Сибирский экологический журнал, 1 (2021) 13–24

УДК 574.5.57.034.57.042.311
DOI 10.15372/SEJ20210102

Вклад солнечной радиации в многолетнюю динамику гидроэкологических параметров озерных экосистем с переменной нагрузкой биогенными элементами (на примере Нарочанских озер)

Т. И. КАЗАНЦЕВА[1*], Б. В. АДАМОВИЧ[2], Т. М. МИХЕЕВА[2], Т. В. ЖУКОВА[2], Р. З. КОВАЛЕВСКАЯ[2], В. Н. СОЛНЦЕВ

[1]*Зоологический институт РАН*
199034, С.-Петербург, Университетская наб., 1

[2]*Белорусский государственный университет*
220030, Минск, просп. Независимости, 4
[*]*E-mail: tamara.kazantseva@zin.ru*

Статья поступила 28.01.2020

После доработки 12.03.2020

Принята к печати 20.03.2020

АННОТАЦИЯ

Результаты непрерывного мониторинга системы Нарочанских озер, включающей в себя эвтрофное оз. Баторино, мезотрофное оз. Мястро и олигомезотрофное оз. Нарочь, были использованы для исследования вопроса о том, какие факторы в наибольшей степени влияют на многолетнюю динамику состояния озерной экосистемы, находящейся в условиях переменной нагрузки биогенными элементами. Совокупность непрерывных рядов среднесезонных значений восьми параметров каждой экосистемы за 1978–2015 гг. проанализирована методами сингулярных спектров (SSA) и главных компонент (PCA). Вторая главная компонента (F2), вклад которой в динамику экосистем озер Мястро, Баторино и Нарочь составил соответственно 15,3, 20,5 и 22,1 %, оказалась связанной только с тремя параметрами, отражающими процессы образования и разложения органического вещества. Сопоставление периодов доминирующих циклических составляющих главных компонент F2 и связанных с ними параметров экосистем позволило интерпретировать стоящий за этими компонентами второй главный фактор как активность солнечного излучения.

Ключевые слова: озерные экосистемы, многолетняя динамика, трофический статус, циклические компоненты, метод PCA, метод SSA, интерпретация главных факторов, Нарочанские озера.

Многолетние наблюдения за характеристиками различных водных экосистем не только позволяют описать текущее состояние конкретной экосистемы, но и становятся базой для выявления общих закономерностей развития водных экосистем [George et al., 2007; Остапеня и др., 2012; Lake Kinneret..., 2014; Oneida Lake..., 2016; Adamovich et al., 2017; Kovalenko et al., 2018; Pérez-Ruzafa et al., 2019]. Система Нарочанских озер является идеальным модельным объектом для установления таких закономерностей. Три озера, связанных между собой протоками, имеют разные морфометрию и трофический статус,

© Казанцева Т. И., Адамович Б. В., Михеева Т. М., Жукова Т. В., Ковалевская Р. З., Солнцев В. Н., 2021

находятся под влиянием одних и тех же климатических условий и по-разному реагируют на естественное или антропогенное изменение условий среды. Эти экосистемы изучаются с 40-х годов XX в. Во второй половине XX в. на фоне естественных климатических колебаний они подверглись антропогенному эвтрофированию, целенаправленной деэвтрофикации и вселению моллюска-фильтратора *Dreissena polymorpha* Pallas, что дало толчок развитию в них процесса бентификации [Жукова, Остапеня, 2000; Остапеня и др., 2012; Жукова, 2013а, б; Adamovich et al., 2017]. До 80-х годов XX в. оз. Баторино имело статус высокоэвтрофного, оз. Мястро – эвтрофного, оз. Нарочь – мезотрофного [Экологическая система..., 1985]. В настоящее время трофический статус всех трех озер понизился до эвтрофного, мезотрофного и олиго-мезотрофного соответственно [Адамович и др., 2016]. С 1978 г. по настоящее время наблюдения за озерами ведутся регулярно на протяжении вегетационного сезона и охватывают основные гидроэкологические показатели состояния экосистем всех трех озер [Бюллетень..., 1999–2018]. 38-летние (1978–2015) ряды среднесезонных значений восьми характеристик каждой экосистемы Нарочанской группы озер послужили основой для исследования вопроса о том, какие факторы внешней или внутренней среды в наибольшей степени определяют долговременную динамику состояния озерной экосистемы. Для решения этой задачи проведен факторный анализ методом главных компонент (PCA) совокупности рядов семи биотических показателей каждой экосистемы, полностью формирующихся внутрисистемными процессами. Кроме того, методом анализа сингулярных спектров (SSA) [Vautard, Ghil, 1989; Golyandina et al., 2001; Zhigljavsky, Golyandina, 2013] все восемь рядов исходных данных и каждая главная компонента были разложены на долговременный тренд, несколько циклических составляющих и некоторый остаток. Результаты такого разложения и биологическая интерпретация первой главной компоненты были описаны в наших предыдущих публикациях [Казанцева и др., 2018, 2019]. Первый главный фактор, соответствующий первой главной компоненте и определявший динамику экосистем озер Нарочь, Мястро и Баторино в 1978–2015 гг. на 43, 65 и 63 % соответственно, интерпретирован нами как устойчивость озерной экосистемы к переменной биогенной нагрузке, находящаяся в обратной зависимости от степени трофности водоема.

Данная статья посвящена интерпретации второй главной компоненты.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Нарочанская озерная система представляет собой цепочку из трех последовательно связанных протоками озер Баторино, Мястро и Нарочь. Морфометрические и гидрологические характеристики озер представлены в табл. 1.

Исходными данными для описываемого исследования послужили непрерывные ряды средних за вегетационные сезоны 1978–2015 гг. значений следующих характеристик озер Баторино, Мястро и Нарочь в интегральных пробах, отражающих средний состав озерной воды с учетом батиметрической составляющей: концентрация общего фосфора (P_{tot}, мг·л$^{-1}$), биохимическое потребление кислорода за 5 суток (BOD_5, мг O_2·л$^{-1}$), концентрация хлорофилла *a* (Chl *a*, мкг·л$^{-1}$), биомасса фитопланктона (B_{phyto}, мг·л$^{-1}$), биомасса зо-

Таблица 1

Основные характеристики Нарочанских озер (по: [Бюллетень..., 1999–2018])

Показатель	Баторино	Мястро	Нарочь
Площадь водного зеркала, км^2	6,3	13,1	79,6
Объем водной массы, 10^6 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
Удельный водосбор	14,7	10,2	3,5

опланктона (B_{zoo}, мг·л$^{-1}$), концентрация сестона (Seston, мг·л$^{-1}$), первичная продукция (A_{opt}, мг С·м$^{-3}$·сут$^{-1}$) и аэробная деструкция (D_{opt}, мг С·м$^{-3}$·сут$^{-1}$) в интегральных пробах воды, экспонируемых на глубине оптимального фотосинтеза (30–50 см). Полные таблицы исходных данных, а также методики, использованные для их получения, приведены в предыдущей публикации [Казанцева и др., 2019].

Таблица 2

Вклад главных компонент F1–F5 (%) в общую дисперсию совокупности параметров экосистем Нарочанских озер

Озеро	F1	F2	F3	F4	F5	Сумма
Баторино	62,9	20,5	8,2	4,7	–	96,3
Мястро	65,1	15,3	9,8	5,1	–	95,3
Нарочь	42,7	22,1	13,3	9,0	7,1	94,2

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методом РСА проанализирована совокупность 38-летних рядов семи биотических параметров экосистемы каждого озера. В анализ не был включен параметр P_{tot}, так как он отражает не только внутрисистемные процессы, но и внешнее антропогенное воздействие, результатом которого на протяжении рассматриваемого нами периода времени стало сначала эвтрофирование, а потом деэвтрофирование всех трех экосистем. В результате анализа для каждой экосистемы выделено 7 взаимно независимых и взаимно ортогональных главных компонент, из которых 4–5 практически полностью отражают динамику исходных переменных (табл. 2).

Компонента F2 определила общую динамику каждой экосистемы на 15–22 %, F3 – примерно на 10 %. Для озер Баторино и Мястро вкладом компоненты F4 уже можно пренебречь, однако для оз. Нарочь не только F4, но и F5 являются значимыми, если считать значимыми те компоненты, сумма вкладов которых в общую дисперсию системы составляет не менее 90 %. Так как каждая главная компонента является отражением какого-то фактора, влияющего на экосистему, можно сказать, что чем ниже трофность озера, тем большее число факторов определяет текущее состояние экосистемы.

Отдельные параметры вносят разный вклад в формирование главных компонент в различных озерах (табл. 3). Соответственно, и главные компоненты (факторы) в разных озерах оказывают разное влияние на одноименные характеристики экосистемы (табл. 4, столбец *D*).

Как следует из табл. 3 и 4 (столбец *D*), во всех трех озерах компонента F2 значимо связана с одними и теми же параметрами $A_{орт}$, D_{opt} (кроме оз. Мястро) и BOD_5 (оз. Нарочь). Об этом свидетельствуют и коэффициенты корреляции между главными компонентами F2 и параметрами трех экосистем (см. табл. 4, столбец *K*). В оз. Мястро статистическая связь F2 с определяющим его параметром положительна, в озерах Баторино и На-

Таблица 3

Вклады переменных (доли от 1) в главные компоненты F2–F5 Нарочанских озер

Параметр	F2			F3			F4			F5
	Б	М	Н	Б	М	Н	Б	М	Н	Н
Chl *a*	–	–	–	–	–	–	–	–	0,19	0,19
B_{phyto}	–	–	–	0,15	–	0,54	0,26	0,51	0,35	–
$A_{орт}$	0,62	0,84	0,33	–	0,15	–	0,28	–	–	0,16
D_{opt}	0,26	–	0,51	–	0,45	–	0,35	–	–	0,14
B_{zoo}	–	–	–	0,72	0,36	–	–	0,20	–	0,50
Seston	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
BOD_5	–	–	0,14	0,11	–	0,36	–	0,19	0,38	–

Примечание. Прочерк соответствует значению, меньшему 0,1. Здесь и далее в таблицах Б – Баторино; М – Мястро; Н – Нарочь.

Таблица 4

Доля дисперсии параметров, объясняемая главными компонентами F2 (*D*), и значимые коэффициенты корреляции между главными компонентами F2 и параметрами (*K*) экосистем Нарочанских озер

Параметр	*D*			*K*		
	Б	М	Н	Б	М	Н
Chl *a*	–	–	–			
B_{phyto}	–	–	–			
A_{opt}	0,89	0,90	0,51	$-0{,}94^{**}$	$0{,}94^{**}$	$-0{,}71^{*}$
D_{opt}	0,37	–	0,78	$-0{,}61^{*}$		$-0{,}89^{*}$
B_{zoo}	–	–	–			
Seston	–	–	–			
BOD_5	–	–	0,22			$-0{,}47^{**}$

Примечание. Прочерк соответствует значению, меньшему 0,1.

$^{*}p < 0{,}001$; $^{**}p < 0{,}01$.

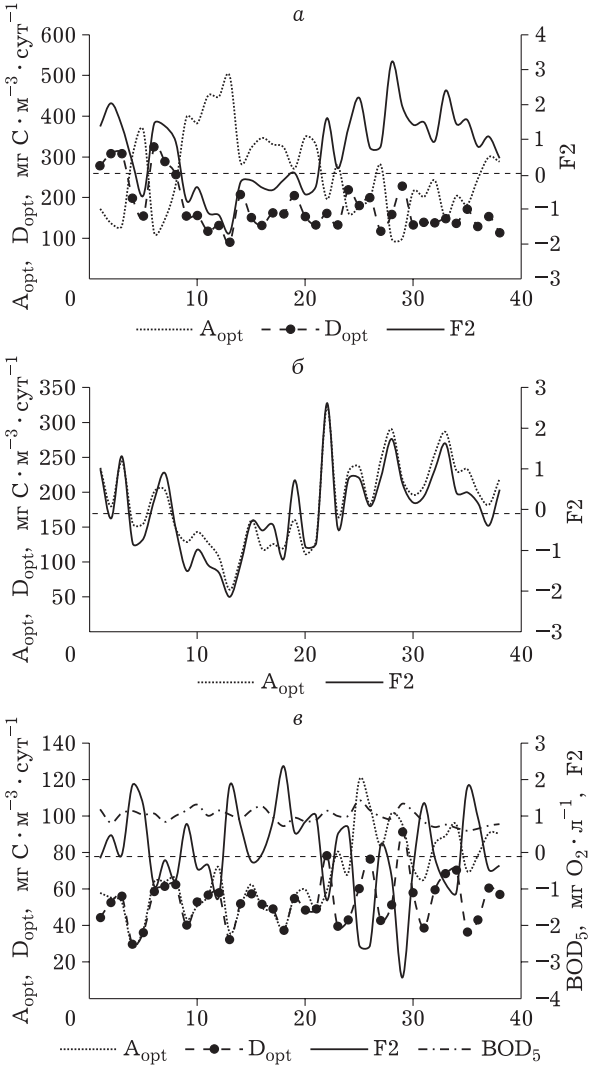

Рис. 1. Динамика главной компоненты F2 и связанных с ней параметров экосистем. *а* – оз. Баторино; *б* – оз. Мястро; *в* – оз. Нарочь. По осям абсцисс – период наблюдений, лет

рочь – отрицательна. Связи между самими параметрами положительны (табл. 5). Динамика главной компоненты F2 и определяющих ее параметров на протяжении рассматриваемого периода времени представлена на рис. 1.

В оз. Мястро динамика F2 практически повторяет динамику A_{opt}. В озерах Баторино и Нарочь F2 и связанные с ним параметры изменяются в противоположном направлении.

В нашей предыдущей работе [Казанцева и др., 2019] описаны результаты анализа 38-летних рядов рассматриваемых характеристик трех Нарочанских озер методом SSA. Показано, что в динамику большинства показателей, в том числе A_{opt} и D_{opt}, максимальный после тренда вклад вносят циклические составляющие с периодами, равными или близкими к 22 годам. Однако период доминирующих колебаний в динамике главных компонент F2 озер Баторино и Мястро по единственному наблюдаемому полному циклу визуально можно оценить в 32–33 года (рис. 2, табл. 6).

Таблица 5

Коэффициенты корреляции между параметрами, связанными с главной компонентой F2

Параметр	Б	М	Н
(A_{opt}, D_{opt})	$0{,}41^{**}$	–	0.56^{*}
(A_{opt}, BOD_5)	–	–	–
(D_{opt}, BOD_5)	–	$0{,}76^{*}$	0,21

Примечание. $^{*}p < 0{,}001$; $^{**}p < 0{,}01$.

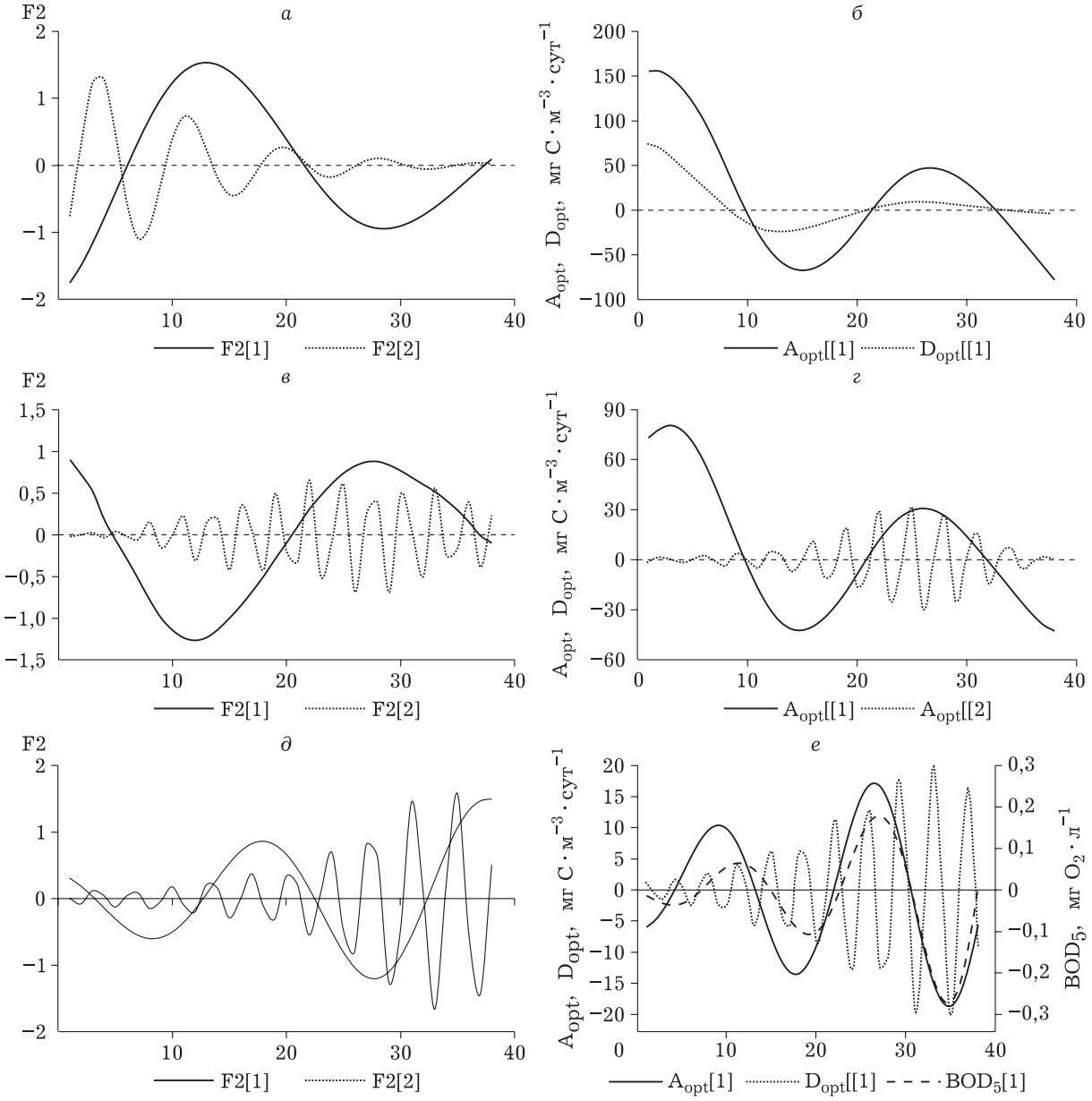

Рис. 2. Доминирующие колебания главной компоненты F2 и связанных с ней параметров экосистем озер Баторино (*а*, *б*), Мястро (*в*, *г*) и Нарочи (*д*, *е*). [1] – колебание с наибольшим вкладом в динамику F2 или параметра; [2] – второе по значимости вклада колебание. По осям абсцисс – период наблюдений, лет

Таблица 6

Периоды (годы) доминирующих циклов главной компоненты F2 и связанных с ней параметров экосистем Нарочанских озер

Показатель	Б		М		Н	
	[1]	[2]	[1]	[2]	[1]	[2]
F2	32 (62)	8 (13)	33 (47)	3 (14)	20 (34)	4 (24)
A_{opt}	22	3	22	3	18	4
D_{opt}	22	6			4	5
BOD_5					15	3

Примечание. [1], [2] – первая и вторая по значимости вклада в динамику параметра составляющие. В скобках – процент вклада в динамику показателя.

ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные результаты исследования главных компонент F2 сводятся к следующим основным фактам:

1. Для всех трех экосистем компоненты F2 значимо связаны только с параметрами A_{opt}, D_{opt} и BOD_5, которые характеризуют процессы образования и разложения (окисления) органического вещества. Значительный вклад в динамику параметров A_{opt} всех трех озер и D_{opt} оз. Баторино внесли колебания с периодом, равным или близким к 22 годам.

2. В рассматриваемый период времени F2 оз. Мястро и двух других озер изменялись в противоположных направлениях. Также вели себя их доминирующие циклические составляющие, вносящие от 34 до 62 % вклада в их динамику.

3. Периоды доминирующих колебаний F2 оцениваются в 20 (оз. Нарочь) и 32–33 (оз. Баторино и Мястро) года.

4. Периоды колебаний, обнаруженных в динамике главных компонент F2 и связанных с ними параметров Нарочанских озер, ассоциируются с периодами солнечных циклов*.

Эти факты дают основание предположить, что фактором, стоящим за главной компонентой F2 (будем называть его главным фактором F2), является солнечное излучение, без которого невозможен фотосинтез, обеспечивающий образование большей части органического вещества на Земле.

Кроме общеизвестных и наиболее часто упоминаемых 11- и 22-летних циклов солнечной активности в солнечном излучении выделяются и другие циклы, в частности цикл Брикнера с переменным периодом, в среднем равным 35 годам. Этот цикл был выделен Э. Брикнером (Eduard Brückner)** по многолетним климатологическим и гляциологическим данным [Brückner, 1886, 1890]. Существование цикла Брикнера неоднократно подтверждено другими исследователями [Костин, 1965; Brönnimann, 2015], в том числе в области гидрологии [Калесник, 1968; Голяндина и др., 1997].

Изменение солнечной активности во второй половине XX – начале XXI в. (циклы Швабе) показано на рис. 3 [SILSO data/image, Royal Observatory of Belgium, Brussels (http://sidc.be\silso)]. На этот же график наложены кривые доминирующих колебаний компоненты F2 трех озер. Нельзя ожидать полной синхронности циклов в динамике F2 и циклов солнечной активности. Факторы F2, определяемые продукционными и деструкционными процессами, связаны не только с солнечной энергией, но и с обеспеченностью биогенными элементами, температурой, активностью бактерий и другими характеристиками экосистем. Однако отдельные совпадения наблюдаются. Наибольшее число совпадений периодов одноименных экстремумов отмечено для оз. Баторино. Имеются такие совпадения и для оз. Нарочь. А в оз. Мястро, наоборот, максимум солнечной активности соответствует минимальному воздействию фактора F2.

Более четкое соответствие наблюдается между циклами солнечной активности и потенциальной первичной продукции A_{opt} (рис. 4). Совпадает и общая тенденция снижения солнечной активности [Гвишиани и др., 2015] и амплитуды колебаний A_{opt} [1] экосистем Баторино и Мястро в период 21–24 солнечных циклов.

Посмотрим теперь, насколько выдвинутая нами гипотеза согласуется с отмеченными выше фактами. Примем во внимание следующие обстоятельства:

1. Как следует из табл. 7, в оз. Баторино водная масса за год почти полностью обновляется, причем 62 % общего объема составляет приток с водосбора и 67 % стекает

---

* Солнечными циклами называются периодические изменения солнечной активности [Витинский и др., 1986; Haigh, 2007]. Видимым проявлением изменения солнечной активности является изменение числа солнечных пятен, поэтому для количественной оценки солнечной активности чаще всего применяют усредненное за год число Вольфа $W = k(f + 10g)$, где f – число наблюдаемых солнечных пятен; g – число наблюдаемых групп солнечных пятен; k – нормировочный коэффициент, свой для каждого прибора и каждого наблюдателя. Наиболее заметно выраженным является 11-летний цикл ("цикл Швабе" или "цикл Швабе – Вольфа"). "Одиннадцатилетним" цикл называют условно: его длина за XVIII–XX вв. менялась от 7 до 17 лет, а в XX в. в среднем была ближе к 10,5 года. Для того чтобы в ходе изменений активности к исходному состоянию вернулось магнитное поле Солнца, должно пройти два 11-летних цикла, поэтому выделяют еще 22-летний цикл ("цикл Хейла"). 11-летние циклы нумеруются, начиная с минимума 1755 г. Рассматриваемый нами период приходится на 21–24 циклы. Существуют и солнечные циклы других периодов.

** "Нужно писать именно Брикнер, как писал по-русски он сам, а не Брюкнер" [Хромов С. П., Мамонтова Л. И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеоиздат, 1974].

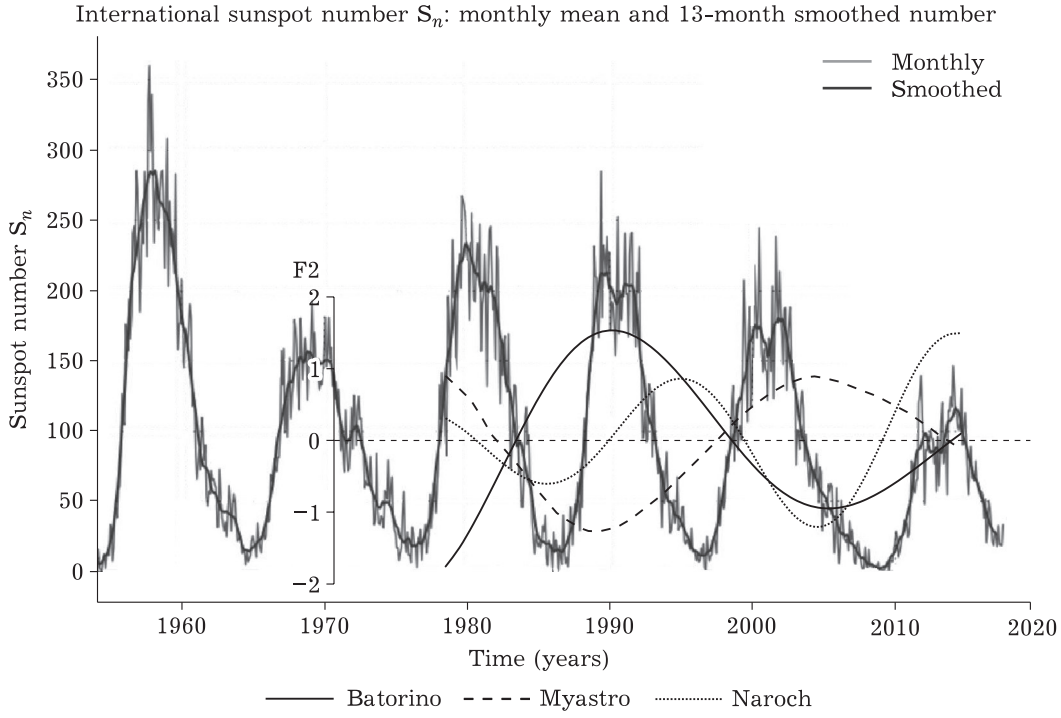

Рис. 3. Сопоставление солнечных циклов и доминирующих колебаний главных компонент F2

в оз. Мястро. Таким образом, можно считать, что состав и качество воды оз. Баторино определяются боковым притоком, атмосферными осадками и внутренними процессами текущего года. В оз. Мястро ежегодный приток воды из оз. Баторино составляет 18 % общего объема, что в 1,5 раза превосходит боковой и подземный притоки, вместе взя-

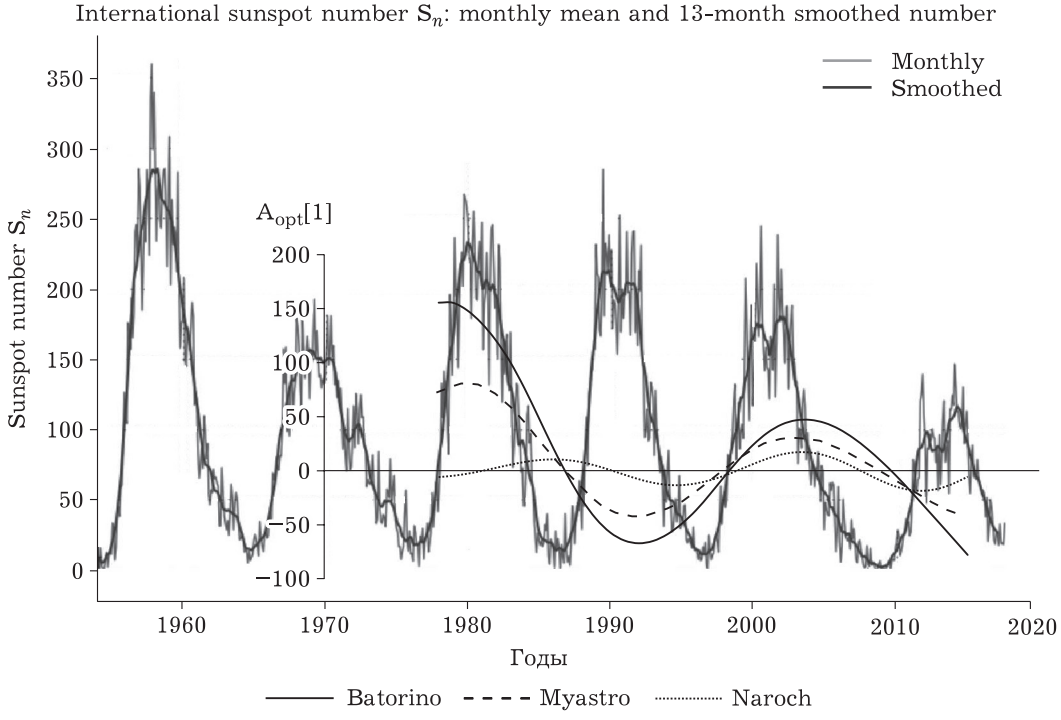

Рис. 4. Сопоставление циклов солнечной активности и доминирующих циклов [1] в динамике A_{opt} Нарочанских озер

Таблица 7

Водный баланс Нарочанских озер (данные озерной станции "Нарочь" (по: [Жукова, 1987])

Объем водной массы, 10^6 м^3	оз. Баторино		оз. Мястро		оз. Нарочь	
	18,7		70,0		710,4	
Статья баланса	10^6 м^3·год$^{-1}$	Доля от объема	10^6 м^3·год$^{-1}$	Доля от объема	10^6 м^3·год$^{-1}$	Доля от объема
ПРИХОД						
Осадки на зеркало озера	4,91	0,26	9,70	0,14	55,87	0,08
Приток из вышележащего озера	–	–	12,61	0,18	23,56	0,03
Боковая приточность	11,52	0,62	5,48	0,08	8,42	0,01
Приток подземных вод	–	–	2,49	0,04	7,73	0,01
Итого	**16,43**	**0,88**	**30,28**	**0,43**	**95,58**	**0,13**
РАСХОД						
Сток из озера	12,61	0,67	23,56	0,34	52,20	0,07
Испарение	3,40	0,18	7,25	0,10	43,78	0,06
Итого	**16,01**	**0,85**	**30,81**	**0,13**	**95,98**	**0,13**

тые. Время оборота воды в оз. Мястро равно 2,5 года, поэтому влияние оз. Баторино на состав воды в оз. Мястро достаточно заметно (примерно 25 % всего объема воды – это вода из оз. Баторино). В оз. Нарочь вода, поступающая из разных источников, составляет всего 13 % водной массы, поэтому при времени водообмена 7,4 года (по данным табл. 7)* состав воды определяется в основном внутренними процессами в экосистеме.

2. Хотя вселение *Dreissena polymorpha* в Нарочанские озера началось с озер Баторино и Мястро, наиболее благоприятными по характеру субстратов для ее поселения оказались условия в оз. Мястро. Поэтому в Мястро дрейссена достигла наибольшего уровня развития и оказывает наибольшее влияние на экосистему. Благодаря высокой фильтрационной активности дрейссена способствует очищению воды от взвеси, тем самым: а) увеличивая прозрачность воды; б) снижая концентрацию вновь образованного органического вещества; в) влияя на ранний диагенез донных отложений. Продукты жизнедеятельности дрейссены пополняют запасы биодоступных биогенов в водоеме, т. е. способствуют процессу образования первичной продукции.

Фактор F2 связан с условиями, необходимыми для фотосинтеза, в первую очередь с солнечной радиацией. Это подтверждается сильной корреляционной связью F2 с A_{opt} во всех озерах (соответственно –0,94, 0,94 и –0,71 в озерах Баторино, Мястро и Нарочь), а также наличием в динамике F2 всех трех озер доминирующих колебаний с периодами, близкими к периодам солнечной активности.

В оз. Баторино, наиболее мелком, прогреваемом и эвтрофированном, усиление солнечной активности по сравнению с оптимальным для этого озера уровнем ведет к уменьшению прозрачности и угнетению фотосинтеза, а ослабление, наоборот, создает для него более благоприятные условия. Этим объясняется противоположный ход динамики F2 и A_{opt}, а также отрицательная корреляция между ними. Влияние дрейссены на изменение прозрачности воды минимально, так как структура дна в Баторино неблагоприятна для развития дрейссены. Все автохтонное органическое вещество остается в озере, перетекая частично в оз. Мястро.

В оз. Нарочь подобный эффект наблюдается в менее выраженной степени. Влияние дрейссены также мало из-за большой площади, большой глубины пелагиали и мелкоразмерности моллюсков [Жукова, 2013б]. Возможными факторами, лимитирующими первичную продукцию, может быть недостаток биодоступных биогенных соединений (фосфатов и нитратов), а также угнетение фотосинтетической активности водорослей ультрафиолетовой радиацией. Созданное органическое

* Значение 7,4 года отличается от указанного в табл. 1 (10–11 лет). Это расхождение можно объяснить сложностью и приближенностью оценок разных статей водного баланса оз. Нарочь, которые могли быть сделаны в разные годы. Для данного исследования это обстоятельство не является существенным.

вещество накапливается в озере благодаря низкой скорости водообмена.

В оз. Мястро фотосинтез (A_{opt}) практически полностью следует за фактором F2. Корреляция между ними высока и положительна. Остальные показатели (из рассмотренных) с F2 никак не связаны. Дрейссена развивается в большом количестве и активно фильтрует воду, очищая ее от избытков органического вещества и создавая благоприятные условия для фотосинтеза. Лимитирование продукционного процесса фосфатами здесь, как правило, не происходит.

Величина D_{opt} показывает, какое количество кислорода использовано за одни сутки на окислительные процессы всего органического вещества, содержащегося в темной склянке при реальной температуре на глубине оптимального фотосинтеза. А там, помимо фитопланктона, содержатся другие организмы (бактерии, зоопланктон), а также неживое органическое вещество различного происхождения (авто- или аллохтонное) на разных стадиях разложения. Наличие положительной связи между D_{opt} и A_{opt} может говорить о том, что значительная часть всего этого вещества является результатом фотосинтеза, и эта часть в течение первых суток активно участвует в процессах, идущих с участием кислорода. Так происходит в оз. Баторино ($r(A_{opt}, D_{opt}) = 0{,}42$) и оз. Нарочь ($r(A_{opt}, D_{opt}) = 0{,}56$). Если же D_{opt} не коррелирует с A_{opt}, это может означать, что вклад продукции фотосинтеза в общее количество органики в озере настолько мал, что ее доля в суточном поглощении кислорода практически не заметна. Так происходит в оз. Мястро ($r(A_{opt}, D_{opt}) = 0{,}07$). Следовательно, основная часть общего органического вещества в оз. Мястро не является результатом текущего фотосинтеза, а поступает из других источников, в частности, из оз. Баторино (18 % всего объема воды в год) и от дрейссены, которая с большой скоростью перерабатывает взвешенное органическое вещество (его оборачиваемость в оз. Мястро составляет 24 раза за сезон* [Жукова, 2013б]).

При положительной корреляции между A_{opt} и D_{opt} и отрицательной корреляции между F2 и A_{opt} в озерах Баторино и Нарочь корреляции между F2 и D_{opt} тоже отрицательны: ($r(A_{opt}, D_{opt}) = -0{,}61$ в Баторино и ($r(A_{opt}, D_{opt}) = -0{,}89$ в Нарочи.

Величина BOD_5 показывает, сколько кислорода использовано на различные окислительные процессы в темных склянках за 5 суток при температуре 20 °С. Здесь уже можно ожидать, что фотосинтезирующие клетки за это время либо погибли, либо перешли в неактивное состояние, и значение BOD_5 определяется количеством и скоростью разложения остального органического вещества (включая дыхание бактерий и зоопланктона). Поэтому значение $r(D_{opt}, BOD_5)$ показывает, в какой степени поглощение кислорода за 5 суток при температуре 20 °С связано с поглощением кислорода за одни сутки при реальной температуре, т. е. в какой степени органическое вещество, не участвующее в фотосинтезе, определяло суточную деструкцию. Наименьшее значение ($r(D_{opt}, BOD_5) = 0{,}21$) оказалось в оз. Нарочь, в котором создаваемое в процессе фотосинтеза органическое вещество в сравнительно небольшой степени подвергается фильтрации дрейссеной, а доля поступающего аллохтонного вещества мала. В оз. Нарочь BOD_5 входит в число параметров, формирующих фактор F2 ($r(F2, BOD_5) = -0{,}47$). Среднее по величине значение $r(D_{opt}, BOD_5) = 0{,}56$ отмечено в оз. Баторино, в котором накапливаются большие количества фитомассы, быстро теряющей активность, и велика доля аллохтонного органического вещества. Самое большое значение $r(D_{opt}, BOD_5) = 0{,}76$ – в оз. Мястро, в котором активные фотосинтезирующие клетки быстро поглощаются дрейссеной и в то же время происходит непрерывное пополнение органического вещества из оз. Баторино.

Таким образом, все отмеченные факты находят свое объяснение и не вступают в противоречие с выдвинутой гипотезой.

ВЫВОДЫ

1. В период 1978–2015 гг. главный фактор F2 вносит 15,3, 20,5 и 22,1 % вклада в общую динамику состояния экосистем озер Мястро, Баторино и Нарочь соответственно. В оз. Мястро F2 связан с одним параметром – A_{opt}, в оз. Баторино – с двумя параметрами: A_{opt} и D_{opt},

* В оз. Баторино оборачиваемость взвешенного органического вещества составляет 16, в оз. Нарочь – 10 раз за сезон.

в оз. Нарочь – с тремя параметрами: A_{opt}, D_{opt} и BOD_5. Все эти параметры характеризуют процессы образования и разложения органического вещества в экосистеме водоема.

2. Доминирующие циклические составляющие динамики фактора F2 всех трех экосистем имеют периоды, близкие или равные 22 и 32 годам. Колебания таких же периодов отмечены в динамике потенциальной продуктивности A_{opt} трех экосистем. Сопоставление этих колебаний с известными циклами солнечной активности в период 1978–2015 гг. дает основание предположить, что вторым по степени влияния на экосистемы Нарочанских озер фактором является солнечная радиация.

3. При анализе функциональных и статистических связей между фактором F2 и связанными с ним параметрами, с одной стороны, и между самими параметрами каждой экосистемы, с другой стороны, были учтены такие важные характеристики экосистем, как водный баланс и развитие моллюска-фильтратора *Dreissena polymorpha* Pallas, вселившегося в Нарочанские озера в середине 80-х годов XX в. Анализ позволил объяснить противоположную направленность динамики F2 и A_{opt} в экосистемах Баторино и Нарочи и одинаковую направленность этих процессов в экосистеме оз. Мястро. Таким образом, было частично объяснено замеченное ранее функциональное отличие оз. Мястро от двух других озер [Adamovich et al., 2017].

4. Проведенный анализ не выявил противоречий между известными фактами и выдвинутой гипотезой. Таким образом, мы предполагаем, что вторым главным фактором, влиявшим на экосистемы Нарочанских озер в период 1978–2015 гг. и внесшим от 15 до 22 % вклада в их динамику, является активность солнечного излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-54-00003) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Б18Р-095), а также частично в рамках гостемы № АААА-А19-119020690091-0.

ЛИТЕРАТУРА

Адамович Б. В., Жукова Т. В., Михеева Т. М., Ковалевская Р. З., Лукьянова Е. В. Многолетние изменения индекса трофического состояния Нарочанских озер и его связь с основными гидроэкологическими параметрами // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 5. С. 535–543. doi: 10.7868/S0321059616050023 [Adamovich B. V., Zhukova T. V., Mikheeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Luk'yanova E. V. Long-Term Variations of the Trophic State Index in the Narochanskie Lakes and Its Relation with the Major Hydroecological Parameters // Water Resources. 2016. Vol. 43, N 5. P. 809-817. doi:10.1134/S009780781605002X].

Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мястро, Баторино (1999–2018 гг.) / Т. В. Жукова, Т. М. Михеева, Р. З. Ковалевская и др.; под ред. А. П. Остапени, Т. М. Михеевой. Минск: БГУ, 1999–2018.

Витинский Ю. И., Копецкий М., Куклин Г. В. Статистика пятно-образовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. 298 с.

Гвишиани А. Д., Старостенко В. И., Сумарук Ю. П., Соловьев А. А., Легостаева О. В. Уменьшение солнечной и геомагнитной активности с 19-го по 24-й цикл // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 3. С. 314–322. doi: 10.7868/S0016794015030098

Голяндина Н. Э., Солнцев В. Н., Филатова Т. Н., Яани А. Э. Исследование периодических компонент в динамике гидрологических показателей // Главные компоненты временных рядов: метод "Гусеница" / под ред. Д. Л. Данилова, А. А. Жиглявского. СПб.: ПРЕСКОМ, 1997. С. 289–301.

Жукова Т. В. Роль биогенных веществ в биотическом круговороте и эвтрофировании Нарочанских озер: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Киев, 1987. 23 с.

Жукова Т. В. Многолетняя динамика фосфора в Нарочанских озерах и факторы, ее определяющие // Водные ресурсы. 2013а. Т. 40, № 5. С. 468–476. doi: 10.7868/S0321059613050088 [Zhukova T. V. Long-Term Dynamics of Phosphorus in the Narochanskie Lakes and Factors Determining It // Water Resources. 2013a. Vol. 40, N 5. P. 510–517. doi: 10.1134/S0097807813050072].

Жукова Т. В. Роль дрейссены (Dreissena polymorpha Pallas) в функционировании Нарочанских озер (обзор) // Дрейссениды: эволюция, систематика, экология / под ред. А. В. Крылова, Е. Г. Пряничниковой. Ярославль: Канцлер, 2013б. С. 55–59.

Жукова Т. В., Остапеня А. П. Оценка эффективности природоохранных мероприятий на водосборе Нарочанских озер // Природ. ресурсы (Межвед. бюл.). 2000. № 3. С. 68–73.

Казанцева Т. И., Адамович Б. В., Алимов А. Ф., Жукова Т. В., Солнцев В. Н. Анализ динамики гидроэкологических показателей оз. Нарочь методом Singular Spectrum Analysis по данным 1978–2015 гг. // Экология. 2018. № 1. С. 3–16. doi: 10.7868/S0367059718010018 [Kazantseva T. I., Adamovich B. V., Alimov A. F., Zhukova T. V., Solntsev V. N. Singular Spectrum Analysis of Hydroecological Parameter Dynamics of Lake Naroch' in the Years 1978–2015 // Rus. J. Ecol. 2018. Vol. 49, N 1. P. 1–13. doi: 10.1134/S1067413618010071].

Казанцева Т. И., Адамович Б. В., Алимов А. Ф., Михеева Т. М., Жукова Т. В., Ковалевская Р. З., Солнцев В. Н. Главный фактор, определяющий динамику озерной экосистемы при избыточной нагрузке биогенами (на примере Нарочанских озер) // Сиб. экол. журн. 2019. № 6. С. 668–687. doi: 10.15372/SEJ20190604 [T. I. Kazantseva, B. V. Adamovich, A. F. Alimov, T. M. Mikheyeva, T. V. Zhukova, R. Z. Kovalevskaya, V. N. Solntsev. The Main Factor Determining the Dynamics of the Lake Ecosystem under Excessive Nutrient

Loading (A Case Study of the Naroch Lakes) // Contemporary Problems of Ecology. 2019. Vol. 12, N 6. P. 544–561. doi: 10.1134/S1995425519060052].

Калесник С. В. Ладожское озеро. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 160 с.

Костин С. И. Колебания климата на Русской равнине в историческую эпоху // Тр. Гл. Геофиз. Обсерватории им. А. И. Воейкова. Вып. 181. Вопросы общей и синоптической климатологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 182 с.

Остапеня А. П., Жукова Т. В., Михеева Т. М., Ковалевская Р. З., Макаревич Т. А., Жукова А. А., Лукьянова Е. В., Никитина Л. В., Макаревич О. А., Дубко Н. В., Карабанович В. С., Савич И. В., Верес Ю. К. Бентификация озерной экосистемы: причины, механизмы, возможные последствия, перспективы исследований // Тр. БГУ. 2012. Т. 7, № 1. С. 135–148.

Экологическая система Нарочанских озер / под ред. Г. Г. Винберга. Минск: Изд-во "Университетское", 1985. 302 с.

Adamovich B. V., Zhukova T. V., Mikheyeva T. M., Kovalevskaya R. Z., Makarevich T. A., Zhukova A. A. Eutrophication, oligotrophication, and benthiphication in Naroch Lakes: 40 years of monitoring // J. Sib. Fed. Univ. Biol. 2017. Vol. 10, N 4. P. 379–394. doi: 10.17516/1997-1389-0040

Brönnimann S. Climatic Changes Since 1700 / Advances in Global Change Research, 55. Springer Int. Publ. Switzerland, 2015. 359 p. doi: 10.1007/978-3-319-19042-6

Brückner E. Die Vergletscherung des Salzachgebietes, nebst Beobachtungen über die Eiszeit in der Schweiz. Wien – Olmütz: E. D. Hölzel, 1886. Geogr. Abhandl., Bd. 1. H. 1.

Brückner E. Klimatschwankungen seit 1770: nebst Bemerkungen über die Klimatschwankungen der Diluvialzeit: mit zahlreichen Tabellen. Wien – Olmütz: E. D. Hölzel, 1890. Geogr. Abhandl., Bd. 4. H. 2.

George G., Hurley M., Hewitt D. The impact of climate change on the physical characteristics of the larger lakes in the English Lake District // Freshwater Biol. 2007. Vol. 52, N 9. P. 1647–1666. doi:10.1111/j.1365–2427.2007.01773.x

Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. Analysis of Time Series Structure: SSA and related techniques. Chapman & Hall/CRC, 2001. 303 p.

Haigh J. D. The Sun and the Earth's Climate // Living Rev. Sol. Phys., 2007. Vol. 4, N 2. 64 p. https://doi.org/10.12942/lrsp-2007-2

Kovalenko K. E., Reavie E. D., Barbiero R. P., Burlakova L. E., Karatayev A. Y., Rudstam L. G., Watkins J. M. Patterns of long-term dynamics of aquatic communities and water quality parameters in the Great Lakes: Are they synchronized? // J. Great Lakes Res. 2018. Vol. 44, N 4. P. 660–669. doi: 10.1016/j.jglr.2018.05.018

Lake Kinneret: Ecology and Management / Eds. T. Zohary, A. Sukenik, T. Berman, A. Nishri. Berlin; Heidelberg, Germany: Springer, 2014. 683 p.

Oneida Lake: Long-term dynamics of a man aged ecosystem and its fishery // American Fisheries Society / Eds. L. G. Rudstam, E. L. Mills, J. R. Jackson, D. J. Stewart. Maryland: Bethesda, 2016. 541 p.

Pérez-Ruzafa A., Campillo S., J. M. Fernández-Palacios, García-Lacunza A., García-Oliva M., Ibañez H., Navarro-Martínez P. C., Pérez-Marcos M., Pérez-Ruzafa I. M., Quispe-Becerra J. I., Sala-Mirete A., Sánchez O., Marcos C. Long-Term Dynamic in Nutrients, Chlorophyll *a*, and Water Quality Parameters in a Coastal Lagoon during a Process of Eutrophication for Decades, a Sudden Break and a Relatively Rapid Recovery // Front. Mar. Sci. 2019. Vol. 6. Art. 26. 23 p. https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00026

Vautard R., Ghil M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series // Physica D. 1989. Vol. 35. P. 395-424.

Zhigljavsky A., Golyandina N. Singular Spectrum Analysis for Time Series. Springer Briefs in Statistics. 1. Auflage. 2013. 120 p.

The contribution of solar radiation to the long-term dynamics of hydroecological parameters of lake ecosystems under variable nutrient loading (a case study on the Naroch Lakes)

T. I. KAZANTSEVA[1*], B. V. ADAMOVICH[2], T. M. MIKHEEVA[2], T. V. ZHUKOVA[2], R. Z. KOVALEVSKAYA[2], V. N. SOLNTSEV

[1]*Zoological Institute of RAS*
199034, St. Petersburg, Universitetskaya nab., 1

[2]*Belarusian State University*
220030, Minsk, Nezavisimosti av., 4
[*]*E-mail: tamara.kazantseva@zin.ru*

Results of continuous monitoring of the Naroch lake system, which include the eutrophic lake Batorino, mesotrophic lake Myastro and oligo-mesotrophic lake Naroch, had been used to study the question of what factors most affect the long-term dynamics of the lake ecosystem, which are under a variable nutrient loading. The set of continuous series of average seasonal values of eight parameters from each ecosystem in 1978–2015 was analyzed using the methods SSA and PCA. The second principal component (F2), which contribution to the dynamics of lake ecosystems Myastro, Batorino and Naroch were 15.3 %, 20.5 % and 22.1 %, respectively, was associated with only three parameters that reflect the processes of formation and decomposition of organic matter. Comparison of the periods of the dominant cyclical components of the principal component F2 and related ecosystem parameters allowed us to interpret the second main factor behind these components as the activity of solar radiation.

Key words: lake ecosystems, long-term dynamics, trophic state, cyclic components, PCA method, SSA method, interpretation of main factors, Naroch lakes.