УДК 577.47:502.747

В.Ф.Шуйский, Д.С.Петров, Т.А.Петрова, Т.В.Максимова, О.С.Иванова

Санкт-Петербургский горный институт (технический университет)

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА, НОРМИРОВАНИЕ И РЕГУЛЯЦИЯ МНОГОФАКТОРНЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРЕСНОВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Разработаны методы количественного изучения, оценки, нормирования и выбора мер по регуляции многофакторных антропогенных воздействий на экосистемы пресноводных водоемов и водотоков. Реакция биоты на воздействие оценивается по состоянию макрозообентоса как наиболее чувствительного биоиндикатора, а само воздействие – особым показателем, учитывающим эффект взаимодействия факторов. Нормирование многофакторного воздействия строится на выявлении его предельно допустимого уровня, не вызывающего необратимых изменений макрозообентоса. Регуляция воздействия направлена на его снижение до предельно допустимых сочетаний взаимодействующих факторов для достижения безопасного уровня их совместного биотического эффекта.

The methods of the quantitative study, estimation, rate setting and choice of measures to regulate multifactor manmade influences on the ecosystem of freshwater reservoirs and rivers have been developed. The reaction of biota on the influence was assessed at the state of macrozoobenthos as the most sensitive bioindicator. The influence was quantitatively estimated by the special parameter taking into account the factor interaction effect. The multifactor influence rate setting was based on revealing its permissible level limit, which does not cause irreversible changes of macrozoobenthos. The influence regulation was aimed at its reduction to the limit of permissible combinations of the interacting factors in order to achieve a safe level of their joint biotic effect.

Адекватная оценка и нормирование сложных (многофакторных) антропогенных воздействий на экосистемы является одной из наиболее актуальных задач современной экологии. Для решения этой задачи наиболее перспективны методы биоиндикации, использующие количественные закономерности реакции биоты на внешнее воздействие. Разработка методов количественного изучения, оценки, нормирования и выбора мер по регуляции многофакторных воздействий на водные объекты требует решения следующих основных задач:

- выбор оптимальных биоиндикаторов и их наиболее информативных характеристик;
- выбор количественной меры многофакторного воздействия, адекватно учитывающей эффект взаимодействия лимитирующих факторов различной природы во всевозможных комбинациях;
- выявление и формализация основных количественных закономерностей реакции биоиндикаторов на воздействие;
- количественное определение предельно допустимого уровня (ПДУ) воздействия и выбор наиболее эффективного пути уменьшения реального воздействия до установленного ПДУ.
- разработка схемы организации мониторинга гидроэкосистем, испытывающих антропогенное воздействие, которая заведомо обеспечит получение всех эмпирических данных, необходимых для реализации вышеуказанных действий.

При выполнении настоящей работы использованы результаты многолетнего (1983-2002) изучения антропогенных сукцессий экосистем разнотипных водных объектов (реки, озера, водоемы-охладители, эстуарии, ручьи, временные водоемы). Гидроэкологические исследования выполнены в Северо-Западном и Центральном регионах России (Ленинградская, Псковская и Рязанская области) и в Финляндии. Заключительная часть исследований (изучение воздействия на речные экосистемы ОАО «Фосфорит», «Бокситогорский глинозем» и «Пикалевский глинозем»), выполненная в 2001-2002 гг., включена в научно-техническую программу Министерства образования «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники».

Оптимальный биоиндикатор и его наиболее информативные характеристики. Одним из лучших биоиндикаторов качества водной среды и воздействий на гидроэкосистемы является макрозообентос – сообщества донных беспозвоночных с размером тела не менее 2 мм, чьи характеристики по сравнению с другими сообществами гидробионтов наиболее стабильны в пространстве и времени. Макрозообентос 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 их видовой состав, который строго детерминирован условиями среды. Результаты исследований показывают, что в сравнительных биоиндикационных исследованиях следует оценивать видовой состав макрозообентоса гидроэкосистемы в соответствии с перечнем тех видов, особи которых встречаются в биотопе закономерно, с вероятностью, превышающий доверительный уровень 90 %. Наиболее информативны следующие количественные показатели макрозообентоса: видовое богатство, видовое сходство сообщества с его фоновым состоянием (коэффициент Сьеренсена), видовое разнообразие (индекс Шеннона – Уивера), биомасса, скорость образования продукции, относительное и абсолютное обилие представителей ряда таксонов с характерной экологической валентностью.

Количественная мера многофакторного воздействия. Мерой устойчивости донных сообществ к воздействию может служить минимальный уровень этого воздействия, вызывающий достоверное (более 90 %)

изменение видового состава. При сложном n-факторном воздействии мерой устойчивости сообщества к воздействию (сохранение исходного видового состава и отсутствие необратимых изменений количественных характеристик) является область всех тех сочетаний значений n факторов, при которых происходит достоверное изменение его видового состава, т.е. «область сохранения устойчивости» (ОСУ) в гиперпространстве данных n факторов. Выделение факторов, значимо влияющих на сообщество, при наличии репрезентативного материала может быть осуществлено одним из принятых для этого методов (например, дисперсионным анализом, при групповом учете аргументов и др.). Граница ОСУ определяется выражением

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

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

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

$$\sum_{i=1}^{n}\left[(x_{ij}-x_{io})(x_{it}-x_{io})^{-1}Y_j^{-1}\right]^{Z_i}=1, \quad (2)$$

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

Закономерности реакции макрозообентоса на многофакторные воздействия. Зависимость указанных характеристик макрозообентоса, нормированных относительно их фоновых значений (f/f_0), от показателя многофакторного воздействия Y хорошо аппроксимировалась модифицированным логистическим уравнением (график функции – нисходящая S-образная кривая)

$$f/f_0\,(Y)=1-\frac{1}{1+ae^{bY}}, \quad (3)$$

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

Оценка ПДУ на макрозообентос. Проведенный анализ реакции макрозообентоценозов на многофакторные воздействия позволяет выявить следующие ее общие закономерности. Малые дозы воздействия ($Y < 1$) не влияют на видовой состав сообщества, вызывая незначительные (менее 15 %), обратимые изменения количественных характеристик сообщества. Изменение видового состава при уровне воздействия $Y = 1$ – исчезновение целой группы наиболее стенобионтных видов (обычно около 40 % от их общего количества в сообществе) – обычно происходит резко, скачкообразно. При этом наблюдается значительное (на 25-50 % от фоновых значений) необратимое изменение основных количественных характеристик сообществ. Таким образом, потеря устойчивости индикаторного сообщества к воздействию при $Y = 1$ является, в сущности, катастрофой. По мере дальнейшего усиления воздействия в диапазоне $1 > Y < 3$ видовой состав сообществ практически не меняется, а значения количественных характеристик плавно уменьшаются, все более отклоняясь от фоновых значений. При $Y \approx 3$ происходит второе катастрофическое изменение свойств сообщества: повторное обеднение его исходного видового состава (сохраняется не более 20-30 % видов) и резкое (на 70-90 % от их фоновых значений) снижение значений количественных характеристик.

Таким образом, можно предложить обоснованный количественный подход к нормированию сложных воздействий на пресноводные экосистемы: предельно допустимое изменение сообществ f/f_0 определяет предельно допустимый уровень воздействия Y_{max}:

- для девственных экосистем, высоко чувствительных к воздействию, $Y < 1$;
- для эксплуатируемых экосистем со значительным фоновым уровнем антропогенного преобразования, с нарушенной биотой $Y<3$.

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. Наиболее эффективные пути уменьшения реального воздействия до установленного ПДУ выбираются на основе уравнений (1)-(3), подбор предельно допустимых сочетаний взаимодействующих факторов, совместно создающих комбинированное антропогенное воздействие, базируется на условии $Y \leq Y_{max}$.