



УДК 574.5

Оценка состояния водных экосистем (на примере озера Байкал) с помощью термодинамической целевой функции – эксэргии

Е. А. Зилов, А. В. Мокрый

Научно-исследовательский институт биологии при Иркутском государственном университете, Иркутск
E-mail: silow@bio.isu.runnet.ru

Аннотация. Рассматривается применение структурной эксэргии в водной экологии, приводятся методы расчета эксэргии и структурной эксэргии. Ранее показанная на математических моделях и экспериментальных экосистемах возможность использования структурной эксэргии для оценки состояния водных экосистем подтверждается результатами расчета структурной эксэргии для планктона озера Байкал из чистого и загрязненного районов.

Ключевые слова: оценка состояния экосистем, эксэргия, структурная эксэргия, термодинамические целевые функции, планктон, бентос, озеро Байкал.

Необходимость иметь интегральный показатель, позволяющий говорить о негативности или позитивности для экосистемы тех или иных изменений, давно признана современной экологией. Целое семейство таких показателей разработано экологической термодинамикой. Перебрав термодинамические величины, используемые сейчас в экологии для оценки состояния экосистем, мы обнаружили, что эксэргия имеет перед другими следующие преимущества: хорошее теоретическое обоснование в термодинамике, связь с теорией информации, высокая степень корреляции с другими целевыми функциями при относительной простоте её расчета.

Эксэргия – максимальная работа, которую совершает термодинамическая система при переходе из данного состояния в состояние физического равновесия с окружающей ее средой [6]. Таким образом, эксэргия – мера отклонения экосистемы от равновесного состояния. Она указывает на количество работы, затраченной на создание данной системы из первичных компонентов (в случае экосистемы – из первичного неорганического «бульона»), и информации, использованной при этом, или, другими словами, на количество энергии, затрачиваемой на разрушение данной системы до первичных компонентов.

Для выявления динамики состояния экосистем служит структурная эксэргия. Структурная эксэргия – это эксэргия, отнесенная к общей биомассе. Она отражает способность экосисте-

мы усваивать поток энергии извне, служа одновременно индикатором степени развития экосистемы, её сложности и уровня эволюционного развития организмов, из которых та состоит.

Материал и методика

Непосредственно измерить эксэргию нельзя, можно только рассчитать ее в случае, если известен состав экосистемы. Эксэргия и структурная эксэргия рассчитываются по формулам

$$Ex / RT = \sum_{i=1}^n c_i f_i, \quad (1)$$

$$Ex_{Str} = \left(\sum_{i=1}^n c_i f_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n c_i \right)^{-1}, \quad (2)$$

где Ex – эксэргия ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$); Ex_{Str} – структурная эксэргия; R – газовая константа ($8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), T – абсолютная температура (К), c_i – концентрация в экосистеме компонента i ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$), f_i – пересчетный коэффициент (рассчитывается как отношение общей величины эксэргии к таковой для детрита 7,34·105). Коэффициент f_i является качественным фактором, отражающим эксэргиальную составляющую различных таксонов. Соответствующие коэффициенты уже рассчитаны для многих систематических групп организмов и опубликованы (для зеленых одноклеточных водорослей f_i будет составлять 3,4; для дрожжей 6,4; олигохет 35; коловраток 30; копепод 44 и т. п.).

Структурная эксэргия рассчитывалась по формуле (2); в качестве пересчетного коэффициента для зоопланктона брался 44, для фитопланктона – 3,4 [10]. Биомасса фитопланктона рассчитывалась, исходя из того, что хлорофилл *a* составляет 0,25 % сырой биомассы фитопланктона, по формуле [7]:

$$B_{\text{ф.}} = 400 \cdot C_{\text{хл. } a}, \quad (3)$$

где $B_{\text{ф.}}$ – сырая биомасса фитопланктона, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$; 400 – пересчетный коэффициент; $C_{\text{хл. } a}$ – концентрация хлорофилла *a*, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Результаты и обсуждение

Расчет структурной эксэргии для бентоса озера Байкал.

Как было показано [1; 2; 13; 15], структурная эксэргия хорошо продемонстрировала себя в качестве индекса здоровья экосистемы при работе с модельными экосистемами и математическими моделями экосистем. Для того, чтобы оценить пригодность приложения структурной эксэргии к реальным природным экосистемам, одним из авторов был проведен расчет структурной эксэргии для бентосных сообществ озера Байкал в районе сброса очищенных сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (находящихся в заведомо неблагоприятных экологических условиях) и фонового района по опубликованному данным Научно-исследовательского института биологии [11]. Как видно из результатов расчетов, опубликованных ранее [1, 2], для всех глубин и грунтов структурная эксэргия ниже в районе сброса сточных вод, что говорит о существенных нарушениях структуры и функционирования донных сообществ, и полностью соответствует выводам, полученным ранее с использованием других критериев.

Результаты расчета структурной эксэргии для природного планктона озера Байкал.

Для оценки пригодности приложения структурной эксэргии к реальным природным экосистемам был проведен расчет структурной эксэргии для планктонного сообщества пелагиали Южного Байкала в верхнем трофогенном слое 0–50 м за период 1990–2002 гг. Расчет выполнялся на основании данных ГИС «Планктон» НИИ биологии при ИГУ [8], полученных в результате ежедекадных наблюдений на пелагической постоянной станции № 1. Район постоянной станции № 1 является фоновым для Южного Байкала [3]. Таким образом, рассчитав значения структурной эксэргии для не подверженно-го антропогенному влиянию района, мы получим диапазон естественной ее изменчивости.

Среднегодовые значения структурной эксэргии за период 1990–2002 гг. изменялись в пределах от $11,8 \pm 1,7$ (1994 г.) до $22,0 \pm 1,6$ (2002 г.) со среднегодовым значением $17,1 \pm 0,4$ (табл. 1).

Так, на рисунке 1 видно, что все среднегодовые значения структурной эксэргии не выходят за пределы «среднегодовое \pm среднее квадратическое отклонение (δ)». Таким образом, среднегодовые значения структурной эксэргии в период 1990–2002 гг. колебались вокруг своего среднегодового значения, не испытывая каких-либо направленных изменений, что, в свою очередь, говорит об отсутствии неблагоприятных изменений в планктонном сообществе фонового района пелагиали Южного Байкала.

При анализе внутригодовых изменений структурной эксэргии за 1990–2002 гг. были выявлены максимальные и минимальные ее значения (табл. 2). Наименьшее значение структурной эксэргии (4,3), зарегистрировано в 1994 г., наибольшее (40,8) – в 2002 г.

Таблица 1

Среднегодовые значения структурной эксэргии в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1990–2002 гг.

Год	Структурная эксэргия	Год	Структурная эксэргия
1990*	$18,3 \pm 1,7$	1997	$15,6 \pm 1,0$
1991	$19,0 \pm 1,5$	1998	$16,9 \pm 0,9$
1992	$21,0 \pm 1,1$	1999	$15,9 \pm 1,0$
1993	$19,1 \pm 2,4$	2000	$13,2 \pm 1,1$
1994	$11,8 \pm 1,7$	2001	$18,9 \pm 1,4$
1995	$17,7 \pm 2,1$	2002	$22,0 \pm 1,6$
1996	$16,4 \pm 1,0$	1990–2002	$17,1 \pm 0,4$

Примечание: * – данные за июнь - декабрь

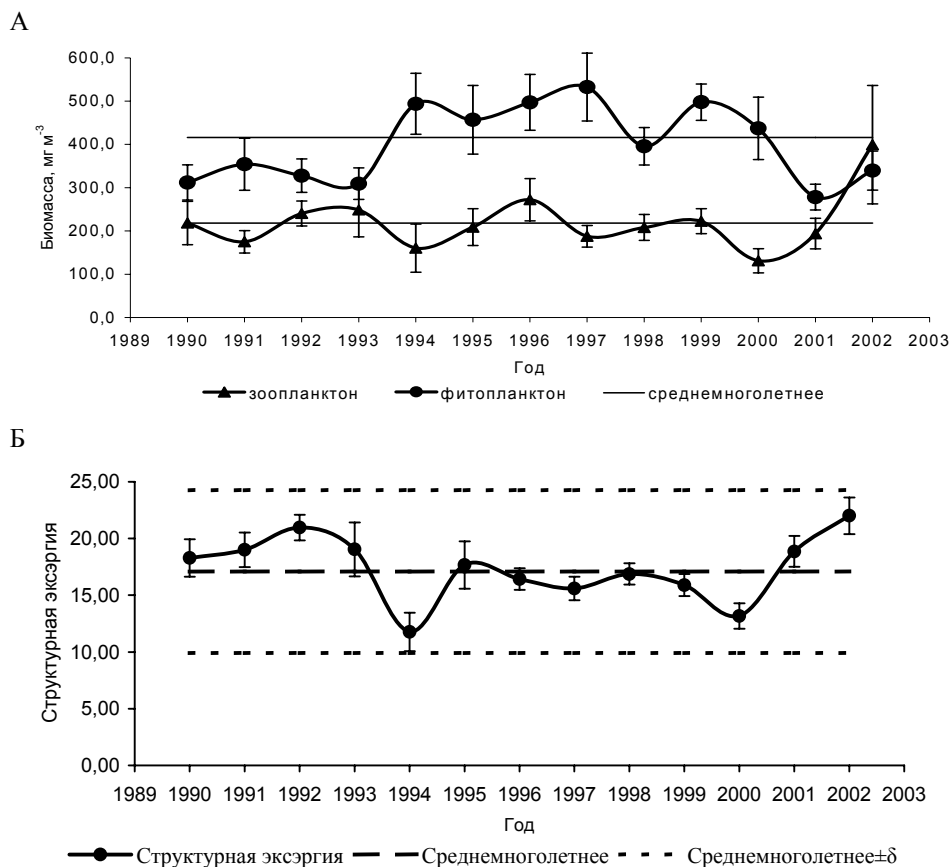


Рис. 1. Многолетняя динамика биомассы фито- и зоопланктона (А) и структурной эксэргии (Б) в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1990–2002 гг.

Таблица 2

Внутригодовые максимальные и минимальные значения структурной эксэргии в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1990–2002 гг.

Год	Структурная эксэргия			
	минимум	месяц	максимум	месяц
1990*	8,6	7	32,0	6
1991	9,0	4	34,0	6
1992	11,7	6	32,4	11
1993	4,9	12	30,4	5
1994	4,3	4	29,3	8
1995	5,2	5	33,3	3
1996	8,4	3	24,7	10
1997	4,7	5	27,1	10
1998	4,7	5	29,0	7
1999	5,7	5	31,7	9
2000	4,4	4	27,0	10
2001	7,8	3	29,8	8
2002	7,8	5	40,8	9
1990–2002	4,3		40,8	

Примечание: * – данные за июнь - декабрь

За весь рассматриваемый период годовой минимум значений структурной эксэргии в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 в 23 % случаев приходился на апрель и в 38 % – на май (т. е. на конец подледного – начало переходного периодов). Всего же на биологическую весну (февраль - июнь) приходилось 85 % случаев минимума структурной эксэргии. Годовой максимум значений структурной эксэргии в слое 0–50 м на пелагической станции № 1 в 70% случаев приходился на летне-осенний период.

В экспериментах с математическими моделями [12; 13; 14], а также в экспериментах с мезокосмами на озере Байкал [1] показана существенно большая чувствительность весеннего сообщества планктона, по сравнению с летне-осенним планктоном, к действию химических загрязнителей, причем как питательных веществ (биогенные элементы), так и токсиантов. Приведенные выше данные также свидетельствуют о меньшей устойчивости весеннего комплекса видов байкальского планктона. Следовательно, поступление загрязнителей в Байкал биологической весной с гораздо большей вероятностью может вызвать неблагоприятные сдвиги в экосистеме озера.

При анализе сезонной динамики структурной эксэргии в 1999 г. [5] обратил на себя внимание тот факт, что в период вскрытия озера ото льда в переходный к лету период (май - июнь) значения структурной эксэргии были почти втрое меньше по сравнению с другими периодами. Этот факт наглядно свидетельствует о меньшей устойчивости весеннего сообщества планктона.

Интересен также тот факт, что минимальные показатели структурной эксэргии наблю-

даются не биологической зимой, в период годового минимума биомасс зоо- и фитопланктона [4], а биологической весной. Интерпретация этого явления может стать задачей будущих исследований.

Авторы сравнили полученные для точки № 1 результаты со значениями для Южного Байкала, подверженного антропогенному влиянию. Расчет структурной эксэргии для района воздействия сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината выполнялся на основе данных среднегодовых биомасс зоо- и фитопланктона Байкальского института экологической токсикологии (ИЭТ) [9]. К сожалению, в ряду наблюдений ИЭТ имеется пробел с 1991 по 1997 гг.

Среднегодовые значения структурной эксэргии в районе г. Байкальска за период 1987–1991 и 1998–2003 гг. изменялись в пределах от 15,6 (1990 г.) до 29,4 (2002 г.) (рис. 2). Таким образом, среднегодовые значения структурной эксэргии и размах ее варьирования (13,8 против 10,2) в районе г. Байкальска выше таковых в фоновом районе (на пелагической станции № 1).

Основываясь на значениях структурной эксэргии в районе г. Байкальска, можно сделать вывод о том, что планктонное сообщество пелагиали в районе воздействия сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината функционирует на уровне, отличном от невозмущенного состояния.

Конечно, пока рано говорить об однозначной трактовке данного факта. Для более обоснованного суждения необходимо наличие более длительного непрерывного ряда наблюдений в районе воздействия БЦБК, возможно также, что в уточнении нуждается сам показатель.

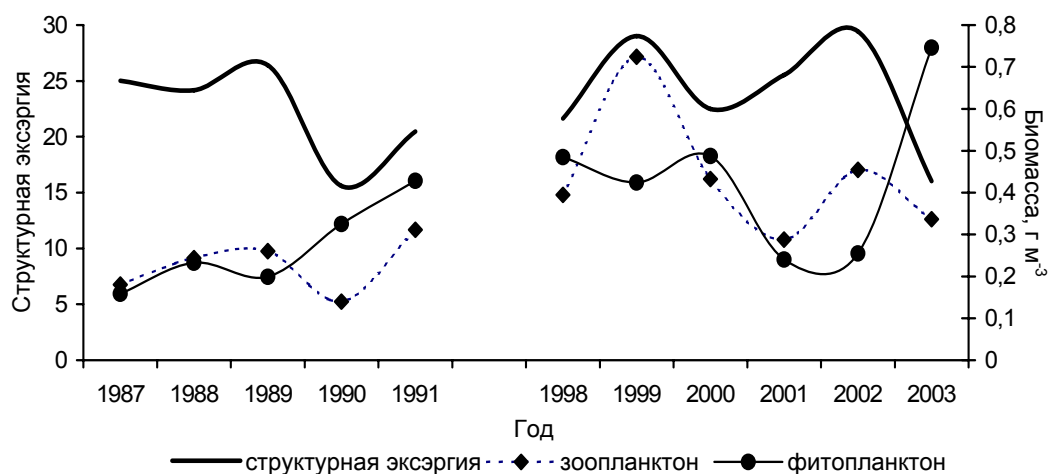


Рис. 2. Многолетняя динамика структурной эксэргии и биомассы фитопланктона и зоопланктона в слое 0–50 м в районе г. Байкальска, 1987–1991 и 1998–2003 гг.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что структурная эксэргия может использоваться для оценки изменений и отражать степень адаптированности экосистемы при различных воздействиях. Структурная эксэргия хорошо показала себя при работе с данными, полученными в результате экологического мониторинга озера Байкал. Следовательно, структурную эксэргию можно использовать в качестве интегрального показателя состояния экосистемы. Таким образом, данный показатель уже сейчас можно рекомендовать в качестве индекса состояния экологической системы и степени его антропогенного изменения. Естественно, он не лишен недостатков, но он имеет перед другими показателями такие важные преимущества, как простота расчета и работоспособность.

Литература

1. Зилов Е. А. Использование эксэргии для оценки здоровья водных экологических систем / Е. А. Зилов // Экосистемы и природные ресурсы горных стран. – Новосибирск : Наука, 2004. – С. 22–40.
2. Зилов Е. А. Возможность использования целевых функций для оценки «здоровья» водных экологических систем: эксэргия / Е. А. Зилов // Сиб. экол. журн. – 2006. – № 3. – С. 269–284.
3. Измestьева Л. Р. Опыт организации гидробиологического мониторинга / Л. Р. Измestьева, О. М. Кожова // Методология оценки состояния экосистем. – Новосибирск : Наука, 1998. – С. 95–110.
4. Кожов М. М. Биология озера Байкал / М. М. Кожов. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 316 с.
5. Мокрый А. В. Использование структурной эксэргии в качестве интегрального показателя состояния экосистемы / А. В. Мокрый, Е. А. Зилов // Изв. Самарского НЦ РАН. – 2006. – Т. 8, № 3. – С. 93–98.
6. Реймерс Н. Ф. Природопользование: Словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – М. : Мысль, 1990. – 637 с.
7. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. – Л. : Гидрометеоздат, 1983. – 128 с.
8. Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2005620028 «База данных «ПЛАНКТОН», выданное Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам 21.01.2005 г.
9. Святенко Г. С. Тенденции изменения состояния байкальского фитопланктона в районе антропогенного воздействия : дис. ... канд. биол. наук / Святенко Г. С. – Иркутск, 2005. – 130 с.
10. Jørgensen S. E. Fundamentals of Ecological Modelling – 3d ed./ Jørgensen S. E., Bendricchio G. – Amsterdam : Elsevier, 2001. – 530 p.
11. Kozhova O. M. Economic use and anthropogenic pressure / O. M. Kozhova, B. K. Pavlov, E. A. Silow // Lake Baikal. Biodiversity and evolution. – Leiden, The Netherlands : Backhuys Publishers, 1998. – P. 279–292.
12. Silow E. A. Mathematical models of lake Baikal ecosystem / E. A. Silow, V. J. Gurman, D. J. Stom et al. // Ecological Modelling. – 1995. – Vol. 82. – P. 27–39.
13. Silow E. A. The use of two lumped models for the analysis of consequences of external influences on the lake Baikal ecosystem / E. A. Silow // Ecological Modelling. – 1999. – Vol. 121. – P. 103–113.
14. Silow E. A. Prediction of Lake Baikal ecosystem behaviour using an ecosystem disturbance model / E. A. Silow, V. A. Baturin, D. J. Stom // Lakes & Reservoirs: Research and Management. – 2001. – Vol. 6, N 1. – P. 33–36.
15. Silow E. A. Aquatic ecosystem assessment using exergy / E. A. Silow, I. H. Oh // Ecological Indicators. – 2004. – Vol. 4. – P. 189–198.

Aquatic ecosystems state assessment (Lake Baikal as a case study) with the use of thermodynamic goal function – exergy

E. A. Zilov, A. V. Mokry

Research Institute for Biology, Irkutsk State University

Abstract. The use of structural exergy in aquatic ecology is observed, the methods of exergy and structural exergy calculation are given. The possibility of structural exergy use for aquatic ecosystem state assessment, demonstrated previously is additionally proved by structural exergy calculations for natural benthos and plankton of the lake Baikal in pristine and disturbed regions.

Key words: ecosystem state assessment, exergy, structural exergy, thermodynamic goal functions, plankton, benthos, Lake Baikal.

*Зилов Евгений Анатольевич
Научно-исследовательский институт биологии
при Иркутском государственном университете
664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 3
доктор биологических наук,
старший научный сотрудник
тел. (395 2) 33-44-79, факс (395 2) 34-00-07
E-mail: eugenetilow@hotmail.com*

*Zilov Evgeni Anatolyevitch
Irkutsk State University
664003, Irkutsk, 3, Lenin St.
D.Sc. in Biology, senior research scientist,
Research Institute for Biology
phone: (3952) 33-44-79, fax: (3952) 34-00-07
E-mail: eugenetilow@hotmail.com*

*Мокрый Андрей Викторович
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 3
аспирант
тел. (395 2) 33-44-79, факс (395 2) 34-00-07*

*Mokry Andrey Viktorovitch
Irkutsk State University
664003, Irkutsk, 3, Lenin St.
doctoral student, Research Institute for Biology
phone: (3952) 33-44-79, fax: (3952) 34-00-07*