

УДК 574.5
ББК 28.082

А.В. Мокрый, м.н.с.
Е.А. Зилов, д.б.н., проф.,
НИИ биологии при ИГУ, Иркутск, Россия
mokry@list.ru
Шу Фу-Лью, проф.
Пекинский Университет, Пекин, Китай

ДИНАМИКА ЭКСЭРГИИ В РАЙОНЕ Г. БАЙКАЛЬСКА

Аннотация: В статье 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 бентоса и планктона озера Байкал для фонового и загрязненного районов.

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

A.V. Mokry, E.A. Silow,
Scientific Research Institute of Biology
at Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
Xu Fu-Liu, Peking University, Beijing, China

DYNAMICS OF EXERGY IN BAIKALSK REGION

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, Lake Baikal.

Эксэргия – максимальная работа, которую совершает термодинамическая система при переходе из данного состояния в состояние физического равновесия с окружающей ее средой^{1,2}. Эксэргия имеет хорошее теоретическое обоснование в термодинамике, связь с теорией информации и высокую степень корреляции с другими целевыми функциями при относительной простоте её расчета³. Впервые использованная в экологическом моделировании в конце 70-х годов⁴, ныне эксэргия использу-

¹ Реймерс, 1990

² Jorgensen et al., 2005

³ Jorgensen, 1997

⁴ Mejer, Jorgensen, 1979

ется для расчета параметров моделей экосистем и создания моделей, способных предсказывать изменения видового состава экосистем^{5,6,7,8}.

Эксэргия определяется как расстояние между текущим состоянием системы и её состоянием в термодинамическом равновесии с окружающей средой. 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. Эксэргия, отнесенная к общей биомассе (*структурная эксэргия*), отражает способность экосистемы усваивать поток энергии извне, служа, одновременно, индикатором степени развития экосистемы, её сложности и уровня эволюционного развития организмов, из которых она состоит³. Для выявления динамики состояния экосистем служит структурная эксэргия. Структурная эксэргия – это эксэргия, отнесенная к общей биомассе. Она отражает способность экосистемы усваивать поток энергии извне, служа одновременно индикатором степени развития экосистемы, её сложности и уровня эволюционного развития организмов, из которых та состоит³.

Авторам показалось интересным оценить пригодность приложения структурной эксэргии к реальным природным экосистемам и рассчитать данный показатель для района Байкала, подверженного антропогенному стрессу.

Эксэргия и структурная эксэргия рассчитываются по формулам^{7,9}

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

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

где Ex – эксэргия ($\text{мг} * \text{м}^{-3}$), Ex_{Str} – структурная эксэргия, R – газовая константа ($8,31 \text{ Дж} * \text{моль}^{-1} * \text{К}^{-1}$), T – абсолютная температура (К), c_i – концентрация в экосистеме компонента i ($\text{мг} * \text{м}^{-3}$), f_i – пересчетный коэффициент. Коэффициент f_i является качественным фактором, отражающим эксэргиальную составляющую различных таксонов. Соответствующие коэффициенты уже рассчитаны для многих систематических групп организмов и опубликованы^{2,9}.

Для данной работы расчет структурной эксэргии для района воздействия сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (г. Байкальск) выполнялся на основе данных среднегодовых биомасс

⁵ Jorgensen, 1992

⁶ Jorgensen, Nielsen, 1994

⁷ Зилов, 2006

⁸ Мокрый, Зилов, 2006

⁹ Jorgensen, Bendoricchio, 2001

зоо- и фитопланктона Байкальского института экологической токсикологии¹⁰. К сожалению, в ряду наблюдений 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) (рисунок 1). Таким образом, среднегодовые значения структурной эксэргии и размах ее варьирования в районе г. Байкальска выше таковых для фонового района Южного Байкала^{8,11} (гидробиологической пелагической станции «Точка № 1»).

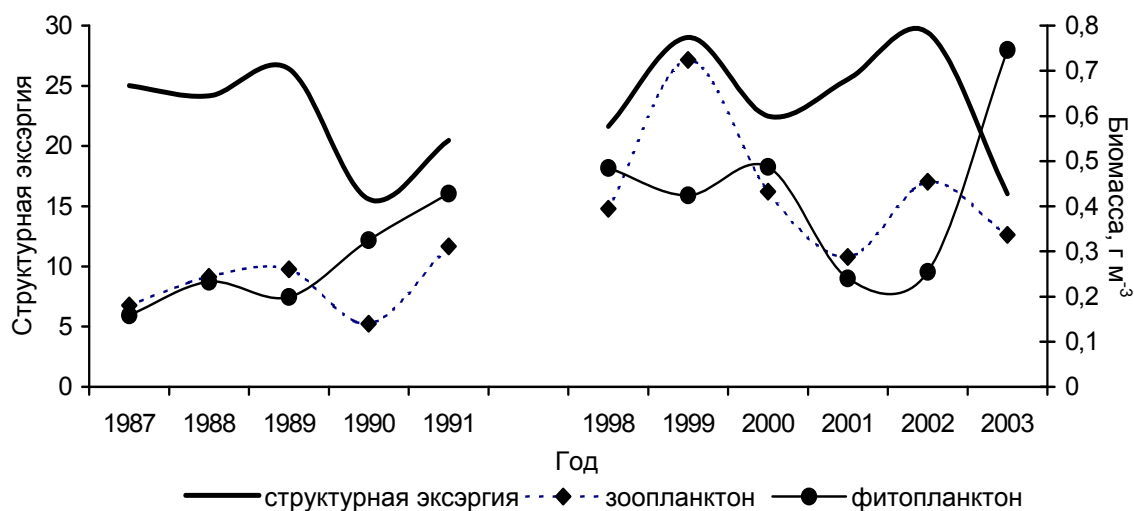
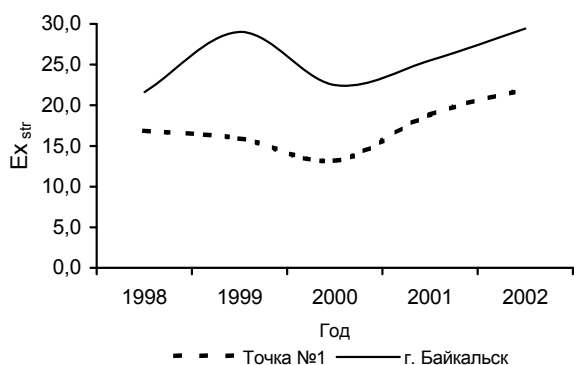


Рисунок 1 – Многолетняя динамика структурной эксэргии, биомасс фито- и зоопланктона в слое 0-50 м в районе г. Байкальска, 1987-1991 и 1998-2003 гг.

Сравнивая среднегодовые значения структурной эксэргии для района г. Байкальска и для фонового района за аналогичные периоды (1998-2002) отбора проб, имеем существенные отличия как по абсолютным, так и по среднемноголетним значениям (рисунок 2).



Структурная эксэргия		
год	Точка №1	г. Байкальск
1998	16,9	21,6
1999	15,9	29,0
2000	13,2	22,5
2001	18,9	25,5
2002	22,0	29,4
1998-2002	17,4	25,6

Рисунок 2 – Многолетняя динамика структурной эксэргии в слое 0-50 м, пелагиаль Южного Байкала, 1998-2002 гг.

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-

¹⁰ Святенко, 2005

¹¹ Зилов, Мокрый, 2008

бумажного комбината функционирует на уровне, отличном от невозмущенного состояния.

Авторами также был проведен расчет эксэргии и 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 опубликованным данным Научно-исследовательского института биологии^{12,13}. Как видно из результатов расчетов, приведенных на рисунке 3, 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.

Таким образом, такой показатель как эксэргия уже сейчас можно рекомендовать в качестве индекса состояния экологической системы и степени его антропогенного изменения. Естественно, он не лишен недостатков, но в то же время имеет такие важные преимущества как простота расчета и работоспособность.

Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 гг.)» проект No. 2.1.1/1359; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013 гг.) по государственному контракту No. 02.740.11.0018.

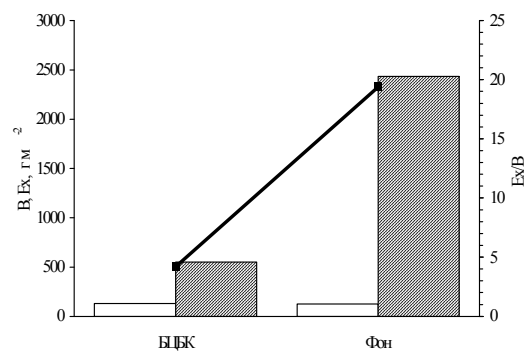
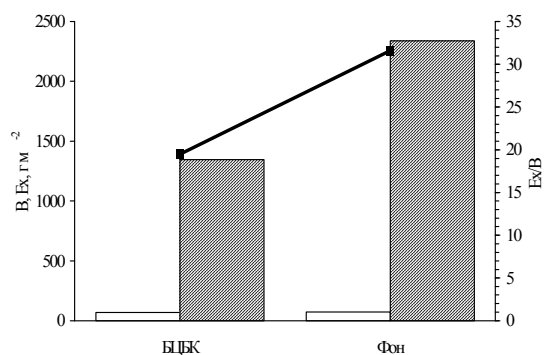
¹² Кожова и др., 1998

¹³ Kozhova *et al.*, 1998

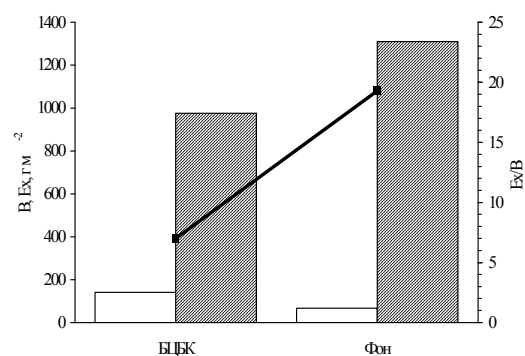
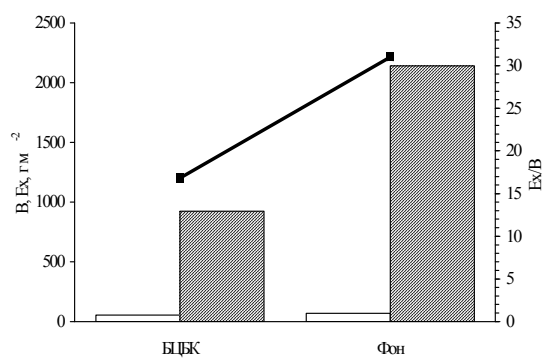
А

На глубинах 0–20 м

Б



На глубинах 20–50 м



На глубинах 50–70 м

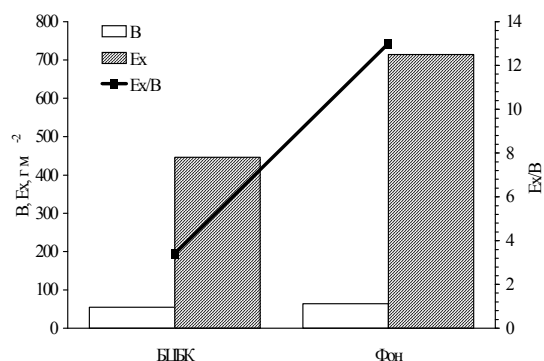
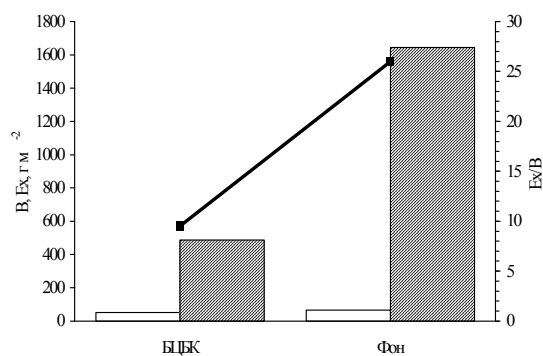


Рисунок 3 – Показатели состояния сообщества бентоса в районе сброса очищенных сточных вод БЦБК и в фоновом районе для разных глубин. А – заиленный песок, Б – ил.

Список литературы

- 1 Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник – М.: Мысль, 1990. – 637 с.
- 2 Jørgensen S.E. Calculations of exergy for organisms / S.E. Jørgensen, N. Ladegaard, M. Debeljak, J.C. Marques // *Ecol. Modell.* – 2005. – Vol. 185. – P. 165-175.
- 3 Jørgensen S. E. Integration of Ecosystem Theories : a Pattern / S. E. Jørgensen. – 2nd ed. – Doedrecht ; Boston ; L. : Kluwer Academic Publishers, 1997b. – 400 p.
- 4 Mejer H. F., Jørgensen S. E. State of the Art in Ecological Modelling – Copenhagen, ISEM, 1979. – P. 829 – 846.
- 5 Jørgensen S. E. Parameters, ecological constraints and exergy // *Ecological Modelling.* – 1992. – Vol. 62. – P. 163–170
- 6 Jørgensen S. E. Models of the structural dynamics in lakes and reservoirs / S. E. Jørgensen, S. N. Nielsen // *Ecol. Modell.* – 1994. – Vol. 74. – P. 39-46.
- 7 Зилов Е. А. Возможность использования целевых функций для оценки «здоровья» водных экологических систем: эксэргия / Е. А. Зилов // *Сибирский экологический журнал.* – 2006. – № 3. – С. 269–284.
- 8 Зилов Е. А., Мокрый А.В. Оценка состояния водных экосистем (на примере озера Байкал) с помощью термодинамической целевой функции – эксэргии // *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология».* – 2008. – Т. 1, № 1. – С. 79–84.
- 9 Jorgensen S.E., Bendoricchio G. Fundamentals of Ecological Modelling – 3d ed. – Amsterdam: Elsevier, 2001. – 530 p.
- 10 Святенко Г.С. Тенденции изменения состояния байкальского фитопланктона в районе антропогенного воздействия: Дис. ... канд. биол. наук. – Иркутск, 2005. – 130 с.
- 11 Зилов Е. А., Мокрый А.В. Оценка состояния водных экосистем (на примере озера Байкал) с помощью термодинамической целевой функции – эксэргии // *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология».* – 2008. – Т. 1, № 1. – С. 79–84.
- 12 Кожова О. М. Сообщества макрозообентоса Южного Байкала в районе антропогенного воздействия / О. М. Кожова, Л. С. Кравцова, И. В. Верхотурова // *Проблемы сохранения биоразнообразия.* – Новосибирск, 1998. – С. 64–66.
- 13 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.