

**СЕМИНАР 11**  
**ДОКЛАД НА СИМПОЗИУМЕ "НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА - 2000"**  
**МОСКВА, МПГУ, 13 января - 14 февраля 2000 года**

✂ **В.Ф. Шуйский, Д.С. Петров,**  
**М.Л. Матюшонок,**  
**А.В. Савченко, Т.А. Петрова,**  
**2000**

УДК 658.516:502

**В.Ф. Шуйский, Д.С. Петров, М.Л. Матюшонок,**  
**А.В. Савченко, Т.А. Петрова**

**ОЦЕНКА И ПОДХОД К НОРМИРОВАНИЮ**  
**МНОГОФАКТОРНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ**  
**ВОЗДЕЙСТВИЙ НА БИОСИСТЕМЫ**

Техногенные воздействия на окружающую природную среду и на биосистемы различного уровня организации (включая человека) имеют обычно весьма сложный, полифакторный характер. Применяемые в экологии методы оценки и нормирования таких сложных воздействий весьма несовершенны. В лучшем случае рекомендуется применять простейшую, аддитивную модель (суммация реализованных долей ПДК, которые в совокупности не должны превышать единицы), и то лишь для нескольких факторов сходного действия. Чаще же комплексный характер сложного воздействия вообще игнорируется, а действие каждого из факторов рассматривается и нормируется по отдельности. Более того, в природоохранной литературе последних лет иногда обсуждается даже возможность принципиального отказа от какого-либо специального нормирования многокомпонентных воздействий на среду, т.к. свойства смесей токсикантов якобы вполне предсказуемы по свойствам компонентов.

Действительно, изредка в комбинации некоторые вещества могут действовать на живые организмы практически независимо друг от друга. Однако общеизвестно, что подавляющее большинство веществ в смесях оказывает на организмы иное действие, чем по отдельности. В некоторых комбинациях веществ их биологический эффект может быть: суммарным (аддитивным); или более сильным, чем суммарный (тогда говорят о «потенцировании» эффекта,

или о синергичности); или, наоборот, более слабым (при так наз. «антагонизме» веществ). Более того, часто при комбинации нескольких веществ возникает принципиально новый биологический эффект. Это может обуславливаться как особенностями реакции организма на определенное сочетание компонентов смеси, так и их химическим взаимодействием с образованием совершенно новых веществ. Следовательно, даже достаточно строгое и полное экологическое нормирование компонентов не позволяет предсказывать ни ожидаемых физико-химических свойств смеси,

ни, тем более, ее биологической активности (в частности, токсичности).

Известны попытки количественной оценки сложных воздействий на различные биосистемы путем аппроксимации зависимости той или иной биологической характеристики от нескольких факторов. Для этого используются довольно громоздкие многопараметрические уравнения, применяются методы прямой или непрямой ординарии. Несомненно, подбор значений многочисленных параметров такого уравнения позволяет исследователю добиться достаточно точного описания данной конкретной зависимости и вести интерполяционные расчеты. Однако подобные уравнения не дают проанализировать ситуацию, т.к. не позволяют судить о реальной роли каждого из факторов в результирующем воздействии. И уж тем более бесполезны такие модели для сравнительного изучения и обобщения знаний о различных сложных воздействиях на биосистемы.

Поэтому весьма актуальна разработка более простой и универсальной формулы, структура которой хорошо соответствовала бы характеру взаимодействия любых факторов, причем в произвольном их сочетании. При выполнении этого условия искомая формула окажется «изоболической», т.е. будет корректно описывать любые «изоболы» (области всех тех сочетаний значений взаимодействующих факторов, при которых биосистема лимитируется равносиль-

но). В настоящей работе излагается метод оценки и нормирования многофакторных техногенных и иных антропогенных воздействий на биосистемы. Метод разработан на кафедре экологии, аэрологии и охраны труда СПГГИ (ГУ) и апробирован для ситуаций техногенного воздействия на различные пресноводные экосистемы (Бокситогорский глиноземный завод на р. Воложба (приток р. Сясь); Сясьский ЦБК на р. Сясь и Светогорский ЦБК на р. Вуокса; ОАО «Фосфорит» на р. Луга и др.).

Предварительно следует пояснить некоторые используемые понятия. Для оценки отклика биосистем на воздействие удобны широко применяемые в экологии понятия «функция отклика», «частная функция отклика» и «функция благополучия» биосистемы (Федоров, Гильманов, 1980). Зависимость значений  $k$ -й характеристики изучаемой биосистемы от значений  $n$  экологических факторов выражается **функцией отклика** этой характеристики ( $f_k$ ) на данные факторы:  $f_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Соответственно, **изоболой** какого-либо постоянного значения функции отклика является  $n$ -мерная поверхность, описывающая все те сочетания значений  $n$  факторов, при которых реализуется это значение функции отклика. Функция отклика на один из  $n$  экологических факторов при некоторых фиксированных значениях остальных факторов называется **частной функцией отклика** на данный фактор при данном сочетании остальных факторов. **Функция благополучия** изучаемой биосистемы от  $n$  экологических факторов – такая функция отклика данной биосистемы на лимитирующие ее факторы, которая обобщенно характеризует степень ее благополучности при различных сочетаниях значений этих факторов. Для удобства сравнения различных функций благополучия удобно нормировать их значения относительно фоновых, т.е. реализуемых в отсутствии изучаемого воздействия при прочих равных условиях ( $f/f_0$ ).

Очевидно, что важнейшей функцией благополучия любой биосистемы является ее **упругая устойчивость к воздействию**, т.е. ее способность избегать необратимых изменений и возвращаться к исходному состоянию после снятия воздействия. Так, для **организма** критерием сохранения устойчивости к воздействию является отсутствие необратимых патологических изменений. Для **популяции** – сохранение при воздействии той минимальной популяционной

плотности, которая необходима для полного самовосстановления популяции. Критерием сохранения упругой устойчивости к воздействию для **сообщества** или **биоценоза** должно служить сохранение его исходного видового состава, которое, как известно, является залогом обратимости любых экзогенных изменений этих биосистем.

Действие любого фактора на биосистему следует оценивать по вызываемым изменениям значений функций ее благополучия. Для простоты ограничимся рассмотрением однонаправленных изменений значений фактора. В определенном диапазоне малых, подпороговых значений любого фактора он вообще не вызывает достоверной реакции биосистемы (конечно, если ее при этом не лимитируют какие-либо другие факторы), и значения всех функций благополучия этой биосистемы не отличаются от максимальных. Такой диапазон значений фактора является **оптимальным**. Дальнейшее возрастание значений фактора вызывает достоверное уменьшение значений сначала одной функций благополучия, наиболее чувствительной к данному воздействию, затем, поочередно, всех остальных. Иными словами, при выходе факторных значений за оптимальный диапазон происходит лимитирование биосистемы. До определенного уровня воздействия ее изменения обратимы. Наконец, при определенном значении фактора биосистема неизбежно претерпевает какие-либо необратимые изменения, т.е. теряет упругую устойчивость к этому воздействию. Диапазон значений фактора, при котором биосистема испытывает достоверные, но обратимые изменения, является **субоптимальным**. Диапазон всех значений фактора, при котором биосистема сохраняет упругую устойчивость к его воздействию, называется **толерантным** и объединяет оптимальный и субоптимальный диапазоны. Таким образом, если факторное значение превышает толерантный диапазон, нарушения биосистемы становятся необратимыми. При комбинации нескольких ( $n$ ) лимитирующих факторов мерой устойчивости биосистемы к их результирующему воздействию является  $n$ -мерная **область сохранения устойчивости (ОСУ)**, включающая все сочетания значений этих факторов, при которых биосистема не испытывает необратимых изменений. Границей ОСУ является  $n$ -мерная поверхность.

Ясно, что для адекватной количественной оценки сложного (n-факторного) воздействия на биосистему нужно совместно учитывать все n факторов, даже если они имеют совершенно различную природу и разную размерность. Для этого удобно подвергнуть значения каждого из них следующей единой нормировке:

$$x_{ij} \sim (X_{ij} - X_{iopt}) \times (X_{itot} - X_{iopt}) \quad (1)$$

где  $X_{ij}$  – абсолютное  $j$ -е значение фактора  $X_i$  ( $i \in \{1, \dots, n\}$ ),  $X_{iopt}$  – граница оптимального диапазона значений фактора  $X_i$ ,  $X_{itot}$  – граница толерантного диапазона фактора  $X_i$ ,  $x_{ij}$  – нормированное  $j$ -ое значение фактора  $X_i$ . Таким образом, все изменения факторных значений в пределах оптимальных диапазонов, не влияющие на биосистему, исключаются из рассмотрения, а отклонения факторных значений от границы оптимального диапазона соразмеряются с их минимальным отклонением, вызывающим потерю упругой устойчивости биосистемы. Таким образом, нормировка (1) позволяет выразить с одинаковой размерностью действие факторов любой природы.

В экологической литературе встречаются различные способы аппроксимации частных функций отклика на отдельные экологические факторы. Наиболее часто используются уравнения, графики которых представляют собой отрезок прямой, вогнутую, выпуклую или S-образную кривую. Вместо различных, многообразных уравнений предлагается аппроксимировать любую функцию отклика биосистем на любой фактор среды с использованием модифицированного (двухпараметрического) уравнения Ферхюльста-Перла (так наз. «уравнения логистической кривой»):

$$f/f_o(x) = 1 - \frac{1}{1 - a \times e^{bx}} \quad (2)$$

где  $x$  – нормированные по (1) значения фактора  $X$ ,  $f/f_o(x)$  – значения функции благополучия  $f(x)$ , нормированные относительно ее фонового значения. Формула (2) весьма универсальна, т.к. при различных сочетаниях параметров  $a$  и  $b$  график этого уравнения может приближаться к отрезку прямой или принимать вид вогнутой, выпуклой и S-образной кривой.

Используя единообразную нормировку значений всех взаимодействующих факторов (1), можно описать границу ОСУ биосистемы к любому воздействию формулой:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}^{Z_i} = 1 \quad (3)$$

где  $Z_i$  – параметры уравнения, отражающие характер взаимодействия каждого из факторов с остальными факторами. Значение  $Z$  для каждого фактора постоянно и может быть равно любому числу от нуля до бесконечности – в зависимости от того, насколько сильно соответствующий фактор взаимодействует с остальными. Если действие фактора практически не усиливает действия других факторов, его значение  $Z$  стремится к бесконечности, если его вклад в результирующее воздействие аддитивен, если превышает аддитивный –  $0 < Z < 1$ . Значения  $Z$  определяются эмпирически, для чего требуется довольно подробно изучить воздействие на биосистему, выявив и точно описав ОСУ.

Соответственно, мерой результирующего многофакторного воздействия служит показатель  $Y$ , определяемый по формуле

$$\sum_{i=1}^n (x_{ij} / Y_j)^{Z_i} = 1 \quad (4)$$

Значения  $Y$  изменяются от 0 до 1 (если воздействие вызывает обратимые изменения биосистемы) или превышают 1 (если воздействие слишком сильно, и биосистема необратимо нарушена). Благодаря адекватному учету эффекта взаимодействия любых  $n$  факторов, передаваемого соответствующим множеством значений  $Z_1, \dots, Z_n$ , показатель  $Y$  оценивает результирующее сложное воздействие достаточно корректно и точно.

Преобразуя формулу (2), функцию благополучия биосистемы от  $n$  взаимодействующих факторов следует аппроксимировать уравнением

$$f/f_o(Y) = 1 - \frac{1}{1 - a \times e^{bY}} \quad (5)$$

В частности, выяснилось, что для пресноводных экосистем, испытывающих техногенные изменения, реакция сообществ различных гидробионтов на воздействие хорошо аппроксимируется уравнением (5) (объясняется не менее 80 % общей дисперсии признаков). График (5) обычно является нисходящей S-образной кривой. Оказалось, что деградация сообществ всегда происходит при уровне воздействия  $Y \approx 3$ . Это дает обоснованный количественный подход к нормированию сложных техногенных воздействий на пресноводные экосистемы: допустимое изменение сообщества  $f/f_o$  определяет до-

пустимый уровень воздействия  $Y$  (от  $Y < 1$  для девственных экосистем, высокочувствительных к воздействию, до  $Y < 3$  для экосистем эксплуатируемых, уже значительно преобразованных, с нарушенной биотой).

Предлагаемый подход может быть достаточно широко использован для количественной оценки и нормирования сложных техногенных

и иных антропогенных воздействий на любые биосистемы. Кроме того, возникает возможность управления экологической ситуацией, планирования природоохранных мероприятий путем подбора такого сочетания лимитирующих факторов, которое обеспечит допустимый уровень их результирующего действия.

КОРОТКО  
ОБ  
АВТОРАХ

*Шуйский В.Ф., Петров Д.С., Матюшонок М.Л.,  
Савченко А.В., Петрова Т.А. – Санкт-Петербургский  
государственный горный институт.*