

*Рисник Д.В.*

## **БИОИНДИКАЦИЯ КАЧЕСТВА ВОД ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ РАЗНООБРАЗИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И ДИАГНОСТИКА ПРИЧИН ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НЕБЛАГОПОЛУЧИЯ НИЖНЕЙ ВОЛГИ\***

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Биологический факультет, кафедра общей экологии.

Допустимые уровни факторов среды устанавливаются по их воздействию на биологические объекты. Так, нормативы ПДК определяют методами биотестирования в лабораторных условиях *in vitro* в краткосрочных (дни) и пролонгированных (недели) опытах на изолированных популяциях, принадлежащих к небольшому числу тестовых видов. Критерием воздействия служит ограниченный набор физиологических и поведенческих реакций подопытных организмов на вещества, которые не взаимодействуют друг с другом.

Поскольку экологическая связь между видами более чувствительна по отношению к воздействиям окружающей среды, нежели организменные показатели, более целесообразно искать и исследовать способы описания состояния биоты в природных условиях, под воздействием совокупности факторов, в том числе естественного происхождения, что и сделано в данной работе.

В задачи работы входило:

1. Рассчитать показатели видового разнообразия для фитопланктона Нижней Волги.
2. Выбрать модель, адекватно описывающую ранговые распределения численностей видов для Нижней Волги.
3. Исследовать чувствительность алгоритма поиска нормативов качества вод к выбору количественных критериев поиска.
4. Рассчитать границу благополучия для значений индикаторов экологического состояния.
5. Рассчитать нормативы экологически допустимых уровней факторов среды, приводящих к экологическому неблагополучию.
6. Предложить показатели видового разнообразия, наиболее пригодные для целей биоиндикации.

Данные для анализа были получены из информационно-аналитической системы "Экологический контроль природной среды по данным биологического и физико-химического мониторинга" <http://ecograde.belozersky.msu.ru>

В число исследуемых параметров, характеризующих видовое разнообразие, входили:

Параметр  $z$ , из модели геометрических рядов Мотомуры [1], или экспоненциальная модель, описывает численности функцией  $n_i = n_1 z^{i-1}$ , где  $n_i$  - численность особей ранга  $i$ ,  $n_1$  - численность особей первого ранга,  $z$  - параметр модели

Параметр  $\beta$ , из гиперболической модели, предложенная А.П.Левичем [2], аппроксимирует значения численностей функцией  $n_i = \frac{n_1}{i^\beta}$ , где  $\beta$  - параметр модели.

В приведённых выше моделях ранговых распределений было принято проводить нелинейный регрессионный анализ на основе минимизации модулей отклонений в отличие от квадратов отклонений используемых до этого, что позволило увеличить скорость расчета, уменьшить суммарные отклонения реальных значений от модели.

Как инструмент измерения видового разнообразия, также использованы индексы выравненности: индекс  $d_k$ , выраженный через индекс Бергера-Паркера [3] и равный

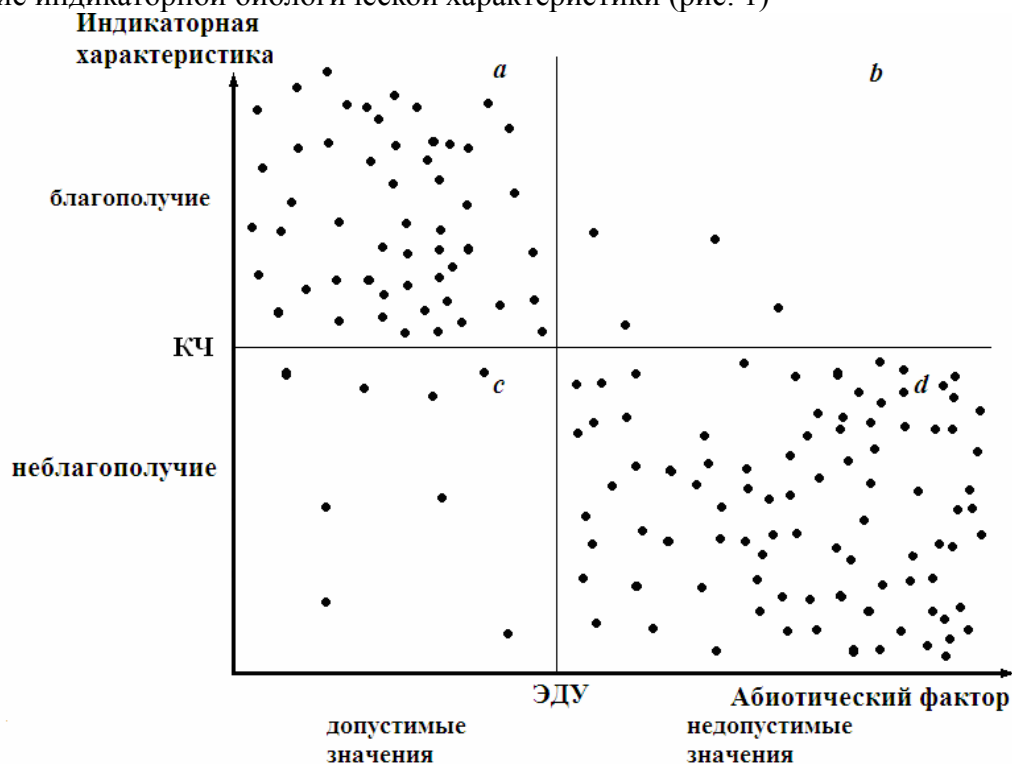
---

\* Работа поддержана грантом РФФИ №09-04-00541а

$d_k = 1 - \frac{1}{k} \frac{n(k)}{N}$ , где  $n(k) = \sum_{i=1}^k n_i$ ,  $N$  – общее число особей в сообществе,  $k$  – число рангов используемых в анализе.

Метод расчета экологически допустимых нормативов абиотических факторов (метод ЭДН):

Данные биологического и физико-химического мониторинга можно представить в виде диаграммы, где по оси  $x$  отложены значения физико-химического показателя среды (концентрация вещества, БПК, ХПК, температура воды, рН, водность и т.д.), а по оси  $y$  – значение индикаторной биологической характеристики (рис. 1)



**Рисунок 1.** Диаграмма распределения наблюдений при поиске границы (КЧ) между значениями индикатора, соответствующими благополучным и неблагополучным состояниям биоты, и верхней границы ЭДУ абиотического 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. Горизонтальная линия указывает границу между значениями индикатора, соответствующими благополучным и неблагополучным состояниям биоты. Будем более кратко называть ее красной чертой (КЧ).

Для формального проведения процедуры минимизации вводят критерий точности [4].

Точность поиска КЧ для индикатора есть  $T_{\text{и}} = \frac{n(a)}{n(a+b)}$ , где  $n(a)$  и  $n(a+b)$  – количества наблюдений в соответствующих областях. При определении ЭДУ для фактора критерий точности есть  $T_{\text{ф}} = \frac{n(d)}{n(b+d)}$ , 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. Представительностью названо количество "точек" в классах благополучных и неблагополучных, допустимых и недопустимых наблюдений для этих факторов. Порог представительности не должен быть слишком мал (например, не менее 0,15 от общего числа наблюдений).

Для процедуры ранжирования факторов по их вкладу в степень экологического неблагополучия вводят критерий полноты  $P = \frac{n(d)}{n(c+d)}$ , где  $n(d)$  и  $n(c+d)$  – количества

наблюдений в соответствующих областях [4]. Чем выше полнота, тем больше вклад фактора в экологическое неблагополучие в сравнении с другими факторами.

В данной работе опробован новый алгоритм поиска ЭДУ и КЧ проводящий расчёт результирующей точности для всех значений фактора при каждом значении индекса (в предыдущих работах использовался алгоритм, считающий результирующую точность для одного значения фактора при каждом значении индекса).

Также опробован алгоритм одновременной максимизации значений точности и представительности  $(K=(Prp+0,5)Tr)$ , где  $K$  – максимизируемый параметр,  $Prp$  – результирующая представительность,  $Tr$  – результирующая точность, 0,5 – поправка к результирующей представительностью, с целью приравнять значимость точности и представительности в анализе), позволивший в пределах погрешности 5% (погрешности измерений численности) избавиться от случайных значений КЧ и ЭДУ.

Выбраны лидирующие индексы (табл.1)

Таблица 1

Критерии оптимальности при выборе индикатора

№	Критерий	Лидирующие индексы			Значимость критерия
		1-е место	2-е место	3-е место	
1	Разброс значений границы благополучия для различных факторов	$d_4$	$d_2$	$d_3$	+
2	Жесткость ЭДУ (максимальная зона неблагополучия по фактору) для каждого из факторов	$d_3, d_4$	$d_2, d_1$	$s$	?
3	Жесткость границы благополучия (максимальная зона неблагополучия по биоиндикатору)	$z_3$	$d_1$	$d_2$	?
4	Точность (биоиндикатора, фактора, результирующая)	$d_3$	$d_2$	$d_1, s$	+
5	Количество факторов с найденными ЭДУ и границами благополучия.	$d_1$	$d_2, d_3$	$d_4, s$	+
6	Доступное для анализа количество наблюдений	$d_1, s$	$d_2, z_2$	$d_3$	+

Оптимальными по большинству показателей являются индексы  $d_1, d_2, d_3$ , они присутствует среди лидеров практически по всем показателям оптимальности. Данных с определенными численностями одного или двух первых видов в ранговом распределении численностей.

Индикаторы  $z$  уступают индикаторам  $d$  по большинству показателей, также существенный минус индикаторов  $z$  в сложности и низкой скорости расчета, поскольку для нахождения  $z$  требуется проведение нелинейного регрессионного анализа.

Полученные значения ЭДУ значимых абиотических факторов для Нижней Волги упорядоченные по вкладу фактора в состояние экосистемы приведены в таблице 2

Таблица 2

Экологически допустимые уровни (ЭДУ) значимых абиотических факторов, установленные по показателям разнообразия фитопланктона ( $d_1$ ) бассейна Нижней Волги.

Фактор	ЭДУ верхний (ЭДУ нижний)	Для ЭДУ верхнего (для ЭДУ нижнего)		ПДК
		Точность фактора	Полнота фактора	
Na+K мг/л	(19,8)	(0,96)	(0,57)	
Цветность по Pt-Co шкале, град	(21,33)	(0,83)	(0,54)	
Взвешенные в-ва, мг/л	21,33	0,92	0,44	
Раствор. кислород, мг/л	10	0,83	0,44	
Железо общее, мг/л	(0,04)	(0,85)	(0,44)	
Запах, балл	(1)	(0,82)	(0,41)	
pH, ед-цы pH	8,23	0,85	0,39	6,5-8,5
Азот сумм. минер., 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)	9
СПАВ, мг/л	(0,013)	(0,84)	(0,36)	
Хлориды, мг/л	43,5	0,80	0,35	300
Жёсткость, мг-экв/л	4	0,81	0,35	
Кальций, мг/л	57,2 (41,3)	0,81 (0,83)	0,35 (0,31)	180
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	40
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	0,001
Нефтепродукты, мг/л	0,19	0,89	0,31	0,05
Гидрокарбонатный анион мг/л	(84,9)	(0,91)	(0,31)	

Для большинства анализируемых факторов, за исключением азота нитритов, фенолов и нефтепродуктов величины верхних ЭДУ получились более жесткими, чем нормативы ПДК. Так, например, для концентраций магния, хлоридов, сульфатов, кальция, азота нитратов, величины верхнего ЭДУ ниже, чем ПДК (табл.)

Менее жесткие значения ЭДУ азота нитритов, фенолов и нефтепродуктов говорят о том, что может иметь место адаптация фитопланктонного сообщества в бассейне Нижней Волги к данным факторам.

Для pH значения ЭДУ и ПДК достаточно близки.

Нижние границы ЭДУ для прозрачности - 12,5 см, для цветности – 21,3 град. Высокая цветность считается признаком, отражающим неблагоприятное состояние вод, найденная нижняя граница цветности может говорить о том, что вещества (чаще органические) окрашивающие воду являются необходимыми для нормального функционирования экосистемы, либо о том, что цветность воды вызвана цветностью самого фитопланктона, и при ухудшении состояния экосистемы за счет других факторов одновременно снижается разнообразие и численность сообщества. Т.е. снижение разнообразия отражается на ПВР, снижение численности – на цветности, что и приводит к появлению нижнего ЭДУ.

Сравнение принятого и предложенного алгоритмов расчета показало, что предложенный алгоритм отличается:

- в положительную сторону

1. Большим количеством найденных факторов
2. 95% вероятностью того, что найденные значения не являются случайными
3. Большими точностями и полнотами факторов.

- в отрицательную сторону

1. Сравнительно долгим временем счёта.

Проведенная работа позволила увеличить точность методов и скорость расчета ранговых распределений, за счет введения метода наименьших модулей на замену методу наименьших квадратов отклонений.

Среди исследуемых данных не было обнаружено групп однородности.

Был сделан вывод, что индексы гиперболической модели на данном массиве описывают ранговые распределения численностей значительно хуже экспоненциальных.

Использование нового алгоритма поиска ЭДУ и КЧ позволило получить ЭДУ для большего количества факторов с более высокими характеристиками точности и полноты, значительно снизить влияние случайности на полученные результаты.

Было сделано заключение о том, что для определения ЭДУ и КЧ для данного массива данных оптимальными являются индексы выравненности, а именно  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  и, нежели индексы ранговых распределений.

Для большинства факторов ПДК оказались менее жесткими, чем ЭДУ, что говорит о том, что методы биоиндикации более чувствительны, чем методы биотестирования, т.е. совокупность организмов обитающих в реальной экосистеме более чувствительна к факторам с найденными ЭДУ, чем лабораторные индикаторные виды.

В дальнейшие исследования предполагается включить:

1. Анализ и доработку моделей определения ПВР, поскольку полученные результаты говорят о том, что в существующих моделях ранговых распределений есть недочеты, не позволяющие им описывать состояние экосистемы настолько же хорошо, как индексы выравненности, хотя распределение значений численности видов они (начиная с  $i=3$ ) описывают значительно лучше.

2. Продолжение исследования на более крупных массивах данных, чтобы исключить влияние низкого числа наблюдений на результаты анализа.

3. Доработку алгоритма поиска ЭДУ и КЧ.

4. Аргументацию выбора значений минимальной границы представительности и минимальной границы точности.

### *Литература*

1. *Motomura I.* Statistical treatment of association // *Japan J. Zool.* 1932. V.44. Pp. 379–383.
2. *Левич А.П.* Экстремальный принцип в теории сообществ // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* Л.: Гидрометеиздат, 1978. Т.1. С. 164–82.
3. *Berger W.H., Parker F.L.* Diversity of planktonic Evraminifera in deepsea sediments // *Science.* 1970. V. 168. №3937. Pp. 1345-1347.
4. *Чесноков С.В.* Детерминационный анализ социально-экономических данных. М.: Наука, 1982. 168 с.