УДК 591.524.11

Т.А.ПЕТРОВА
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

СИСТЕМА КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА, ОЦЕНКИ И НОРМИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Предложена система оценки и нормирования многофакторных техногенных воздействий на водные объекты, построенная на основе биоиндикации. В качестве биоиндикатора используется макрозообентос, как наиболее чувствительное сообщество. Разработан оригинальный способ выделения видов, имеющих реальную индикаторную ценность, установлены информативные количественные характеристики этого сообщества. Определены и формализованы условия сохранения устойчивости сообществ к воздействию, дана универсальная количественная мера комбинированного воздействия. Установлены и описаны основные закономерности реакции сообществ на комбинированные техногенные воздействия. Выявлены условия двух характерных катастроф сообществ в градиенте комбинированных воздействий. Соответственно дан подход к нормированию техногенных воздействий для гидроэкосистем с различной степенью фоновой антропогенной нагрузки.

The system of an estimation and normalization of multifactored manmade influences on the water objects, constructed on the basis of bioindication, is offered. As the bioindicator it is used macrozoobenthos, as the most sensitive community. The original way of the allocating the most informative species is developed. The most informative quantitative characteristics of this community are allocated. Conditions of preservation of communities' stability are determined and formalized. The universal quantitative measure of the combined influence is given. The basic laws of reaction of communities on combined manmade influences are established and described. Conditions of two characteristic accidents in communities in a gradient of the combined influences are revealed. The way of normalization of manmade influences for the hydroecosystems with a various degree of background manmade loading is accordingly given.

Количественное изучение, оценка и нормирование воздействий, оказываемых промышленными предприятиями на экосистемы водоемов и водотоков, является одной из наиболее актуальных задач современной экологии. Эти задачи очень сложны и не решаются принятыми методами, поскольку данные воздействия представляют собой совокупность сложно взаимодействующих факторов различной природы, т.е. являются комбинированными.

Настоящая работа посвящена созданию единой, универсальной системы оценки и нормирования многофакторных техногенных воздействий на водные объекты. Для решения проблемы наиболее перспективными оказались методы биоиндикации, использующие характеристики биоты в качестве показателей состояния и изменения окружающей среды.

Материалом послужили результаты оригинальных полевых исследований, выполненных автором в составе экспедиций кафедры экологии, аэрологии и охраны труда на водные объекты Северо-Запада в зонах техногенных воздействий в 1998-2003 гг. Это более 20 рек бассейна Финского залива и Ладожского озера, различные озера и ручьи. Изучалось воздействие горно-промышленных предприятий (ОАО «Бокситогорский глинозем», «Пикалевский глинозем», «Фосфорит»), гидростроительства в Усть-Луге, целлюлозно-бумажной промышленности (Светогорский ЦБК).

Кроме того, были внесены в базу компьютерных данных, обработаны и проанализированы результаты гидроэкологических исследований на других водных объектах, подвергающихся техногенным воздействиям (влияние электростанций, транспортного строительства, эвтрофирование и др.).

Для достижения цели исследования потребовалось решить следующие основные задачи:

- выбор оптимальных биоиндикаторов и их наиболее информативных характеристик;
- разработка количественной меры комбинированных техногенных воздействий, пригодной для любого сочетания факторов любой природы;
- выявление и формализация основных количественных закономерностей реакции биоиндикаторов на воздействие;
- определение подхода к нормированию комбинированных техногенных воздействий на водные экосистемы.

Выбор биоиндикатора. Одним из лучших биоиндикаторов качества водной среды и воздействий на гидроэкосистемы служит макрозообентос – сообщества донных беспозвоночных с размером тела не менее 2 мм. Его характеристики наиболее стабильны в пространстве и времени, по сравнению с другими сообществами гидробионтов. Он наиболее четко отражает не только общее состояние водной среды и экосистемы, но и их локальные особенности в градиентах воздействий.

Важнейшей для биоиндикации характеристикой макрозообентоса следует считать видовой состав, который строго детерминирован условиями среды и определяет остальные характеристики сообществ. На основе вероятностного анализа разработан оригинальный способ выделения видов, имеющих реальную индикаторную ценность, встречаемых в ненарушенном сообществе с достоверностью не менее 90 %.

Наиболее информативными количественными характеристиками макрозообентоса оказались: видовое богатство, видовое сходство сообщества с его фоновым состоянием (коэффициент Сьеренсена), видовое разнообразие (индекс Шеннона – Уивера), биомасса, скорость образования продукции, относительные и абсолютные показатели обилия представителей ряда таксонов с характерной экологической валентностью.

Количественная мера комбинированного воздействия. Мерой устойчивости донных сообществ к воздействию может служить минимальный уровень этого воздействия, вызывающий достоверное (более 90 %) изменение видового состава. При сложном, комбинированном воздействии мерой устойчивости сообщества к воздействию (сохранение исходного видового состава и отсутствие необратимых изменений количественных характеристик) является область всех тех сочетаний значений комбинированных факторов, при которых происходит достоверное изменение его видового состава – область сохранения устойчивости (ОСУ) в гиперпространстве данных факторов.

Граница ОСУ определяется формулой

$$\sum_{i=1}^{n}\left[(X_{ij}-X_{io})(X_{it}-X_{io})^{-1}\right]^{Z_i}=1,$$

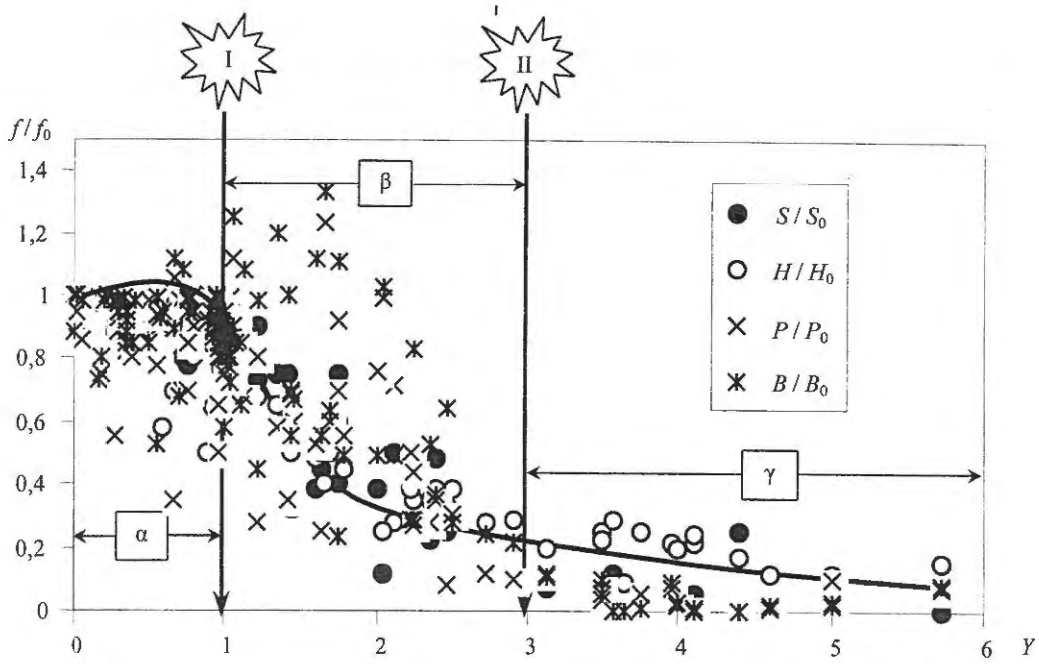
где X_{ij} – j-е значение i-го фактора, X_{io} и X_{it} – оптимальное и толерантное значение данного фактора соответственно; Z_i – параметр, передающий особенности взаимодействия i-го фактора с остальными (при $0<Z<1$ взаимодействие сильнее аддитивного, при $Z>1$ слабее).

Мерой многофакторного воздействия на макрозообентос является кратность превышения этим воздействием своего минимального уровня, достаточного для достоверного изменения видового состава сообщества. Этот безразмерный показатель Y для каждой j-й ситуации может быть рассчитан по формуле

$$\sum_{i=1}^{n}\left[(x_{ij}-x_{io})(x_{it}-x_{io})^{-1}Y_j^{-1}\right]^{Z_i}=1.$$

Показатель Y является адекватной мерой многофакторного воздействия на сообщество, всегда гибко учитывающей реальное взаимодействие конкретной группы факторов.

Благодаря учету реального эффекта комбинации факторов с использованием показателей Z и Y является вполне адекватной



Зависимость видового богатства *S*, видового разнообразия *H*, биомассы *B* и скорости образования продукции *P* (нормированных относительно фоновых значений) макрозообентоса изучавшихся гидроэкосистем от показателя результирующего антропогенного воздействия *Y* (рассчитаны по изоболической модели)

мерой любого комбинированного воздействия и дает большие преимущества по сравнению с общепринятым сейчас способом «принудительного» суммирования значений факторов условно-сонаправленного действия.

Количественные закономерности реакции макрозообентоса на комбинированное воздействие. Зависимость значений всех вышеперечисленных характеристик макрозообентоса, нормированных относительно их фоновых значений (f/f_0), от уровня комбинированного воздействия *Y* хорошо аппроксимировалась модифицированным логистическим уравнением, график которого является нисходящей *S*-образной кривой

$$f/f_0(Y) = 1 - \frac{1}{1 + a\,e^{bY}},$$

где $a = \text{const}$; $b = (1 - f/f_{0\,\min})(f/f_{0\,\min})^{-1} = \text{const}$; $f/f_{0\,\min} = \text{const}$ – нижний предел значений функции при $Y \to \infty$.

Нормирование комбинированных техногенных воздействий на водные экосистемы. Проведенный анализ реакции макрозообентоценозов на многофакторные воздействия позволяет выявить следующие ее общие закономерности (см. рисунок). Малые дозы воздействия, не влияющие на видовой состав сообщества ($Y < 1$), вызывают незначительные (менее 15 %), обратимые изменения количественных характеристик сообщества (зона α на рисунке).

При уровне воздействия $Y = 1$ происходит резкое уменьшение характеристик сообществ, причем исчезает сразу около 40 % исходного видового состава. Этот уровень следует считать критическим для высокоценных, девственных экосистем, высоко чувствительных к воздействию. При дальнейшем усилении воздействия до $Y = 3$ видовой состав сообществ более не меняется, а значения количественных характеристик уменьшаются очень плавно (зона β на рисунке). При уровне воздействия $Y > 3$ происходит второе катастрофическое изменение свойств сообщества, ведущее к его резкой деградации (зона γ на рисунке). Поэтому уровень воздействия $Y = 3$ является предельно допустимым для экосистем, эксплуатируемых со значительным фоновым уровнем антропогенного преобразования, с нарушенной биотой.

Соответственно, экологические нормативы фонового состояния гидроэкосистем определяются формализацией фонового состояния макрозообентоценозов вне изучаемого воздействия как функции отклика вышеуказанных основных ценотических характеристик на императивные естественные факторы среды. Выбор наиболее эффективного пути уменьшения реального воздействия до установленного предельно допустимого уровня осуществляется с использованием предложенных уравнений. Подбор предельно допустимых сочетаний взаимодействующих факторов, совместно создающих комбинированное антропогенное воздействие, базируется на условии $Y \leq Y_{max}$.

Научный руководитель д.б.н. проф. *В.Ф.Шуйский*