

УДК 502.171:556.55 (476)

П.А. МИТРАХОВИЧ

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ВОДОЕМА МНОГОЦЕЛЕВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ – оз. ЛУКОМСКОЕ

The analysis of long-term researches of hydrological, hydrothermal, hydrochemical and hydrobiological modes of the ecosystem of a reservoir of multi-purpose use – Lukomskoe lake is given.

Результаты многолетних исследований оз. Лукомское – водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС – показали, что формирование экосистемы протекает при совокупном взаимодействии природных и антропогенных факторов. Это взаимодействие имеет неоднозначный характер, поскольку накладывается на многолетнюю ритмику природных процессов и нестабильное проявление антропогенных [1].

Современная направленность природного характера тесно связана с морфологией и морфометрией котловины, параметры которых способствуют интенсивной гидродинамике и почти полному вертикальному перемешиванию водной массы. Гидрологические циклы с чередованием маловодных и многоводных фаз приводят к значительным колебаниям уровня воды. С вводом ГРЭС амплитуды многолетних колебаний уровня уменьшились, а сезонных – возросли (до 1,5 м) за счет испарения. Летом они могут составлять до 10 % общего объема водной массы, при этом площадь озера сокращается почти на 5 км².

Значительное влияние на внутриводоемные процессы оказывает сброс подогретой воды, в многолетнем аспекте озеро стало «теплее». Распределение теплых вод по акватории зависит в основном от направления и скорости ветра: южные и юго-западные ветры препятствуют растеканию нагретой струи, западные – смещают теплые воды на значительную глубину, восточные – размывают зону подогрева в западном направлении. Летом наиболее вероятны две основные динамические ситуации – распространение подогрева в северные заливы либо к водозабору. Поступление подогретых вод в ка-

нал садкового комплекса изменяет термический режим северных заливов и увеличивает площадь распространения теплых вод.

Возникшие особенности гидрологического и термического режима оказывают непосредственное влияние на кислородный баланс и его сезонную динамику. Значительно улучшились аэрация в зимнюю стагнацию вследствие более высокого коэффициента газового обмена с атмосферой в незамерзающей части акватории и эффективных условий циркуляции водной массы. Наиболее напряженный кислородный режим, особенно после ввода в эксплуатацию садкового комплекса, наблюдается в летнюю стагнацию. Усилилась неоднородность в распределении кислорода на различных глубинах по акватории – перенасыщение в эвфотическом слое и резкая убыль его к придонным горизонтам вплоть до полного потребления. В открытой акватории обнаружены участки с дефицитом кислорода по всей глубине (рис. 1).

Сезонные и межгодовые вариации основных компонентов минерализации обусловлены преимущественно климатическим фактором, в частности колебаниями уровня режима. Более чем за 70-летний период исследований (1932–2008) наблюдается статистически достоверная устойчивая тенденция роста суммы ионов почти в 1,5 раза (рис. 2). Линия тренда свидетельствует о циклическом характере изменения данного параметра. Минимальная ее величина – $(192,0 \pm 2,0)$ мг/л зафиксирована в 1932 г., максимальная – $(309,6 \pm 36,6)$ мг/л – в 1989 г. Наиболее низкие концентрации, как правило, соответствуют многогодным гидрологическим циклам либо несколько запаздывают.

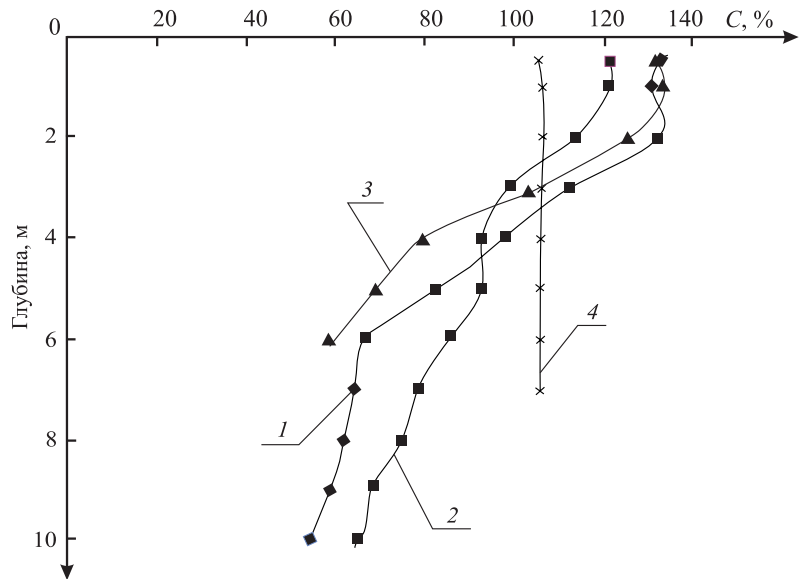


Рис. 1. Послойное распределение кислорода в период летней стагнации (17.08.2005 г.). Станции: 1 – 9, 2 – 10, 3 – 12, 4 – 21

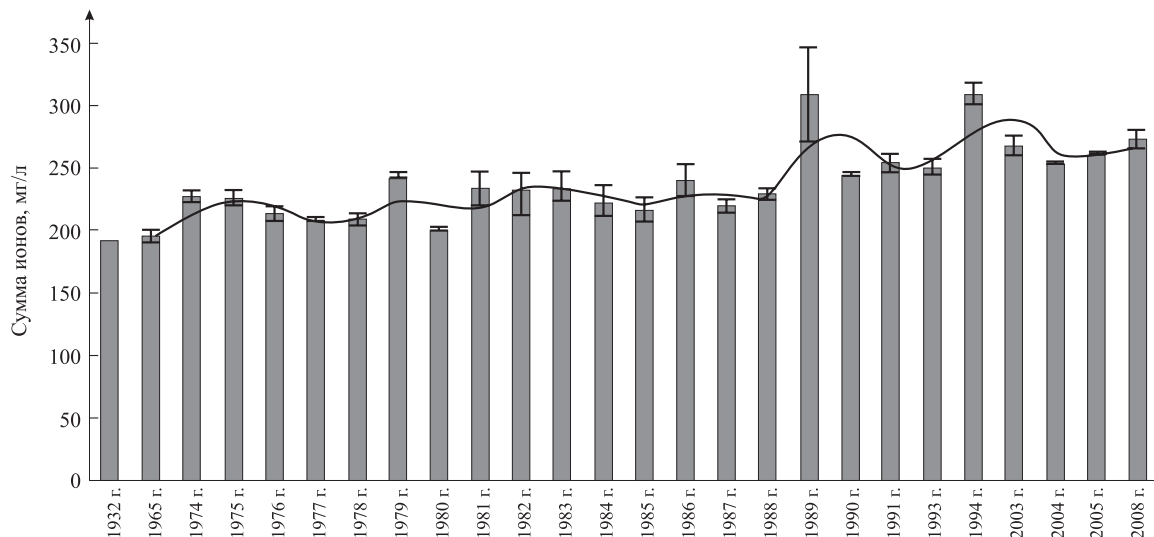


Рис. 2. Многолетняя динамика суммы ионов

Увеличение суммы главных ионов, хлоридов, а также магния, натрия и калия – процесс исключительно антропогенный. Изменения в абсолютных и относительных характеристиках ионов столь существенны, что при сохранении класса (гидрокарбонатный) и группы (кальциевая) вод с 1994 г. отмечается изменение типа вод со второго на третий с иным положением в системе главных ионов:

$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (рис. 3). Намечаются значительные отклонения от природного фона в соотношениях главных ионов: снижение относительного содержания кальция и увеличение хлоридов, магния, натрия и калия. Все эти изменения увеличивают соленость вод.

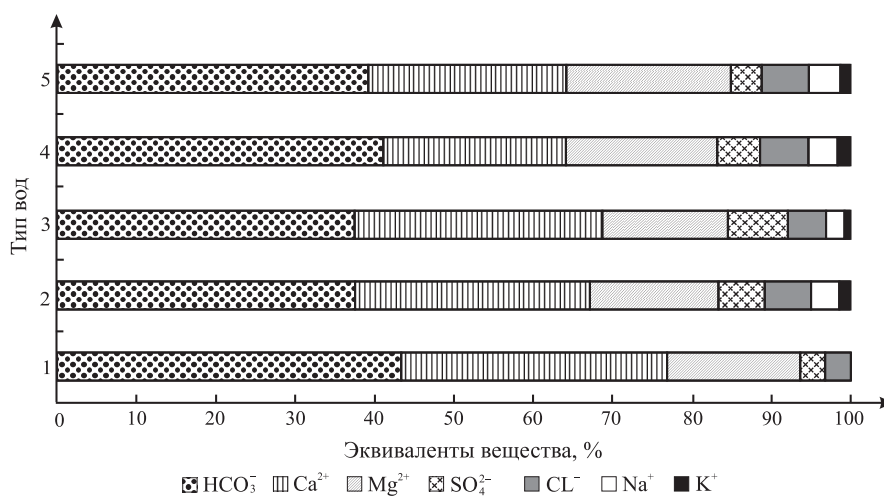


Рис. 3. Изменения относительного содержания главных ионов (эквивалентов вещества) и типа вод (1–3 – второй, 4, 5 – третий): 1 – 1974 г., 2 – 1990 г., 3 – 1994 г., 4 – 2005 г., 5 – 2008 г.

Повышение щелочности вод в летнюю стагнацию (более 9,0) – результат отклонения от равновесия в карбонатной системе вследствие фотосинтеза и присутствия в воде карбонатов и бикарбонатов натрия и магния.

Отмечена устойчивая тенденция увеличения концентрации фосфора в водной массе, что обусловлено его поступлением в экосистему с комбикормом, используемым для выращивания рыб. Многолетние и сезонные флуктуации фосфора тесно связаны и с колебаниями уровня режима водоема. Наиболее экологически опасны низкие уровни, фиксируемые в летнюю стагнацию при максимальной нагрузке ГРЭС.

Рост концентрации всех форм азота также является показателем эвтрофирования экосистемы водоема. Полученная линейная зависимость между минеральными формами фосфора и азота свидетельствует, что за повышением концентрации фосфора в воде следует рост минеральных соединений азота. Увеличение поступления азота в экосистему водоема связано с выносом органики с садкового комплекса, а также усилением его фиксации из атмосферы некоторыми видами синезеленых водорослей.

Рост уровня органического вещества, продуцируемого в водоеме, следует рассматривать как усиление процесса эвтрофирования. В многолетней динамике уровень новообразования органического вещества в водоеме коррелирует с концентрацией фосфора ($r = 0,414$).

Реальная нагрузка ($0,15 \text{ г/м}^2$ в год) по фосфору в настоящий период превышает критическое значение – показатель перехода экосистемы на более высокий трофический уровень. Современная хозяйственная структура водосбора оптимальна, потоки фосфора с его территории оцениваются в рамках природного фона. Количество фосфора, поступающего в экосистему, постоянно изменяется и определяется в основном мощностью садкового комплекса. При современной технологии кормления рыб она не должна превышать 30–50 садков, что позволит сохранять годовой суммарный поток фосфора в пределах 3200 кг, а реальную нагрузку – на уровне критического значения.

На развитие планктонных водорослей в оз. Лукомское оказывают влияние антропогенные и природные факторы. В условиях слабого антропогенного воздействия вплоть до начала 1970-х гг. водоем находился на эвтрофной стадии. Вселение моллюска-фильтратора дрейссены и бурный рост численности ее популяции в условиях повышения уровня воды на 1,5 м совпали с началом работы ГРЭС. Именно развитие дрейссены стало сдерживающим фактором в развитии водорослей в условиях, когда значительная часть акватории водоема стала испытывать влияние подогрева. В этот период наблюдалось снижение трофического статуса водоема, который приближался к мезотрофной стадии. Вслед за пиком численности дрейссены (середина 1970-х гг.) наступил этап стабилизации ее популяции на более низком уровне, что способствовало постепенному усилению развития водорослей, осо-

бенно синезеленых (рис. 4). Введенный в эксплуатацию садковый комплекс стал мощным дополнительным источником биогенных элементов. С 1990-х гг. интенсивность развития водорослей постепенно возрастала, синезеленые вызывали интенсивное «цветение» воды, их удельная численность достигала 95 %. В сложившихся условиях значительная часть популяции дрейссены погибла. Разложение огромной биомассы дрейссены способствовало дополнительному обогащению водной толщи фосфором. Поэтому даже после значительного сокращения количества садков содержание фосфора в воде не только не уменьшилось, но продолжало возрастать, усиливая развитие фитопланктона. Повышению уровня продуктивности в начале 2000-х гг. способствовали также снижение уровня воды в водоеме, высокая температура в течение вегетационного сезона, длительные периоды штилевой погоды во время летней стагнации. Летом наблюдается интенсивное «цветение» воды синезелеными, реже – диатомовыми водорослями, что ухудшает качество воды. Годовая продукция фитопланктона достигает 120 тыс. тонн и почти в 4 раза превышает уровень 1980-х гг. Эта масса новообразованного органического вещества утилизируется гетеротрофными звеньями экосистемы, способствуя увеличению продуктивности зоопланктона, зообентоса и всей экосистемы в целом. При этом наблюдаются серьезные структурные перестройки в сообществах гидробионтов (упрощение трофической структуры, смена доминантов, возрастание роли мелкоклеточных организмов и др.), что снижает устойчивость экосистемы.

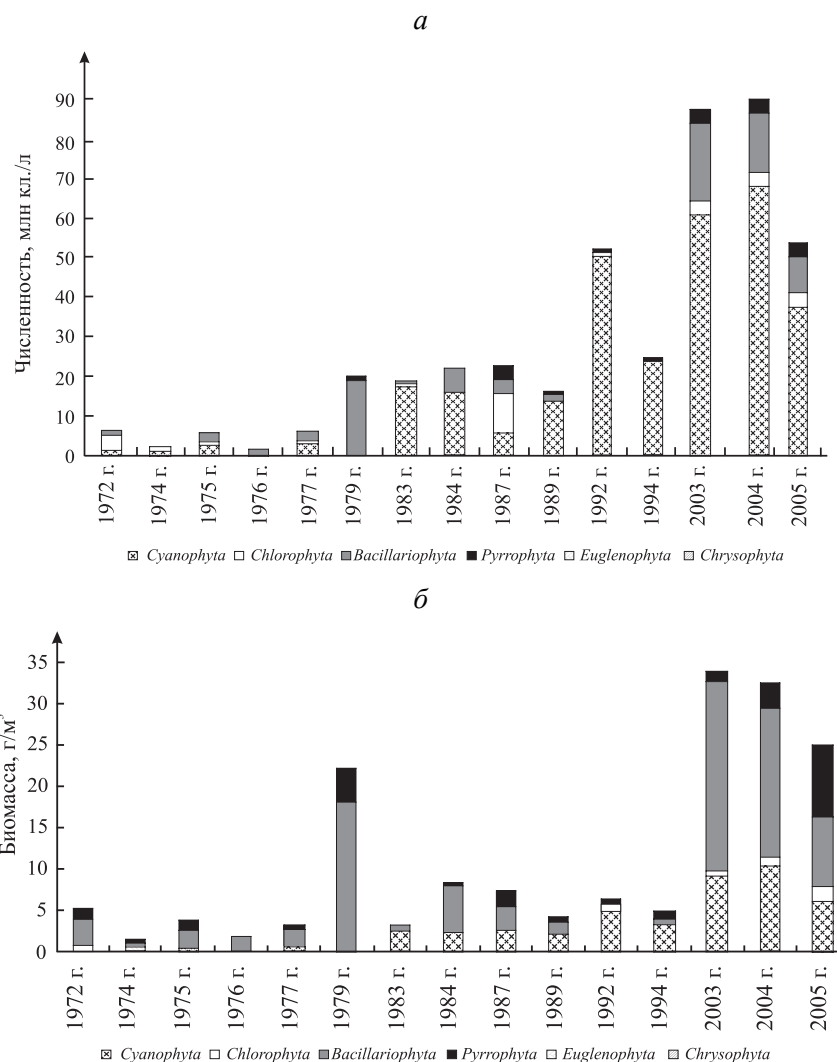


Рис. 4. Многолетние изменения численности (а) и биомассы (б) фитопланктона в период летней стагнации

Анализ многолетней динамики численности и биомассы зоопланктона оз. Лукомское показал, что в начальный период эксплуатации электростанции (1969–1970) показатели обилия по сравнению с 1950-ми гг. существенно не изменились. С начала 1970-х гг. количество и особенно биомасса зоо-

планктона начинают снижаться. Минимальные показатели количественного развития сообщества отмечены в 1980 г. (рис. 5).

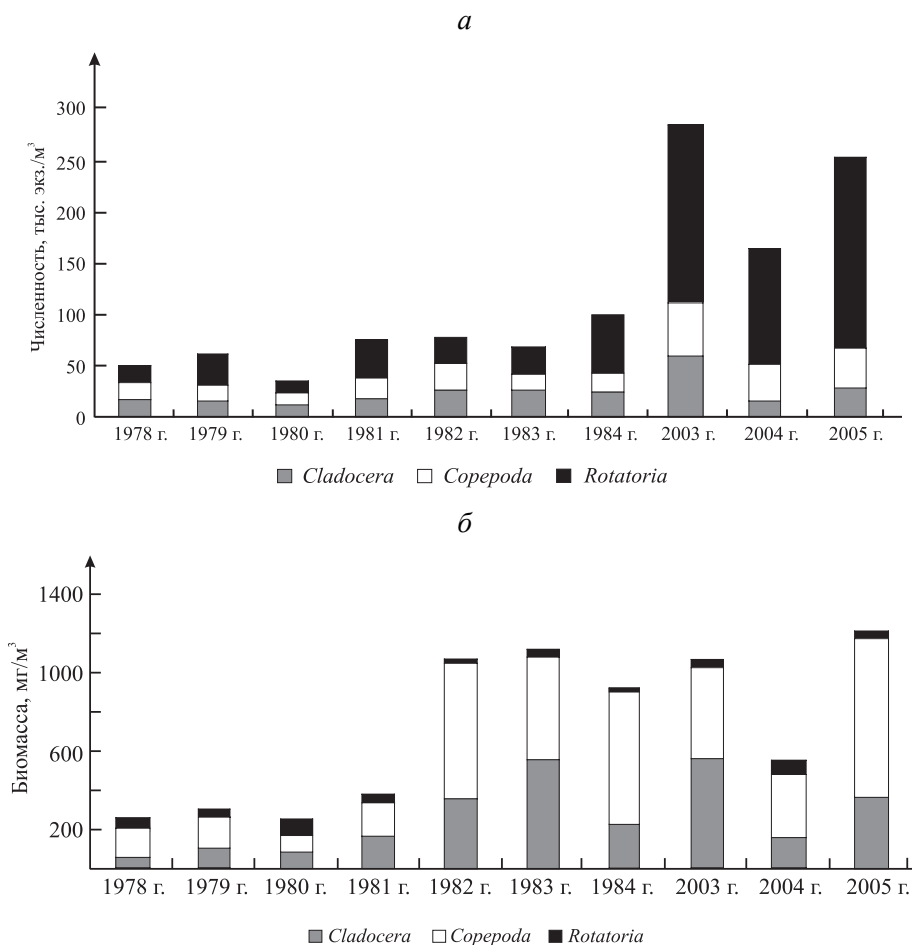


Рис. 5. Многолетняя динамика численности (а) и биомассы (б) зоопланктона

Состав доминирующего комплекса за период исследования был подвержен значительным колебаниям. Места в ряду доминантов за последние три года распределились аналогично 1950-м гг. и соответствовали статусу водоема эвтрофного типа. В среднем за сезон 2003–2005 гг. в составе кладоцер ведущая роль принадлежала *Cladocera sphaericus* ($20,69 \pm 0,009$). В период роста продуктивности популяции дрейссены (1972–1981) указанный вид встречался единичными экземплярами. Флуктуации доминирующих видов ветвистоусых фильтраторов проявляются в изменении соотношения их численностей.

Заметные перестройки, частично вызванные вселением дрейссены и поднятием уровня воды на 1,5 м, начались в 1972–1975 гг. Во время наибольшей продуктивности популяция дрейссены заметно стабилизировала продукционные процессы, особенно в планктонных сообществах, поддерживая трофический статус водоема-охладителя на уровне мезотрофного типа. К концу 1970-х гг. из состава планктона выпали или находились на грани исчезновения несколько ранее широко распространенных видов ветвистоусых рачков и коловраток: *Cladocera vicinus*, *Daphnia longispina*, *Bosmina coregoni thersites*. Произошла смена доминантов, особенно среди ветвистоусых рачков. Так, в 1970-е гг. почти полностью исчезли из планктона *Chydorus sphaericus*, *Daphnia brachiurum*, *Ceriodaphnia pulchella* и коловратки родов *Trichocerca* и *Pompholyx*. В то же время численность таких видов, как *Bosmina crassicornis*, увеличилась [2, 3].

В 2000-е гг. почти в два раза по сравнению с 1970-ми гг. увеличили свою численность и биомассу копеподы. Основной вклад сделан популяцией диаптомусов ($31,90 \pm 0,10$) тыс. экз./м², или ($0,247 \pm 0,057$) г/м³. Наибольший прирост показали коловратки: с 2003 по 2005 г. на фоне пятикратного роста численности всего зоопланктона количество особей данной группы увеличилось в 9 раз.

Численность одиннадцати наиболее массовых видов коловраток колебалась от ($13,03 \pm 0,002$) до ($122,71 \pm 0,015$) тыс. экз./м³ с максимумом у *Keratella cochlearis* [4]. Восемь видов коловраток до ввода

в эксплуатацию садкового комплекса встречались единично. Показательно также и двадцатикратное уменьшение плотности личинки дрейссены в 2003–2005 гг. по сравнению с началом 1980-х гг. (с 40,0 до 2,0 тыс. экз./м³ соответственно).

С начала 1980-х гг. отмечено закономерное увеличение численности и биомассы зоопланктона. Соответственно возросла продукция как хищного, так и мирного зоопланктона. Изменения в соотношении хищного и мирного зоопланктона, наблюдаемые в 2003–2005 гг., – естественная реакция на значительный рост продукционных показателей доминирующих популяций веслоногих рачков и коловраток.

Таким образом, многолетняя динамика обилия зоопланктона характеризуется снижением биомассы с начала 1970-х до 1980-х гг., последующим увеличением и стабилизацией на новом уровне к концу 1980-х гг.

Указанные изменения сопровождалась перестройкой доминирующего комплекса зоопланктона вначале в сторону преобладания видов, типичных для мезотрофного водоема, а с начала 1980-х гг. по настоящее время – ростом роли представителей эвтрофных озер (таблица). С 1992 г. прослеживается тенденция восстановления структуры доминирующего комплекса ветвистоусых ракообразных, характерного для периода 1953–1955 гг., т. е. до появления в озере дрейссены и пуска ТЭС (см. таблицу). Так, наблюдается устойчивое доминирование в зоопланктоне *Bosmina crassicornis*. В целом изменения в структуре доминирующего комплекса, численности и биомассы зоопланктонного сообщества с начала 1990-х гг. свидетельствуют об эвтрофировании водоема, одной из главных причин которого является функционирование садкового комплекса.

Элементы биотического баланса экосистемы оз. Лукомское

Элемент	P/B	1980-е гг.				2000-е гг.			
		г/м ²		ккал/м ²		г/м ²		ккал/м ²	
		B	P	B	P	B	P	B	P
Фитопланктон	50,0	17,8	892,2	12,5	624,5	66,79	3339,6	45,75	2337,72
Макрофиты	1,25	265,5	332,0	132,8	166,0	237,6	297,0	95,08	118,8
Зоопланктон	16,0	4,2	66,9	2,1	33,6	9,44	151,04	7,72	75,52
Зообентос «мягкий»	4,0	6,9	27,6	4,8	19,3	7,3	29,2	5,08	30,22
Моллюски (без дрейссены)	2,07	5,3	10,97	1,59	3,29	3,5	7,25	1,05	2,18
Дрейссена	0,6	124,0	74,4	27,8	16,7	112,1	67,25	25,12	15,09
Рыбы	0,55	800	440	8	4,4	140	77	1,4	0,77

Соотношение численности зоопланктона оз. Лукомское (N_{\max} летом / N_{\min} зимой) составляло 28 в 1978 г. и 72 в 1983 г. и находилось в прямой зависимости от его суммарной сезонной продукции. Это согласуется с данными [5].

Проявление негативных последствий антропогенного влияния на экосистему – сложившееся в настоящее время несоответствие между уровнем развития кормовой базы и продуктивностью рыб как конечного звена экосистемы, которое является результатом недостаточно обоснованного, а зачастую хищнического отношения человека. Неблагоприятное воздействие на продуктивность рыбного стада оказывает выращивание карпа в садках. Используемый при этом комбикорм – мощный источник поступления эвтрофирующих веществ, в особенности фосфора. Как показал анализ гидробиологического и гидрохимического режима, водоем пока еще способен к самоочищению, но возможности эти не беспредельны. Ухудшение среды обитания приводит к снижению численности и даже к полному выпадению из состава ихтиофауны наиболее требовательных к условиям среды ценных видов, сводя к нулю все усилия и материальные затраты по повышению рыбопродуктивности водоема. Поэтому интенсификацию рыболовства и рыбоводства целесообразнее проводить в расчете только на естественную биологическую продуктивность без нарушения экосистемы водоема. Для анализа изменений были рассчитаны элементы биотического баланса (см. таблицу). Подобные расчеты дают общее представление об изменении потоков энергии в экосистеме. При расчетах продукции отдельных сообществ были использованы коэффициенты P/B близкого по трофическому статусу оз. Мястро [6]. Суммарная биомасса продуцентов в настоящее время (304,4 г/м²) несколько превышает значения 1980-х гг. [7]. Доля макрофитов в общей биомассе сократилась с 93 до 78 %, а фитопланктона возросла с 7 до 22 %, т. е. в 3,8 раза. Суммарная продукция автотрофного звена увеличилась в 3 раза на фоне роста продукции фитопланктона (в 3,7 раза) и незначительного снижения макрофитов и в настоящее время составляет 3636,6 г/м² или 2456,52 ккал/м². Эта величина характеризует

запас энергии органических веществ, используемый в настоящее время всеми последующими звеньями экосистемы. По уровню новообразования органического вещества первичными продуцентами (без перифитона) оз. Лукомское приближается к высокоэвтрофному оз. Баторино [6].

Суммарная биомасса зоопланктона и зообентоса несколько снизилась, вместе с тем биомасса зоопланктона возросла в 2,2 раза. Эффективность использования энергии автотрофов водными беспозвоночными снизилась с 9 до 5 %. При расчете общей рыбопродукции исходили из того, что любительским ловом изымается рыбы не менее промыслового объема. Общая рыбопродукция в настоящее время – 0,77 ккал/м², что почти в 6 раз ниже, чем в 1980-е гг. Вылов рыбы составляет 0,6 % продукции второго трофического уровня и 0,3 % – автотрофов (в 1980-е гг. соответственно 11 и 1 %). Очевидно, что наблюдается недоиспользование кормовых ресурсов рыбным стадом. Улучшению ситуации может способствовать изменение соотношения вселенцев фитофагов в пользу пестрого толстолобика.

Таким образом, в последние годы наблюдается существенное повышение первичной продукции автотрофов и на этом фоне – снижение эффективности утилизации энергии гетеротрофными звеньями, что свидетельствует о значительных нарушениях функционирования экосистемы.

Серьезной экологической проблемой для водоема может оказаться новый вид-вселенец – брюхоногий моллюск *Lithoglyphus naticoides*. Вытеснение близких ему по экологии аборигенных моллюсков может привести к значительным перестройкам в трофических цепях, упрощению структуры сообществ и т. д. Поскольку литоглиф является основным или промежуточным хозяином нескольких гельминтов, в том числе патогенных для молоди многих видов рыб, возможно ухудшение паразитологической ситуации, что может негативно отразиться на состоянии и без того сокращающихся рыбных запасов водоема.

Таким образом, замедление темпов антропогенного эвтрофирования водоема-охладителя в настоящий период возможно прежде всего при условии снижения мощности садкового комплекса и совершенствования технологического процесса кормления рыбы. Улучшение качества воды и функционирования экосистемы в целом будет способствовать снижению экономических затрат ГРЭС.

1. Митрахович П. А., Самойленко В. М., Карташевич З. К. и др. Экосистема водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС. Мн., 2008.

2. Митрахович П. А., Ляхнович В. П., Бойкова С. А. // Гидробиол. журн. 1983. № 4. С. 60.

3. Митрахович П. А., Ляхнович В. П. // Вестн. БГУ. Сер. 2. 1988. № 1. С. 40.

4. Митрахович П. А., Бурко Л. Д. // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Материалы III Междунар. науч. конф., Минск – Нарочь. Мн., 2007. С. 64.

5. Крючкова Н. М., Рыбак В. К., Петрович П. Г. // Экологическая система Нарочанских озер. Мн., 1985. С. 127.

6. Экологическая система Нарочанских озер. Мн., 1985.

7. Ляхнович В. П., Каратаев А. Ю., Митрахович П. А. и др. // Экология. 1987. № 5. С. 43.

Поступила в редакцию 01.07.09.

Петр Анисимович Митрахович – кандидат биологических наук, доцент кафедры физической географии материков и океанов и методики преподавания географии.