

УДК 574.5:682.5:285.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ЭКСЭРГИИ В КАЧЕСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ

© 2006 А.В. Мокрый, Е.А. Зилов

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Проведен расчет структурной эксэргии для фонового района пелагиали Южного Байкала (постоянная станция № 1). Показано, что среднегодовые значения структурной эксэргии в фоновом районе в период 1990–2002 гг. колебались в пределах от $11,8 \pm 1,7$ (1994 г.) до $22,0 \pm 1,6$ (2002 г.) вокруг своего среднегодового значения ($17,1 \pm 0,4$), не испытывая каких-либо направленных изменений, что, в свою очередь, говорит об отсутствии неблагоприятных изменений в планктонном сообществе фонового района пелагиали Южного Байкала.

Необходимость иметь измеряемый параметр, отражающий состояние экосистемы как целого и дающий возможность оценивать степень урона экосистеме от того или иного внешнего воздействия, давно признана современной экологией. За последние десятилетия было предложено множество таких показателей, но возникло и множество проблем, связанных с их применением. Во-первых, к каждой экосистеме следует подходить индивидуально, поскольку естественная изменчивость экосистем зависит от труднообозримого числа факторов и границы изменчивости каждого параметра экосистемы также индивидуальны. Вторую проблему представляют процессы сукцессии: при изменении условий прежняя экосистема сменяется практически новой, адаптированной к новым условиям, следовательно, показатели состояния экосистемы должны быть достаточно динамичны. Наконец, практически каждый исследователь выбирает собственный показатель в зависимости от своих вкусов и опыта.

В конце 80-х годов были сформулированы требования к показателям состояния экосистемы. Они должны:

- не зависеть от состояния отдельных видов;
- иметь числовое, желательно лишенное размерности, выражение;
- быть приложимы к экосистемам разного иерархического уровня организации;

- определяться по минимальному числу наблюдений.

В настоящее время используются следующие показатели: организованность биоценоза [10]; асценденция [23]; индекс биологической целостности [19]; индекс «общего здоровья системы» [12], удельная фотосинтетическая поверхность [8, 9]. Но и они не лишены недостатков. Так, показатели Г.Е. Михайловского, Р. Улановича и Р. Костанцы громоздки и чрезвычайно сложны для вычисления, индексы Дж. Карра и Г.Г. Миничевой проще и работоспособнее, но основаны на состоянии отдельных компонентов экосистемы – сообщества рыб, зоо- или фитобентоса.

В то же время необходимо помнить о том, что экосистемы являются открытыми, неравновесными термодинамическими системами. Давно уже высказывалась идея, что экологические системы развиваются в направлении увеличения потока энергии через них [1, 6, 7, 20, 21]. Естественно, поток энергии характеризует настоящее состояние экосистемы и определяет ее дальнейшее развитие. Но *поток энергии в экосистеме невозможен без вещества и информации*, и чем выше уровень информации, тем выше степень использования вещества и энергии для дальнейшего удаления экосистемы от термодинамического равновесия. Согласно данным принципам, был разработан целый ряд термодинамичес-

ких показателей – максимизация энергии, минимизация энтропии, энмергия, эксэргия.

Среди других целевых функций одна, а именно эксэргия, имеет такие преимущества как хорошее теоретическое обоснование в термодинамике, связь с теорией информации и высокую степень корреляции с другими целевыми функциями при относительной простоте ее расчета [16]. Впервые использованная в экологическом моделировании в конце 70-х годов [22], ныне эксэргия используется для расчета параметров моделей экосистем и создания моделей, способных предсказывать изменения видового состава экосистем [13, 18].

Эксэргия определяется как расстояние между текущим состоянием системы и ее 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 состоит [Jørgensen, 1997].

Эксэргия рассчитывается по формуле [Mejer, Jørgensen, 1978]:

$$Ex = RT \sum_{i=0}^n [c_i \ln(c_i / c_{i,eq}) - (c_i - c_{i,eq})], \quad (1)$$

где Ex - эксэргия, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура, c_i – концентрация в экосистеме компонента i , $c_{i,eq}$ – концентрация компонента i в условиях термодинамического равновесия с окружающей средой, $i = 0$ – неорганические соединения, $i = 1$ – детрит, $i \geq 2$ – организмы.

Величина $c_{i,eq}$ представляет собой очень малую (но не нулевую) концентрацию органических компонентов, соответствующую очень низкой вероятности спонтанного фор-

мирования комплексных органических соединений в «первичном бульоне» в условиях термодинамического равновесия. Проблема практического применения уравнения (1) состоит в нахождении величины $c_{i,eq}$ для каждого из значимых компонентов. С.Э. Йоргенсен был разработан метод расчета эксэргии для любых ($i \geq 2$) компонентов экосистемы для которых известна биомасса, приближительное число клеток и значащих последовательностей ДНК [13].

Например, для зеленых одноклеточных водорослей это будет

$$Ex / RT = 25,2 \cdot 10^5 c_i .$$

Тогда, отнеся общую величину эксэргии к таковой для детрита ($7,34 \cdot 10^5$), мы избавимся от многочисленных нулей и получим пересчетный коэффициент f_i , который для зеленых одноклеточных водорослей будет составлять 3,4, для дрожжей – 6,4, олигохет – 35, коловраток – 30, копепод – 44 и т.п. Соответствующие коэффициенты уже рассчитаны для многих систематических групп организмов и опубликованы [14-17]. Тогда общая эксэргия экосистемы может быть рассчитана по уравнению

$$Ex / RT = \sum_{i=1}^n c_i f_i , \quad (2)$$

структурная эксэргия, соответственно – по уравнению

$$Ex_{str} = \sum_{i=1}^n c_i f_i / \sum_{i=1}^n c_i . \quad (3)$$

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, полученных в результате еженедельных наблюдений на пелагической постоянной станции № 1.

Район постоянной станции № 1 является фоновым для Южного Байкала [3, 5]. Таким образом, рассчитав значения структурной эксэргии для не подверженного антропогенно-

му влиянию района, мы получим диапазон естественной ее изменчивости.

Структурная эксэргия рассчитывалась по формуле (3); в качестве пересчетного коэффициента для зоопланктона бралось 44, для фитопланктона – 3,4 [17]. Биомасса фитопланктона рассчитывалась исходя из того, что хлорофилл *a* составляет 0,25% сырой биомассы фитопланктона, по формуле [11]:

$$B_{\phi} = 400 \cdot C_{\text{хл}a}, \quad (4)$$

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

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 среднемноголетним равным $17,1 \pm 0,4$ (табл. 1).

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	$17,1 \pm 0,4$

* - данные за июнь-декабрь

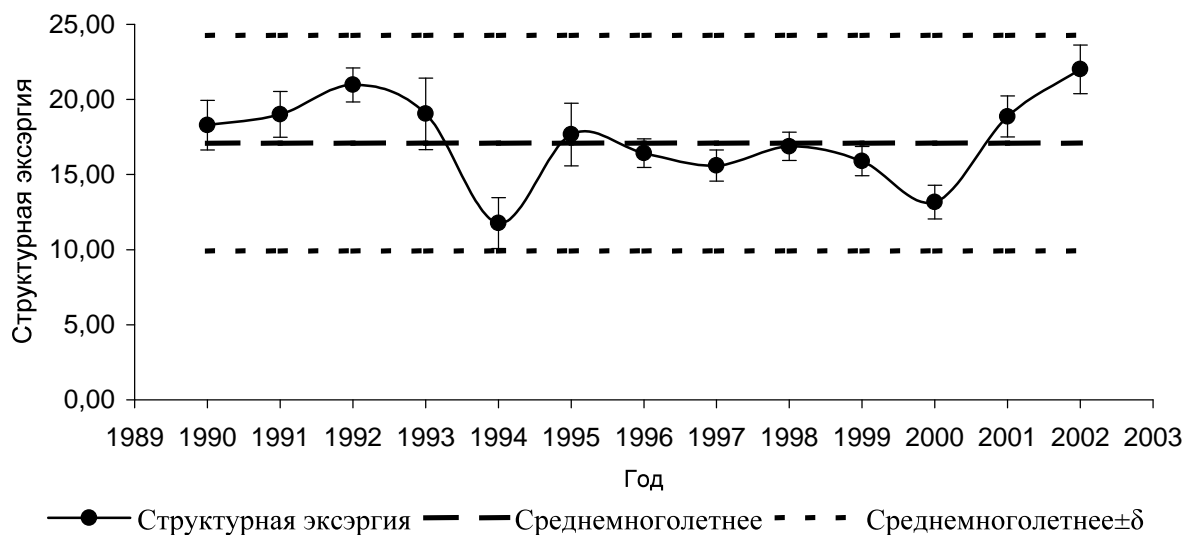


Рис. 1. Многолетняя динамика структурной эксэргии в слое 0-50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1990-2002 гг.

На рис. 1 видно, что все среднегодовые значения структурной эксэргии не выходят за пределы «среднемноголетнее \pm среднее квадратическое отклонение (д)». Таким образом, среднегодовые значения структурной эксэргии в период 1990-2002 гг. колебались вокруг своего среднемноголетнего значения, не испытывая каких-либо направленных изменений, что, в свою очередь, говорит об отсут-

ствии 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, равное 4,3, зарегистрировано в 1994 г., наибольшее, равное 40,8,

– в 2002 г.

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 биоло-

гическую 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.

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	

* - данные за июнь-декабрь

В экспериментах с моделью возмущений, а также в натуральных экспериментах с мезокосмами на оз. Байкал 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 токсикантов [2]. 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 наличии многолетней динамики структурной эксэргии, рассчитанной по значениям биомассы зоопланктона и концентрации хлорофилла *a*, нами была рассчитана

и сезонная динамика структурной эксэргии в слое 0-50 м на пелагической станции № 1 для 1999 г. по имеющимся данным биомасс зоо- и фитопланктона. Причем сырая биомасса каждого вида фитопланктона вычислялась путем умножения его численности (числа клеток) на объем клетки данного вида, принимая удельный вес равным единице. При анализе сезонной динамики структурной эксэргии в 1999 г. обращает на себя внимание тот факт, что в период вскрытия озера ото льда, в переходный к лету период (май-июнь), значения структурной эксэргии почти втрое меньше по сравнению с другими периодами (рис. 2). 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. Интерпре-

тация этого явления может стать задачей будущих исследований.

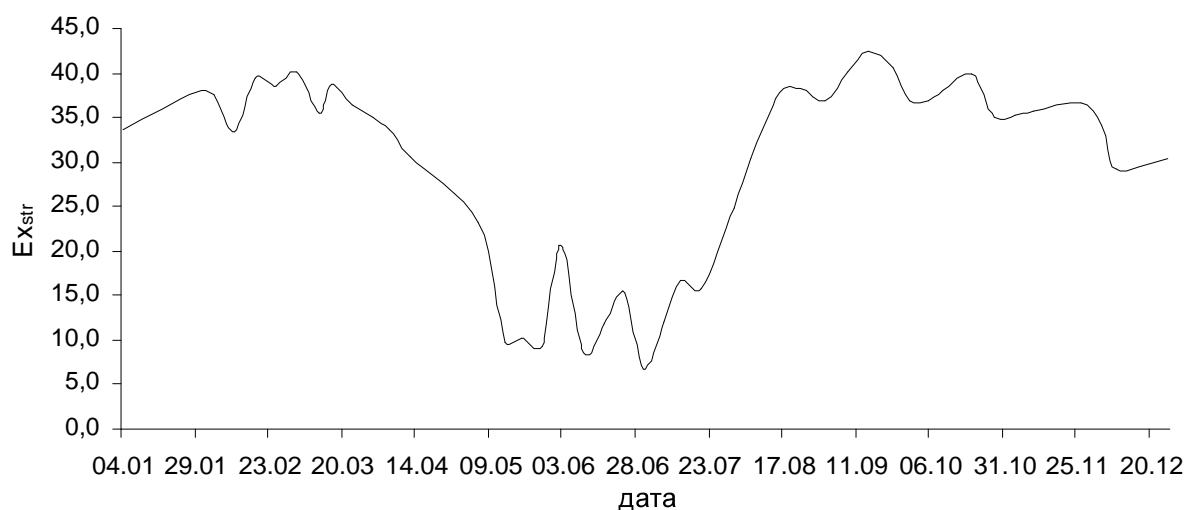


Рис. 2. Динамика структурной эксэргии в слое 0-50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1999 г.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ (шифр 2006-РИ-19.0/001/096, государственный контракт № 02.442.11.7261 в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным на-

правлениям развития науки и техники») и гранта по разделу «Университеты России» Научной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Федерального агентства по образованию РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Живое вещество. М.: Наука, 1978.
2. Зилов Е.А. Использование эксэргии для оценки здоровья водных экологических систем // Экосистемы и природные ресурсы горных стран. Новосибирск: Наука, 2004.
3. Измestьева Л.Р., Кожова О.М. Опыт организации гидробиологического мониторинга // Методология оценки состояния экосистем. Новосибирск: Наука, 1998.
4. Кожов М.М. Биология озера Байкал. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
5. Кожова О.М., Бейм А.М. Экологический мониторинг Байкала. М.: Экология, 1993.
6. Камшилов М.М. Эволюция биосферы. М.: Наука, 1979.
7. Маргалеф Р. Облик биосферы. М.: Наука, 1992.
8. Миничева Г.Г. Прогнозирование структуры фитобентоса с помощью показателей поверхности водорослей // Бот. журн. 1990. Т. 75, № 11.
9. Миничева Г.Г. Использование показателей поверхности бентосных водорослей для экспресс-диагностики трофо-сапробионтного состояния прибрежных экосистем //

- Альгология. 1998. Т. 8, № 3.
10. Михайловский Г.Е. Описание и оценка состояния планктонных сообществ. М.: Наука, 1988.
 11. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В.А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат, 1983.
 12. Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health // *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington: Island Press, 1992.
 13. Jørgensen S.E. Parameters, ecological constraints and exergy // *Ecological Model*. 1992. Vol. 62.
 14. Jørgensen S.E. Review and comparison of goal functions in system ecology // *Vie Milieu*. 1994. Vol.44.
 15. Jørgensen S.E. Exergy and ecological systems analysis // *Complex Ecology: the Part-Whole Relation in Ecosystem*. 1995.
 16. Jørgensen S.E. Integration of Ecosystem Theories: a Pattern. 2nd ed. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 1997.
 17. Jørgensen S.E., Bendricchio G. *Fundamentals of Ecological Modelling*. 3^d ed. Amsterdam: Elsevier, 2001.
 18. Jørgensen S.E., Nielsen S.N. Models of the structural dynamics in lakes and reservoirs // *Ecological Modelling*. 1994. Vol. 74.
 19. Karr J.R. Biological integrity: a long-neglected aspect of water resource management // *Ecological Applications*. 1991. Vol.1.
 20. Margalef R. *Perspectives in Ecological Theory*. Chicago: Univ. Press, 1968.
 21. Margalef R. *Ecologia*. Barcelona: Omega, 1974.
 22. Mejer H.F., Jørgensen S.E. Energy and ecological buffer capacity // *State of the Art in Ecological Modelling*. Copenhagen: ISEM, 1979.
 23. Ulanowicz R.E. Network growth and development: Ascendancy // *Complex Ecology*. New Jersey. 1995.

THE USE OF STRUCTURAL EXERGY AS AN INTEGRAL INDEX OF THE ECOSYSTEM STATE

© 2006 A.V. Mokry, E.A. Silow
Irkutsk State University, Irkutsk

Structural exergy is calculated for the background region of the Southern Baikal pelagial (permanent station #1). The average annual values of structural exergy in this region in 1990–2002 fluctuated within the limits between 11.8 ± 1.7 (1994) and 22.0 ± 1.6 (2002) around their average (17.1 ± 0.4). They do not demonstrate any tendency which points to the lack of negative changes in the planktonic community of Southern Baikal.