

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет»  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ

**Е. А. Зилов**

**АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 504:574.5:396.6(285.2)

ББК 28.082

3-61

*Печатается по решению*

*Ученого совета Научно-исследовательского института биологии*

*Рецензенты:* чл.-корр. РАН Г. С. Розенберг  
проф., д-р техн. наук С. С. Тимофеева

**Зилов Е.А.**

- 3-61 Анализ и прогноз изменений водных экосистем на основе модельных экспериментов /  
Е. А. Зилов. — М.: Книга по требованию, 2014. 2-е изд. — с.

ISBN

Монография посвящена разработке методологических подходов к оценке функционирования крупных водных экосистем в условиях внешней нагрузки (на примере оз. Байкал). Приведены результаты натурных опытов с мезокосмами, в которых определялось действие основных аллохтонных веществ на компоненты планктонного сообщества оз. Байкал. Обнаружены значительные различия в реакции подледного и летне-осеннего комплексов планктона на внешние воздействия. Полученные результаты использованы для построения математических моделей возмущений экосистемы оз. Байкал на основе идеологии сложного модельного эксперимента. Предложено в качестве индикатора состояния экосистем использовать такую целевую функцию, как структурная эксергия, снижающуюся при неблагоприятных изменениях экосистем.

Книга предназначена для экологов, лимнологов, гидробиологов, специалистов в области окружающей среды, докторантов, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Библиогр. 530 назв. Ил. 51. Табл. 42.

УДК 504:574.5:396.6(285.2)

ББК 28.082

ISBN

© Издание на русском языке, оформление,  
«Книга по Требованию», 2014  
© Зилов Е. А., 2014

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию .....	5
Предисловие .....	8
<b>Раздел I. Модельный эксперимент в экологии</b>	
<i>Глава 1.</i> Роль и место модельного эксперимента в экологическом прогнозировании .....	11
<i>Глава 2.</i> Модели экосистем .....	25
<i>Глава 3.</i> Модельные экосистемы .....	34
<b>Раздел II. Аналитическое моделирование водной экосистемы</b>	
<i>Глава 4.</i> Экосистема как сложная термодинамическая система .....	59
<i>Глава 5.</i> Существующие подходы к термодинамическому описанию экосистем .....	63
<i>Глава 6.</i> Экосистема как гиперцикль .....	73
<i>Глава 7.</i> Анализ динамики и устойчивости гиперциклических моделей разной сложности .....	75
<b>Раздел III. Сложный модельный эксперимент</b>	
<i>Глава 8.</i> Методология сложного модельного эксперимента .....	83
<i>Глава 9.</i> Получение экспериментальных данных по взаимодействию компонентов планктона оз. Байкал в разные сезоны с основными загрязнителями .....	90
<i>Глава 10.</i> Модель возмущений экосистемы оз. Байкал и результаты экспериментов с ней .....	141
<b>Раздел IV. Термодинамические целевые функции в экологии</b>	
<i>Глава 11.</i> Приложение термодинамических целевых функций к анализу экосистем .....	155
<i>Глава 12.</i> Понятие эксэргии .....	158
<i>Глава 13.</i> Поведение эксэргии в математических моделях .....	162
<i>Глава 14.</i> Поведение эксэргии в реальных экосистемах .....	168
<i>Глава 15.</i> Перспективы использования понятия эксэргии в экологии .....	202
<b>Заключение .....</b>	213
<b>Литература .....</b>	216



## **Предисловие ко второму изданию**

Подвигнуло меня на переиздание моей книги исключительно любезное письмо заместителя главного редактора «Нобель-пресс» Алёны Александровны Левендеевой в котором сообщалось, что на мою книгу есть спрос.

Поначалу у меня была мысль сделать второе издание «переработанным и дополненным», но по размышлении я от неё отказался. Новые результаты применительно к эксэргии заинтересованный читатель может найти в:

Мокрый А.В. Динамика эксэргии в районе города Байкальска / А.В. Мокрый, Е.А. Зилов, Ф.-Л. Шу // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права). — 2010. — № 4. — С. 328 — 333.

Silow E.A. Exergy as a Tool for Ecosystem Health Assessment / E.A. Silow, A.V. Mokry // Entropy. — 2010. — V. 12, № 4. — P. 902-925. doi:10.3390/e12040902.

Зилов Е.А. Долговременная динамика эко-эксергии в Женевском озере / Е.А. Зилов, О. Анневиль, Б. Монтюэль // Вестник ИрГСХА. — 2012. — Вып. 48, февраль. — С. 39 — 44.

Silow E.A. Exergy changes in lakes around the world under pressure from global change / E.A. Silow // Archives des Sciences. — 2012. — V. 65. — P. 209 — 214.

Mokry A. The study of exergy and structural exergy dynamics in lake Baikal plankton (1951 - 1999) / A. Mokry, E. Silow // 13th World Lake Conference Papers. — Shiga: ILEC, 2010. — 4 p. - [http://wldb.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13\\_Papers/others/12.pdf](http://wldb.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13_Papers/others/12.pdf)

Panasenkova E. The study of structural exergy in Ust-Ilimsk reservoir ecosystem / E. Panasenkova, S. Timofeeva, E. Silow // 13th World Lake Papers. — Shiga: ILEC, 2010. — 4 p. - [http://wldb.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13\\_Papers/others/26.pdf](http://wldb.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13_Papers/others/26.pdf)

Silow E.A. Eco-Exergy use for ecosystem health assessment / E.A. Silow, A.V. Mokry, S.E. Juergensen // International Journey of Exergy. — Paris: Paris Ouest University, 2011. — 22 p. Available from [http://leme.u-paris10.fr/exergy/files/17\\_06\\_11/SilowA.pdf](http://leme.u-paris10.fr/exergy/files/17_06_11/SilowA.pdf)

Silow E.A. Case studies of Eco-Exergy use for ecosystem health assessment / E.A. Silow, O. Anneville, B. Montuelle, A.V. Mokry, F.-L. Xu // *International Journey of Exergy*. — Paris: Paris Ouest University, 2011. — 18 p. Available from [http://leme.u-paris10.fr/exergy/files/17\\_06\\_11/SilowB.pdf](http://leme.u-paris10.fr/exergy/files/17_06_11/SilowB.pdf)

Silow E.A. Some Applications of Thermodynamics for Ecological Systems / E.A. Silow, A.V. Mokry, S.E. Jørgensen // J.C. Moreno-Pirajan (Ed.). *Thermodynamics - Interaction Studies - Solids, Liquids and Gases*. — Vienna: InTech, 2011. — P. 319-342. ISBN: 978-953-307-563-1. Available from <http://www.intechopen.com/articles/show/title/some-applications-of-thermodynamics-for-ecological-systems>

А то, что связано с антропогенным загрязнением озера Байкал и его современным состоянием опубликовано в:

Зилов Е.А. Современное состояние химического загрязнения озера Байкал: Источники и агенты / Е.А. Зилов, П.А. Орлов // Вестник ИрГСХА. — 2011. — Вып. 45, сентябрь. — С. 32 — 37.

Izmest'eva L.R. Long-Term Dynamics of Lake Baikal Pelagic Phytoplankton under Climate Change / L. R. Izmest'eva, E. A. Silow, and E. Litchman // Inland Water Biology. — 2011. — Vol. 4, No. 3. — P. 301-307. © Pleiades Publishing, Ltd., 2011. ISSN 1995\_082.

Izmestyeva L. Long-term dynamics of summer community of Baikal phytoplankton and climate change / L. Izmestyeva, E. Silow // 13th World Lake Papers. — Shiga: ILEC, 2010. — 4 p. - [http://wlbd.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13\\_Papers/others/9.pdf](http://wlbd.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13_Papers/others/9.pdf)

Mokry A. Long-term dynamics of diatom alga of lake Baikal phytoplankton / A. Mokry, G. Kobanova, E. Silow // 13th World Lake Conference Papers. — Shiga: ILEC, 2010. — 4 p. - [http://wlbd.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13\\_Papers/others/11.pdf](http://wlbd.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13_Papers/others/11.pdf)

Pislegina E. Long-term dynamics of Baikal zooplankton and climate change / E. Pislegina, E. Silow // 13th World Lake Conference Papers. — Shiga: ILEC, 2010. — 4 p. - [http://wlbd.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13\\_Papers/others/10.pdf](http://wlbd.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13_Papers/others/10.pdf) Shimaraeva S. Long-term dynamics of under-ice community of Baikal phytoplankton and climate change / S. Shimaraeva, L. Izmestyeva, E. Silow // 13th World Lake Conference Papers. — Shiga:

ILEC, 2010. — 4 p. - [http://wldb.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13\\_Papers/others/13.pdf](http://wldb.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13_Papers/others/13.pdf)

Silow E. Lake Baikal as possible sentinel of the Climate Change / E. Silow // 13th World Lake Papers. — Shiga: ILEC, 2010. — 4 p. - [http://wldb.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13\\_Papers/S2/s2-6.pdf](http://wldb.ilec.or.jp/data/ilec/WLC13_Papers/S2/s2-6.pdf)

Домышева В.М. История гидрохимических исследований на Байкале / В.М. Домышева, Т.В. Ходжер, Е.А. Зилов // Байкаловедение: в 2 кн. — Новосибирск: Наука, 2012. — Кн. 1. — С. 46-56.

Зилов Е.А. Сообщества планктона / Е.А. Зилов // Байкаловедение: в 2 кн. — Новосибирск: Наука, 2012. — Кн. 2. — С. 729-757.

Зилов Е.А. Кругооборот вещества и потоки энергии в экосистеме пелагиали / Е.А. Зилов // Байкаловедение: в 2 кн. — Новосибирск: Наука, 2012. — Кн. 2. — С. 771-777.

Зилов Е.А. Физическое воздействие на озеро / Е.А. Зилов // Байкаловедение: в 2 кн. — Новосибирск: Наука, 2012. — Кн. 2. — С. 982-983.

Зилов Е.А. Химическое загрязнение озера / Е.А. Зилов, Т.В. Ходжер // Байкаловедение: в 2 кн. — Новосибирск: Наука, 2012. — Кн. 2. — С. 983-995.

Зилов Е.А. Необходимые меры по сохранению экосистемы Байкала / Е.А. Зилов // Байкаловедение: в 2 кн. — Новосибирск: Наука, 2012. — Кн. 2. — С. 1004-1011.

Зилов Е.А. Очерки химии окружающей среды: учеб. пособие / Е.А. Зилов. — Иркутск: Вост.-Сиб. акад. образования, 2011. — 176 с.

## Предисловие

Современная академическая экология, как и 35 лет назад (Margalef, 1973), зачастую оказывается бессильной при решении практических задач прогнозирования, необходимых для управления ресурсопользованием (Kumagai et al., 1999, Кондратьев, 1999). Как писал Р. Петерс, «экология может давать полезные, количественные, общие прогнозы, если ее теории будут: эмпирическими, так как лишь эмпиризм позволяет реалистично оценивать неопределенность, связанную с неучтенными факторами; холистическими и упрощенными, поскольку сложные или механистические теории показали себя практически непригодными; практическими, более связанными с насущными вопросами о природе, нежели с академической сколастикой» (Peters, 1991, p. 304).

Уже сейчас используется около 100 000 химических соединений. Если учесть, что для предсказания поведения в окружающей среде каждого из этих соединений мы должны знать, по крайней мере, 25 характеристик и для прогноза его воздействия на биоту нужно изучить его взаимодействие пусть не с 5 000 000 видов, населяющих планету, а лишь с 25 000 «ключевых» видов, то мы получим количество необходимых исследований  $\approx 7,25 \cdot 10^{10}$ , что, естественно, совершенно нереально (Jørgensen, 1998). Поэтому очевидно, что широко используемое сейчас биотестирование вряд ли способно решить проблемы экотоксикологической прогностики. Кроме того, нельзя не согласиться с Р. Маргалефом в том, что «к сожалению для биотестирования, эволюция не остановилась и тест-объекты подвержены изменениям при культивировании» (1992, с. 32). Представляется, что математическое моделирование и эксперименты с модельными экосистемами на сегодня едва ли не единственно возможные подходы к предсказанию последствий антропогенных воздействий на экосистемы (Beyers, Odum, 1993, Jørgensen, 1997, 2008).

Автор поставил перед собой цель разработать методологические подходы к оценке функционирования водных экосистем в условиях антропогенной нагрузки (на примере оз. Байкал). Для достижения указанной цели следовало решить следующие задачи:

- проанализировать существующие методы предсказания антропогенных изменений водных экосистем и выбрать наиболее продуктивные из них;
- получить данные о взаимодействии планктонного сообщества оз. Байкал с биогенными элементами и главными загрязнителями озера;
- обеспечить построение математической модели на основе этих экспериментальных данных;
- провести вычислительные эксперименты прогнозного характера с математическими моделями;
- исследовать пригодность различных интегральных показателей для оценки состояния экосистем и анализа их антропогенных изменений по литературным источникам, для математических моделей, результатов натурных экспериментов и полевых наблюдений.

Результаты мы попытались изложить в виде настоящей книги, выносимой на суд читателей. Насколько удачной оказалась попытка — судить читателям. Отзывы и пожелания будем рады получить по e-mail: [eugenesislow@hotmail.com](mailto:eugenesislow@hotmail.com).

Исследования были поддержаны рядом грантов РФФИ: «Оценка устойчивости экологических систем с помощью физического, математического и комплексного моделирования (на примере озера Байкал)» (грант РФФИ № 94-04-12360), «Оценка состояния планктонных сообществ открытого Байкала и параметров, характеризующих продуцирование и деструкцию органического вещества» (грант РФФИ № 01-04-97227), «Изучение механизмов функционирования экосистемы озера Байкал» (грант РФФИ № 02-04-49362); грантами: Рособразования по научной отраслевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы» «Создание эколого-информационной системы моделирования и прогнозирования состояния планктона озера Байкал», 2005 г.; Национального Центра Экологического Анализа и Синтеза (NCEAS) США, 2005–2006 г. «Массив данных по динамике планктона в озере Байкал за 60 лет: Исследование граней бриллианта Сибири» (ПЛАНКТОН ОЗЕРА БАЙКАЛ) / "The 60-year data set of plankton dynamics in Lake Baikal:

Examining facets of the jewel of Siberia” (LAKE BAIKAL PLANKTON); государственным контрактом «Разработка интегрального индекса для анализа и прогноза состояния экосистем на основе экологических целевых функций и проверка его применимости (на примере оз. Байкал и других водоемов Восточной Сибири)» по Федеральной целевой научно-технической программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 гг. по мероприятию «Проведение молодыми учеными научных исследований по приоритетным направлениям науки, высоких технологий и образования», 2006 г.

*Издание подготовлено при частичной финансовой поддержке Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный университет» на 2012 — 2016 гг. и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (грант 14 В 37.21.1252).*