

ПРИМЕНЕНИЕ метода **ДЕТЕРМИНАЦИОННОГО АНАЛИЗА** и ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ для ОЦЕНКИ состояния водной ЭКОСИСТЕМЫ

С помощью оптимизационной процедуры метода детерминационного анализа для рассматриваемой пары компонентов индикатор – фактор определяются экологически допустимые уровни (ЭДУ) на основе критериев метода – точности и полноты, представляющих собой частотные оценки, определяющие необходимое и достаточное условия оптимизации. Сформированы таблицы нормированных значений компонентов с использованием функции желательности Харрингтона. Полученные интервалы значений компонентов могут служить экспертной оценкой реального состояния экосистемы озера (на примере оз. Неро).

Введение

Технология контроля природной среды складывается из экологического мониторинга и анализа полученных данных, на основе которого принимаются решения о перспективах практического использования экосистем. Анализ данных состоит из нескольких этапов, включающих, в частности, индикацию по биотическим показателям и экологическое нормирование с целью оценки состояния экосистемы.

В настоящее время существует множество разнообразных индексов для оценки состояния водных экосистем: по продукционным показателям, по внешней нагрузке и содержанию биогенных элементов и органического вещества, по содержанию кислорода как необходимого элемента жиз-

Л. А. Кучай*,
научный сотрудник
лаборатории гидро-
логии и гидрохимии,
ФГБУН Институт био-
логии внутренних вод
им. И.Д. Папанина
Российской академии
наук

Е. Н. Соколова,
младший научный со-
трудник лаборатории
гидрологии и гидрохи-
мии, ФГБУН Институт
биологии внутрен-
них вод им. И.Д.
Папанина Российской
академии наук

неспособности гидробионтов. Но все большее количество сторонников появляется у обобщенной оценки благополучия экосистемы с помощью интегрированного ответа на вопрос о «здоровье» ее компонентов, о допустимых или безопасных границах этих компонентов. Поскольку гидробионты водной экосистемы испытывают одновременное воздействие множества факторов среды, вопрос о зависимости их от этих факторов чрезвычайно актуален. Стандартные статистические методы анализа компонентов экосистемы, как правило, показывают отсутствие значимых связей. К тому же как биологические, так и гидрохимические переменные редко распределены по гауссову закону, из-за чего применение многих привычных статистических процедур оказывается некорректным.

Детерминационный анализ [1] и метод экологических норм [2, 3] предлагают пути преодоления обозначенных трудностей. Использование этих методов продемон-

*Адрес для корреспонденции: Lak@ibiw.yaroslavl.ru

Таблица 1

Границы экологически допустимых уровней (ЭДУ) для компонентов первой группы экосистемы оз. Неро

Индикатор	Фактор	ЭДУ индикатора	ЭДУ Фактора	Точность	Полнота
Хл	PO ₄	25,53-70,99	0,01-0,02	0,96	0,79
Хл	NH ₄	10,32-24,02	0,02-0,04	1,00	0,75
Хл	N _{мин}	30,08-51,29	0,03-0,08	1,00	0,64
Хл	P _{общ}	48,26-67,96	0,09-0,14	0,92	0,64
Хл	N _{общ}	48,26-67,96	1,63-2,17	0,92	0,76
Хл	БПК	48,18-60,47	4,66-8,53	1,00	0,47
Хл	C _{взв}	67,41*	6,04*	0,95	0,66
Хл	ХПК	51,8-81	29,3-50,3	0,93	0,43
ПП	PO ₄	4,5-6,8	0,05-0,063	0,90	0,54
ПП	NH ₄	4,5-7,4	0,026-0,103	0,89	0,47
ПП	N _{мин}	4,6-7,4	0,026-0,103	0,89	0,47
ПП	pH	3,74-5	7,96-8,6	0,94	0,54
ПП	БПК	1,32-4,08	4,02-6,24	0,87	0,69
ПП	ХПК	1,29-3,14	26,6-36,2	0,75	0,79
ПП	Хл	1,24-2,92	48,54-103,5	0,89	0,63
П/Д	ХПК	1,35-1,94	26,22-51,06	0,95	0,38
Д	ХПК	1.86-2,9	31,5-46,7	1,00	0,72

* – верхние границы интервалов

стрировано в настоящей работе на примере реальной экосистемы оз. Неро.

Неро – самое большое озеро в пределах Ярославского Поволжья, известное с древнейших времен и нашедшее отражение в одном из памятников литературы как Ростовское озеро. Расположено оно в южной части Ростовской низины и принадлежит к бассейну Горьковского водохранилища. Современное оз. Неро – эвтрофный мелководный водоем. Донные отложения его богаты сапропелем, который представляет интерес не только как ценное удобрение, но и как лечебный агент. К его промышленной добыче приступали неоднократно, но из-за отсутствия сиюминутной прибыли неоднократно прекращали [4].

Первые самостоятельные труды, посвященные гидрологическим и гидробиологическим исследованиям, зафиксированы в 1895-1915 гг. [4]. Впоследствии, в разные годы XX века, уточнялись сведения о морфометрии озера, его гидрологии и гидрохимии, обобщались гидробиологические данные. Вместе с тем, сведения о многих показателях гидрологического и гидрохи-

мического режимов, особенно их сезонная и межгодовая динамика, были весьма ограничены. С целью устранения существующих пробелов в исследовании экосистемы озера, научными сотрудниками ИБВВ РАН в период с 1987 по 1991 гг., а затем с 2000 по 2005 гг. было проведено обследование озера, охватывавшее всю его акваторию и притоки [4, 5].

Материалы и методы исследования

В настоящей работе использовались данные наблюдений на 16 станциях в течение вегетационных периодов указанных лет.

Исследование сопряженности компонентов экосистемы оз. Неро проводилось с помощью компьютерной программы, разработанной сотрудниками кафедры биофизики биологического факультета МГУ [2].

Рассматривались 3 типа компонентов: гидробиологические – хлорофилл «а» (Хл) (интегральная концентрация, мкг/л), первичная продукция (ПП), (интегральная

концентрация, мг O_2 /л), деструкция (Д, мг O_2 /л), отношение продукции к деструкции (П/Д, б/р); гидрохимические, включающие биогенные элементы — азот, фосфор (общие и неорганические формы, мг/л) и органическое вещество (общая форма, мг/л), а также кислород, БПК, ХПК (мг O_2 /л), макрокомпоненты солевого состава — кальций, калий, натрий, магний, хлор, сульфаты, сумма ионов (Σ и) (мг/л), жесткость (Ж), щелочность (Щ), сумма анионов (Σ а), сумма катионов (Σ к) (мг-экв/л); гидрофизические — электропроводность (Σ мкСм/см) и температура воды ($T^\circ C$).

Анализировались два вида сопряженности компонентов:

- гидробиологические компоненты с биогенными элементами, органическим веществом (взвешенным), кислородом, рН, БПК, ХПК (табл. 1);

- гидробиологические компоненты с макроэлементами солевого состава и гидрофизическими компонентами (табл. 2).

Включение макрокомпонентов солевого состава в элементы среды произведено по следующим причинам. Вода оз. Неро относится к гидрокарбонатному классу группы Са [4]. Нормальное функционирование его экосистемы во многом определяется свойствами карбонатно-кальциевой системы.

Ключевые слова: экосистема, оценка состояния, функция желательности, нормирование

От состояния равновесия между ее элементами зависят такие важные процессы как фотосинтез, растворение и выпадение солей. Устойчивость озерной воды к внешним воздействиям также является функцией элементов этой системы. Поэтому оценка состояния экосистемы, определяемая с помощью всевозможных индексов и учитывающая равновесие элементов солевого состава, может быть весьма полезной.

В каждой анализируемой паре компонентов определен фактор и индикатор. Как правило, в качестве факторов рассматривались элементы среды, а в качестве индикаторов — гидробиологические компоненты. Значения точности и полноты являются вероятностными характеристиками сопряженности компонентов [2].

Анализ данных мониторинга, как было сказано выше, включает в себя и задачу экологического нормирования с целью оценки состояния системы. Оценка состояния сложных систем, каковою, несомненно, является экосистема, приводит к многокритериальным задачам, при решении которых используются методы нечеткой логики, а именно функции принадлежности. В качестве одной из таких функций часто применяется функция желательности Харрингтона [6].

Таблица 2

Границы ЭДУ для компонентов второй группы экосистемы оз. Неро

Индикатор	Фактор	ЭДУ индикатора	ЭДУ фактора	Точность	Полнота
Хл	SO_4	77,2-85,2	24,2-32,7	0,95	0,7
Хл	Са	85-102	28-40	0,94	0,57
Хл	Σ а	70,61-79,5	3,31-3,7	1	0,72
Хл	Σ к	41-44	3,82-4,3	1	0,92
Хл	Σ и	40,95-46,9	294-333	1	
Хл	T	50,76-77,00	7,00 -22,00	1	0,38
Хл	Э	65,08-76,05	226,5-283,3	1	0,56
ПП	SO_4	3,62-4,69	21,65-31,01	1	0,62
ПП	Са	1,37-2,67	35-57,4	0,91	0,5
ПП	Σ к	0,54-1,23	3,74-4,94	1	0,83
ПП	Σ и	2,1-6,07	239-311,4	1	0,64
ПП	T	2,12-3,68	8-17	0,9	0,81

Таблица 3

Психофизическая шкала Харрингтона

Лингвистическая оценка	Интервальные значения функции желательности
Очень хорошо	1,00- 0,80
Хорошо	0,80-0,63
Удовлетворительно	0,63-0,37
Плохо	0,37-0,20
Очень плохо	0,20-0,00

Функция желательности переводит наблюдаемые значения в единую безразмерную числовую шкалу [0-1] с фиксированными границами. В задачах оценки состояния экосистем конкретным значениям экологического параметра функция желательности ставит в соответствие условные баллы экологического состояния. Стандартные отметки на шкале желательности Харрингтона приведены в *табл. 3*.

Функция Харрингтона имеет вид: $G(X) = \exp(-Z^2(X))$, где $Z(X) = (2X-a-b) / (b-a)$; параметры a, b – границы диапазона желательности, выбираемые различным образом. Соотнесение текущего значения индикаторной характеристики с максимумом или признание наиболее вероятного значения этой характеристики

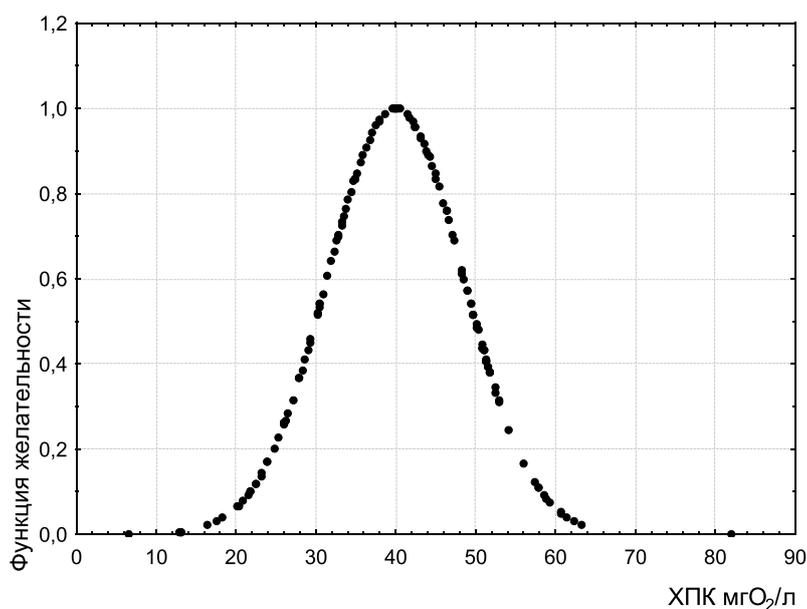


Рис. 1. Функция желательности величин ХПК.

наиболее предпочтительной (желательной) – это различные формы построения шкал. Для конкретного водоема произвол в выборе двусторонних границ его компонентов может быть устранен, если принять за наиболее предпочтительные величины этих компонентов среднеарифметические значения рядов многолетних наблюдений, и установить границы благополучия с помощью среднеквадратического отклонения [7]. Таким образом, может быть дана оценка состояния реальной экосистемы по шкале Харрингтона. Задача, которая решается при этом – формирование таблиц нормированных значений компонентов этой экосистемы на основе построения их функций желательности.

Результаты и их обсуждение

В настоящей работе функции желательности построены для биогенных элементов и органического вещества оз., БПК, ХПК и следующих макрокомпонентов солевого состава: магния, кальция, сульфатов, калия, хлора, натрия, щелочности (HCO_3), электропроводности и жесткости воды. На основе этих функций рассчитаны диапазоны значений компонентов, соответствующие разным оценкам, и составлены таблицы (*табл. 4, 5*), которые дают возможность по результатам последующих измерений сразу произвести оценку современного состояния экосистемы по выбранным компонентам. Для примера на *рис. 1* приведена функция желательности ХПК.

Отметим, что интервалы сопряженности рассматриваемых компонентов, рассчитанные с применением детерминационного анализа, за редким исключением, входят в границы величин компонентов, которые по шкале Харрингтона относятся к областям «очень хорошо» и «хорошо».

Используя таблицы нормирования компонентов, сопоставляя оценки состояния экосистемы год от года, можно утверждать, в каком направлении она изменяется. Кроме того, для оценки экологической ситуации можно рассчитать обобщенную желательность: $D = (d_1 * d_2 * \dots * d_n)^{1/m}$, где d_i – желательность i -того компонента, а m – число компонентов, использованных для расчета [8]. Располагая на шкале 0-1 полученные значения D различных водных экосистем, можно сравнивать их состояния.

Таблица 4

Нормированные значения гидрохимических компонентов оз. Неро
(размерность компонентов мг/л)

	N _{общ}	P _{общ}	NH ₄	PO ₄	БПК	ХПК	C _{общ}
Очень хорошо	1,28-1,84	0,082-0,144	0,024-0,057	0,012-0,042	3,78-6,24	31,1-43,2	12,4-16,5
Хорошо	1,16-1,28 1,84-1,97	0,07-0,082 0,144-0,158	0,016-0,024 0,057-0,065	0,006-0,012 0,042-0,051	3,31-3,78 6,24-6,81	29,0-31,1 43,2-45,6	11,6-12,4 16,5-17,5
Удовлетворительно	0,96-1,16 1,97-2,15	0,048-0,07 0,158-0,176	0,01-0,016 0,065-0,078	0,001-0,006 0,051-0,06	2,51-3,31 6,81-7,66	24,5-29 45,6-49,2	10,0-11,6 17,5-18,5
Плохо	0,81-0,96 2,15-2,31	0,032-0,048 0,176-0,195	0,078-0,087	0,06-0,068	1,75-2,51 7,66-8,37	21,5-24,5 49,2-52,8	9,1-10,0 18,9-20,0
Очень плохо	<0,81 >2,31	<0,032 >0,195	<0,01 >0,087	<0,001 >0,068	<1,75 >8,37	<21,5 >52,8	<9,1 >20,0

Закключение

Необходимо отметить, что при использовании предложенных методов чрезвычайно важно наличие пополняемого банка информации и сравнительный анализ оценок различных временных периодов, что позволит составлять экологические прогнозы.

Кроме того, важным является решение вопроса о границах между нормальным и

паталогическим состоянием экосистемы, что представляет собой предмет соглашения между исследователями.

Предстоит тщательный сравнительный анализ оценок состояния экосистемы по данным последующих экспедиций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-05-00593.

Таблица 5

Нормированные значения содержания основных компонентов солевого состава вод оз. Неро

Оценка	Интервал значений функций желательности	Ca мг/л	Ж мг-экв/л	Mg мг/л	Na мг/л	K мг/л	SO ₄ мг/л	Cl мг/л	Э мкСм/см
Очень хорошо	1-0.8	36,8-54,2	3,1-4,2	13-19	8,5-15	3-4	20-39	14-28,4	286-423
Хорошо	0.8-0.63	32-36,8 54,2-60	2,8-3,1 4,2-4,6	11,4-13 19-20,5	6,7-8,5 15-17	2,7-3 4-4,3	15-20 39-43	10,3-14 28,4-32	246-286 423-458
Удовлетворительно	0.63-0.37	27,3-32 60-64	2,5-2,8 4,6-4,8	10-11,4 20,5-22	5-6,7 17-18,6	2,5-2,7 4,3-4,5	10-15 43-48	32-35	210-246 458-500
Плохо	0.37-0.2	21,7-27,3 64-69	2,1-2,5 4,8-5,2	9-10 22-24,5	3,7-5 18,6-21	2,2-2,5 4,5-4,8	5-10 48-55	35-40	500-540
Очень плохо	0.2-0	< 27 > 69	<2,1 > 5,2	< 9 > 24,5	< 3,7 > 21	<2,2 > 4,8	<5 > 55	<28 > 40	<210 > 540

Литература

1. Чесноков С. В. Детерминационный анализ социально-экономических данных. М.: Наука, 1982. 168 с..
2. Левич А. П. Экологический контроль окружающей среды по данным биологического и физико-химического мониторинга природных объектов / А. П. Левич, Н. Г. Булгаков, Д. В. Рисник, Е. С. Милько // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. № 2. С. 161-170.
3. Булгаков Н. Г. Анализ экологического состояния вод для отдельных створов Нижней Волги на основе биоиндикации по показателям видового разнообразия фитопланктона / Н. Г. Булгаков, Д. В. Рисник, А. П. Левич, Е. С. Милько // Вода: химия и экология. 2010. № 12. С. 27-34.
4. Бикбулатов Э. С. Гидрология и гидрохимия озера Неро / Э. С. Бикбулатов, Е. М. Бикбулатова, А. С. Литвинов, С. А. Поддубный. Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский дом печати», 2003. 192 с.
5. Состояние экосистемы озера Неро в начале XXI века / [отв. редактор В. И. Лазарева]; Ин-т биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. М.: Наука, 2008. 406 с..
6. Harrington E. C. The desirability Function. Industrial Control. 1965, V 21, № 10, p. 494-498.
7. Бикбулатов Э. С. Дифференциальные экологические нормы для биогенных элементов и органического вещества Рыбинского водо-

хранилища / Э. С. Бикбулатов, И. Э. Степанова, Е. М. Бикбулатова // Мат. конф. «Современные проблемы гидрохимии и формирования качества вод». Ростов-на-Дону: Изд-во «Виразж», 2010. С. 191-194.

8. Левич А. П. Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга / А. П. Левич, Н. Г. Булгаков, В. Н. Максимов. М.: Издательско-полиграфический комплекс НИИ – Природа, 2004. 273 с.

Авторы выражают благодарность д.б.н. кафедры биофизики МГУ А.П. Левичу за консультации в процессе работы по применению детерминационного метода в экологии и к.х.н. Э.С. Бикбулатову за идею использования статистических характеристик данных наблюдения при построении функций желательности компонентов экосистемы.

L.A. Kuchai, E.N. Sokolova

APPLICATION OF DETERMINATION ANALYSIS AND ECOLOGICAL NORMALIZATION FOR STATE ESTIMATION OF A WATER SYSTEM

Ecological allowable levels are detected using optimization procedure of determination analysis for a pair of ecosystem components: an indicator and a factor. This estimation bases on precision and completeness as a criterions which are rating curves determining necessary and sufficient optimization conditions. Tables of normalized component values were created using Harrington's desirability function. Obtained limits may be expert appraisals of a real state of a lake ecosystem (as an example of the Nero lake).

Key words: ecosystem, state estimation, desirability function, normalization