

УДК 577.3

УСТОЙЧИВОСТЬ РЕКУРРЕНТНЫХ СВОЙСТВ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕРНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

© 2021 г. А.В. Русаков*, Б.В. Адамович**, Т.В. Жукова**, Р.З. Ковалевская**, А.Б. Медвинский*, Т.М. Михеева**, Н.И. Нуриева*, Н.П. Радчикова***, ****

*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,
142290, Пущино Московской области, ул. Институтская, 3;

**Белорусский государственный университет, 220030, Минск, пр. Независимости, 4, Республика Беларусь

***Московский педагогический государственный университет, 119991, Москва, ул. Малая Пироговская, 1/1

****Московский государственный психолого-педагогический университет, 127006, Москва, ул. Сретенка, 29

E-mail: rusakov_a@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.03.2021 г.

После доработки 20.04.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

Представлен анализ многолетней динамики гидроэкологических характеристик системы Нарочанских озер (Беларусь) за период с 1979 по 2018 гг. За этот период произошло резкое изменение антропогенной нагрузки на водосбор Нарочанской экосистемы, связанный с проведением мероприятий по ее экологическому оздоровлению, а также инвазия моллюска *Dreissena polymorpha* Pallas. Показано, что изменение внешней нагрузки на озерную экосистему привело к существенным изменениям в амплитуде колебаний концентраций гидроэкологических характеристик, тогда как предсказуемость таких колебаний изменилась незначительно.

Ключевые слова: многолетняя динамика, биогенная нагрузка, численный рекуррентный анализ, озерные экологические системы.

DOI: 10.31857/S0006302921040220

Оценка влияния антропогенной нагрузки на функционирование озерных экологических систем – востребованная, но сложная комплексная задача. Основная сложность при решении такой задачи заключается в невозможности напрямую измерить факторы, относящиеся к антропогенному воздействию, а, следовательно, необходимо отделить изменения в поведении экосистемы, вызванные естественной вариативностью природных факторов, от изменений, вызванных изменением антропогенного давления на исследуемую систему. Для решения такой задачи необходимо наличие большого числа полевых наблюдений как за динамикой гидробионтов, так и за динамикой гидрохимических и гидрологических характеристик исследуемой экосистемы, с последующим их анализом как линейными, так и нелинейными методами. К таким данным предъявляется ряд требований, а именно: длительность и непрерывность наблюдений, единообразие методов измерения на протяжении всего времени измерений, регулярность и синхронность наблюдений. Таким требованиям удовлетворяют данные, полученные в результате многолетних не-

прерывных наблюдений за динамикой гидроэкологических характеристик системы Нарочанских озер (Республика Беларусь). В результате многолетних мониторинговых наблюдений был выделен ряд внешних факторов, существенно определивших этапы эволюции экосистем Нарочанских озер и их современное состояние [1, 2]. Было показано, что интенсивная биогенная нагрузка в виде активного сельскохозяйственного производства в районе водосбора озерной экосистемы привела к прогрессирующему эвтрофированию водоемов к концу 1980-х годов. С конца 1980-х годов начала проводиться программа экологического оздоровления Нарочанских озер, включающая репрофилирование сельхозугодий (замена более 2000 га пахотных земель пастбищами и сенокосами), залесение 683 га водоохранной зоны, вынос за пределы водосбора девяти животноводческих ферм и благоустройство восьми оставшихся ферм, организацию обводного коллектора для сбора, последующей очистки и сброса за пределы водосбора сточных вод Нарочанской курортной зоны [3]. Благодаря целенаправленному снижению биогенной нагрузки, существенно снизи-

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых озер [2]

Показатели	оз. Баторино	оз. Мястро	оз. Нарочь
Площадь водного зеркала, км ²	6.3	13.1	79.6
Объем водной массы, млн м ³	18.7	70.1	710.0
Глубина (средняя/максимальная), м	2.4/5.5	5.4/11.3	8.9/24.8
Время водообмена, лет	1.0	2.5	10–11

лись концентрации азота и фосфора и повысилась прозрачность воды [1, 2, 4]. Еще одним фактором, существенно повлиявшим на функционирование Нарочанской системы озер, явилось вселение в конце 1980-х годов в озера мощнейшего фильтрата – моллюска *Dreissena polymorpha* Pallas [1, 5]. Оба этих фактора привели к бентификации экосистемы, т.е. смещению процессов трансформации вещества из толщи воды в придонный слой [1, 2]. Процессы эвтрофирования, как и противоположно направленные процессы деэвтрофирования или олиготрофизации, а также протекающие в Нарочанских озерах процессы бентификации оказали влияние на все звенья трофической цепи и все основные гидроэкологические параметры. На фоне таких существенных изменений функционирования озерной экосистемы оценка изменения ее динамики, в том числе предсказуемости, за периоды разной антропогенной нагрузки может дать дополнительную информацию для оценки влияния на экологические системы как интенсивной сельскохозяйственной деятельности, так и мероприятий по экологическому оздоровлению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Озера Баторино, Мястро и Нарочь, послужившие полигоном исследований, расположены на северо-западе Беларуси, принадлежат бассейну р. Неман и представляют собой систему из трех полимиктических водоемов, имеющих общую водосборную территорию и соединенных между собой протоками [6]. Трофность озер снижается в ряду Баторино – Мястро – Нарочь [7]. Основные характеристики озер Нарочанской экосистемы представлены в табл. 1.

Мониторинговые исследования проводили в глубоководной зоне озер на станциях и горизонтах постоянных наблюдений с частотой один-три раза в месяц во время вегетационного сезона. В зависимости от погодных условий первый отбор проводили в апреле или мае, последний – в ноябре. Пробы воды отбирали при помощи двухлитрового батометра Рутнера на шести горизонтах водного столба (0.5, 3, 6, 8, 12 и 16 м) в оз. Нарочь (54°53'18''N, 26°43'20''E), четырех горизонтах

(0.5, 4, 7 и 9 м) в оз. Мястро (54°52'02''N, 26°52'83''E) и трех горизонтах (0.5, 3 и 5 м) в оз. Баторино (54°50'80''N, 26°80'06''E). При мониторинговых наблюдениях воду со всех горизонтов смешивали для получения интегральной пробы, отражающей средний состав озерной воды (объем воды каждого горизонта в интегральной пробе был пропорционален доле, которую составляет данный слой в общем объеме озера в соответствии с данными батиметрии).

Методики анализа гидроэкологических показателей (содержание общего углерода, общего азота, общего фосфора, хлорофилла, сестона, биомасса фитопланктон) были подробно описаны в наших предыдущих работах [2, 9].

В рамках численного рекуррентного анализа повторяемость состояния исследуемой динамической системы может быть представлена в виде рекуррентной матрицы

$$R_{ij}(\varepsilon) = H(\varepsilon - \|X(i) - X(j)\|); i, j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где $X(k)$, $k = i, j$ – вектор, описывающий состояние исследуемой системы; N – число измерений состояния этой системы; ε – малый параметр (некоторые правила выбора численного значения параметра ε представлены в работе [8]); H – функция Хевисайда: $H(x) = 0$, если $x < 0$, в противном случае $H(x) = 1$, $\|\cdot\|$ – норма. Матрица (1) используется для визуализации рекуррентности в виде рекуррентных диаграмм. Рекуррентные диаграммы представляют собой набор точек в системе координат i и j , причем черные точки соответствуют координатам (i, j) , для которых $R_{ij} = 1$, а белые точки соответствуют координатам (i, j) , для которых $R_{ij} = 0$. Такие рекуррентные диаграммы симметричны относительно диагональной линии $R_{ii} = 1$.

Очевидно, что разные динамические процессы будут отображаться разными структурами на рекуррентной диаграмме. Так, рекуррентная диаграмма периодических осцилляций представляет собой набор диагональных линий, параллельных основной диагонали $R_{ii} = 1$. Расстояния между этими линиями (как по горизонтали, так и по вертикали) равны периоду колебаний. Хаотическая динамика отображается аперiodическими

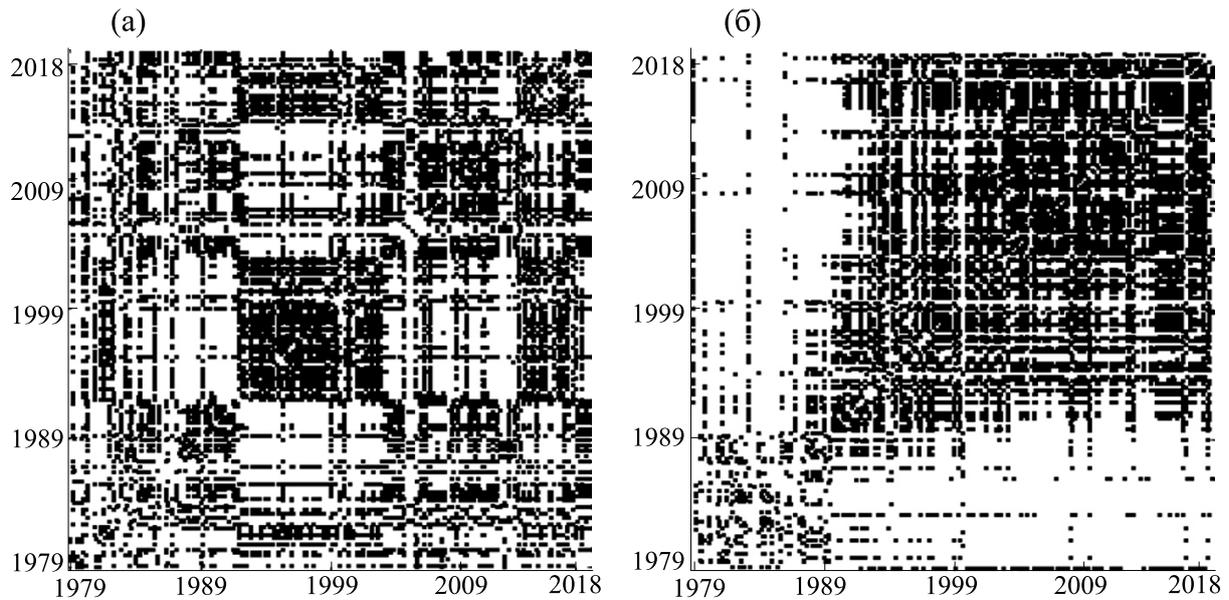


Рис. 1. Рекуррентные диаграммы концентраций биогенных элементов в озере Баторино за весь период наблюдения: (а) – концентрация общего азота, (б) – концентрация общего фосфора.

структурами, короткими диагональными линиями, которые повторяются не регулярно. Таким образом, внешний вид рекуррентной диаграммы позволяет оценить динамику исследуемых процессов, наличие и влияние шума, а также наличие резких изменений состояния системы.

На рис. 1 представлены рекуррентные диаграммы изменения концентраций общего азота (рис. 1а) и общего фосфора (рис. 1б) в озере Баторино за весь период наблюдения. Можно видеть, что распределение точек на диаграмме существенно неравномерное. Для общего азота обла-

сти с высокой плотностью рекуррентных точек соседствуют с разреженными участками, что говорит об изменении характера динамики на этих участках (сравни рис. 1а и 2а). Для общего фосфора в течение 1990-х годов произошло резкое изменение состояния системы. Это связано с уменьшением биогенной нагрузки на систему Нарочанских озер в результате мероприятий по экологическому оздоровлению, а также с вселением моллюска *Dreissena* [1, 3]. На рекуррентной диаграмме хорошо виден этот переход (рис. 2б). Область с низкой плотностью рекуррентных то-

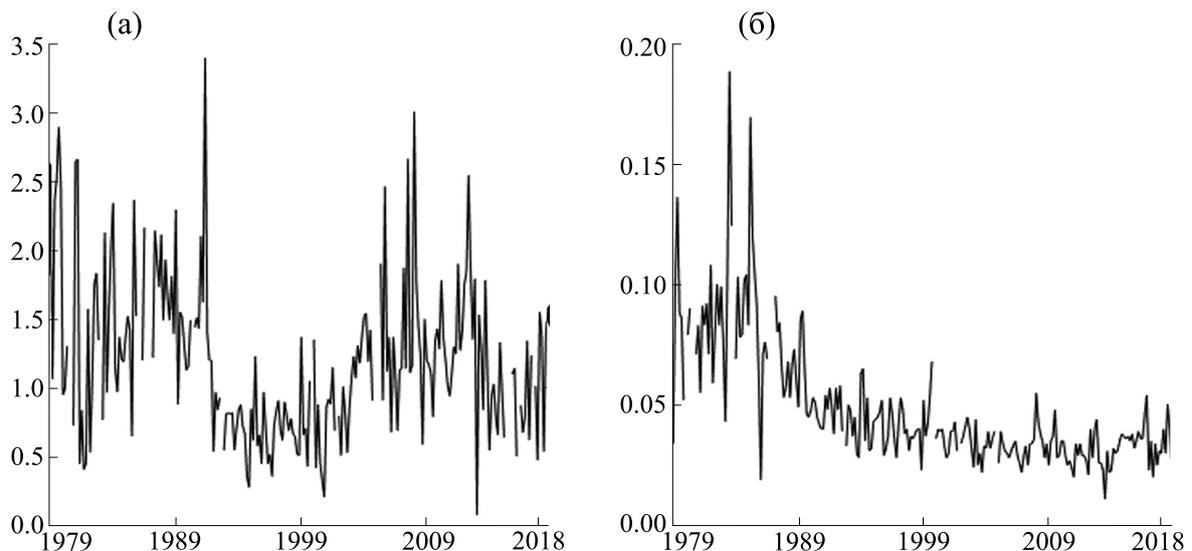


Рис. 2. Концентрация общего азота в мг/л (а) и общего фосфора в мг/л (б) в озере Баторино.

чек переходит в область с высокой плотностью (вдоль главной диагонали $R_{ii} = 1$) в районе 1990 г.

Подробное рассмотрение рекуррентных диаграмм позволяет выявить мелкомасштабные структуры, состоящие из точек, вертикальных, горизонтальных и диагональных отрезков. Отдельные точки характеризуют случайные события или сильные флуктуации, вертикальные и горизонтальные отрезки – ламинарность процесса, диагональные отрезки – повторяемость динамики временного ряда в течение некоторого времени. Такие мелкомасштабные структуры используются для вычисления мер количественного рекуррентного анализа. Так, для иррегулярных и хаотических процессов диагональные отрезки длины l , параллельные диагональной линии $R_{ii} = 1$, являются результатом того, что фазовая траектория проходит одни и те же области фазового пространства в разные моменты времени, и сегмент этой траектории оказывается практически параллельным другому близкому ему сегменту в течение l временных единиц. Длина таких диагональных отрезков удовлетворяет следующему тождеству [10]:

$$(1 - R_{i-1,j-1})(1 - R_{i+1,j+1}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k} \equiv 1, \quad (2)$$

где $R_{i-1,j-1} = 0$, если $R_{1,j} = 1$ или $R_{i,1} = 1$ и $R_{i+k,j+k} = 0$, если $R_{N,j} = 1$ или $R_{i,N} = 1$. Поскольку такие диагональные отрезки длины l означают рекуррентность характера динамического процесса на протяжении l временных шагов, то горизонт предсказуемости (T_{pr}) этого процесса может быть представлен как усредненная длина диагональных отрезков:

$$T_{pr} = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N lP(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)}, \quad (3)$$

где $P(l)$ – гистограмма диагональных отрезков длины l [7], т. е.

$$P(l) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i-1,j-1})(1 - R_{i+l,j+l}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k}, \quad i \neq j, \quad (4)$$

и l_{min} – пороговое значение длины диагонального отрезка, позволяющее исключить из рассмотрения слишком короткие отрезки, соответствующие временным интервалам, в течение которых автокорреляция, заметная вначале, приближается к нулю (или близкому к нулю значению).

В работе [11] предложена еще одна численная мера оценки динамики временного ряда по рекуррентной матрице. Эта мера была предложена для анализа зашумленных временных рядов, которыми является большинство временных рядов, полученных в ходе полевых наблюдений; эта мера

представляет собой отношение количества всех точек рекуррентной диаграммы, входящих в диагональные отрезки с длиной, превышающей пороговое значение l_{min} , к общему количеству точек на диаграмме:

$$P_d = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N lP(l)}{n}, \quad (5)$$

где n – общее количество точек на рекуррентной диаграмме, для которых $R_{ij} = 1$.

В данной работе для оценки динамических характеристик озерной экосистемы Нарочанских озер за временные периоды, характеризующиеся разной антропогенной нагрузкой, применяли обе меры (3) и (5). В работах [2, 9, 12] проведен статистический анализ временных рядов таких биогенных элементов, как общий азот и общий фосфор, а также хлорофилла. Выделено три этапа эволюции экосистемы Нарочанских озер, существенно различающихся по характеру изменения динамики хлорофилла, оцененного путем анализа линий тренда и их коэффициентов детерминации для всех озер [12]: период, характеризующийся интенсивной сельскохозяйственной деятельностью, а, следовательно, высокой биогенной нагрузкой (1978–1983 гг.), период, характеризующийся снижением биогенной нагрузки и концентрации хлорофилла во всех озерах (1984–1990 гг.), период, соответствующий отклику экосистемы на программу экологического оздоровления системы Нарочанских озер и вселение моллюска *Dreissena* (1991–2013 гг.). В данной работе произведен анализ временных рядов за период с 1979 по 2018 годы, состоящих из средних месячных значений таких гидроэкологических характеристик, как концентрация общего углерода, общего азота, общего фосфора, сестона, хлорофилла и биомассы фитопланктона в период с мая по октябрь, для каждого озера Нарочанской группы. Из нашего анализа исключали короткий переходный период с 1989 по 1992 годы, а динамику колебаний гидрологических характеристик оценивали за два периода: высокой биогенной нагрузки (1979–1988 гг.) и низкой биогенной нагрузки (1993–2018 гг.). Для выбора численного значения параметра ϵ в выражении (1) использовали плотность заполнения рекуррентной диаграммы:

$$P_f = n/N^2, \quad (6)$$

где n – количество единиц рекуррентной матрицы, N – длина исследуемого ряда (длина стороны рекуррентной матрицы). Для всех случаев величина P_f выбиралась близкой к 0.19.

Исследуемые в данной работе гидроэкологические характеристики демонстрируют существенные вариации их значений от измерения к

измерению (в качестве примера на рис. 5 показаны временные ряды, т.е. колебания концентраций, общего азота и общего фосфора в оз. Баторино). Такие колебания носят нерегулярный характер. Тем не менее им свойственна повторяемость, но не абсолютная, а с точностью до величины параметра ϵ , который используется в соответствии с уравнением (1) для построения рекуррентной матрицы. В результате черные точки на рекуррентных диаграммах (см. рис. 1) соответствуют таким моментам времени, когда колебания демонстрируют некоторую — с точностью до ϵ — повторяемость (рекуррентность). В том случае, когда такая рекуррентность характеризует не одно значение временного ряда, а несколько идущих подряд значений, черные точки на рекуррентной диаграмме образуют диагональные отрезки, параллельные основной диагонали $R_{ii} = 1$, длина которых l удовлетворяет тождеству (2). В соответствии с уравнением (3) горизонт предсказуемости T_{gr} исследуемого временного ряда определяется как усредненная длина таких диагональных отрезков. Изменение величины T_{gr} на разных участках временного ряда может отражать изменение характера динамики исследуемого процесса. Наличие одиночных, т.е. не входящих в состав диагональных отрезков, точек на рекуррентной диаграмме соответствует одиночным флуктуациям состояния исследуемой динамической системы. При неизменной плотности заполнения рекуррентных диаграмм (6): $P_f \approx 0.19$ — изменениям количества одиночных флуктуаций соответствуют изменения численного значения параметра P_d (см. уравнение (5)).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Процессы, протекающие в экологических системах, носят ярко выраженный рекуррентный характер. Это связано с выраженной сезонностью многих процессов, а также с колебаниями численности и концентраций, вызванными трофическими взаимодействиями. Примечательно, что антропогенная нагрузка, связанная с активной хозяйственной деятельностью, носит ярко выраженный сезонный характер. Колебания численности гидробионтов в озерных экосистемах могут носить регулярный, иррегулярный и даже хаотический характер [7]. При этом экологические процессы существенно нелинейны [13, 14], что подразумевает преимущество нелинейных методов оценки динамики по сравнению с линейными методами [14, 15].

Анализ рекуррентных диаграмм, построенных для разных гидроэкологических характеристик за весь период наблюдения с 1979 по 2018 годы, позволил уточнить момент изменения характера их динамики после проведения мероприятий эколо-

гического оздоровления Нарочанской экосистемы и других внешних воздействий и выбрать время переходного периода с 1989 по 1992 годы для исключения из дальнейшего анализа. На рис. 1 показаны рекуррентные диаграммы для временных рядов концентраций общего азота (рис. 1а) и общего фосфора (рис. 1б) за весь период исследований с 1979 по 2018 годы в озере Баторино. Четко видно отличие в структурах рекуррентных диаграмм до переходного периода (с 1989 по 1992 годы) и после, что соответствует реакции экосистемы на снижение антропогенной нагрузки на озерную экосистему. Оказалось, что структура рекуррентной диаграммы за период с 1993 по 2018 годы для общего фосфора не меняется, тогда как для общего азота наблюдается изменение в структуре рекуррентной диаграммы в течение этого периода. В связи с этим численную оценку рекуррентных свойств динамики гидроэкологических характеристик проводили не за весь период с 1993 по 2018 годы, а отдельно с 1993 по 2005 годы и с 2006 по 2018 годы.

В табл. 2 и 3 представлены значения параметра T_{gr} , характеризующего горизонт предсказуемости, и параметра P_d , характеризующего зашумленность динамики концентраций гидрологических характеристик и биомассы фитопланктона за периоды 1979–1988 гг., 1993–2005 гг. и 2006–2018 гг. для озер Баторино (Бат. 1, Бат. 2, Бат. 3), Мястро (Мяст. 1, Мяст. 2, Мяст. 3) и Нарочь (Нар. 1, Нар. 2, Нар. 3). На рис. 3–8 приведены диаграммы размаха, характеризующие динамику концентраций гидроэкологических характеристик для озер Нарочанской группы за выбранные периоды для каждого озера. На рисунках представлены медианы, верхний и нижний квартили, а также максимальные и минимальные значения.

Сопоставляя результаты численного рекуррентного анализа, представленного в табл. 2 и 3, а также результаты статистического анализа, представленные на рис. 3–8, можно дать оценку изменению динамики гидроэкологических характеристик в каждом из озер, начиная с периода высокой антропогенной нагрузки (1979–1988 гг.) и заканчивая периодом, значительно удаленным по времени и от мероприятий по экологическому оздоровлению системы Нарочанских озер, и от вселения в озера *Dreissena polymorpha* Pallas [12] (с 2006 по 2018 годы). Так, изменения параметров T_{gr} и P_d для динамики концентрации общего фосфора для разных озер не имеют выраженных тенденций, тогда как изменение ее амплитуды (рис. 3) во всех озерах имеет ярко выраженную тенденцию к уменьшению от первого периода к последнему. Видно значительное уменьшение медианы концентрации общего фосфора за второй период по сравнению с первым во всех озерах. Таким образом, такая гидроэкологическая

Таблица 2. Значения параметра $T_{\text{рг}}$ для каждого озера Нарочанской экосистемы за периоды 1979–1988 гг., 1993–2005 гг. и 2006–2018 гг.

	Бат. 1	Бат. 2	Бат. 3	Мяст. 1	Мяст. 2	Мяст. 3	Нар. 1	Нар. 2	Нар. 3
Фосфор	3.44	3.19	3.59	3.17	3.52	3.13	3.36	3.15	3.21
Азот	3.71	3.71	3.42	3.22	3.66	3.18	3.25	3.23	3.2
Углерод	3.2	3.25	3.44	3.08	3.23	3.55	3.08	3.06	3.125
Сестон	3.1	3.12	3.46	3.27	3.18	3.28	3.09	3.1	3.44
Хлорофилл	3.38	3.26	3.21	3.25	3.26	3.24	3.08	3.29	3.32
Биомасса фитопланктона	—	3.38	3.31	—	3.06	3.16	—	3.33	3.3

Примечание. Параметр $T_{\text{рг}}$ характеризует горизонт предсказуемости изменения концентраций гидрологических характеристик и биомассы фитопланктона.

Таблица 3. Значения параметра P_d для каждого озера Нарочанской экосистемы за периоды 1979–1988 гг., 1993–2005 гг. и 2006–2018 гг.

	Бат. 1	Бат. 2	Бат. 3	Мяст. 1	Мяст. 2	Мяст. 3	Нар. 1	Нар. 2	Нар. 3
Фосфор	0.09	0.14	0.11	0.11	0.14	0.13	0.11	0.1	0.1
Азот	0.15	0.18	0.07	0.21	0.28	0.12	0.12	0.17	0.06
Углерод	0.05	0.12	0.15	0.12	0.12	0.12	0.12	0.1	0.1
Сестон	0.11	0.13	0.08	0.1	0.16	0.14	0.1	0.12	0.06
Хлорофилл	0.13	0.13	0.13	0.04	0.18	0.1	0.11	0.13	0.16
Биомасса фитопланктона	—	0.14	0.07	—	0.09	0.1	—	0.12	0.1

Примечание. Параметр P_d характеризует зашумленность динамики концентраций гидрологических характеристик и биомассы фитопланктона.

характеристика, как концентрация общего фосфора, показала одинаковую для всех озер реакцию на уменьшение биогенной нагрузки, что свя-

зано, по-видимому, со снижением поступления фосфора в результате прекращения активной хозяйственной деятельности и природоохранных

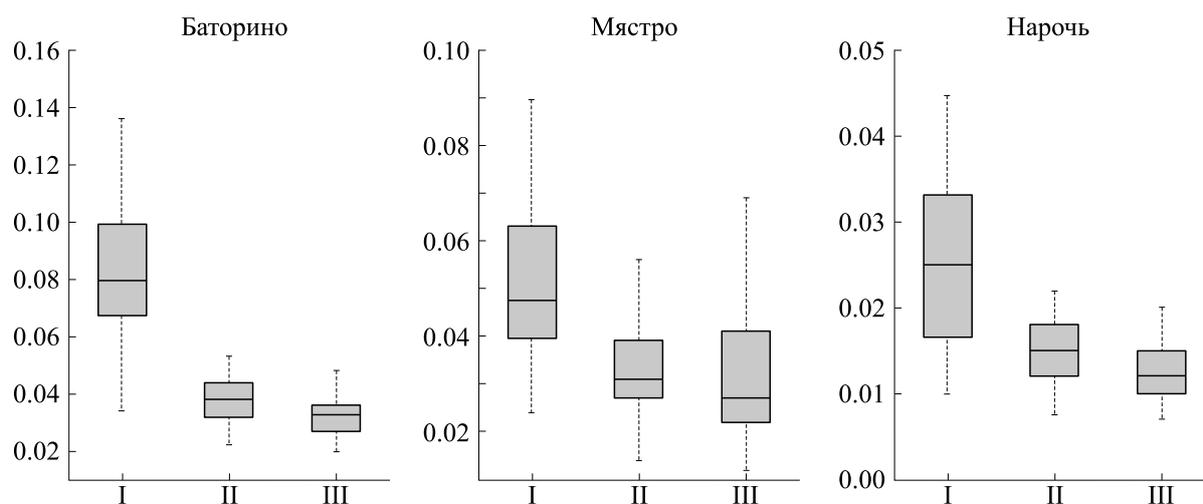


Рис. 3. Диаграммы размаха, характеризующие динамику концентраций (мг/л) общего фосфора в озерах за периоды 1979–1988 гг. (I), 1993–2005 гг. (II), 2006–2018 гг. (III). Представлены медиана, верхний и нижний квартиль, наибольшее и наименьшее значения.

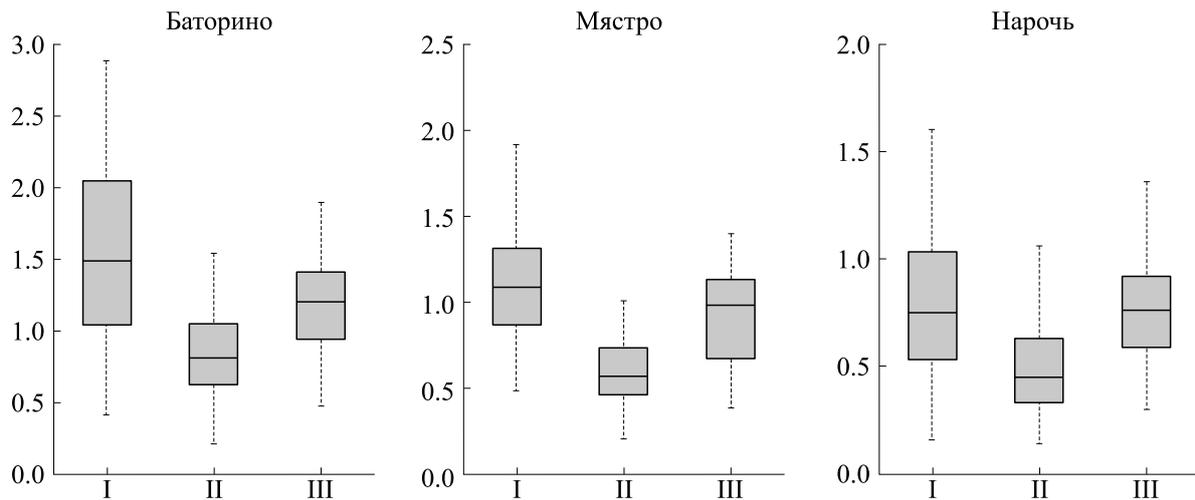


Рис. 4. Диаграммы размаха, характеризующие динамику концентраций (мг/л) общего азота в озерах за периоды 1979–1988 гг. (I), 1993–2005 гг. (II), 2006–2018 гг. (III). Представлены медиана, верхний и нижний квартиль, наибольшее и наименьшее значения.

мероприятий на водосборе Нарочанских озер [3] по сравнению с первым рассматриваемым периодом (1979–1988 гг.).

Предсказуемость динамики концентрации общего азота $T_{\text{рг}}$ практически не меняется для Нарочи, незначительно уменьшается за третий период в Баторино и возрастает по сравнению с другими периодами в Мястро за второй период. Параметр P_d показывает одинаковую тенденцию к существенному уменьшению за третий период во всех озерах. Статистические характеристики (рис. 4) тоже имеют сходную для всех озер картину – уменьшение амплитуд колебаний за второй период и увеличение в третий, при этом в Нарочи медиана за третий период практически идентична с медианой за первый период. Медианы концентраций общего азота за третий период в озерах Мястро и Баторино также приближаются к значениям медиан за первый период. Можно сделать вывод, что такая гидроэкологическая характеристика, как концентрация общего азота, отражает сходную для озер динамику нагрузки по этому биогенному элементу, несмотря на разный трофический статус озер, разные размеры и разную скорость водообмена.

Для динамики концентрации общего углерода параметр $T_{\text{рг}}$ демонстрирует незначительный тренд к увеличению предсказуемости для озер Баторино и Мястро, тогда как изменения этого параметра для озера Нарочь незначительны. Параметр P_d не меняется для озера Мястро, слабо меняется для Нарочи и демонстрирует значительное уменьшение в Баторино для периода высокой антропогенной нагрузки. Разброс амплитуд колебаний концентрации углерода и ее медианные значения (рис. 5) для всех озер демонстрируют раз-

ные тенденции. Так, для Баторино медианные значения уменьшаются от этапа к этапу, в Нарочи демонстрируют незначительный тренд к постоянному увеличению, для Мястро медиана незначительно уменьшается во второй период и увеличивается за третий период. Можно сделать вывод, что концентрация общего углерода более чувствительна к отличиям основных характеристик между озерами, чем к одинаковым для всех озер внешним воздействиям и изменению общей антропогенной нагрузки.

Для динамики концентрации сестона параметр $T_{\text{рг}}$ демонстрирует незначительный тренд к увеличению предсказуемости для озер Баторино и Нарочь, тогда как изменения этого параметра для озера Мястро незначительны. Для динамики концентрации хлорофилла параметр $T_{\text{рг}}$ демонстрирует противоположный динамике концентрации сестона незначительный тренд к уменьшению предсказуемости для Баторино, похожий незначительный тренд к увеличению предсказуемости в Нарочи, изменения этого параметра для озера Мястро незначительны. Параметр P_d слабо меняется как для концентрации сестона, так и для концентрации хлорофилла для всех озер и периодов, кроме значительного уменьшения в озере Нарочь за третий период для концентрации сестона и значительного уменьшения за первый период в Мястро для концентрации хлорофилла. Статистические характеристики (рис. 6, 7) имеют сходную для всех озер картину – существенное уменьшение амплитуд колебаний за второй период и идентичные со вторым периодом амплитуды колебаний за третий период. Можно предположить, что реакция сестона и хлорофилла на внешние воздействия отражает с некоторым лагом ре-

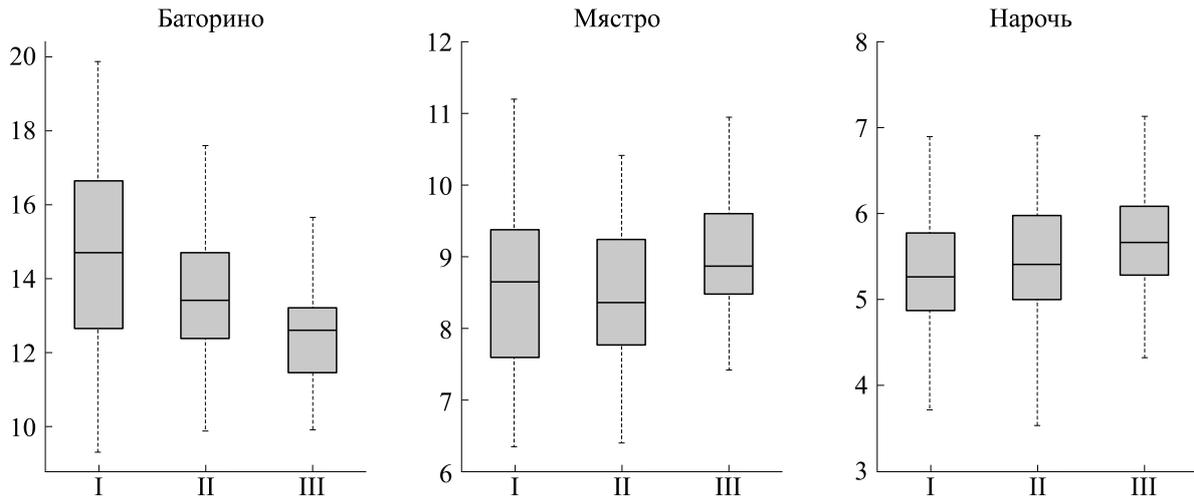


Рис. 5. Диаграммы размаха, характеризующие динамику концентраций (мг/л) общего углерода в озерах за периоды 1979–1988 гг. (I), 1993–2005 гг. (II), 2006–2018 гг. (III). Представлены медиана, верхний и нижний квартиль, наибольшее и наименьшее значения.

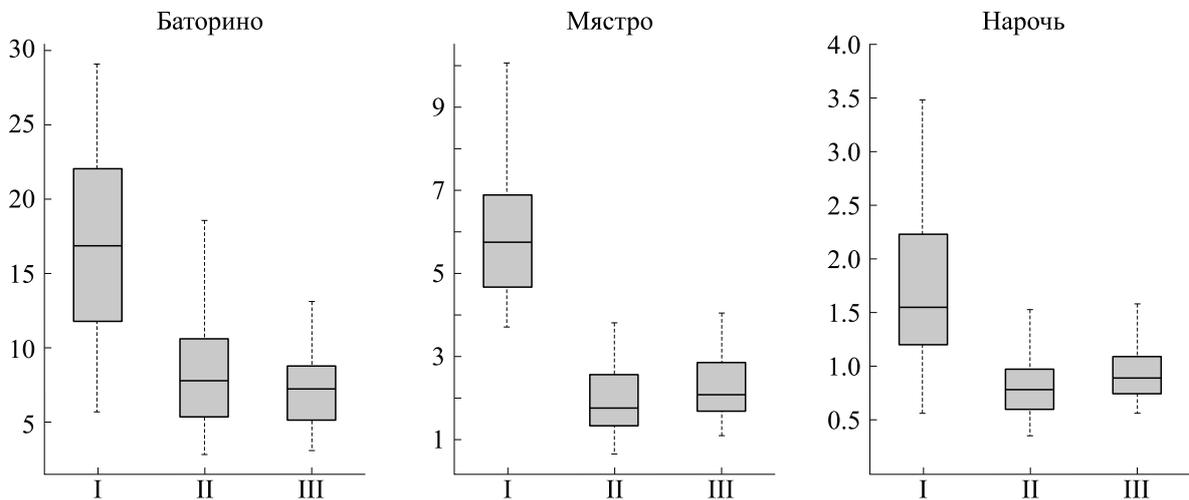


Рис. 6. Диаграммы размаха, характеризующие динамику концентраций (мг/л) сестона в озерах за периоды 1979–1988 гг. (I), 1993–2005 гг. (II), 2006–2018 гг. (III). Представлены медиана, верхний и нижний квартиль, наибольшее и наименьшее значения.

акцию других гидроэкологических характеристик, в особенности общего фосфора, на изменение внешних воздействий. Показано [1, 7], что фосфор является лимитирующим компонентом в экологической системе Нарочанских озер, что частично подтверждает такое предположение.

Изменение динамики биомассы фитопланктона является, наверное, самой интегральной из представленных гидрологических характеристик. К сожалению, данных о биомассе фитопланктона за первый период недостаточно, чтобы достоверно вычислить параметры T_{gr} и P_d , а также получить статистические характеристики за первый

период для озер Баторино и Мястро. Тем не менее из представленных рекуррентных характеристик видно, что только параметр P_d за третий период в озере Баторино существенно меньше, чем параметр P_d за предыдущий период, все остальные параметры показывают сходные значения. Динамика статистических характеристик биомассы фитопланктона (рис. 8) для всех озер сходна с динамикой статистических характеристик для сестона.

Таким образом, несмотря на то что в экологической системе Нарочанских озер в связи с изменением внешних условий, связанных с прекращением интенсивной сельскохозяйственной деятельно-

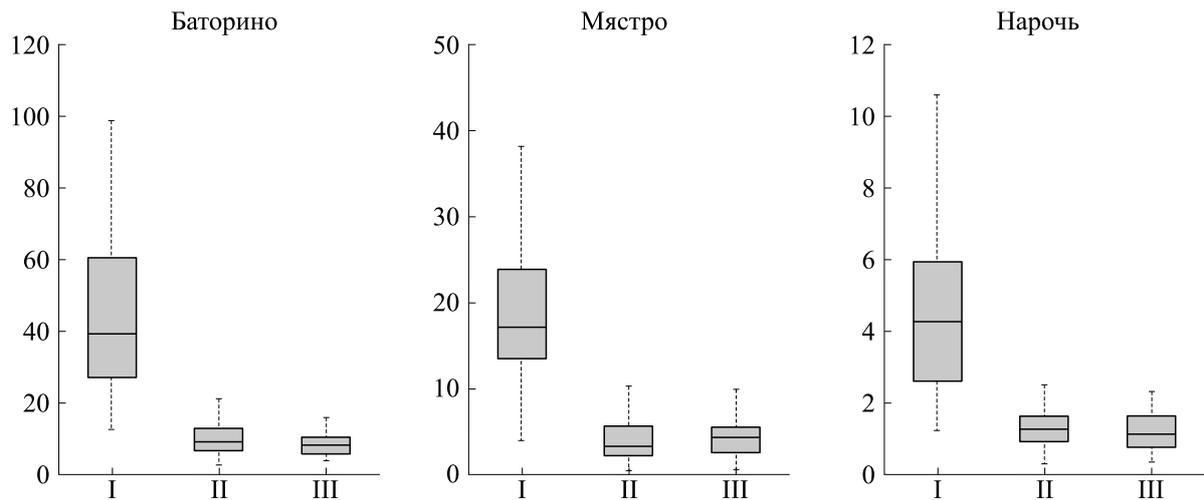


Рис. 7. Диаграммы размаха, характеризующие динамику концентраций (мкг/л) хлорофилла в озерах за периоды 1979–1988 гг. (I), 1993–2005 гг. (II), 2006–2018 гг. (III). Представлены медиана, верхний и нижний квартиль, наибольшее и наименьшее значения.

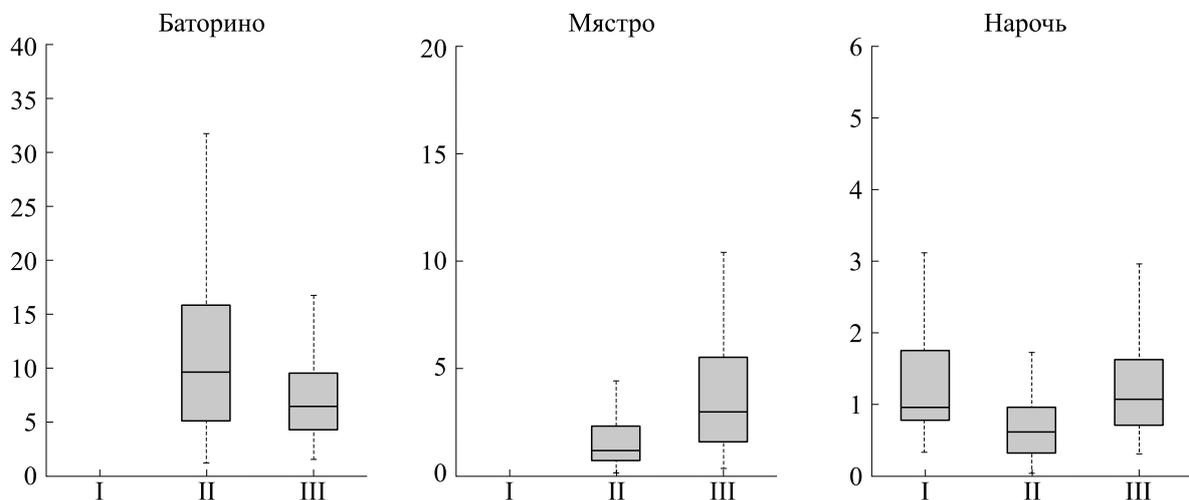


Рис. 8. Диаграммы размаха, характеризующие динамику концентраций (мг/л) биомассы фитопланктона в озерах за периоды 1979–1988 гг. (I), 1993–2005 гг. (II), 2006–2018 гг. (III). Представлены медиана, верхний и нижний квартиль, наибольшее и наименьшее значения.

сти, проведением мероприятий по экологическому оздоровлению и вселением моллюска-фильтратора произошли существенные изменения динамики гидробиологических характеристик по амплитуде (так, медианные значения концентраций общего фосфора, сестона и хлорофилла уменьшились в два и более раза), рекуррентные свойства динамики гидробиологических характеристик менялись незначительно. Постоянство характера динамики системы в плане предсказуемости говорит о ее качественной устойчивости к внешним воздействиям, сохранению устойчивых трофических связей и взаимодействий между гидробионтами. Детальное изучение механизмов таких взаимодействий и вли-

яния на них внешних факторов возможно, по-видимому, только с применением методов математического моделирования экологических систем, в частности, с помощью математических моделей, использующих данные полевых наблюдений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00381-21-00 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (научный проект № 20-54-00017) и Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (грант Б20Р–273).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. П. Остапеня, Т. В. Жукова, Т. М. Михеева и др., Труды БГУ, **7** (1), 135 (2012).
2. B. V. Adamovich, T. V. Zhukova, T. M. Mikheyeva, et al., J. Sib. Fed. Univ. Biol. **10** (4), 379 (2017).
3. Т. В. Жукова и А. П. Остапеня, Природные ресурсы (Межведомственный бюллетень), № 3, 68 (2000).
4. Т. В. Жукова, Водные ресурсы **40** (5), 468 (2013).
5. L. E. Burlakova, A. Yu. Karatayev, and D. K. Padilla, Hydrobiologia **571**, 133 (2006).
6. *Экологическая система Нарочанских озер*, под ред. Г. Г. Винберга (Университетское, Минск, 1985).
7. B. V. Adamovich, T. V. Zhukova, T. M. Mikheeva, et al., Water Resources **43** (5), 809 (2016).
8. A. B. Medvinsky, B. V. Adamovich, R. R. Aliev, et al., Ecol. Complexity **32**, 90 (2017).
9. Т. В. Жукова, Н. П. Радчикова, Т. М. Михеева и др., Биология внутренних вод, № 3, 250 (2017).
10. N. Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, and J. Kurths, Phys. Rep. **438**, 237 (2007).
11. А. В. Русаков, А. Б. Медвинский и Н. И. Нуриева, Биофизика **63** (4), 751 (2018).
12. Б. В. Адамович, Р. З. Ковалевская, Н. П. Радчикова и др., Биофизика **60**, 769 (2015).
13. D. Kaplan and L. Glass, *Understanding Nonlinear Dynamics* (Springer, New York, 1995).
14. H. Kantz and T. Schreiber, *Nonlinear Time Series Analysis* (Cambridge University, Cambridge, 1997).
15. S. P. Otto and T. Day, *A Biologist's Guide to Mathematical Modeling in Ecology and Evolution* (Princeton University, Princeton, 2007).

Stability of Recurrent Properties of the Hydrobiological Characteristics of a Lake Ecosystem in Response to the Contribution of Anthropogenic Influences

A.V. Rusakov*, B.V. Adamovich**, T.V. Zhukova**, R.Z. Kovalevskaya**, A.B. Medvinsky*, T.M. Mikheyeva**, N.I. Nurieva*, and N.P. Radchikova***, ****

*Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia

**Belarussian State University, prosp. Nezavisimosti 4, Minsk, 220030 Belarus

***Moscow Pedagogical State University, ul. Malaya Pirogovskaya 1/1, Moscow, 119991 Russia

****Moscow State University of Psychology and Education, ul. Sretenka 29, Moscow, 127006 Russia

This paper presents analysis of the long-term dynamics of hydroecological characteristics of the ecosystem of Naroch Lakes (Belarus) covering the period from 1979 to 2018. Over this period, because of the significant enhancement of human activities such as the implementation of measures to improve lake conditions and after the invasion of the shellfish *Dreissena polymorpha* Pallas, drastic changes have taken place on a catchment scale in the Naroch ecosystem. It is shown that anthropogenic activities have had some impacts on the lake ecosystem leading to significant changes in hydroecological characteristics, namely in the amplitude of concentration fluctuations, while predictability of the time series changed slightly.

Keywords: long-term dynamics, nutrient load, recurrence analysis, lake ecosystems