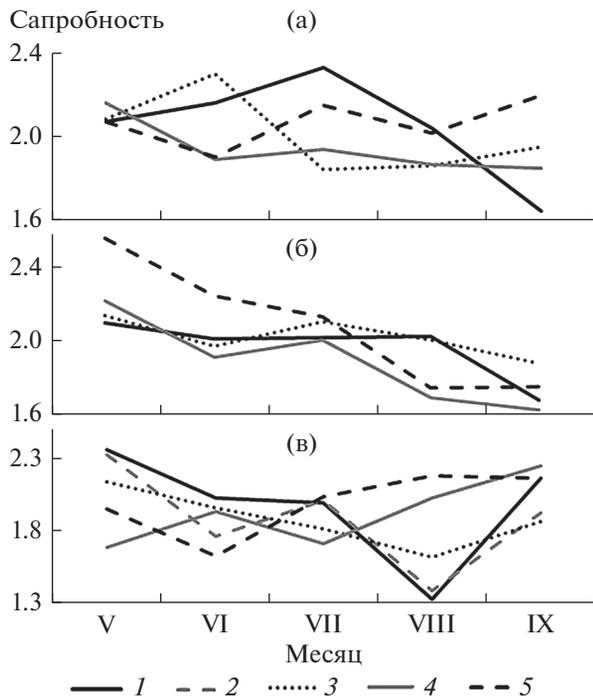


Рис. 2. Сезонная динамика сапробности устьевых участков р. Ильдь и граничащих зон пелагиали и свободного течения реки в 2009 г. (а), 2010 г. (б) и 2011 г. (в). 1 – зона свободного течения реки, 2 – переходная зона притока, 3 – фронтальная зона, 4 – переходная зона приемника, 5 – водохранилище.

На мелководных участках ведущая роль в депонировании большей части органического вещества принадлежит высшей водной растительности. Она имеет преимущества перед водорослями планктона в усвоении биогенных элементов, таким образом, препятствуя “цветению” воды (Scheffer et al., 1993). На защищенных мелководьях, заросших на 60%, не обнаружено “цветения” воды цианопрокариотами. Однако в пелагиали водохранилища отме-

Таблица 2. Средние показатели растворенного кислорода (O_2), биохимического потребления кислорода БПК₅, биомассы бактериопланктона (B) и сапробности (F) зон устьевой области р. Ильдь и граничащих участков

Участок	O_2 , мг/дм ³	БПК ₅ , мг O_2 /дм ³	B , мг/м ³	F
Река	7.73	1.4	540.8	2.00
ПЗ притока	7.2	1.2	—	1.88
ФЗ	6.87	3.2	762.7	1.97
ПЗ приемника	6.83	2.2	670.4	1.92
Рыбинское вдхр.	8.53	1.7	385.2	2.05

Примечание. ПЗ – переходная, ФЗ – фронтальная зона. Значения O_2 , БПК₅ и B даны по: (Гидроэкология..., 2015), “—” – данные отсутствуют.

чен ярко выраженный летний максимум биомассы фитопланктона за счет развития цианопрокариот (β -мезосапробов), что также может служить объяснением увеличения сапробности в глубоководной зоне водохранилища. Повышенные значения сапробности в пелагиали относительно мелководья и устья реки могут свидетельствовать о других источниках поступления органического вещества: с вышерасположенного руслового участка (Соловьева, Корнева, 2012) и из донных отложений (Степанова, 2016).

Сапробность как показатель деструкции, накопления мертвого органического вещества и как показатель органического загрязнения вод, снижалась в экотонных участках водохранилища (табл. 2). В этих зонах, отличавшихся более высокой биомассой и разнообразием планктонных водорослей, наблюдали снижение концентрации кислорода и увеличение биомассы бактериопланктона и биохимическое потребление кислорода (БПК₅) (табл. 2). Последнее свидетельствует о более активном потреблении кислорода за счет работы бактерий и соответственно более интенсивном процессе самоочищения.

Выводы. Экотонные участки водохранилищ служат буфером, обеспечивая устойчивость водоемов к росту трофии и органического загрязнения их вод. Аномальные погодные условия (высокие значения летней температуры воды) могут приводить к нарушению устойчивости экотонных альгоценозов и, как следствие, к нарушению процесса самоочищения водоема. Учитывая важную роль мелководий и устьев рек, необходимо дальнейшее изучение особенностей структуры и функционирования экосистем этих участков водохранилищ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке государственного задания № 121051100099-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болотов С.Э., Крылов А.В., Цветков А.И. и др. 2012. Водные массы и зоопланктон зоны подпора притока Рыбинского водохранилища // Поволжский экол. журн. № 2. С. 134.
- Гидроэкология устьевых областей притоков равнинного водохранилища. 2015. Ярославль: Филигрань.
- Крылов А.В., Цветков А.И., Малин М.И. и др. 2010. Сообщества гидробионтов и физико-химические параметры устьевой области притока равнинного водохранилища // Биология внутр. вод. № 1. С. 65.
- Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. 1975. М.: Наука.
- Прокин А.А., Цветков А.И. 2013. Макрозообентос узлов слияния рек // Поволжский экол. журн. № 2. С. 200.
- Рыбинское водохранилище и его жизнь. 1972. Л.: Наука.

- Сахарова Е.Г., Корнева Л.Г. 2018. Фитопланктон литорали и пелагиали Рыбинского водохранилища в годы с разными температурным и уровнем режимами // Биология внутр. вод. № 1. С. 11. <https://doi.org/10.7868/S0320965218010023>
- Сахарова Е.Г., Корнева Л.Г. 2019. Влияние температуры и уровня воды на фитопланктон устьевой зоны притока Рыбинского водохранилища // Биология внутр. вод. № 2. С. 26.
- Соловьева В.В., Корнева Л.Г. 2012. Характеристика сапробности мелководий и пелагиали Волжского плеса Рыбинского водохранилища по фитопланктону // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Серия: Естественные науки. Т. 21. № 21 (140). С. 34.
- Степанова И.Э. 2016. История изучения биогенных элементов в Рыбинском водохранилище // Тр. Ин-та биологии внутр. вод РАН. № 75(78). С. 53.
- Шацуловская Е.А. 2009. О накоплении тяжелых металлов в высшей водной растительности Волгоградского водохранилища // Поволжский экол. журн. № 4. С. 355.
- Экологические проблемы Верхней Волги. 2001. Ярославль: Изд-во Ярослав. гос. техн. ун-та.
- Pantle F., Buck H. 1955. Die Biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse // Gas- und Wasserfach. Bd 96. H. 18.
- Scheffer M., Houser S.H., Meijer M.L. et al. 1993. Alternative equilibria in shallow lakes // Trends in Ecology and Evolution. V. 8. P. 275.
- Sládeček V. 1973. System of water quality from the biological point of view // Arch. Hydrobiol., Beih. Ergebn. Limnol. H. 7. P. 1.
- Wegl R. 1983. Index für die Limnosaprobität // Wasser und Abwasser. Bd 26. P. 1.

The Resistance of Waters to Trophy Increases as a Result of Processes in Their Ecotone Areas (according to Phytoplankton Indicators)

E. G. Sakharova¹, * and L. G. Korneva¹

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

*e-mail: katya.sah@mail.ru

According to the saprobity index, estimated by the phytoplankton biomass, the degree of organic pollution of ecotone areas (the mouth of the Il'd River and the littoral of the Volga reach of the Rybinsk reservoir) was determined. The saprobity index in protected shallow waters was 1.83 in 2009 and 2.07 in 2010; in the pelagial — 2.14 and 2.13 in 2009 and 2010 respectively. In the “river-reservoir” system, the lowest average values of the saprobity index were noted in the mouth area of the Il'd River: in 2009 — 1.94, in 2010 — 1.87, in 2011 — 1.88. In the river and the reservoir, its values were higher: 2.05 and 2.07 in 2009, 1.96 and 2.08 in 2010, and 1.97 and 1.99 in 2011 respectively. The decrease in saprobity in shallow waters and at the mouth of the river, compared to the bordering water, indicates a higher intensity of self-purification processes, which can ensure the sustainability of the ecosystem of the reservoir as a whole. Abnormal weather phenomena, in particular, high summer water temperatures, can lead to destabilization of the features of ecotone algal communities, as a result, to a violation of the process of self-purification of the reservoir.

Keywords: phytoplankton, saprobity, Rybinsk reservoir, ecotone zones, river mouth, shallow waters