

О МЕТОДЕ ПОИСКА СОПРЯЖЁННОСТЕЙ МЕЖДУ БИОЛОГИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ НАТУРНЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ЭКОСИСТЕМЫ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

*Рисник Д.В. *, Рыбка К.Ю. ***

**Биологический факультет, **Факультет почвоведения
МГУ имени М.В.Ломоносова. E-mail: biant3@mail.ru*

Введение. Анализ взаимосвязи между биологическими (БХ) и физико-химическими характеристиками (ФХХ) экосистем имеет ряд методических особенностей. В контролируемых условиях лабораторных экспериментов соответствующие "хорошо организованные" данные "доза-эффект" имеют вид однозначных функциональных зависимостей, поддающихся корреляционному, регрессионному и другим видам статистического анализа. В природных экосистемах на БХ одновременно действует множество факторов среды, среди которых только часть представлена в экспедиционных измерениях. Диаграмма "доза-эффект" в этом случае имеет вид "плохо организованного" облака точек. Для выявления закономерностей в нефункциональных взаимосвязях между БХ и ФХХ для "плохо организованных" натуральных данных предложен специальный метод поиска сопряженностей [1].

Исходные данные. Первичные данные, используемые для анализа, были получены в результате исследования БХ и ФХХ поверхностных и батометрических проб в различных районах Рыбинского водохранилища в пяти рейсах научно-исследовательского судна Института биологии внутренних вод имени И.Д.Папанина РАН "Академик Топчиев", проходивших с июня по август 2010 года.

Сотрудниками ИБВВ имени И.Д.Папанина РАН (Э.С.Бикбулатов, Е.М.Бикбулатова, Ю.В.Ершов, Т.П.Зайкина, Л.Г.Корнева, В.И.Лазарева, А.С.Литвинов, Н.Г.Отюкова, С.А.Поддубный, И.Л.Пырина, Е.А.Соколова, И.Э.Степанова, О.Л.Цельмович), были получены данные о: 1) содержании минеральных веществ (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , сумма ионов, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , общий азот, PO_4^{3-} , общий фосфор); 2) содержании органических веществ (органический углерод во

взвеси, нефтепродукты); 3) показателях утилизации кислорода (БПК, ХПК); 4) кислотности и щелочности; 5) физических характеристиках (температура воды и воздуха, электропроводность, прозрачность, цветность); 6) содержании хлорофилла "а", "b", "с", феопигментов, чистого хлорофилла "а", каротиноидов.

Сотрудниками Биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова (Н.Г.Булгаков, И.В.Конюхов, А.П.Левич, В.А.Осипов, Д.В.Рисник) были получены данные по флуоресценции проб. В отобранных пробах бортовым флуориметром "МЕГА-11" в 3-6-кратных повторностях определяли фоновый уровень флуоресценции $Fo_{общее}$ (все реакционные центры фотосистемы 2, возбуждаемой светом в коротковолновой части спектра, находятся в "открытом" состоянии) и максимум переменной флуоресценции $Fm_{общее}$ (все реакционные центры фотосистемы 2 находятся в "закрытом" состоянии). Кроме того, определяли флуоресценцию фильтрата $Fo_{фильтрата}$, обусловленную флуоресценцией органических веществ. Значения $Fo_{фильтрата}$ совпадают со значениями $Fm_{фильтрата}$, что связано с отсутствием в фильтрате реакционных центров фотосистемы 2. В качестве исследуемой БХ была использована эффективность фотосинтеза фитопланктона $\alpha_{фито}$, соответствующая максимальной величине эффективности первичных стадий утилизации света в фотосистеме 2, рассчитанная по формуле $\alpha_{фито} = \frac{Fm_{фито} - Fo_{фито}}{Fm_{фито}}$, где $Fo_{фито} = Fo_{общее} - Fo_{фильтрата}$ и

$Fm_{фито} = Fm_{общее} - Fm_{фильтрата}$. В качестве БХ также исследовали содержание хлорофилла "а".

На основании сравнения коэффициентов вариации (КВ) показателей флуоресценции внутри повторностей отбора проб и КВ показателей флуоресценции наблюдений 1) по горизонтам, на каждой станции в каждом рейсе; 2) по рейсам, каждый горизонт на каждой станции; 3) по станциям, каждый горизонт в каждом рейсе; 4) по рейсам и станциям для каждого горизонта; 5) по станциям и горизонтам в каждом рейсе; 6) по рейсам и горизонтам на каждой станции. Из анализа были исключены пробы, КВ которых превышал КВ одной из шести группировок, приведенных выше.

Методы определения зависимостей между БХ и ФХХ. Для исходных количественных данных были использованы стан-

дартные методы статистического анализа: корреляционный анализ и множественный регрессионный анализ. Значимые корреляции (коэффициент детерминации $R^2 > 0,7$) между БХ и ФХХ не были выявлены (R^2 колебался от 0 до 0,38).

Множественный регрессионный анализ позволяет определить вес вклада каждого фактора (коэффициенты в уравнении регрессии) и исследовать зависимость БХ от рассчитанного по уравнению регрессии показателя, учитывающего все включенные в анализ факторы. Однако в связи с тем, что для значений БХ часто отсутствуют те или иные данные по ФХХ (в анализе было использовано 225 значений показателей флуоресценции, 165 значений содержания хлорофилла "а" и от 38 до 187 значений показателей ФХХ), применение множественного регрессионного анализа осложнено недостаточным количеством данных. Для найденных регрессий связь между переменными практически не обнаружена – наибольший коэффициент детерминации (0,29) был получен для хлорофилла "а" и концентраций Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} .

Один из методов анализа "плохо организованных" данных – переход от количественных переменных к их качественным классам, (см., например, [2]). Такими классами могут быть "низкие", "средние" и "высокие" значения; "благополучные" и "неблагополучные", "допустимые" и "недопустимые" значения и т.п. После выделения качественных классов возможен поиск корреляций (см., например, [3]) и других видов связи уже между качественными классами различных переменных. Применение анализа качественных переменных сталкивается, по крайней мере, с двумя трудностями. Во-первых, возникает проблема выбора объективного критерия для выделения качественных классов: какие значения назвать "высокими" и какие "низкими", какие "допустимыми" и какие "недопустимыми". Вторая трудность особенно ярко проявляется при поиске связи между биотическими и абиотическими характеристиками экосистем. Поясним это на примере биоиндикации нарушающих воздействий факторов среды.

Качественные классы для биологического индикатора – это классы "благополучных" и "неблагополучных" значений, указывающих соответственно на экологическое благополучие или неблагополучие биоты. Для фактора – это классы "допустимых" и "недопустимых" значений. Если некоторая биологическая характеристика Y действительно является индикатором воздействия на биоту факто-

ра X , то благополучные значения индикатора Y встречаются в наблюдениях за экосистемой только совместно с допустимыми значениями фактора X , а неблагополучные значения индикатора Y – только совместно с недопустимыми значениями фактора X . Этот идеальный случай отражен на рис. 1а, где граница между "благополучными" и "неблагополучными" значениями названа "границей нормы состояния экосистемы", а граница между "допустимыми" и "недопустимыми" значениями фактора названа "границей нормы фактора".

На рис. 1б представлено типичное реальное распределение результатов наблюдения за индикаторной характеристикой Y и некоторым фактором X . От идеального случая на рис. 1а это распределение отличает наличие точек-наблюдений в области "с". Наполненность области "с" связана с влиянием на индикатор всех существующих в среде факторов.

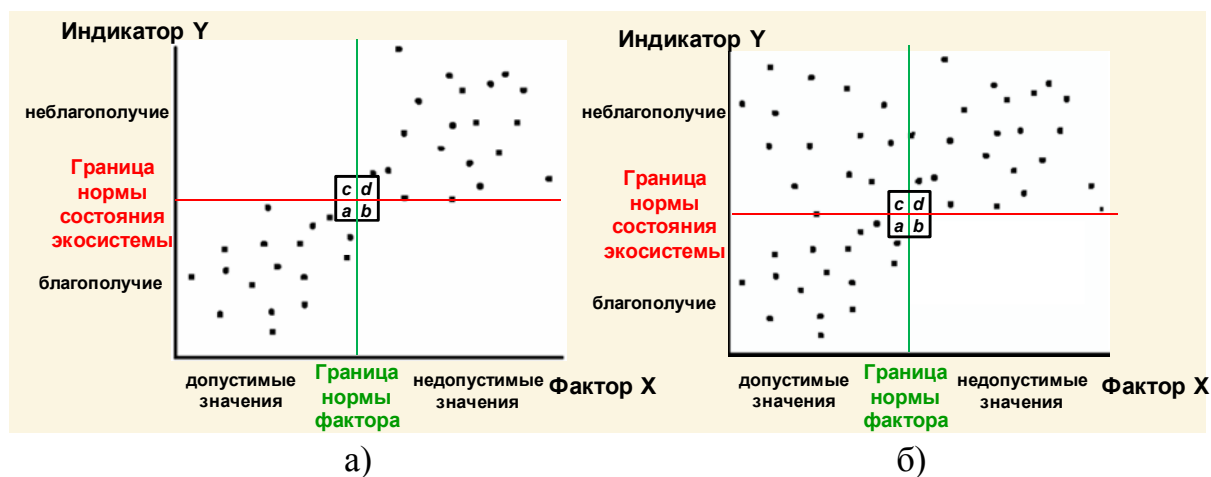


Рис. 1. Классы значений индикатора и фактора в идеальном случае, когда на индикатор влияет только один фактор (а), и в реальном наблюдении, когда на индикатор воздействует множество факторов (б)

Подход, который можно назвать методом установления локальных экологических норм (методом ЛЭН см. также [1, 4, 5]) или методом частичных корреляций между качественными переменными, может быть основан на утверждении: если индикатор Y действительно представляет собой "правильный отклик" на воздействие X , то область "b" на рис. 1б обязательно должна быть пуста. Другими словами, недопустимые значения фактора X никогда не должны приводить к благополучным значениям индикатора независимо от действия других факторов. Однако, в силу возможности случайного попадания точек в область "b" требование к пустоте области приходится смягчать, требуя, чтобы область "b" была "как можно более" пустой. Степень "пустоты" области "b" относительно областей "a"

и "d" характеризует критерий точности $T = \sqrt{\frac{n_a}{n_a + n_b} \cdot \frac{n_d}{n_d + n_b}}$, где

n_i – число наблюдений в области "i". Точность изменяется от 0 до 1, и чем больше точность, тем более "пуста" область "b". В то же время области "a" и "d" должны быть достаточно полными, чтобы распределение наблюдений в них можно было считать достоверными. Также при поиске учитывают доверительную вероятность того, что полученные результаты не случайны.

Метод позволяет одновременно рассчитать границы норм состояния экосистемы и фактора и обнаруживает зависимости в случае, когда область "c" не пуста и методы корреляционного анализа не работают.

Кроме того, данный метод позволяет производить поиск двух границ нормы фактора, когда к неблагоприятию индикатора приводят как "низкие", так и "высокие" значения фактора, допустимыми же являются "средние" значения фактора.

Результаты. Обнаруженные методом ЛЭН зависимости содержания хлорофилла "a" и эффективности фотосинтеза от ФХХ приведены в таблице.

Таблица. Зависимость содержания хлорофилла "a" и эффективности фотосинтеза фитопланктона ($\alpha_{\text{фито}}$) от ФХХ

БХ	ФХХ	Граница между качественными классами ФХХ при наличии зависимости между БХ и ФХХ		Граница между качественными классами БХ	Вклад ФХХ*	$T_{\text{рез}}$	Число наблюдений
		прямой	обратной				
Хлорофилл "a", мг/л	Температура воды, °С	18	26	15,1	0,43	1,00	150
	Прозрачность, м	-	1,5	20,0	0,12	1,00	59
	ХПК, мг/л	29	49	25,2	0,11	1,00	50
	Органический углерод во взвеси, мг/л	0,7	-	22,0	0,10	1,00	48
	NO ₃ ⁻ , мг/л	-	0,1	17,0	0,09	1,00	50
$\alpha_{\text{фито}}$	Температура воды, °С	-	24	0,70	0,32	0,84	187
	Электропроводность, мкСм/см	155	-	0,70	0,22	0,87	182
	Общий азот, мг/л	-	1,0	0,69	0,07	0,93	57

PO ₄ ³⁻ , мг/л	0,01	-	0,70	0,07	0,93	57
Нефтепродукты мг/дм ³	-	0,030	0,71	0,05	1,00	38

*Отношение числа наблюдений, в области "d" (рис. 1б) к общему числу "неблагополучных" наблюдений позволяет ранжировать факторы по степени их взаимосвязи с БХ.

Отсутствующие в таблице ФХХ слабо связаны с БХ в диапазоне исследуемых значений, либо один или несколько из искоемых качественных классов недостаточно наполнен.

Заключение. Стандартные методы статистического анализа не позволили выявить зависимость содержания хлорофилла "а" и эффективности фотосинтеза вод Рыбинского водохранилища от ФХХ. Однако с помощью метода ЛЭН были найдены границы, разделяющие качественные классы, и была выявлена зависимость качественных классов исследуемых БХ от качественных классов ФХХ. Например, для зависимости хлорофилла "а" от нитратов коэффициент детерминации при поиске корреляции равен 0,12, а результирующая точность частичной корреляции между найденными качественными классами равна 1,00.

ФХХ были ранжированы по степени их взаимосвязи с БХ. Наибольшее влияние на содержание хлорофилла "а" оказывала температура воды, существенно меньший вклад давали прозрачность, ХПК, органический углерод во взвеси и концентрация нитратов. Наибольшее влияние на эффективность фотосинтеза оказывали температура воды и электропроводность, существенно меньший вклад давали общий азот, концентрация фосфатов и нефтепродуктов.

Литература

1. Левич А.П., Милько Е.С. Нормирование качества среды и биоиндикация экологического состояния природных объектов как детерминационный анализ зависимостей «доза-эффект» для функций многих переменных // Актуальные проблемы экологии и природопользования. – М.: РУДН, 2011. – С. 16-25.
2. Чесноков С.В. Детерминационный анализ социально-экономических данных. – М.: Наука, 1982. – 168 с.
3. Васнев С.А. Статистика: Учебное пособие. – М.: МГУП, 2001. 170 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. *Левич А.П., Булгаков Н.Г., Рисник Д.В., Милько Е.С.* Экологический контроль окружающей среды по данным биологического и физико-химического мониторинга природных объектов // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. №2. С. 199-207.