



# КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

2010 Том 2 № 2

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

<i>Евин И. А.</i> Введение в теорию сложных сетей.....	121
<i>Мокин А. Ю.</i> О спектральных свойствах одного несамосопряженного разностного оператора.....	143
<i>Резаев Р. О., Трифонов А. Ю., Шаповалов А. В.</i> Система Эйнштейна–Эренфеста типа $(O, M)$ и асимптотические решения многомерного нелинейного уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова.....	151

### АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ЖИВЫХ СИСТЕМ

<i>Ризниченко Г. Ю.</i> Графические процессоры в биологии [High-performance parallel computing on GPUs for biological applications].....	161
<i>Джораев А. Р.</i> Гибридные вычислительные системы на основе GPU для задач биоинформатики .....	163
<i>Погорелова Е. А.</i> Математическая модель сдвиговых течений в вене при наличии облитерирующего тромба .....	169
<i>Киселев С. С., Комаров В. М., Масулис И. С., Озолин О. Н.</i> Распределение мононуклеотидных повторов в бактериальных хромосомах: A/T-треки преобладают над G/C-треками.....	183
<i>Шульга Л. А., Саакян С. В., Складнев Д. А.</i> Новый биометрический подход для автоматического анализа изображений сосудистой системы сетчатки глаза .....	189
<i>Левич А. П., Булгаков Н. Г., Рисник Д. В., Милько Е. С.</i> Экологический контроль окружающей среды по данным биологического и физико-химического мониторинга природных объектов .....	199

### МОДЕЛИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

<i>Словохотов Ю. Л.</i> Аналогии фазовых переходов в экономике и демографии .....	209
<i>Романовский М. Ю., Видов П. В., Пыркин В. А.</i> Является ли тик элементарным прыжком в схеме случайных блужданий на фондовом рынке?.....	219

# COMPUTER RESEARCH AND MODELING

---

2010 Volume 2 Number 2

---

## CONTENTS

### MATHEMATICAL MODELING AND NUMERICAL SIMULATION

- Yevin I. A.* Introduction to the theory of complex networks ..... 121  
*Mokin A. Ju.* On spectral properties of a nonselfadjoint difference operator ..... 143  
*Rezaev R. O., Trifonov A. Yu., Shapovalov A. V.* The Einstein–Ehrenfest system of  $(0, M)$ -type and asymptotical solutions of the multidimensional nonlinear Fokker–Planck–Kolmogorov equation ..... 151

### ANALYSIS AND MODELING OF COMPLEX LIVING SYSTEMS

- Riznichenko G. Yu.* Graphical processors in biology [High-performance parallel computing on GPUs for biological applications] ..... 161  
*Dzhoraev A. R.* GPU-accelerated hybrid systems for high-performance computing in bio-informatics ..... 163  
*Pogorelova E. A.* Mathematical model of shear stress flows in the vein in the presence of obliterating thrombus ..... 169  
*Kisselev S. S., Komarov V. M., Masulis I. S., Ozoline O. N.* Distribution of mononucleotide repeats in bacterial chromosomes: A/T-tracts dominate on G/C-tracts ..... 183  
*Shulga L. A., Saakyan S. V., Skladnev D. A.* A new biometric approach and efficient system for automatic detection and analysis of digital retinal images ..... 189  
*Levich A. P., Bulgakov N. G., Risnik D. V., Mil'ko E. S.* Biological and physico-chemical data from natural objects for ecological environmental monitoring ..... 199

### MODELS OF ECONOMIC AND SOCIAL SYSTEMS

- Slovokhotov Yu. L.* Phase transitions associated with economy and demography ..... 209  
*Romanovsky M. Yu., Vidov P. V., Pyrkin V. A.* Is a tick an elementary jump in a random walks scheme on the stock market? ..... 219

УДК: 574.52:57.045

## Экологический контроль окружающей среды по данным биологического и физико-химического мониторинга природных объектов

А. П. Левич<sup>а</sup>, Н. Г. Булгаков, Д. В. Рисник, Е. С. Милько

Государственное учебно-научное учреждение Биологический факультет  
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы 1, стр. 12

E-mail: <sup>а</sup>apl@chronos.msu.ru

Получено 24 марта 2010 г.

Предложены методы установления нормативов качества среды по данным экологического мониторинга: методы биоиндикации по показателям видового разнообразия и размерной структуры сообществ, по показателям рыбопродуктивности; метод диагностики для выявления причин экологического неблагополучия и их ранжирования по вкладу в степень неблагополучия; методы нормирования значимых для неблагополучия факторов окружающей среды.

Ключевые слова: биоиндикация, экологическая диагностика, экологическое нормирование, фитопланктон, видовое разнообразие

### Biological and physico-chemical data from natural objects for ecological environmental monitoring

A. P. Levich, N. G. Bulgakov, D. V. Risnik, E. S. Mil'ko

*Biological Faculty of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1-12, Moscow 119991, Russia*

**Abstract.** – Methods for establishing standards of environmental quality by data of ecological monitoring are proposed. These are: methods of bioindication by indices of species diversity and size structure of communities, by indices of fish productivity; method for searching for reasons of environmental trouble and ranking them by their contribution into the trouble; methods for standardization of factors which are important as causes of environmental trouble.

Keywords: bioindication, ecological diagnostics, ecological standardization, phytoplankton, species diversity

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2010, vol. 2, no. 2, pp. 199–207 (Russian).

Работа поддержана грантами РФФИ 09-07-00204а и 09-04-00541а.

## Введение

Существующая система контроля природной среды России крайне экологически непродуктивна из-за неэффективности принятых ныне в качестве нормативов качества среды предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ. В свою очередь, основная причина низкой эффективности нормативов ПДК связана с их установлением в лабораторных условиях в краткосрочных (дни) и хронических (недели) экспериментах на изолированных популяциях организмов, принадлежащих к небольшому числу тестовых видов, по ограниченному набору физиологических и поведенческих реакций отдельных видов по отношению к отдельным факторам без какого-либо учета их возможного взаимодействия. ПДК принимают в виде единых нормативов для огромных административных территорий, в то время как действие факторов зависит от специфических фоновых, климатических, хозяйственных и многих других характеристик конкретного региона. Количество веществ, для которых установлены ПДК, составляет около 1.5 тыс., тогда как число загрязняющих веществ антропогенного происхождения превысило миллион наименований. ПДК не учитывают косвенные эффекты и отдаленные последствия вредных воздействий, адаптационный потенциал биоты, целевое назначение и категории использования природных объектов. Негативным воздействием на качество природной среды могут обладать не только химические вещества, но и многие геофизические, гидрологические, климатические факторы, которые вовсе не фигурируют в нормативах ПДК. В силу указанных причин устанавливаемые по лабораторным испытаниям нормативы ПДК имеют слишком отдаленное отношение к состоянию реальных природных экосистем.

## Формулировка альтернативного подхода

Решение указанной проблемы лежит на пути разработки подхода к нормированию качества окружающей среды непосредственно по данным экологического мониторинга. Для этого необходима реализация следующих задач:

1. Создание электронных баз биологических и физико-химических данных (ретроспективных и современных) мониторинга состояния биосферы.
2. Разработка методов оценки состояния природных объектов по биологическим показателям (методов биоиндикации).
3. Разработка методов выявления физико-химических факторов, приводящих к экологическому неблагополучию биоты, и методов оценки вклада различных факторов в степень экологического неблагополучия (методов экологической диагностики).
4. Разработка метода расчета уровней физико-химических факторов, в пределах которых соблюдается экологическое благополучие биоты (метода экологического нормирования).
5. Разработка метода прогнозирования состояния водных объектов при различных сценариях природных и антропогенных воздействий на биосферу.
6. Разработка метода выявления неполноты программ физико-химического мониторинга по отношению к набору факторов, вызывающих экологическое неблагополучие.
7. Подготовка специалистов, владеющих экологически эффективными концепциями и методами.

## Информационная основа для реализации альтернативного подхода

Как было сказано выше, осуществление эффективной системы экологического контроля начинается с создания электронных баз многолетних данных биологического и физико-химического мониторинга. В решении этой проблемы должна помочь создаваемая информационно-аналитическая система (ИАС) «Экологический контроль природной среды по данным биологического и физико-химического мониторинга» (<http://ecograde.belozersky.msu.ru>; <http://ecograde.bio.msu.ru>). ИАС предназначена для создания в сети Интернет интегрированного

пространства для охвата знаний в области контроля природной среды, а также для отражения результатов экологического мониторинга (данных о биологических и физико-химических показателях, а также полученных на их основе оценок экологического состояния, экологически допустимых уровней вредных воздействий) природных объектов.

ИАС можно рассматривать как информационно-программный продукт, пригодный для использования в прикладной природоохранной деятельности. ИАС является уникальным доступным для научных исследований банком информации об экологическом состоянии пресноводных экосистем и возможных причинах его ухудшения на представительной части гидросферы мира.

В нынешнюю версию ИАС включены:

1. Информационный блок:

- а) библиотека электронных публикаций (научные статьи, монографии, материалы научных конференций), в которой представлены: способы оценки состояния экосистем по биологическим показателям (экспертные оценки качества окружающей среды, основанные на измерении в водных сообществах индексов, учитывающих обилие в пробе видов-индикаторов сапробности; на измерении индекса видового разнообразия; на определении степени деградации экосистемы методом экологических модификаций; на измерении параметров моделей ранговых распределений численностей групп организмов в сообществе; на оценке состояния экосистем по показателям эффективности ее функционирования (величины первичной продукции, общей продуктивности, дыхания; значений численности и биомассы видов, сообществ, трофических уровней и т. д.), по изменению морфологических, биохимических, цитогенетических, иммунологических характеристик, заболеваемости растений и животных, чувствительных к внешним воздействиям); методы нормирования абиотических воздействий на биоту путем измерения предельно допустимых для лабораторных тест-объектов концентраций загрязняющих веществ с помощью нахождения критических точек на кривой «доза – эффект» в природных экосистемах путем выделения в пространстве факторов окружающей среды области неблагополучия биоты и определения экологически допустимых уровней нарушающих воздействий на природные сообщества;
- б) набор пополняемых баз данных (БД) по экологии пресноводных объектов Баренцевского, Балтийского, Каспийского, Азовского, Черноморского, Среднеазиатского, Карского, Восточно-Сибирского, Тихоокеанского гидрографических районов и ряд прилагаемых к БД справочных материалов. В БД включены данные о качестве пресных вод, в том числе: сведения об индексах сапробности по фито- и зоопланктону, о биотических и олигохетных индексах по зообентосу, о гидробиологических классах качества вод, о первичных гидробиологических показателях (числе видов, численности и биомассе сообществ в целом и отдельных таксонов), включающая информацию по фито-, зоо-, бактериопланктону, перифитону, зообентосу и макрофитам, о гидрохимических и гидрологических показателях;
- в) справочный материал, содержащий нормативы санитарно-гигиенических и рыбохозяйственных ПДК веществ-загрязнителей;
- г) справочный материал по индивидуальным сапробностям видов фитопланктона, зоопланктона и зообентоса, представленных в базах данных, по методам расчета показателей качества вод, по методикам сбора гидробиологических проб, по программам гидробиологического и гидрохимического мониторинга, подробные перечни водных объектов и створов отбора проб, картографические материалы с указанием створов;
- д) классификаторы качества среды по биологическим и химическим показателям;
- е) толковый словарь терминов, относящихся к методам контроля природной среды;
- ж) персональные страницы отечественных и зарубежных экологов и специалистов в области охраны природы;
- з) объявления о научных экологических конференциях и конкурсах;

- и) каталог ссылок на web-сайты, посвященные проблемам контроля природной среды, а также web-сайты общеэкологической направленности;
  - к) коллекция экологических обучающих программ и игр.
2. Аналитический блок, состоящий из программного обеспечения, позволяющего на основе первичных данных биологического мониторинга, содержащихся в БД информационного блока, а также на основе собственных данных предполагаемого пользователя рассчитывать оценки экологического состояния природных объектов по индикаторным биологическим показателям. Два способа оценки реализованы в виде программного обеспечения, позволяющего проводить: а) расчет индекса сапробности сообщества гидробионтов по данным о численности видов – индикаторов загрязнения среды; б) расчет показателей разнообразия сообществ гидробионтов по данным о численности видов в сообществе: параметров ранговых распределений численностей и индекса выравненности.

В дальнейшем предполагается оснастить аналитический блок программами, предназначенными для экологической диагностики и экологического нормирования, т. е. для проведения границы между экологическим благополучием и неблагополучием на шкале значений биологического индикатора, для выявления физико-химических факторов, ответственных за возникновение экологического неблагополучия биологических индикаторов, для вычисления экологически допустимых уровней этих факторов, выход за пределы которых приводит к экологическому неблагополучию, для ранжирования факторов по степени их вклада в степень экологического неблагополучия.

ИАС может быть использована при решении целого ряда практических задач:

1. Экологическое обоснование и планирование природоохранных мероприятий, выбор их приоритетности.
2. Нормирование сбросов загрязняющих веществ, тепловых, физических, климатических и любых других типов воздействий на биоту. Прогноз последствий изменения климата.
3. Создание реестров экологического состояния используемых природных объектов.
4. Аналитическая поддержка экологического мониторинга.
5. Экологическое картирование гидрографических районов.
6. Совершенствование действующих программ экологического мониторинга.

## Методы анализа данных экологического мониторинга

Для реализации альтернативного концепции ПДК подхода необходимо решение целого ряда методических задач, связанных с биоиндикацией состояния природных экосистем, с экологической диагностикой, нормированием и ранжированием факторов окружающей среды.

В настоящее время наиболее часто используемым методом биоиндикации является применение индекса сапробности организмов фитопланктона, зоопланктона, перифитона. Однако для его вычисления требуется определение таксономической принадлежности каждого входящего в соответствующее сообщество вида. Кроме того, известно, что индекс сапробности является индикатором в основном органического загрязнения природных вод.

В дополнение к расчету индекса сапробности предлагаются следующие методы биоиндикации:

1. Метод расчета показателей видового разнообразия (ПВР) экологических сообществ – параметров ранговых распределений численностей видов и индексов выравненности, поскольку видовое разнообразие зависит от факторов, влияющих на качество среды (Левич, 1980, 2007; Баринаова, 2006; Забурдаева, 2007; Булгаков и др., 2009; Забурдаева и др., 2010). Преимущество применения этих показателей заключается, в частности, в том, что для их вычисления необходим только подсчет численностей видов без определения их видовой принадлежности, что существенно снижает требования к квалификации работников, участвующих в первичной обработке проб.

В качестве ПВР могут быть использованы: параметр  $z$  из экспоненциальной модели ранговых распределений Мотомуры (Motomura, 1932)  $n_i = n_1 z^{i-1}$ , где  $n_i$  – численности особей

ранга  $i$ ; параметр  $\beta$  гиперболической модели ранговых распределений (Левич, 1978)

$$n_i = \frac{n_i}{i^\beta}; \text{ индекс } d_k, \text{ равный } d_k = 1 - \frac{1}{k} \left( \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{\sum_{i=1}^w n_i} \right), \text{ где } k - \text{ число видов, используемых}$$

для расчета,  $w$  – общее число видов в сообществе.

2. Метод расчета показателей размерной структуры (ПРС), основанный на расчетах средней массы клетки в пробе и на соотношении численностей и биомасс отдельных размерных классов сообщества (Булгаков и др., 2009). Размерная структура сообществ гидробионтов, так же как и видовая, может реагировать на качество вод. Применение ПРС, как и ПВР, не требует определения видовой принадлежности организмов и, кроме того, позволяет проводить необходимые измерения в режиме реального времени и без предварительного отбора и «ручной» обработки проб с помощью уже существующей инструментальной базы, автоматизирующей и определение размеров, и все расчеты оценок состояния.

В качестве ПРС могут быть использованы индексы:  $S_m = \frac{\bar{m} - \bar{m}_{\min}}{\bar{m}_{\max} - \bar{m}_{\min}}$ , где  $\bar{m}$  – средняя

масса организма в данном наблюдении,  $\bar{m}_{\min}$  и  $\bar{m}_{\max}$  – наименьшая и наибольшая массы организмов среди всех наблюдений,  $\bar{m} = \frac{b}{n}$ , где  $b$  и  $n$  – соответственно суммарные био-

масса и численность сообщества организмов в данном наблюдении;  $S_n = \frac{n_k}{n_k + n_M}$ , где  $n_M$

и  $n_k$  – соответственно численности классов мелких и крупных организмов в сообществе;

$S_b = \frac{b_k}{b_k + b_M}$ , где  $b_M$  и  $b_k$  – соответственно биомассы классов мелких и крупных организмов в сообществе.

3. Метод, основанный на уловах и урожайности промысловых рыб (Bulgakov et al., 1995).

При использовании любых биоиндикаторов возникает проблема установления границ экологического благополучия (ГЭБ) между различными градациями качества окружающей среды. Обычно эту проблему решают без специального обоснования, ориентируясь на мнение экспертов. Авторами предложено менее субъективное решение на основе статистических методов распознавания образов в пространстве многомерных данных экологического мониторинга. С помощью этих же методов предложено отыскивать экологически допустимые уровни (ЭДУ) физико-химических факторов, выход за пределы которых приводит к экологическому неблагополучию биоты.

Величины ГЭБ и ЭДУ предложено рассчитывать методом экологически допустимых нормативов (ЭДН) (Levich, Terekhin, 1997; Левич и др., 2004, 2008). Преимущества ЭДН заключены в том, что они: 1) носят не общегосударственный, а региональный характер, т.е. учитывают фоновое загрязнение окружающей среды (без необходимости его измерения), климатические, хозяйственные и другие специфические характеристики природного объекта; 2) применимы не только к химическим веществам, но и к любым абиотическим факторам, воздействующим на природные сообщества, например к температуре, скорости ветра, уровням воды, интенсивности водопотребления, радиоактивным загрязнениям и т. п. (Максимов и др., 2009, 2010); 3) учитывают не изолированные вредные воздействия, а реально сложившиеся в природе комплексы потенциально вредных воздействий; многочисленные косвенные эффекты воздействия, совокупное действие которых может быть более сильным, нежели эффект прямых влияний; 4) дифференцированы для природных объектов различного целевого назначения и для различных

требований к качеству окружающей среды; 5) допускают уточнение по мере накопления новых экологических данных о природном объекте; 6) могут быть рассчитаны не только для текущих значений физико-химических факторов, но и для их экстремальных значений в заданные периоды и средних значений за различные периоды усреднения.

При использовании метода ЭДН данные биологического и физико-химического мониторинга представляют в виде диаграммы, где по оси  $x$  отложены значения физико-химического показателя среды (например, концентрация вещества, БПК<sub>5</sub>, ХПК, температура воды, рН, водность и т. д.), а по оси  $y$  – значение индикаторной биологической характеристики (рис. 1).

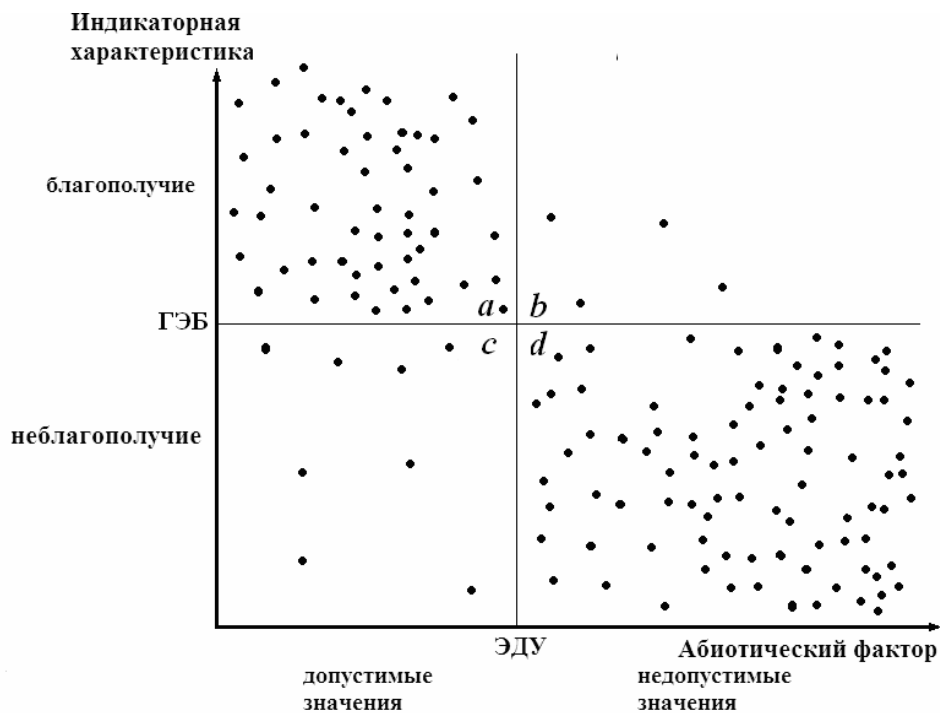


Рис. 1. Диаграмма распределения наблюдений при поиске границы (ГЭБ) между значениями индикатора, соответствующими благополучным и неблагополучным состояниям биоты, и верхней границы ЭДУ абiotic фактора. Область  $a$  – благополучные наблюдения по индикаторной характеристике при соблюдении ЭДУ; область  $b$  – благополучные наблюдения по индикаторной характеристике при несоблюдении ЭДУ; область  $c$  – неблагополучные наблюдения по индикаторной характеристике при соблюдении ЭДУ; область  $d$  – неблагополучные наблюдения по индикаторной характеристике при несоблюдении ЭДУ

Полученные в результате проведения горизонтальной и вертикальной линий области на диаграмме обозначены латинскими буквами  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ . Вертикальная линия на диаграмме соответствует предполагаемой границе между значениями фактора, по одну сторону от которой фактор не нарушает экологическое благополучие, а по другую – нарушает. Эта граница названа экологически допустимым уровнем (ЭДУ) фактора и может быть принята в качестве норматива его экологически допустимого воздействия. При этом можно отыскивать верхний ЭДУ (неблагополучными считаются значения фактора справа от границы), например для концентраций загрязняющих веществ, биогенных элементов, климатических, гидрологических факторов, рН и нижний ЭДУ (неблагополучными считаются значения фактора слева от границы), например для концентрации биогенных элементов, кислорода, климатических, гидрологических факторов, рН. Горизонтальная линия указывает границу экологического благополучия (ГЭБ) между значениями индикатора, соответствующими благополучным и неблагополучным состояниям биоты.

Для формального проведения процедуры минимизации вводят критерий точности, заимствованный из работы С. В. Чеснокова (1982). Точность поиска ГЭБ для индикатора



есть  $T_{и} = \frac{n(a)}{n(a+b)}$ , где  $n(a)$  и  $n(a+b)$  – количества наблюдений в соответствующих областях.

При определении ЭДУ для фактора критерий точности есть  $T_{ф} = \frac{n(d)}{n(b+d)}$ , где  $n(d)$  и  $n(b+d)$  – количества наблюдений в соответствующих областях. Минимальное количество наблюдений  $n(b)$  соответствует максимумам обоих критериев точности  $T$ .

Вторым критерием поиска является представительность  $Pr$ , вычисляемая как доля наблюдений в классах благополучия (или неблагополучия) для биологического индикатора ( $Pr_{и}$ ) и физико-химического фактора ( $Pr_{ф}$ ).

Задача метода ЭДН – отыскать факторы, для которых на диаграмме (рис. 1) как можно менее заполнен наблюдениями сектор  $b$ . Поиск производится путем максимизации критерия  $K = \sqrt{(Pr+0.5)T}$ , где  $Pr = \sqrt{Pr_{и}Pr_{ф}}$ ,  $T = \sqrt{T_{и}T_{ф}}$  (слагаемое 0.5 введено, чтобы участвующие в поиске значения критериев  $Pr$  и  $T$  были статистически равнозначными).

Кроме экологической диагностики и нормирования, т. е. выявления факторов, ответственных за экологическое неблагополучие, и проведения границ благополучия для индикатора и фактора, метод ЭДН позволяет проводить процедуру ранжирования факторов по величине их вклада в экологическое неблагополучие. Эта величина задается критерием полноты (Чесноков,

1982)  $\Pi = \frac{n(d)}{n(c+d)}$ , где  $n(d)$  и  $n(c+d)$  – количества наблюдений в соответствующих областях.

## Апробация метода ЭДН

Предложенные подходы и методы были апробированы на данных подбассейна Нижнего Дона (Левич и др., 2008), рек Подмосковья (Булгаков и др., 2009). В настоящей работе метод ЭДН применен к экологическому контролю водных объектов подбассейна Нижней Волги (12 створов наблюдения за 1989–2006 гг.). Исходные данные были взяты из ИАС «Экологический контроль природной среды по данным биологического и физико-химического мониторинга». Данными для анализа служили значения численностей видов фитопланктона и значения физико-химических факторов, полученные для одних и тех же створов и дат. Были проведены следующие исследования:

1. Рассчитаны ПВР для сообществ фитопланктона.
2. Выбрана модель, адекватно описывающая ранговые распределения численностей видов.
3. Исследована чувствительность алгоритма поиска значений биологических индикаторов к выбору количественных критериев поиска.
4. Рассчитаны границы благополучия для значений биологических индикаторов.
5. Рассчитаны значения ЭДУ факторов среды, приводящих к экологическому неблагополучию.
6. Предложены ПВР, наиболее пригодные для целей биоиндикации.

В результате были рассчитаны ПВР  $z_1, z_2, z_3, z_4, d_1, d_2, d_3, d_4$  (цифры в значениях индексов означают количество оставленных для анализа доминирующих по численности видов в каждом наблюдении).

Были предложены критерии выбора наиболее оптимальных ПВР: разброс значений границы благополучия для различных факторов; жесткость найденных ЭДУ для каждого из факторов; жесткость границы благополучия (максимальная зона неблагополучия по биоиндикатору); точность (биоиндикатора, фактора, результирующая); количество факторов с найденными ЭДУ и границами благополучия; доступное для анализа количество наблюдений.

Лидирующими по большинству критериев оказались показатели  $d_1, d_2, d_3$ . Показатели  $z$  уступают им по большинству критериев. Дополнительными недостатками показателей  $z$  являются сложность (в сравнении с показателями  $d$ ) и низкая скорость расчета, поскольку для нахождения  $z$  требуется проведение нелинейного регрессионного анализа.

В табл. 1 приведены значения ЭДУ факторов, вызывающих экологическое неблагополучие, определенное по ПВР  $d_1$ .

Табл. 1. ЭДУ значимых абиотических факторов бассейна Нижней Волги, установленные по показателю  $d_1$

Фактор	ЭДУ верхний (в скобках – ЭДУ нижний)	Точность фактора для верхнего ЭДУ (в скобках – для нижнего)	Полнота фактора для верхнего ЭДУ (в скобках – для нижнего)
Na+K, мг/л	(19.8)	(0.96)	(0.57)
Цветность, град	(21.33)	(0.83)	(0.54)
Взвешенные вещества, мг/л	21.33	0.92	0.44
Растворенный кислород, мг/л	10	0.83	0.44
Железо общее, мг/л	(0.04)	(0.85)	(0.44)
Запах, баллы	(1)	(0.82)	(0.41)
pH	8.23	0.85	0.39
Азот минеральный суммарный, мг/л	0.536	0.85	0.38
пп/ДДТ, мкг/л	0.002	0.95	0.37
Азот нитратный, мг/л	0.465 (0.24)	0.83 (0.81)	0.35 (0.36)
СПАВ, мг/л	(0.013)	(0.84)	(0.36)
Хлориды, мг/л	43.5	0.80	0.35
Жесткость, мг-экв/л	4	0.81	0.35
Кальций, мг/л	57.2 (41.3)	0.81 (0.83)	0.35 (0.31)
Кремнекислота, мг/л Si	2.7	0.84	0.35
Прозрачность, см	(12.5)	(0.82)	(0.35)
Магний, мг/л	14	0.85	0.34
Углекислый газ, мг/л	(1)	(0.92)	(0.34)
Фосфаты, мг/л P	(0.008)	(0.93)	(0.34)
Фенолы, мг/л	0.004	0.83	0.32
Нефтепродукты, мг/л	0.19	0.89	0.31
Гидрокарбонатный анион, мг/л	(84.9)	(0.91)	(0.31)

## Заключение

Полученные значения ЭДУ могут быть предложены в качестве дополнения или замены нормативов ПДК. Обращаясь к терминологии, описывающей качество окружающей среды, ГЭБ можно характеризовать как целевой биологический показатель (норматив) качества, а ЭДУ – как целевой физико-химический показатель (норматив) качества (Левич и др., 2009).

Нормативы ЭДУ могут быть включены (полностью аналогично нормативам ПДК) в общепринятые технологии природоохранной деятельности – в расчеты нормативов предельно допустимых вредных воздействий, в расчеты нормативов предельно допустимых сбросов, в составление схем комплексного использования и охраны природных объектов, в системы прогнозов качества среды и т. п.

Метод ЭДН, помимо расчетов нормативов (целевых показателей) ГЭБ и ЭДУ, порождает комплекс методов для экологического прогнозирования по сценариям потенциально опасных физико-химических факторов (Булгаков и др., 1997; Maximov et al., 1999) и для выявления неполноты программ физико-химического мониторинга (Levich, Terekhin, 1997; Булгаков и др., 2009).

## Список литературы

Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразие водорослей-биоиндикаторов окружающей среды. Тель-Авив. 2006. 498 с.

- Булгаков Н. Г., Левич А. П., Максимов В. Н. Прогноз состояния экосистем и нормирование факторов среды в водных объектах Нижнего Дона // *Известия РАН. Сер. биол.* 1997. № 3. С. 374–379.
- Булгаков Н. Г., Курочкина В. А., Левич А. П., Максимов В. Н., Мамихин С. В. Биоиндикация экологического состояния по размерной и ранговой структурам фитопланктона водных объектов Московского региона // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический.* 2009. Т. 4. Вып. 3, Приложение 1. Часть 1. С. 106–114.
- Забурдаева Е. А. Ранговые распределения численности клеток фитопланктона как инструмент биоиндикации качества вод (на примере водных объектов бассейна р. Дон) // *Общая и прикладная ценология.* 2007. № 6. С. 27–33.
- Забурдаева Е. А., Бедова В. П., Максимов В. Н. Исследование разнообразия бентофауны озер республики Марий Эл методом ранговых распределений для целей биоиндикации качества вод // *Вестник МГУ. Сер. 16. Биология.* 2010 (в печати).
- Левич А. П. Экстремальный принцип в теории сообществ // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* Л.: Гидрометеиздат, 1978. Т. 1. С. 164–82.
- Левич А. П. Структура экологических сообществ. М.: Издательство Московского университета, 1980. 180 с.
- Левич А. П. Анализ ценозов в экологии сообществ с помощью ранговых распределений // *Общая и прикладная ценология.* 2007. № 5. С. 14–19.
- Левич А. П., Булгаков Н. Г., Максимов В. Н. Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга. М.: НИИ «Природа», 2004. 271 с.
- Левич А. П., Забурдаева Е. А., Булгаков Н. Г., Максимов В. Н., Мамихин С. В. Лабораторные методы определения ПДК следует дополнить методами установления экологически допустимых нормативов вредных воздействий по данным экологического мониторинга // *Материалы конференции «Критерии оценки качества вод и методы нормирования антропогенных нагрузок».* Борок: ИВП РАН. 2008. Часть 1. С. 92–107.
- Левич А. П., Забурдаева Е. А., Максимов В. Н., Булгаков Н. Г., Мамихин С. В. Поиск целевых показателей качества для биоиндикаторов экологического состояния и факторов окружающей среды (на примере водных объектов р. Дон) // *Водные ресурсы.* 2009. Т. 36. №6. С. 730–742.
- Максимов В. Н., Соловьев А. В., Левич А. П., Булгаков Н. Г., Абакумов В. А., Терехин А. Т. Методика экологического нормирования воздействий на водоемы, не нормируемых методами биотестирования (на примере водных объектов бассейна Дона) // *Водные ресурсы.* 2009. Т. 36. № 2. С. 335–340.
- Максимов В. Н., Левич А. П., Булгаков Н. Г., Соловьев А. В., Абакумов В. А., Терехин А. Т. Исследования сезонной динамики экологически допустимых уровней водности, температуры и рН в водных объектах бассейна Дона // *Вестник МГУ. Серия 16. Биология.* 2010 (в печати).
- Чесноков С. В. Детерминационный анализ социально-экономических данных. М.: Наука, 1982. 168 с.
- Bulgakov N. G., Dubinina V. G., Levich A. P., Teriochin A. T. A Method of Searching for Correlation Between Hydrobiological Indices and Abiotic Factors (Using Commercial Fish Catches and Productivity as Examples) // *Biology Bulletin of the Russian Academy of Science.* 1995. V. 22. № 2. P. 184–190.
- Levich A. P., Terekhin A. T. A Method to Calculate Ecologically Admissible Levels of Impact of Freshwater Ecosystems // *Water Resources.* 1997. V. 24. № 3. P. 302–309.
- Maximov V. N., Bulgakov N. G., Levich A. P. Quantitative Methods of Ecological Control: Diagnostics, Standardization, and Prediction // *Environmental indices: Systems Analysis Approach.* London: EOL SS Publishers, 1999. P. 363–381.
- Motomura I. Statistical treatment of association // *Japan J. Zool.* 1932. V. 44. P. 379–383.