

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ОНЗ РАН «ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ СУШИ»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИТАРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ
РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
СЕКЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ НАУК НГК РФ

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
**ВОДА И ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ:
СИСТЕМООБРАЗУЮЩИЕ ФУНКЦИИ
В ПРИРОДЕ И ЭКОНОМИКЕ**

г. Цимлянск, 23–28 июля 2012 г.

Сборник научных трудов



Новочеркасск
2012

УДК 556:502.51 (061.3)

ББК 26.22Я5

В62

Редакционная группа:

д.ф.-м.н. А.Н. Гельфан,

д.г.н. Н.М. Новикова,

д.т.н. В.Г. Пряжинская – отв. редактор,

к.т.н. М.И. Степанова,

Р.И. Бедная,

И.И. Макаров

Вода и водные ресурсы: Системообразующие функции в природе и экономике : сб. науч. тр. / отв. ред В.Г. Пряжинская. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. – 504 с.

ISBN 978-5-9997-0251-7

В настоящий сборник вошли доклады, представленные на Всероссийскую научную конференцию «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике» (г. Цимлянск, 23–28 июля 2012 г.), проведенную Научным советом Отделения наук о Земле РАН «Водные ресурсы суши», Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), Северо-Кавказским филиалом Федерального государственного унитарного предприятия Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (СевКавНИИВХ) и Секцией гидрологических наук НГК РФ.

Организация конференции и издание сборника осуществлены при финансовой поддержке Российской академии наук, Федерального агентства водных ресурсов, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-05-06046-г).

УДК 556:502.51 (061.3)

ББК 26.22Я5

ISBN 978-5-9997-0251-7

- © Федеральное государственное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук, 2012
- © Северо-Кавказский филиал Федерального государственного унитарного предприятия Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, 2012

10. Абакумов В.А., Суцзня Л.М. Гидробиологический мониторинг пресноводных экосистем и пути его совершенствования // Экологические модификации и критерии экологического нормирования. Труды межд. симп. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 41–51.

11. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н. Теоретические и методические основы технологии регионального контроля природной среды по данным экологического мониторинга. М.: НИА-Природа, 2004. 271 с.

12. Данные совместных измерений биологических и физико-химических характеристик экосистемы Рыбинского водохранилища / Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Булгаков Н.Г., Ершов Ю.В., Конюхов И.В., Копылов А.И., Корнева Л.Г., Лазарева В.И., Левич А.П., Литвинов А.С., Масленникова Т.С., Митропольская И.В., Осипов В.А., Отюкова Н.Г., Поддубный С.А., Поромов А.А., Пырина И.Л., Рисник Д.В., Соколова Е.А., Степанова И.Э., Цельмович О.Л. М.: МАКС Пресс, 2011. 67 с.

13. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н., Рисник Д.В. "In situ"-технология установления локальных экологических норм // Материалы объединенного пленума РАН по гидробиологии и ихтиологии, Гидробиологического общества при РАН и Межведомственной ихтиологической комиссии "Вопросы экологического нормирования и разработка системы оценки состояния водоемов". М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. С. 30-55.

МЕТОД УСТАНОВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НОРМ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ГРАНИЦ КЛАССОВ И КЛАССИФИКАТОРА КАЧЕСТВА ВОД¹¹

Левич А. П., Булгаков Н. Г., Рисник Д. В., Максимов В. Н.
Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва
apl@chronos.msu.ru

Для поиска связей между качественными классами индикаторов и факторов по таблицам сопряженности использован метод установления локальных экологических норм (метод ЛЭН), основанный на мерах связи из детерминационного анализа [1]. Анализ связей в таблицах сопряженности рассмотрен на примере выделения двух качественных классов для каждой из характеристик (табл. 1).

Таблица 1. Таблица сопряженности для характеристик X и Y с двумя классами значений каждой («высокие значения» и «низкие значения»).

| | Низкие значения характеристики X | Высокие значения характеристики X | Итого |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| Высокие значения характеристики Y | na | nb | $na+nb$ |
| Низкие значения характеристики Y | nc | nd | $nc+nd$ |
| Итого | $na+nc$ | $nb+nd$ | $na+nb+nc+nd$ |

Символы na , nb , nc и nd обозначают количества наблюдений в соответствующих ячейках таблицы

¹¹ Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №10-04-00013а и №12-07-00580а).

Коэффициенты детерминационного анализа характеризуют степень достоверности прогностических утверждений вида: «если характеристика X имеет значение в классе A, то характеристика Y имеет значение в классе B».

Пусть некоторая биологическая характеристика привлечена в качестве биоиндикатора. Неблагополучными могут быть как высокие его значения (например, смертность организмов), так и низкие (например, для исследуемых в данной работе содержания пигментов или величины флуоресценции). Недопустимыми для факторов среды могут быть только высокие значения (например, для некоторых ксенобиотиков) или только низкие (например, для содержания кислорода в воде); или как высокие, так и низкие значения (для биогенных элементов, некоторых токсикантов – металлов, антибиотиков, гербицидов, пестицидов и ионизирующей радиации) [2]).

Рассмотрим случай, когда для индикатора Y благополучны высокие значения, а для фактора X допустимы – низкие (рис. 1). Если биологический показатель действительно является индикатором, отражающим воздействие исследуемого фактора, то «благополучные» значения биоиндикатора не должны соответствовать «недопустимым» значениям фактора. Соответственно область «b» на графике зависимости биоиндикатора от фактора (рис. 1 а), отвечающая за «благополучные» значения биоиндикатора, соответствующие «недопустимым» значениям фактора, должна быть пуста. Однако в силу погрешностей и ошибок измерения эта область может содержать некоторое число точек.

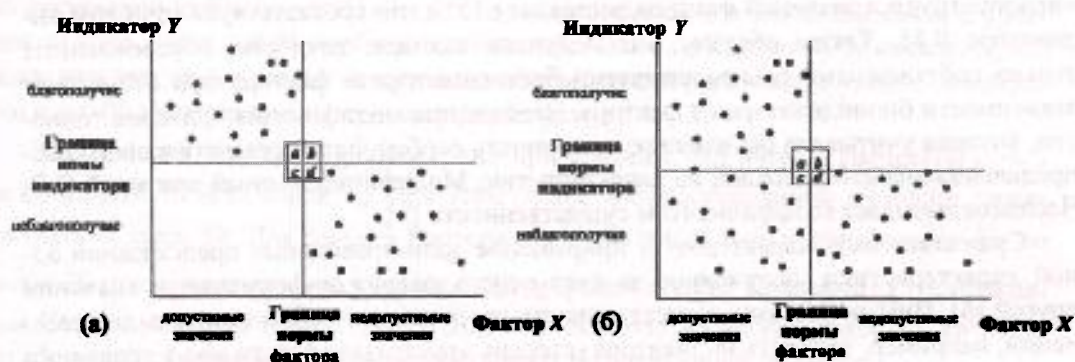


Рисунок 1. Классы значений индикатора и фактора в идеальном случае, когда на индикатор влияет только один фактор (а).

и в реальном наблюдении, когда на индикатор воздействует множество факторов (б)

Если на биоиндикатор влияет только один фактор, область «с» на рис. 1 а, соответствующая «неблагополучным» значениям индикатора и «допустимым» значениям фактора, также пуста. Однако в случае одновременного влияния на биоиндикатор множества факторов среды (что и происходит в природных экосистемах в отличие от лабораторных экспериментов) область «с» может содержать наблюдения, с приводящими к неблагоприятию индикатора значениями факторов среды, отличных от исследуемого. Указанные особенности влекут для натуральных данных необходимость поиска такой взаимосвязи между индикаторами и факторами, которая соответствует «пустоте» единственной области «b» на графике зависимости индикатора от фактора (рис. 1) или в таблице сопряженности (табл. 1). Этим требованиям в детерминационном анализе удовлетворяет только критерий Чеснокова.

В ряде предшествующих работ [1, 3, 4] для анализа взаимосвязи между биоиндикаторами и факторами в рамках метода метода ЛЭН был использован критерий точности Чеснокова: степень «пустоты» области «b» относительно областей «a» и «d» характеризуют величины точности индикатора $T_{инд} = \frac{n_a}{n_a + n_b}$ и точности фактора $T_{факт} = \frac{n_d}{n_d + n_b}$, здесь n_a , n_b , n_c и n_d – число наблюдений в соответствующих областях на рис. 1.

Однако коэффициент точности характеризует степень «пустоты» области «b» независимо от того, вызвана эта «пустота» зависимостью биоиндикатора от фактора, или собственными распределениями биоиндикатора и фактора. Для примера предположим, что границы нормы индикатора и фактора проведены, причем доля «благополучных» значений индикатора среди всех его значений составляет 10%, а доля «недопустимых» значений фактора среди всех его значений составляет 15%. В случае отсутствия зависимости доля «благополучных» и «неблагополучных» значений биоиндикатора не зависит от качественного класса фактора, т.е. и для «допустимых», и для «недопустимых» значений факторов доля «благополучных» значений биоиндикатора составляет 10%, что соответствует точности фактора 0,9. Аналогично для «благополучных» и для «неблагополучных» значений биоиндикатора доля «недопустимых» значений фактора составляет 15%, что соответствует точности индикатора 0,85. Таким образом, мы получаем высокие точности, обусловленные только собственными распределениями биоиндикатора и фактора при отсутствии зависимости биоиндикатора от фактора. Необходима модификация критерия точности, которая учитывала бы влияние на точность особенностей статистического распределения значений каждой из характеристик. Модифицированный критерий С.В. Чесноков называет коэффициентом существенности [5].

Существенность характеризует приращение доли правильных предсказаний одной характеристики, полученное за счет использования информации о значении другой [6]. Иными словами, существенность представляет собой точность детерминации, например, точность индикатора (степень «пустоты» области «b» в сравнении с областью «a»), за вычетом аналогичной точности в случае отсутствия связи между исследуемыми биоиндикатором и фактором, т.е. точность, обусловленную только распределением фактора. Существенность детерминации, характеризующую степень «пустоты» области «b» в сравнении с областью «a» (существенность индикатора), рассчитывают по формуле

$$C_{инд} = \frac{n_a}{n_a + n_b} - \frac{n_a + n_c}{N}$$

Существенность детерминации, характеризующую степень «пустоты» области «b» в сравнении с областью «d» (существенность фактора), рассчитывают по формуле

$$C_{факт} = \frac{n_d}{n_d + n_b} - \frac{n_d + n_c}{N}$$

Результирующую существенность детерминации, характеризующую «пустоту» области «b» в сравнении с областями «a» и «d» можно описать коэффициентом $C = \sqrt{C_{\text{ИНД}} C_{\text{ФАКТ}}}$.

Необходима оценка не только силы связей, но и их значимости по статистическим критериям. Напомним кратко, что для оценки значимости принято [6, 7, 8] использовать критерий «хи квадрат»: $\chi^2 = \sum_i \sum_j \frac{(f_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}}$, где f_{ij} – число наблюдений в ячейке с координатами i -тая строка, j -тый столбец; e_{ij} – расчетная вероятность числа наблюдений в ячейке с координатами i -тая строка, j -тый столбец, равное $f_i f_j / N$, где f_i – число наблюдений в i -той строке, f_j – число точек в j -том столбце таблицы сопряженности, N – общее число наблюдений [7].

Для определения значимости связи проводили сравнение расчетной величины χ^2 с табличным значением при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $n = (i-1)(j-1)$. Если расчетная величина χ^2 больше табличной, то гипотеза об отсутствии связи отвергается, что свидетельствует о значимости связи с уровнем значимости $\alpha = 0,05$. Если расчетная величина χ^2 меньше табличной, то гипотеза об отсутствии связи не отвергается, т. е. для установления значимой связи с уровнем значимости $\alpha = 0,05$ необходимо большее число наблюдений. В нашем случае исследования двух классов качества по обеим характеристикам и уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение критерия равно 3,8415.

Применение критерия χ^2 возможно при условии, что ячеек с расчетной $e_{ij} < 5$ не более 20% от всех ячеек [9]. При этом общее число наблюдений в таблице должно быть больше 40. Для расчета критерия χ^2 при числе наблюдений менее 40, но более 20 применяли поправку Йетса на непрерывность [8]. Критерий χ^2 с поправкой Йетса применим только для таблиц сопряженности с двумя классами качества по обеим характеристикам. Его рассчитывают по следующей формуле:

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j \frac{(|f_{ij} - e_{ij}| - 0,5)^2}{e_{ij}}$$

Метод ЛЭН предполагает выделение нескольких классов качества. Для биологического индикатора в простейшем случае это классы «благополучных» и «неблагополучных» значений, указывающих соответственно на экологическое благополучие или неблагополучие биоты, для фактора – это классы «допустимых» и «недопустимых» значений. Метод включает одновременный поиск двух границ:

1) границы, разделяющей «благополучные» и «неблагополучные» значения индикатора и

2) границы, разделяющей «допустимые» и «недопустимые» значения фактора.

Эти границы названы границами нормы, соответственно индикатора и фактора и задают искомые границы классов качества среды. Предложенный метод позволяет производить поиск двух границ нормы фактора, когда к неблагополучию биоиндикатора приводят как «низкие», так и «высокие» значения фактора, допустимыми же

являются «средние» значения фактора. В связи с этим для анализа данных производился поиск нижней границы нормы индикатора совместно с верхней, нижней или обеими границами нормы фактора.

Алгоритм метода состоит в переборе всевозможных положений границ как для биологического индикатора, так и для физико-химического фактора и выборе двух границ, для которых коэффициент результирующей существенности максимален. Алгоритм включает несколько дополнительных условий:

1. Количество наблюдений в областях «а» и «d» графика (рис. 1) должно быть достаточно представительным, чтобы результат поиска был достоверным. Представительность индикатора можно описать величиной $PP_{ИИД} = \frac{n_a}{N}$, представитель-

ность фактора – $PP_{ФАКТ} = \frac{n_d}{N}$, здесь n_a и n_d – количество наблюдений в областях «а» и «d» соответственно, N – общее количество наблюдений. Каждая из представительностей должна быть больше заданного параметра поиска $PP_{мин}$ (обычно $PP_{мин}$ варьирует в диапазоне 0,15-0,25).

2. Достоверность результатов поиска может быть обеспечена, если общее число наблюдений N не слишком мало: $N > N_{мин}$, где $N_{мин}$ – ещё один параметр поиска (обычно его выбирают в пределах от 30 до 80). Кроме того, чтобы судить о значимости связи по критерию χ^2 , необходимо учитывать минимальное количество наблюдений для применимости данного критерия. Для двух классов качества по обоим характеристикам минимальное число наблюдений составляет 20 (для применимости поправки Йетса на непрерывность), для трех и более классов минимальное число наблюдений составляет 40 [8].

3. Значимость установленной связи определена тем, превышает ли величина χ^2 некоторое табличное значения, которое зависит от заданного уровня значимости. Поэтому χ^2 также является параметром поиска, задаваемым исследователем (как правило, используют уровень значимости $\alpha = 0,05-0,10$).

4. Чтобы можно было утверждать, что область «b» пуста в сравнении с областями «а» и «d», найденные критерии точности индикатора и фактора должны быть не меньше заданного исследователем параметра поиска – величины $T_{мин}$ (обычно $T_{мин}$ принимают в пределах диапазона 0,8-0,9).

Метод ЛЭН формирует несколько методик анализа экологических данных:

- диагностики состояния экосистем, понимаемую как процедуру выявления существенных и несущественных для экологического неблагополучия биоты;
- генерирования границ классов качества среды по показателям как биотическим (границы между благополучными и неблагополучными значениями биоиндикатора), так и абиотическим (границы между допустимыми и недопустимыми значениями физико-химических факторов, выход за пределы этих границ приводит к неблагополучным значениям биоиндикатора);
- ранжирования существенных факторов по их вкладу в экологическое неблагополучие. Ранжирование основано на критерии полноты $P = \frac{n_d}{N}$ для исследу-

мого фактора, где n_d – количество неблагополучных по индикатору и недопустимых по фактору наблюдений (в области "d" на рис. 1), а N^- – количество неблагополучных по индикатору наблюдений во всем исследуемом массиве (т.е. при любых значениях всех факторов). Чем выше полнота фактора, тем бóльшую долю неблагополучных наблюдений он объясняет, т.е. тем выше его вклад в неблагополучие биоты;

- позволяющую выявить, в какой степени достаточна программа мониторинга факторов среды, вызывающих экологическое неблагополучие. Критерий достаточности – величина $D = M^- / N^-$, где M^- – количество наблюдений, недопустимых хотя бы по одному из факторов, N^- – общее количество наблюдений, неблагополучных по индикатору. Чем выше величина достаточности, тем более высокую долю экологического неблагополучия описывают факторы, наблюдение за которыми включено в программу мониторинга.

Применению метода ЛЭН для установления границ классов качества вод посвящена работа коллектива авторов, входящая в настоящий сборник научных трудов.

Литература

1. Левич А.П., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н., Рисник Д.В. "In situ"-технология установления локальных экологических норм // Материалы объединенного пленума РАН по гидробиологии и ихтиологии, Гидробиологического общества при РАН и Межведомственной ихтиологической комиссии "Вопросы экологического нормирования и разработка системы оценки состояния водоемов". М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. С. 30-55.
2. Дмитриева А.Г. Роль низких концентраций загрязняющих веществ при оценке экологических рисков // Биоиндикация и мониторинг пресноводных экосистем: Сб. тез. докл. II Междунар. конф. СПб., 2011. С. 61.
3. 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.
4. 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 бассейна Дона) // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 730-742.
5. Чесноков С. В. Детерминационный анализ социально-экономических данных. М.: Наука, 1982. 168 с.
6. Миркин Б. Г. Анализ качественных признаков и структур. М., 1980. 319 с.
7. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Т. 2: Исследование зависимостей. Справ. изд. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
8. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 488 с.
9. Дубина И.Н. Математические основы эмпирических социально-экономических исследований: учебное пособие. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2006. 263 с.