УДК 658.615:502

Д.С.ПЕТРОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РЕАКЦИИ ВОДНЫХ СООБЩЕСТВ НА ТЕХНОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Проведен анализ возможных вариантов изменения гидроэкосистем при различных типах антропогенных сукцессий. Установлены зависимости нормированных функций благополучия водного сообщества от результирующего уровня техногенного воздействия, определяемого показателем *Y*. Предложено уравнение, описывающее реакцию водных сообществ на тот тип техногенного воздействия, который наиболее характерен для крупных промышленных предприятий (в том числе, предприятий горно-металлургического комплекса).

The analysis of possible variants of hydroecosystems change at various types anthropogenous successions is lead. Dependences normalized well-being functions of water community from resulting level of the technogenic influence defined by parameter Y are established. The equation describing water communities reaction on that type of technogenic influence, which most typical for the large industrial enterprises (including – the enterprises of a mountain-metallurgical complex) is offered.

Проблемой антропогенных влияний на водные ресурсы различные науки занимаются уже более 100 лет. На сегодняшний день особое внимание уделяется вопросам оценки и нормирования антропогенных воздействий на биологические системы водных объектов. Эти воздействия создаются все более и более сложными факторными комбинациями. Методы, применяемые для их оценки и нормирования, весьма несовершенны. В лучшем случае рекомендуется суммировать расчетные эффекты нескольких токсикантов с общим характером действия, прочие же факторы рассматриваются по отдельности без учета какого-либо их взаимовлияния. При этом известно, что подавляющее большинство веществ в смесях влияют на живой организм иначе, чем по отдельности. Эффект их сочетания может быть не только суммарным (аддитивным), но и более, и менее сильным, чем аддитивный. Более того, часто возникают и принципиально новые эффекты, совершенно не свойственные ингредиентам. Все это значительно обесценивает результаты оценки качества природных сред на основе действующей системы санитарно-гигиенических нормативов.

Более объективные и надежные результаты позволяют получить методы биоиндикации при условии правильного выбора самого биоиндикатора и его тест-характеристик. Наиболее перспективной представляется разработка методов биоиндикации, использующих количественные закономерности реакции биоиндикатора на изменение условий среды. С помощью таких методов возможно более адекватное отслеживание антропогенных преобразований гидроэкосистем, а также нормирование и регуляция антропогенного вмешательства в природные процессы.

Следует отметить, что изучение закономерностей техногенных сукцессий водных экосистем осложняется несколькими факторами.

В первую очередь, для построения правильной модели требуется определить наиболее адекватную функцию благополучия водной биоты. В качестве функций благополучия отдельного организма, как правило, выступают такие показатели жизнедеятельности особей, как скорость роста, развития, плодовитость, продолжительность жизни, смертность, питание, метаболизм, двигатель-

ная активность [3]. Если рассматривать более высокие уровни организации биосистем, то наиболее приемлемыми показателями состояния сообщества могут служить биомасса, видовое разнообразие и богатство, средняя масса особи, продуктивность сообщества и др. Чувствительность к воздействию у разных характеристик биосистемы существенно различается. Поэтому реакция биосистемы на действие изучаемого экологического фактора (или совокупности факторов) обычно изучается путем сравнительного анализа различных функций благополучия. Для удобства такого анализа следует единообразно нормировать значения различных функций благополучия относительно диапазонов их возможных значений:

$$\psi(X)_i = \frac{f(X)_i - f(X)_t}{f(X)_0 - f(X)_t}, \qquad (1)$$

где $f(X)_i$ и $\psi(X)_i$ – конкретное (i-е) значение функции благополучия $f(X)$, абсолютное и нормированное соответственно; $f(X)_0$ – оптимальное для биосистемы значение функции благополучия $f(X)$ (при сохранении резистентности биосистемы: $f(X)_i = f(X)_0$); $f(X)_t$ – предельно допустимое значение данной функции; минимальное дальнейшее отклонение значений функции от оптимального несовместимо с нормальной жизнедеятельностью биосистемы, соответствует началу ее необратимых патологических изменений или прекращению существования; при утрате биосистемой резистентности и сохранении упругости $|f(X)_t| \le |f(X)_i| < |f(X)_0|$; при утрате упругости: $|f(X)_i| < |f(X)_t|$.

Такая нормировка значений различных функций благополучия позволяет иметь единую интерпретацию:

• при $\psi = 1$ соответствующая характеристика биосистемы сохраняет оптимальное значение, т.е. не реагирует на воздействие, биосистема сохраняет по данной характеристике резистентность и тем более упругость;

• при $0 \le \psi < 1$ данная характеристика лимитируется воздействием, резистентность биосистемы утрачена, упругость сохраняется;

• при $\psi > 1$ характеристика патологически стимулируется воздействием, резистентность биосистемы утрачена, упругость сохраняется;

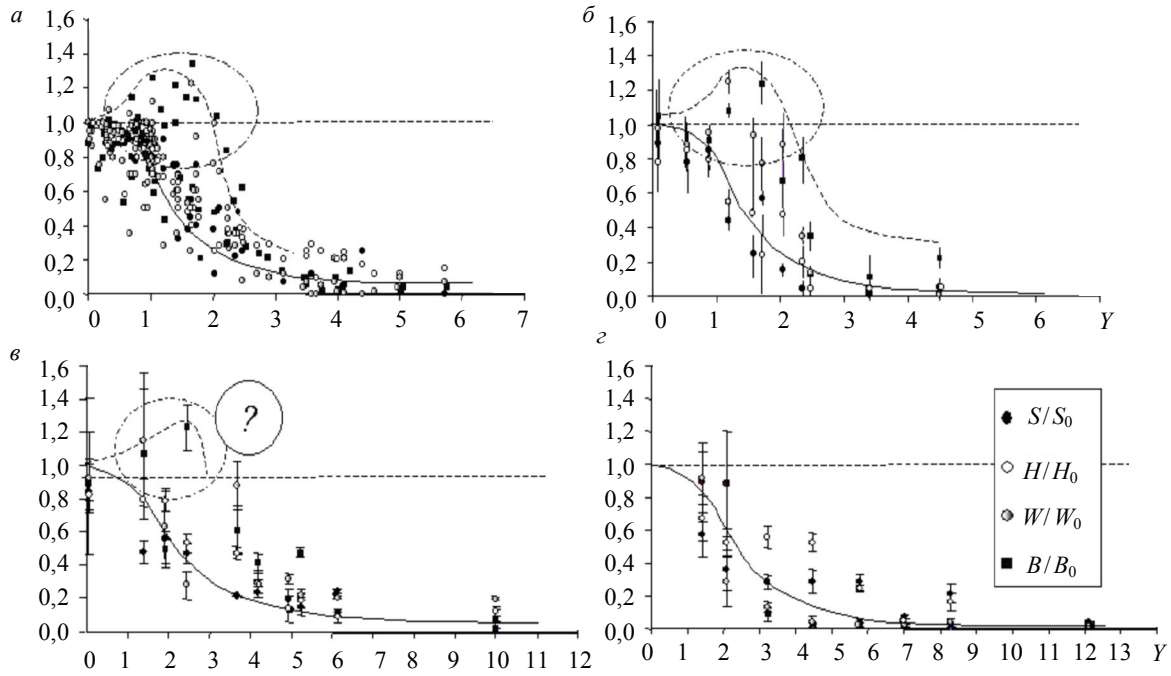
• при $\psi < 0$ характеристика достигает критического значения, при котором биосистема исчерпывает свои адаптивные возможности, необратимо изменяется или перестает существовать, упругость биосистемы утрачена.

Следовательно, данная нормировка позволяет осуществлять сравнительный анализ различных функций благополучия биосистемы, исходно имеющих разную размерность и несопоставимые значения.

Вторая сложность, возникающая при изучении закономерностей реакции биологических систем на экзогенные факторы, заключается в выборе адекватной единой меры результирующего воздействия на биоту, которая могла бы учитывать действие всех факторов, реально влияющих на водное сообщество, независимо от их природы и размерности. В данной работе в качестве такой меры используется показатель Y [4]. Показатель Y является изоболическим, т.е. определенное его значение соответствует тем (и только тем) сочетаниям значений взаимодействующих факторов, на которые биоиндикатор реагирует определенным, равным изменением. Особая структура показателя позволяет адекватно учесть синергизм сочетающихся факторов, а также пороги резистентной и упругой устойчивости сообществ к каждому из них.

Использование изоболического показателя позволило проанализировать, обобщить, формализовать и типизировать основные количественные закономерности реакции водного сообщества (в данном случае примером служат донные сообщества – макрозообентоценозы) на различные варианты техногенных воздействий (см. рисунок).

Так, если техногенная сукцессия происходит по «классическому» сценарию антропогенного эвтрофирования (при отсутствии техногенной токсификации), то в биотопах со слабо заиленными, твердыми субстратами при умеренных уровнях нагрузки ($Y \approx$ 1-2) наблюдается эффект стимуляции биомассы и средней массы особи (см. рисунок, *а*, *б*) [2]. На мягких грунтах (при посту-



Реакция макрозообентоса некоторых рек Ленинградской области на эвтрофирование
S/S_0 – видовое богатство; H/H_0 – видовое разнообразие; B/B_0 – биомасса; W/W_0 – средняя масса особи (значения характеристик нормированы относительно фоновых)

плении техногенных токсикантов – на всех субстратах) этот стимулирующий эффект незначителен (см. рисунок, *в*) либо вовсе не наблюдается (см. рисунок, *г*) [1]. При дальнейшем усилении воздействия ($Y > 2$) изменения указанных характеристик лимитируются во всех биотопах.

Характеристики, зависящие от видового состава (количество характерных видов, индекс видового разнообразия Шеннона), монотонно и закономерно убывают во всем диапазоне значений $Y > 1$ при любом варианте воздействия.

Любые воздействия при уровне $Y > 3$ ведут к необратимой деградации донного биоценоза. В его составе остается лишь несколько наиболее эврибионтных видов, особи которых немногочисленны или вообще встречаются спорадически. Значения большинства функций благополучия не превышают 20 % от фоновых, вне зависимости от типа реакции соответствующих характеристик сообщества на данное воздействие.

В зависимости от свойств биотопа и от характера оказываемого воздействия стимулирующий эффект может быть выражен в самой различной степени. Таким образом, между выделенными основными тремя типами функций благополучия макрозообентоценоза от уровня многофакторного воздействия нет сколько-нибудь четких границ и возможны любые промежуточные варианты. Кроме этого, необходимо отметить тот факт, что сукцессии водных объектов в зоне воздействия крупных промышленных предприятий (в том числе предприятий горно-металлургического комплекса) в подавляющем большинстве случаев развивается по сценарию антропогенного эвтрофирования, отягощенного поступлением в воду большого количества токсичных веществ.

В связи с этим целесообразно считать основным, наиболее универсальным именно простейший тип реакции макрозообентоценозов на многофакторные воздействия. Такая функция благополучия может быть хорошо аппроксимирована логистическим уравнением

$$f/f_0 = 1 - \frac{1}{1 + ae^{bY}}, \qquad (2)$$

где f/f_0 – характеристика макрозообентоса, значение которой в изучаемых импактных условиях нормировано относительно синхронного ей фонового значения; $a = \text{const} = (1 - f/f_{0\min})/(f/f_{0\min})$; $b = \text{const}$; $f/f_{0\,\min} = \text{const}$ – нижний предел значений функции (при $Y \to \infty$).

Сравнительный анализ частных значений параметров уравнения (2), описывающих реакцию различных характеристик макрозообентоценозов на разнообразные многофакторные воздействия, показывает, что вариабельность этих значений и достоверность их различия обычно невелики. Это позволило вывести единое уравнение зависимости нормированных характеристик макрозообентоценозов от изоболического показателя многофакторных антропогенных воздействий Y с параметрами: $a = 22{,}8 \pm 2{,}4$; $b = -1{,}53 \pm 0{,}13$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петров Д.С.* Техногенная сукцессия р.Луги в зоне воздействия ОАО «Фосфорит» // Записки Горного института. СПб, 2002. Т.150. С.50-54.

2. Сукцессия сообществ макрозообентоса реки, испытывающей последействие молевого лесосплава / В.Ф.Шуйский, Т.П.Занцинская, Д.С.Петров, Т.В.Максимова, Т.А.Петрова // Материалы междунар. конф. «Трофические связи в водных сообществах и экосистемах». Борок, 28-31 октября 2003.

3. *Федоров В.Д.* Экология / В.Д.Федоров, Т.Г.Гильманов М.: Изд-во МГУ, 1980. 464 с.

4. *Шуйский В.Ф.* Изоболический метод оценки и нормирования многофакторных антропогенных воздействий на пресноводные экосистемы по состоянию макрозообентоса / В.Ф.Шуйский, Т.В.Максимова, Д.С.Петров // МАНЭБ. СПб, 2004. 304 с.