
**КАЧЕСТВО И ОХРАНА ВОД,
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

УДК 574.524

**МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ФОСФОРА В НАРОЧАНСКИХ ОЗЕРАХ
И ФАКТОРЫ, ЕЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ**

© 2013 г. Т. В. Жукова

*Нарочанская биологическая станция им. Г. Г. Винберга
Белорусского государственного университета*

*222395 Республика Беларусь, пос. Нарочь Мядельского района Минской обл., ул. Набережная, 8
E-mail: zhukova@tut.by*

Поступила в редакцию 17.03.2011 г.

Нарочанские озера (Баторино, Мястро, Нарочь) в Беларуси являются объектом многолетних гидро-экологических исследований. Современная эволюция экосистемы этих озер включает в себя четыре этапа: антропогенное эвтрофирование в 1970-х гг., деэвтрофирование в результате природоохран-ных мер на водосборной территории в 1980-х гг., бентификация вследствие инвазии моллюска-фильтратора *Dreissena polymorpha* Pallas. в 1990-х г. и современное состояние. Представлен ретро-спективный анализ многолетней динамики общего фосфора (1978–2010 гг.) в воде Нарочанских озер на разных стадиях перестройки их экосистем. Показан неоднозначный отклик составляющих единую экосистему водоемов на внешние воздействия, причины которого обсуждаются.

Ключевые слова: озера Нарочь, Мястро и Баторино, режим фосфора, современная эволюция озер-ной экосистемы, антропогенное эвтрофирование, деэвтрофирование, бентификация

DOI: 10.7868/S0321059613050088

Нарочанские озера (Баторино, Мястро и Нарочь) представляют собой единую экосистему. Это три связанных между собой водоема, имеющих общую водосборную территорию, но заметно различающихся по морфометрическим и гидрологическим параметрам (табл. 1). Общая площадь их водосборной территории составляет 279 км², около 35% ее приходится на акватории водоемов. В структуре водосбора преобладают леса и сельхозугодья (соответственно 40 и 30% площади), на долю лугов и болот приходится около 10% площади.

Население поселков (из них два – городского и 37 – сельского типа) составляет около 15 тыс. человек. На побережье оз. Нарочь имеется 13 рекреационных учреждений с количеством отдыхающих порядка 100 тыс. чел. в год.

Наблюдения за режимом фосфора (P) в воде озер включают в себя определение общего фосфора (P_{общ}) и минерального (P_{мин}) по стандартным гидрохимическим методикам [10]. На станциях постоянных наблюдений в глубоководной зоне проводится отбор интегральной пробы, от-

Таблица 1. Основные характеристики Нарочанских озер

Показатель	Баторино	Мястро	Нарочь
Площадь водного зеркала, км ²	6.3	13.1	79.6
Объем водной массы, млн м ³	18.7	70.0	710.4
Глубина средняя, м	3.0	5.4	8.9
Глубина максимальная, м	5.5	11.3	24.8
Время водообмена, год	1.0	2.5	10–11
Площадь общего водосбора, км ²	92.5	133.1	279.0
Площадь частного водосбора без акватории, км ²	86.2	34.6	58.8
Удельный водосбор	14.7	10.2	3.5
Тип перемешивания	Полимиктический		

ражающей средний состав озерной воды. В настоящей работе представлены материалы по многолетней динамике содержания $P_{\text{общ}}$ за 1978–2010 гг. Методы определения внешней нагрузки по P , седиментации взвешенных веществ, аэробной деградации планктона, упоминаемых при обсуждении результатов исследования, а также лабораторные эксперименты по оценке скоростей фильтрации, дыхания и экскреции биогенных веществ дрейссеной подробно описаны в [2, 3, 4]. Расчет показателей режима по P для озерной экосистемы основан на средних многолетних значениях и эмпирических зависимостях с учетом морфометрии водоемов [5].

В последние 40 лет экосистема Нарочанских озер претерпела существенные изменения, включающие глобальный процесс антропогенного эвтрофирования в 1970-х гг., деэвтрофирование в результате природоохранных мер на водосборной территории в рамках Государственной программы экологического оздоровления оз. Нарочь в 1980-х гг. и бентификацию вследствие инвазии моллюска-фильтратора *Dreissena polymorpha Pallas* в 1990-х гг. Это оказало существенное воздействие на трофический статус озер.

Известно, что одним из факторов, определяющих трофический статус водоема, является режим P , наблюдения за которым проводятся с 1978 г. В настоящей работе предпринята попытка ретроспективного анализа многолетней динамики $P_{\text{общ}}$ в воде Нарочанских озер на фоне значимых внешних воздействий.

Многолетняя динамика концентрации $P_{\text{общ}}$ в воде озер, данные о которой положены в основу анализа, показана на рис. 1. Как следует из представленных результатов, исследованные озера четко различаются по содержанию $P_{\text{общ}}$ в воде. Пределы концентрации $P_{\text{общ}}$, включающие экстремальные значения во время весеннего паводка и сезонные и межгодовые колебания, в озерах составляли: Нарочь – 0.010–0.080, Мястро – 0.020–0.130, Баторино – 0.030–0.190 мг P /л.

Трофический статус озер может быть количественно охарактеризован индексом Карлсона [11], который рассчитывается на основании данных о прозрачности воды, содержании $P_{\text{общ}}$ и хлорофилла “а”. Динамика трофического статуса Нарочанских озер (использовано среднее значение по трем показателям) представлена на рис. 2. В 1970-е гг. оз. Баторино характеризовалось как высокоэвтрофный, оз. Мястро – как слабоэвтрофный, оз. Нарочь – как мезотрофный водоем. С конца 1980-х гг. трофический статус всех трех водоемов заметно снизился.

Анализ многолетней динамики содержания $P_{\text{общ}}$ в воде, нормированной по начальному году изучения, показал, что общее для трех озер – снижение в воде концентраций этого элемента, однако имеются и различия (рис. 3).

В начальный период исследований (до середины 1980-х гг.) колебания концентраций $P_{\text{общ}}$ в воде всех трех озер были незакономерны, с экстремальными отклонениями от условного реперного значения. Последующие изменения (до начала 1990-х гг.) позволяют говорить о синхронных изменениях в верхних озерах – Баторино и Мястро и значительно иной ситуации в оз. Нарочь, где произошло резкое снижение концентраций $P_{\text{общ}}$ в воде с ее сохранением (с незначительными колебаниями) до настоящего времени. Следующим этапом можно считать десятилетний период, когда при сходных тенденциях колебания концентрации $P_{\text{общ}}$ в воде озер Нарочь и Баторино и общем его снижении примерно на 60% по сравнению с начальным годом наблюдений ситуация в оз. Мястро была существенно иная – с менее выраженным снижением концентрации (примерно на 40%). Еще более выраженные отличия оз. Мястро от двух других озер наблюдаются в последние 5–6 лет, когда только в этом озере происходит увеличение концентрации $P_{\text{общ}}$ в воде.

Таким образом, есть основания выделить в многолетней динамике содержания $P_{\text{общ}}$ в воде Нарочанских озер по меньшей мере четыре этапа: 1978–1985 гг. (антропогенное эвтрофирование), 1986–1991 гг. (деэвтрофирование), 1992–2004 гг. (бентификация вследствие инвазии дрейссены) и 2005–2010 гг. (современное состояние) (рис. 4).

В период глобального антропогенного эвтрофирования (1978–1985 гг.) концентрация $P_{\text{общ}}$ в воде озер была определяющим фактором их трофического статуса и составляла: в высокоэвтрофном оз. Баторино 0.091 ± 0.012 , в эвтрофном оз. Мястро 0.058 ± 0.011 , в мезотрофном оз. Нарочь 0.033 ± 0.007 мг P /л. Усиливающиеся симптомы эвтрофирования оз. Нарочь, являющегося центром курортно-рекреационной зоны республики, привели к необходимости разработки Государственной программы комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов бассейна оз. Нарочь (1981 г.). В рамках программы было проведено масштабное переуплотнение сельского хозяйства (замена пахотных земель лугами, снижение норм внесения минеральных удобрений, вынос за пределы водосбора или благоустройство животноводческих ферм), залесение прибрежных полос, строительство обводного коллектора для сбора и последую-

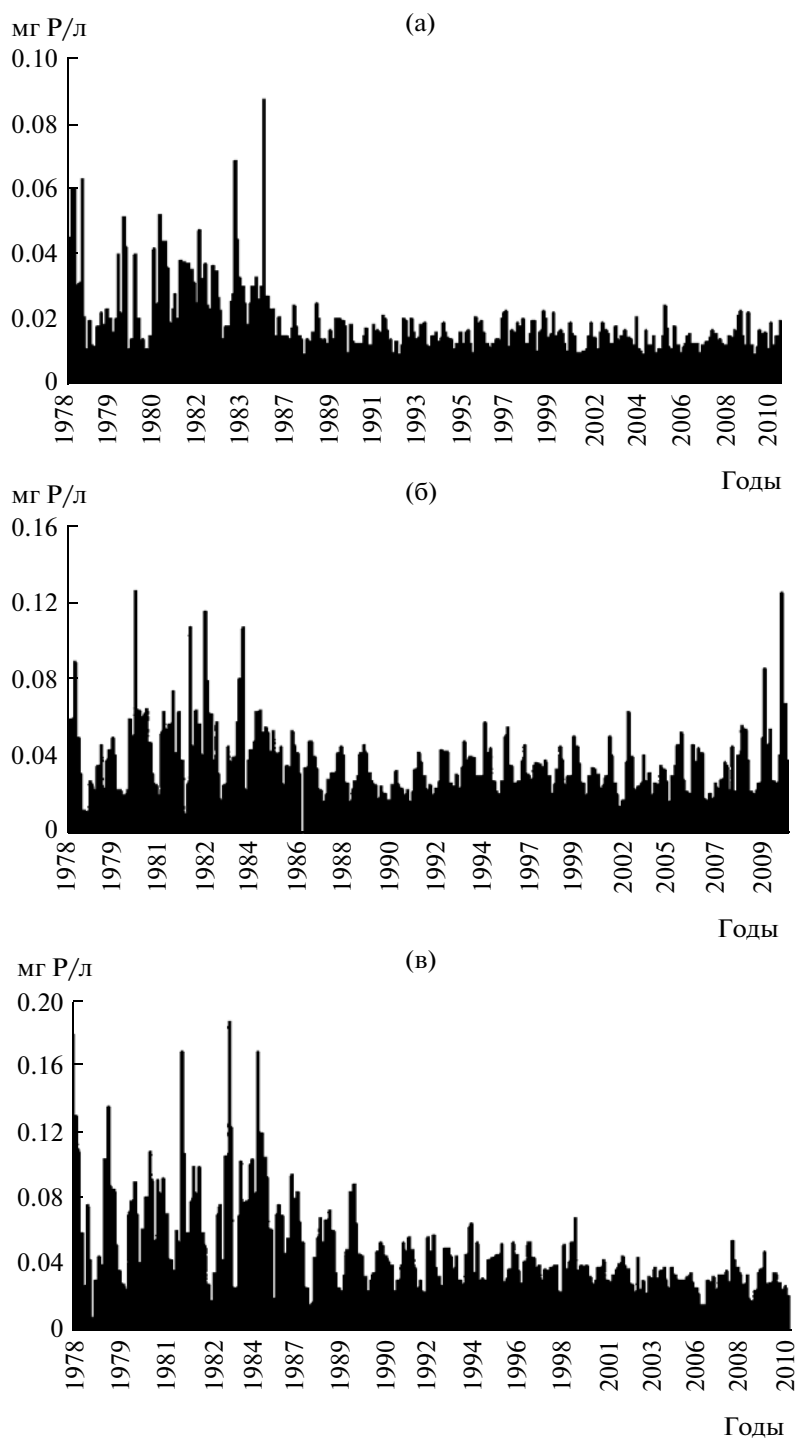


Рис. 1. Динамика концентрации $P_{\text{общ}}$ в воде Нарочанских озер в 1978–2010 гг.: а – Нарочь, б – Мястро, в – Баторино.

щей очистки сточных вод и др. Этот комплекс природоохранных мер позволил существенно снизить внешнюю биогенную нагрузку и явился ключевым моментом деэвтрофирования озерной экосистемы. По оценкам автора настоящей статьи, внешняя нагрузка по Р была уменьшена при-

мерно на 1/3 (с 9.2–28.9 до 4.8–10.3 т Р/год), при этом основные изменения произошли на частном водосборе оз. Баторино [4, 8]. Динамика внешней нагрузки по Р представлена на рис. 5. Концентрация $P_{\text{общ}}$ в период деэвтрофирования (1986–1991 гг.) заметно снизилась во всех трех озерах, соста-

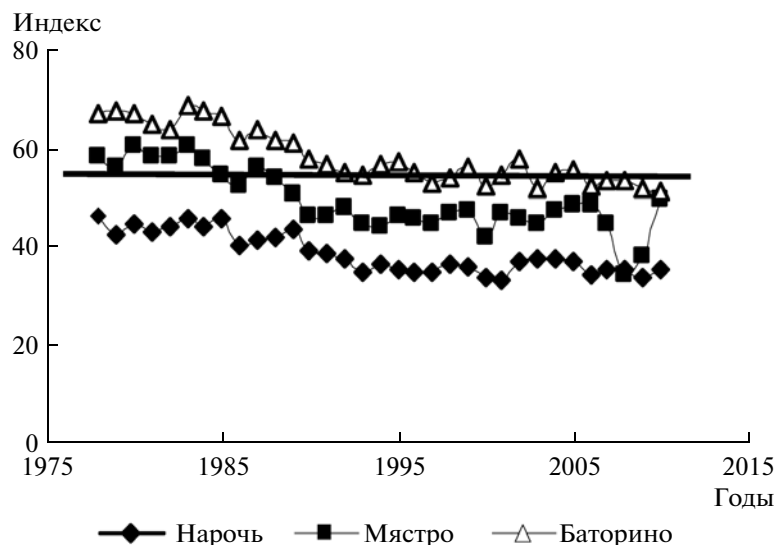


Рис. 2. Динамика трофического статуса Нарочанских озер в 1978–2010 гг. (горизонтальная линия – условный мезотрофный уровень).

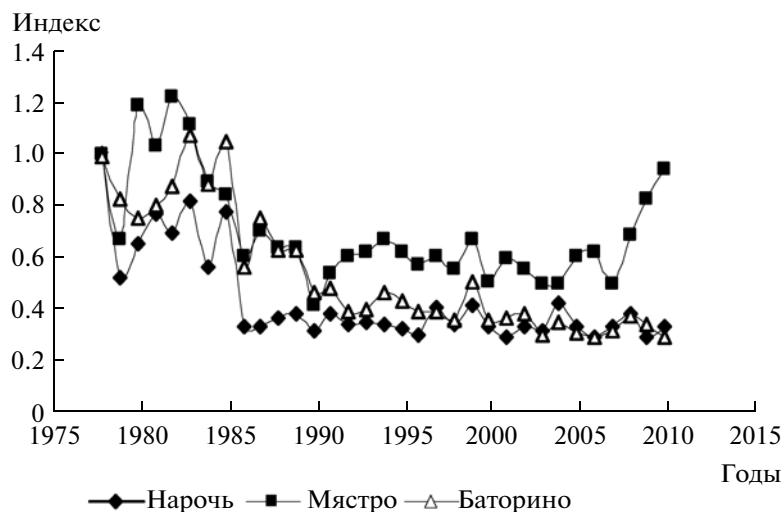


Рис. 3. Динамика концентрации $P_{общ}$ в воде Нарочанских озер (средние для вегетационного сезона величины, нормированные по первому году регулярных наблюдений).

вив 0.059 ± 0.011 (Баторино), 0.034 ± 0.006 (Мястро) и 0.016 ± 0.001 мг Р/л (Нарочь). Следует подчеркнуть, что на этом этапе озера по-прежнему различались по содержанию $P_{общ}$ в воде, что соответствовало их различиям по трофической шкале.

Следующий важный фактор изменений режима биогенных веществ – вселение в озера в конце 1980-х гг. моллюска-фильтратора *Dreissena polymorpha Pallas*. В отличие от эвтрофирования и деэвтрофирования, обусловленных соответственно увеличением и снижением потока биогенных веществ с водосборной территории, здесь происхо-

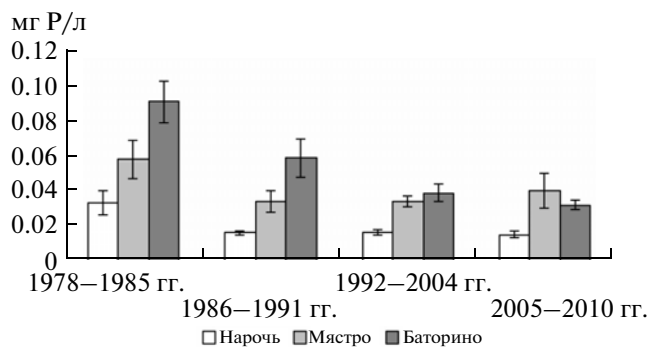


Рис. 4. Содержание $P_{общ}$ в воде Нарочанских озер в разные периоды современной эволюции.

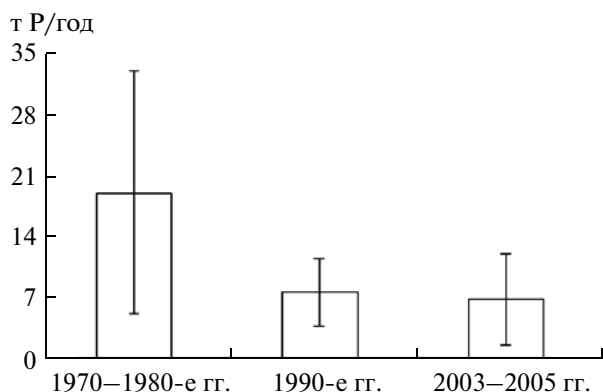


Рис. 5. Динамика внешней нагрузки по Р на экосистемы Нарочанских озер.

дит перераспределение потоков веществ между водной толщей и придонным экотонном, т.е. в пределах водной экосистемы. Для описания происходящих изменений предложен термин “бентификация” [9, 13]. Бентификация может быть вызвана разными факторами, но чаще всего — вселением в водоем дрейссены [12].

Влияние вселенца на режим биогенных веществ выражается в аккумуляции части этих веществ в биомассе и тем самым — в выведении их из активного круговорота на значительное время (жизненный цикл плюс разложение мягких тканей и раковин отмерших моллюсков). Не менее важными для круговорота веществ в озерной экосистеме являются фильтрационная активность моллюсков, их вклад в аэробную деструкцию органического вещества и экскрецию биодоступных форм биогенных веществ в процессе метаболизма, а также влияние дрейссены на ранний седиментогенез [5, 6].

Оценка возможного влияния дрейссены на круговорот Р сделана на основе следующих расчетов. В период стабилизации популяции (середина 1990-х гг.) средневзвешенная для водоема численность моллюсков в озерах Баторино, Мястро и Нарочь составляла соответственно 262 ± 88 , 645 ± 147 и 1521 ± 451 экз/м², а биомасса — 100.1 ± 36.6 , 288.0 ± 117.5 и 107.3 ± 43.9 г/м² [1]. Различия в численности и биомассе моллюсков обусловлены следующими факторами. В оз. Нарочь одним из основных субстратов для дрейссены, помимо донных отложений, являются ежегодно отмирающие подводные макрофиты, что предопределяет мелкоразмерность популяции. Популяции моллюсков в озерах Мястро и Баторино примерно равноразмерны, и здесь различия в численности и биомассе (примерно в три раза) обусловлены степенью доступности подходящих для обраста-

ния субстратов (в оз. Баторино — большие заиленность дна и мутность воды, сдерживающая развитие макрофитов).

Для нарочанской популяции дрейссены имеются эмпирические оценки скоростей фильтрации взвеси, потребления кислорода и экскреции биогенных элементов в зависимости от размеров животных [2]. Скорость седиментации взвеси в разные периоды оценена для пелагической зоны озер с помощью седиментационных ловушек [7]. Скорость седиментации Р рассчитана на основе его содержания во взвешенном веществе. В расчетах использованы также материалы многолетних наблюдений за уровнем аэробной деструкции планктона и концентрацией $P_{\text{общ}}$ и Р взвешенного ($P_{\text{взв}}$) в воде озер. Материалы по оценке скоростей круговорота Р за счет популяции дрейссены приведены в табл. 2.

Как показали расчеты, вселение дрейссены могло оказать существенное влияние на круговорот взвешенных, органических и биогенных веществ в озерах. При этом процессы бентификации должны быть наиболее выражены в оз. Мястро. Здесь в биомассе дрейссены аккумулировалось 37% запаса Р в воде в 1978–1990 гг. против 14–16% в озерах Баторино и Нарочь. Экскреция фосфатов (биологически доступного Р, способного включаться в биотический круговорот), по оценкам автора статьи, во всех озерах довольно высока, а в озерах Баторино и Мястро даже сопоставима с годовой внешней нагрузкой.

Скорость осаждения взвеси дрейссеной наиболее интенсивна в оз. Мястро, что обеспечивает здесь оборачиваемость взвешенных веществ — 24 сезон⁻¹, против 10 и 16 сезон⁻¹ в озерах Нарочь и Баторино. Потери $P_{\text{взв}}$ из столба воды могут составить 53% его запаса в оз. Мястро, 44% — в оз. Нарочь и 17% — в оз. Баторино.

Потребление кислорода дрейссеной довольно значимо и эквивалентно 10–30% аэробной деструкции планктона.

В период бентификации (1992–2004 гг.) концентрация $P_{\text{общ}}$ в воде озер составляла соответственно 0.039 ± 0.005 (Баторино), 0.034 ± 0.004 (Мястро) и 0.016 ± 0.002 мг Р/л (Нарочь). Именно в этот период в режиме Р в единой озерной экосистеме стали наблюдаться существенные различия. Неожиданным оказалось то, что в озерах Нарочь и Мястро существенная активизация круговорота Р за счет дрейссены практически не отразилась на его запасе в водной массе, тогда как в оз. Баторино произошло заметное снижение запаса. Важно подчеркнуть, что именно в это время происходи-

Таблица 2. Влияние дрейссены на круговорот Р в Нарочанских озерах

Параметр	Баторино	Мястро	Нарочь	Примечание
Численность дрейссены, экз/м ²	262 ± 88	645 ± 147	152 ± 1451	По [1]
Биомасса, г/м ² (сырое вещество)	100.1 ± 36.6	288.0 ± 117.5	107.3 ± 43.9	По [1]
Средняя масса особи, г (сырое вещество)	0.382	0.447	0.071	
Вклад в режим Р				
Запас Р в воде (до вселения дрейссены), г/м ² , т	0.079 ± 0.019	0.049 ± 0.015	0.026 ± 0.010	Доля сухой массы в сырой: 45.8 ± 2.7%, содержание Р в сухом веществе: 0.073 ± 0.025% (по [2])
Запас Р в биомассе, т,	1.48	3.43	18.47	
% от запаса в воде	0.21	1.26	2.86	
Экскреция фосфатов, мкг Р/экз ч,	14	37	16	
г Р/м ² сезон	0.108	0.117	0.043	Скорость экскреции, мкг Р/экз ч: $y = 0.182x^{0.545}$ (здесь и ниже x – масса средней особи, г) (по [2])
Нагрузка с водосбора, г Р/м ² год	0.123	0.330	0.285	
	0.22–0.76	0.10–0.30	0.03–0.08	(По [3])
Фильтрационная активность				
Концентрация взвеси (до вселения дрейссены), г/м ³	16.53 ± 2.55	5.86 ± 1.41	1.79 ± 0.30	
Содержание Р во взвеси, %	0.42 ± 0.26	0.59 ± 0.25	0.55 ± 0.30	
Седиментация взвеси в пелагиали, г/м ² сут	4.40–5.08	1.02–1.62	0.22–0.33	По [7]
Расчетная скорость осаждения взвеси дрейссеной, г/м ² сут	2.87	3.11	0.79	Скорость фильтрации, мл/экз ч: $y = 79.25x^{0.66}$ с учетом плотности моллюсков и содержания взвеси (по [2])
Оборачиваемость взвеси, сезон ⁻¹	16	24	10	
Расчетная скорость осаждения фосфора дрейссеной, г/м ² сут	0.012	0.018	0.004	
Потери взвешенного Р, %	17	53	44	
Вклад в аэробную деструкцию				
Аэробная деструкция планктона, г О ₂ /м ³ сут,	0.56 ± 0.30	0.32 ± 0.21	0.19 ± 0.15	Среднее для вегетационных сезонов 1986–2009 гг.
г О ₂ /м ² сут	1.68	1.73	1.69	
Потребление кислорода дрейссеной, мг О ₂ /экз ч,	0.030	0.033	0.010	Скорость потребления кислорода, мг О ₂ /экз ч:
г О ₂ /м ² сут	0.187	0.509	0.355	$y = 0.056x^{0.66}$ (по [2])
Доля от аэробной деструкции планктона, %	11	30	21	

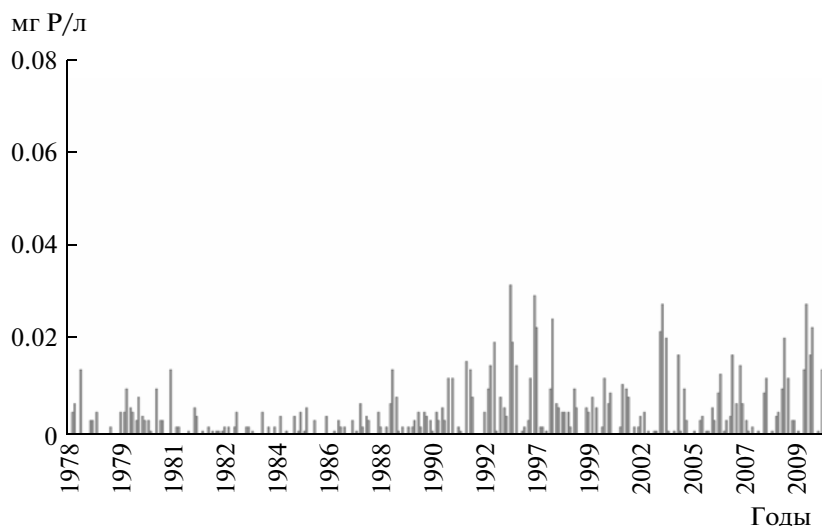


Рис. 6. Динамика концентрации фосфатов в воде оз. Мястро (1978–2010 гг.).

ло сближение концентраций $P_{\text{общ}}$ в воде озер Мястро и Баторино.

Различия в динамике концентрации $P_{\text{общ}}$ в воде между тремя озерами проявляются в последние годы (2005–2010 гг.). На фоне стабильного запаса $P_{\text{общ}}$ в воде оз. Нарочь (0.015 ± 0.002 мг Р/л) в оз. Баторино продолжается некоторое его снижение (0.032 ± 0.003 мг Р/л), а в оз. Мястро, напротив, наблюдается рост запаса соединений Р в воде (0.040 ± 0.010 мг Р/л).

Чрезвычайно важно отметить, что содержание Р в воде озер обеспечивается его органическими соединениями. Концентрация фосфатов в воде Нарочанских озер практически всегда находилась на границе определения (ниже 0.005 мг Р/л). И только в воде оз. Мястро с конца 1980-х гг. во второй половине вегетационного сезона регистрируются концентрации до 0.030–0.070 мг Р/л – Р перестает быть элементом, лимитирующим первичную продукцию (рис. 6).

Отклик озер на изменение биогенной нагрузки с водосборной территории зависит от ее степени, показателями которой могут быть величина удельного водосбора, особенности водного баланса и проточности водоема. Наибольшее влияние водосборной территории испытывает верхнее в цепи оз. Баторино (величина удельного водосбора здесь равна 14.7 против 10.2 и 3.5 для озер Мястро и Нарочь соответственно, а при сопоставлении площадей частных водосборов с площадями акваторий каждого из озер величины этого показателя равны соответственно 13.7, 2.6 и 0.7). Особенность водного баланса оз. Нарочь – преобладание в его приходной части более чем на

1/2 атмосферных осадков, выпадающих на акваторию и менее загрязненных биогенными элементами, чем поверхностный сток; а также значимая роль притока (около 1/4 приходной части водного баланса) из вышележащих озер Баторино и Мястро (озерные воды содержат меньшее количество $P_{\text{общ}}$ по сравнению с ручьевым и диффузным стоком с водосборной территории). С учетом площади акватории внешняя нагрузка по Р, по оценкам автора, в начальный период исследований составляла для оз. Баторино 0.22–0.76, для оз. Мястро – 0.10–0.30, для оз. Нарочь – 0.03–0.08 г Р/м² год [3], т.е. хорошо согласовывалась с трофическим статусом озер. Однако для отклика озер на внешние воздействия большое значение имеет и проточность водоемов, которая определяет инертность отклика системы (время водообмена в Нарочанских озерах составляет 1.0, 2.5 и 10.5 лет). Несмотря на разнонаправленность проявления наиболее вероятных механизмов отклика на внешние воздействия в верхнем и нижнем озерах, составляющих единую экосистему, содержание $P_{\text{общ}}$ в озерной воде четко отражало различия во внешней нагрузке по Р. Озеро Мястро по рассмотренным морфометрическим и гидрологическим параметрам занимает промежуточное положение, что отражается на среднем в ряду озер содержании $P_{\text{общ}}$ в воде.

Анализ многолетней динамики $P_{\text{общ}}$ в воде Нарочанских озер в целом позволяет утверждать, что увеличение внешней биогенной нагрузки (период эвтрофирования) и ее последующее снижение (период деэвтрофирования) имели одинаковую

направленность по отношению к концентрации $P_{\text{общ}}$ в воде всех трех озер.

Чрезвычайно важно то, что в период бентификации сложившееся в экосистемах соотношение внешних и внутриводоемных потоков повлияло на формирование концентраций $P_{\text{общ}}$ в водной массе. По оценкам автора, внешняя и внутренняя нагрузки по P в оз. Баторино были примерно равными, в оз. Мястро внутриводоемная нагрузка превышала внешнюю в 2.5–3.0 раза, в оз. Нарочь — в 6–12 раз [3]. Можно предположить, что с увеличением относительной значимости внутренней нагрузки следует ожидать некоторое демпфирующее свойство донных отложений в ответ на внешнее воздействие.

Согласно приведенным выше расчетам, наибольшее влияние вселения дрейссены должна испытывать экосистема оз. Мястро, что и наблюдается в современный период.

В воде оз. Баторино снижение концентрации $P_{\text{общ}}$ в это время объясняется, вероятно, аккумуляцией некоторой части $P_{\text{общ}}$ в биомассе и усилением седиментации взвешенных веществ за счет фильтрационной активности моллюсков. При этом серьезных сдвигов в режиме по P , под которым подразумевается существенное изменение скоростей потоков с водосборной территории и выноса из донных отложений, не произошло, о чем свидетельствует сохранение близкой к квазистационарному состоянию концентрации $P_{\text{общ}}$ в озерной воде в настоящее время.

Любопытна ситуация в оз. Нарочь, где с середины 1980-х гг. концентрация $P_{\text{общ}}$ в воде, уменьшившись вдвое по сравнению с периодом эвтрофирования, сохраняется на этом уровне до настоящего времени. Не исключено, что одной из основных причин столь устойчивого сохранения концентрации $P_{\text{общ}}$ в водной массе озера является высокая буферная емкость донных осадков, о чем свидетельствует соотношение внутренней и внешней нагрузок по P в процессе формирования его концентрации в водоеме. Можно предположить, что пока не произойдет непредвиденных изменений в этом соотношении, режим по P будет находиться и здесь в квазистационарном состоянии.

Именно “непредвиденные изменения” и произошли в экосистеме оз. Мястро. С большой степенью вероятности можно полагать, что процессы бентификации привели здесь к усиленному выносу P из донных отложений, что явилось не совсем понятным в настоящее время влиянием этого феномена (возможно, не только вселения дрейссены) на круговорот P в воде. Это подтвер-

ждают наблюдения в последние годы за продолжающимся нарастанием концентрации $P_{\text{общ}}$, в том числе $P_{\text{мин}}$, в воде. Необычная перестройка, без сомнения, требует дальнейших исследований по дешифрованию механизмов, приводящих к столь значительным изменениям промежуточного звена единой экологической системы взаимосвязанных озер.

ВЫВОДЫ

На примере многолетней динамики $P_{\text{общ}}$ в воде трех озер, составляющих единую экосистему, показано, что отклик составляющих ее водоемов на внешние воздействия может существенно различаться. При этом процессы, вызванные изменением внешней нагрузки по P (эвтрофирование и деэвтрофирование), во всех трех озерах имели одинаковый характер. Процессы бентификации, одной из основных причин которой явилось вселение в озера моллюска-фильтратора *Dreissena polymorpha* Pallas., развивались в водоемах по-разному. Влияние бентификации оказалось наиболее выраженным в промежуточном оз. Мястро и привело к серьезным нарушениям сложившегося здесь круговорота P .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлакова Л.Е. Экология *Dreissena polymorpha* (Pallas) и ее роль в структуре и функционировании водных экосистем. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Минск: Ин-т зоологии НАН Беларуси, 1998. 18 с.
2. Жукова Т.В. Некоторые эколого-физиологические параметры дрейссены Нарочанских озер // Итоги и перспективы гидроэкологических исследований. Матер. Междунар. конф. по водным экосистемам. Минск, 1999. С.67–72.
3. Жукова Т.В. Потоки биогенных элементов из донных отложений в воду и их роль в формировании трофического статуса Нарочанских озер // Гидробиол. журн. 2002. Т. 38. № 4. С. 14–21.
4. Жукова Т.В., Остапеня А.П. Оценка эффективности природоохранных мероприятий на водосборе Нарочанских озер // Природные ресурсы. 2000. № 3. С. 68–73.
5. Жукова Т.В., Остапеня А.П. Влияние на экосистему Нарочанских озер вселенца — моллюска-фильтратора *Dreissena polymorpha* Pallas. // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. Матер. II Междунар. науч. конф. Минск, 2003. С. 438–441.
6. Жукова Т.В., Остапеня А.П., Никитина Л.В. Особенности трансформации взвеси, осаждающей *Dreissena polymorpha* // Стратегия развития аква-

- культуры в условиях XXI века. Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 2004. С 180–183.
7. *Остапеня А.П.* Сестон и детрит как структурные и функциональные компоненты водных экосистем. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Киев: Ин-т гидробиологии АН УССР, 1988. 42 с.
 8. *Остапеня А.П.* Современное экологическое состояние Нарочанских озер // Природные ресурсы. 1997. № 3. С. 95–102.
 9. *Остапеня А.П.* Деэвтрофирование или бентификация? // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды. Матер. III Междунар. науч. конф. Минск: Издательский центр БГУ, 2007. С. 31–32.
 10. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 541 с.
 11. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes // Limnol. Oceanogr. 1977. 22. P. 361–369.
 12. *Mayer C.M., Keats R.A., Rudstam L.G., Mills E.L.* Scale-dependent effects of zebra mussels on benthic invertebrates in a large eutrophic lake // J. North American Benthological Society. 2002. V. 21. P. 616–633.
 13. *Zhu B., Fitzgerald D.V., Mayer C.M. et al.* Alteration of ecosystem function by zebra mussels in Oneida Lake, N.Y.: impacts on submerged macrophytes // Ecosystems. 2006. № 9. P. 1–12.