В.Ф.Шуйский, Д.С.Петров
Санкт-Петербургский горный институт

УДК 577.47:502.747

МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ И ПОДХОД К НОРМИРОВАНИЮ МНОГОФАКТОРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРЕСНОВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Разработан метод количественной оценки многофакторных воздействий на пресноводные экосистемы. Метод использует установленные нами общие закономерности антропогенных сукцессий в водоемах. При этом лучшим биоиндикатором состояния водной среды, биоты и антропогенных изменений экосистемы оказался макрозообентос. Его параметры признаны главными для оценки внешней нагрузки на водоемы. Мерой воздействия служит универсальный безразмерный показатель, выражающий кратность превышения устойчивости сообществ. Расчет этого показателя проводится по оригинальной изоболической модели. Она впервые позволяет адекватно учесть эффект взаимодействия лимитирующих факторов любой природы и в любом количестве, что обеспечивает высокую точность оценки. Определены предельно допустимые уровни сложных воздействий. Дан единый количественный подход к нормированию и регуляции многокомпонентной антропогенной нагрузки на гидроэкосистемы.

The method of a quantitative estimation of multifactor influences on freshwater ecosystems is developed. The method uses the general laws, established by us, of manmade sukcessions in reservoirs. Thus the best indicator of a condition of water environment, biotic and manmade changes of ecosystem has appeared makrozoobenthos. Its parameters are recognized main for an estimation of external loading on reservoirs. The measure of influence is served a universal dimensionless parameter Y, expressing division of excess of communities's stability. An account of this parameter is made on the basis of original izobolical model. For the first time it allows adequately to take into account effect of interaction of the limiting factors of any nature and in any quantity. It provides high accuracy of estimation. The extreme admitted levels of complex influences are determined. The uniform quantitative approach to standardization and regulation of multicomponent manmade loading on hydroecosystems is given.

Оценка и нормирование многофакторных антропогенных воздействий на экосистемы является одной из наиболее актуальных задач современной экологии. Для решения этой задачи наиболее перспективны методы биоиндикации. К настоящему времени общепризнанно, что лучшим биоиндикатором качества водной среды и воздействий на гидроэкосистемы служат сообщества донных макробеспозвоночных (макрозообентос). По сравнению с другими сообществами гидробионтов, его характеристики наиболее стабильны в пространстве и времени. Поэтому именно макрозообентос наиболее четко отражает не только общее состояние водной среды и экосистемы, но и их локальные особенности в градиентах воздействий.

Очевидно, что для правильной оценки какого-либо сложного воздействия на индикаторное сообщество необходимо использовать для индикации те его характеристики, которые наиболее полно отражают состояние сообщества и определяют его основные свойства, а также выделить все императивные факторы среды и адекватно учесть эффект их взаимодействия.

К сожалению, применяемые методы изучения сложных антропогенных сукцессий с использованием биоиндикации не отвечают этим требованиям. Биоиндикаторы и их учитываемые характеристики часто выбираются произвольно. Взаимодействие факторов или не учитывается вовсе, или учитывается формально и лишь для нескольких токсикантов сходного действия (по известной аддитивной формуле Аверьянова – Лазарева). Это обусловливает недостаточную точность оценки многофакторных антропогенных воздействий, затрудняет их

количественное изучение, нормирование и регуляцию.

Предлагаемый метод оценки и подход к нормированию сложных воздействий на гидроэкосистему по состоянию биоиндикатора-макрозообентоса соответствует указанным требованиям. Метод разработан при изучении пресноводных экосистем различного типа (малые озера, водоемы-охладители электростанций, реки, эстуарии), испытывающих многофакторные антропогенные воздействия (эвтрофирование, термофикация, ацидификация и токсификация в сложных сочетаниях).

Установлено, что основной характеристикой сообщества макрозообентоса как биоиндикатора следует считать видовой состав. Во-первых, он наиболее строго детерминируется условиями среды. Во-вторых, в условиях любого воздействия именно сохранение видового состава сообщества определяет обратимость вызываемых изменений количественных характеристик сообщества, т.е. обеспечивает упругую устойчивость макрозообентоса к данному воздействию. Изменение видового состава, напротив, свидетельствует о необратимых изменениях сообщества, потере им устойчивости к данному воздействию. Выяснилось, что в градиенте любого воздействия всегда достаточно четко выделяется критический уровень, вызывающий резкое, достоверное изменение видового состава макрозообентоса. Соответственно мерой устойчивости сообщества к воздействию является минимальный уровень последнего, вызывающий достоверное изменение структуры сообщества (видового состава). При действии одного фактора мерой устойчивости к нему сообщества является минимальное значение данного фактора, вызывающее достоверное изменение видового состава сообщества ($P = 90\ \%$). При более сложном, n-факторном воздействии мерой устойчивости к нему сообщества является n-мерная поверхность всех тех сочетаний значений лимитирующих факторов, при которых начинается достоверное изменение видового состава бентоса:

$$\sum_{i=1}^{n}\left[(x_{ij} - x_{i0})(x_{it} - x_{i0})^{-1}\right]^{Z_i} = 1\ , \quad (1)$$

где x_{ij} – абсолютное j-е значение i-го фактора; x_{i0} – пороговое значение i-го фактора (минимальное, вызывающее достоверные изменения количественных характеристик сообщества); x_{it} – предельно допустимое значение i-го фактора (минимальное, вызывающее достоверные изменения видового состава сообщества при отсутствии прочих лимитирующих факторов); Z_i – параметры, передающие особенности взаимодействия каждого из факторов с остальными, при $0 < Z < 1$ взаимодействие сильнее аддитивного, при $Z > 1$ слабее.

Мера результирующего многофакторного воздействия на сообщество макрозообентоса разработана на основе результатов сравнительного анализа изобол (изобола – n-мерная поверхность в гиперпространстве лимитирующих факторов, включающая все те сочетания их значений, которые определяют равносильное изменение объекта воздействия). Выяснилось, что при любых воздействиях на бентос все изоболы, соответствующие различным характеристикам сообществ и разным уровням их лимитирования, могут с достаточной точностью считаться подобными как друг другу, так и границе области сохранения устойчивости сообщества к воздействию (1). Это определило следующую структуру универсального показателя результирующего воздействия на сообщество Y:

$$\sum_{i=1}^{5}\left[(x_{ij} - x_{i0})(x_{it} - x_{i0})^{-1}(Y_j)^{-1}\right]^{Z_i} = 1. \quad (2)$$

Безразмерный показатель Y выражает кратность превышения некоторым воздействием своего минимального уровня, вызывающего потерю устойчивости сообщества, и является адекватной мерой многофакторного воздействия на сообщество (поскольку всегда учитывает реальный эффект взаимодействия в каждой конкретной группе факторов, благодаря эмпирически устанавливаемым значениям параметров Z).

Анализ основных функций благополучия различных сообществ макрозообентоса от показателя уровня воздействия Y показал следующее. Малые дозы воздействия, не влияющие на видовой состав сообщества ($Y < 1$), вызывают незначительные (менее 15 %) и обратимые изменения количественных характеристик сообщества. Изменение видового состава при уровне воздействия $Y = 1$ обычно происходит резко, скачкообразно, с исчезновением целой группы наиболее стенобионтных видов (обычно около 40 % от их общего количества в сообществе). 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 $Y = 1$ имеет характер катастрофы.

По мере дальнейшего усиления воздействия в диапазоне значений Y от 1 до 3 видовой состав сообществ практически не меняется, а значения количественных характеристик плавно уменьшаются, все более отклоняясь от фоновых значений. При $Y = 3$ происходит второе катастрофическое изменение свойств сообщества: повторное обеднение его исходного видового состава (от него сохраняется не более 20-30 % видов) и резкое снижение количественных характеристик (на 70-90 % от их фоновых значений).

Установленные закономерности проявляются при любых антропогенных воздействиях на различные пресноводные экосистемы. Это дает обоснованную количественную базу нормирования сложных воздействий на пресноводные экосистемы. Так, для экосистем, практически не нарушенных, высокочувствительных к воздействию (например, уникальных природных комплексов) не следует допускать потери сообществами устойчивости к воздействию и их первой катастрофы ($Y < 1$). При эксплуатации экосистем, уже значительно преобразованных, с нарушенной биотой, следует избегать второй катастрофы ($Y < 3$), и т.д. Допустимые значения конкретных факторов и меры по их регуляции определяются в соответствии с ролью каждого фактора в их общем воздействии согласно уравнению (2).

Данный метод апробирован применительно к различным многофакторным воздействиям на пресноводные экосистемы (влияние предприятий горной промышленности, гидротехнического и транспортного строительства, сооружения и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса, последействия молевого лесосплава и др.). Апробация показала высокую эффективность метода при количественном изучении, оценке, нормировании и разработке мероприятий по предотвращению и ликвидации последствий антропогенных сукцессий гидроэкосистем.