

УДК 504.4.06(1/9); 577.4

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВОДОЕМОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

© Л.Л. Фролова, А.Г. Закиров, О.Ю. Деревенская

Frolova L.L., Zakirov A.G., Derevenskaya O.Y. Methodology of Fresh Water Reservoirs Restoration on the Basis of Fuzzy Sets. The problem of fresh water reservoirs restoration is viewed. Authors consider common approach to solve this problem. Fuzzy sets are used to choose the restoration technology of fresh water reservoirs. The described methods and realized ways are used for designing an expert system.

ВВЕДЕНИЕ

Создание эффективной технологии восстановления пресноводных водоемов - один из рациональных и надежных путей восстановления экологически чистой природной среды. Проведение восстановительных мероприятий требует больших финансовых затрат, поэтому ошибки при выборе технологии восстановления водоемов недопустимы.

Опубликованные материалы [1, 2] свидетельствуют, что за последнее время в мировой практике удалось оздоровить, снять или ослабить негативные последствия антропогенного эвтрофирования примерно для 700 водоемов [3 - 5]. Основную массу этих водоемов составляют небольшие озера или пруды с площадью акватории не превышающей несколько сот га, хотя к числу восстановленных относится и система североамериканских Великих озер.

Для разных водоемов использовались разные мероприятия с неодинаковыми результатами, и выбор технологии восстановления пресноводных водоемов не имел общего для всех водоемов правила. Таким образом, наиболее интересной представляется задача выявления закономерностей применения восстановительных мероприятий и построение на их основе формализованной процедуры выбора технологии восстановления водоемов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор технологии восстановления водоемов является очень сложной проблемой, так как при этом необходимо учитывать действие разнообразных факторов на водоем, который сам, в свою очередь, является сложной системой.

В настоящее время для оздоровления водоемов разработан и испробован целый комплекс различных мероприятий, влияющих на различные биохимические циклы жизнедеятельности биотического сообщества водоемов. Перечень восстановительных мероприятий водоемов, их краткая характеристика, условия применения в

зависимости от показателей состояния водоемов приведены ниже.

Аэрация озерной воды. Искусственное увеличение содержания кислорода в воде при помощи аэратора. Применяется при дефиците растворенного кислорода в воде при значении показателя - % насыщения кислородом $\leq 70\%$ [1, 3, 6].

Отвод воды из гипolimниона. Удаление воды из слоя, расположенного ниже слоя температурного скачка. Применяется для снижения концентрации биогенных элементов в воде при следующих значениях показателей: соединения азота, мгN/л: $NH_4^+ > 0,3$; $NO_2^- > 0,01$; $NO_3^- > 1,0$; фосфора ортофосфатов, мгP/л: $PO_4^{3-} > 0,03$; средняя глубина водоема больше 3 м [3 - 5].

Осаждение фосфора в воде. Осаждение фосфора сульфатом алюминия в слабо проточных водоемах. Применяется для уменьшения содержания фосфора в воде при значении следующих показателей: фосфор ортофосфатов, мгP/л: $PO_4^{3-} > 0,03$; средняя глубина водоема больше 3 м [3 - 5].

Удаление донных отложений. Удаление вычерпыванием или средствами гидромеханизации излишков донных отложений, приводящих к поступлению фосфора в водоем. Применяется для снижения концентрации биогенных элементов в воде при следующих значениях показателей: соединения азота, мгN/л: $NH_4^+ > 0,3$; $NO_2^- > 0,01$; $NH_3 > 1,0$; фосфор ортофосфатов, мгN/л: $PO_4^{3-} > 0,03$; биомасса фитопланктона больше 2 мг/л; толщина донных отложений больше 3 м [3, 5, 7, 8].

Экранирование донных отложений. Изоляция донных отложений материалами, не содержащими загрязняющих и биогенных веществ (пленки, зольная пыль, железосодержащий песок, глина). Применяется для снижения концентрации биогенных элементов в воде при следующих значениях показателей: соединения

азота, мгN/л: $NH_4^+ > 0,3$; $NO_2^- > 0,01$; $NO_3^- > 1,0$; фосфор ортофосфатов, мгP/л: $PO_4^{3-} > 0,03$; средняя глубина водоема больше 3 м; толщина донных отложений меньше 3 м [3, 5].

Создание или усиление проточности. Разбавление озерной воды вновь поступающей водой. Применяется для снижения концентрации биогенных элементов в воде и частичного вымывания донных отложений при следующих значениях показателей: соединения азота, мгN/л: $NH_4^+ > 0,3$; $NO_2^- > 0,01$; $NO_3^- > 1,0$; фосфор ортофосфатов, мгP/л: $PO_4^{3-} > 0,03$; биомасса фитопланктона больше 2 мг/л [3, 9].

Химические методы борьбы с сине-зелеными водорослями. Внесение альгицидов в водоемы технического назначения. Применяется для замедления размножения сине-зеленых водорослей и уменьшения количественных показателей сине-зеленых водорослей в воде при значении показателя биомассы фитопланктона больше 5 мг/л, но меньше 100 мг/л [10, 11].

Механическое изъятие биомассы водорослей. Применяется для замедления размножения сине-зеленых водорослей и уменьшения количественных показателей сине-зеленых водорослей в воде при следующих значениях показателей: биомасса фитопланктона больше 100 мг/л; средняя глубина водоема больше 3 м; площадь зарастания водоема более 11 % [12, 13].

Создание биоценоза из высших водных растений. Разложение нефтепродуктов, фенолов и некоторых других соединений, токсичных для гидробионтов, бактериальным населением зарослей и самими растениями. Применяется для уменьшения концентрации токсических веществ и соединений биогенных элементов в воде при следующих значениях показателей: взвешенные вещества больше 14 мг/л; прозрачность (диск Секки) меньше 0,5 м; соединения азота, мгN/л: $NH_4^+ > 0,3$; $NO_2^- > 0,01$; $NO_3^- > 1,0$; фосфор ортофосфатов, мгP/л: $PO_4^{3-} > 0,03$; нефть и нефтепродукты больше 1 мг/л; фенол больше 1 мг/л; СПАВ больше 1 мг/л; площадь зарастания водоема менее 11 % [9, 14, 15].

Создание биоценоза из моллюсков. Осаждение взвешенных веществ. Применяется для увеличения прозрачности воды при следующих значениях показателей: взвешенные вещества больше 14 мг/л, но меньше 100 мг/л; прозрачность (диск Секки) больше 0,15 м, но меньше 0,5 м [16, 17].

Как видно из выше приведенного описания технологий восстановления водоемов выбор этих технологий в настоящее время определяется четкими числами - пороговыми значениями показателей состояния водоемов. Фактически же приводимые разными авторами числа носят ориентировочный характер и реальные пороговые значения показателей состояния водоемов являются нечеткими числами.

Причем, эта нечеткость носит принципиальный, концептуальный характер [18, 19]. Поэтому для решения задачи выбора технологии восстановления водоемов используем метод анализа альтернатив на основе нечетких множеств [20]. Метод модифицирован авторами в связи с необходимостью учета реального состояния водоемов по измеренным значениям показателей. Критериальные оценки задаются как степени соответствия альтернатив понятиям, определяемым критериями, в диапазоне измеренных значений показателей состояния водоемов. Процедура оценки применимости технологий обобщена введением композиционного правила, в качестве которого могут выступать как операция пересечения, так и операция объединения нечетких множеств.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При изложении математического аппарата принятия решений на нечетких множествах технологии восстановления водоемов рассматриваются в качестве альтернатив, а показатели состояния водоемов рассматриваются в качестве критериев.

Пусть имеется множество из m альтернатив

$$Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}.$$

Тогда для критерия X может быть рассмотрено множество нечетких множеств

$$X = \{\mu_{Y_1}(x), \mu_{Y_2}(x), \dots, \mu_{Y_m}(x)\},$$

где $\mu_{Y_i}(x)$ - функция принадлежности альтернативы Y_i по критерию X , характеризующая степень соответствия альтернативы Y_i понятию, определяемым критерием X и принимающая значения в диапазоне [0, 1].

Значение критерия X для конкретного объекта измеряется. Измеренные значения Z критерия X представляются функцией принадлежности $\mu_Z(x)$.

Для оценки альтернативы Y_i по критерию X используются пересечения нечетких множеств $\mu_{Y_i}(x)$ и $\mu_Z(x)$:

$$\mu_{Y_i}(x) = \mu_{Y_i}(x) \cap \mu_Z(x). \quad (1)$$

При наличии n критериев: X_1, X_2, \dots, X_n , лучшей считается альтернатива, удовлетворяющая и критерию X_1 , и X_2 и ... и X_n . Правило для оценки альтернативы может быть записано в виде следующей формулы:

$$\mu_{D_i}(x) = \mu_{Y_i}(x_1) * \mu_{Y_i}(x_2) * \dots * \mu_{Y_i}(x_n).$$

Здесь $*$ называется композиционным правилом нечеткого вывода. В качестве такого правила может быть использовано пересечение или объединение нечетких множеств.

Оценкой альтернативы Y_i является четкое число D_i , получаемое в результате операции дефазификации нечеткого множества, представляемого функцией принадлежности

$\mu_{D_i}(x)$. Полученные оценки D_i сортируют по убыванию и таким образом получают список предпочтений технологий восстановления водоемов.

В качестве операции пересечения нечетких множеств используется операция нахождения минимума, выполняемая над их функциями принадлежности:

$$\mu_1(x) \cap \mu_2(x) = \min_{k=l,p} (\mu_1(x_k), \mu_2(x_k)). \quad (2)$$

В качестве операции объединения нечетких множеств используется операция нахождения тах, выполняемая над их функциями принадлежности:

$$\mu_1(x) \cup \mu_2(x) = \max_{k=l,p} (\mu_1(x_k), \mu_2(x_k)). \quad (3)$$

В качестве операции дефаздификации используется операция нахождения максимального значения функции принадлежности

$$D_i = \max_{k=l,p} (\mu(x_k))$$

Вид функции принадлежности измерений в общем случае может быть произвольным. В нашем случае для нее принят наиболее распространенный для биологических измерений вид нормального распределения

$$(\ln 0,5/\beta^2) (Z-x)^2$$

$$\mu_Z(x) = e,$$

где β - среднеарифметическая относительная ошибка измерений.

Функции принадлежности альтернативы Y_i по критерию X_j $\mu_{Y_i}(x_j)$ находятся путем введения нечеткости для пороговых значений. Вид этих функций находится из следующих соображений. Вводятся граничные значения критерия L и H , в которых $\mu_{Y_i}(x_j)$ принимает значения 0 или 1. Значения L и H выбираются из экологических соображений по Комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши и соответствуют экологически значимым грациям этой классификации. Функция $\mu_Y(x)$ меняется монотонно от 0 до 1, в области пороговых значений G принимает значение 0,5. В общем случае $\mu_Y(x)$ может содержать возрастающие (индекс L) и убывающие (индекс H) участки и имеет вид:

$$\mu_Y(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < L_L \\ f(x)_L & \text{при } L_L \leq x \leq H_L \\ 1 & \text{при } H_L \leq x \leq L_H \\ f(x)_H & \text{при } L_H \leq x \leq H_H \\ 0 & \text{при } x > H_H \end{cases}$$

Граничные значения показателей состояния водоемов приведены в таблице.

Аналитический вид $f(x)$ строится в виде кубического сплайна на отрезках $[L_L, G_L]$ и $[G_L, H_L]$ (для $f(x)_L$) при условиях: $f(L_L)_L = 0$; $f(G_L)_L = 0,5$; $f(H_L)_L = 1$; равенства первой и второй производных в точке G_L ; равенства 0 первой производной в точках L_L и H_L .

Таблица.

Граничные значения показателей состояния водоемов

Технология	Показатель	L_L	H_L	L_H	H_H
1*	Кислород	-	-	50.0	90.0
2, 4, 5, 6, 9	NH_4^+	200.0	500.0	-	-
2, 4, 5, 6, 9	NO_2^-	5.0	20.0	-	-
2, 4, 5, 6, 9	NO_3^-	0.5	1.5	-	-
2, 3, 4, 5, 6, 9	PO_4^{3-}	16.0	50.0	-	-
9, 10	Взвешенные вещества	9.0	20.0	50.0	300.0
9	Взвешенные вещества	-	-	50.0	300.0
9	Фенол	0.1	1.9	-	-
9	Площадь зарастания	-	-	5.0	20.0
9	СПАВ	0.5	2.0	-	-
9	Нефть	0.3	1.7	-	-
9	Прозрачность	-	-	4.5	7.5
10	Прозрачность	0.5	2.5	4.5	7.5
2, 3, 5, 8	Глубина	2.0	4.0	-	-
8	Фитопланктон	10.0	100.0	-	-
4, 6	Фитопланктон	1.0	5.0	-	-
7	Фитопланктон	2.0	10.0	90.0	110.0
4	Донные отложения	2.0	4.0	-	-
5	Донные отложения	-	-	4.0	2.0

* Примечание: 1 - аэрация озерной воды; 2 - отвод воды из гипolimниона; 3 - осаждение фосфора в воде; 4 - удаление донных отложений; 5 - экранирование донных отложений; 6 - создание или усиление проточности; 7 - химические методы борьбы с сине-зелеными водорослями; 8 - механическое изъятие биомассы водорослей; 9 - создание биоплато из высших водных растений; 10 - создание биоплато из моллюсков.

При выборе технологии восстановления водоемов используются стратегии селективной и аддитивной оценки применимости этих технологий. При селективной оценке используется правило (2). Значение $D_i > 0,6$ означает, что все показатели состояния водоема указывают на применимость соответствующей технологии. При аддитивной оценке используется правило (3). Значение $D_i > 0,6$ означает, что технология применима, но не все показатели (возможно, только один) указывают на эту возможность. Для окончательного принятия решения о возможности применимости данной технологии требуется анализ частных оценок, полученных по правилу (1), по каждому показателю состояния водоема в отдельности.

В настоящее время при "ручном" выборе технологии восстановления используется только частная оценка по правилу (1). Обобщенные оценки по правилам (2) и (3) практически не возможны из-за большого объема вычислительной работы.

Описанная выше методология использована при разработке экспертной системы "СТАН" на персональном компьютере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены пороговые значения показателей состояния водоемов, используемые при выборе технологии восстановления водоемов. Впервые для выбора технологии восстановления водоемов предложена и реализована методология принятия решений с использованием теории нечетких множеств, как наиболее соответствующая природе объекта. Нечеткие множества использованы при описании пороговых значений показателей состояния водоемов, результатов измерений этих показателей, при построении процедур принятия решений. Использование нечетких множеств позволяет провести ранжирование технологий восстановления водоемов по их экологической эффективности.

Реализация методологии выбора технологии восстановления водоемов на персональном компьютере в виде экспертной системы позволит пользователю, не специалисту в данной области, получить квалифицированный совет, а специалисту-экологу обратиться к экспертной системе с целью либо ускорить процесс получения результата, либо с целью возложить на экспертную систему рутинную работу.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Y - технология восстановления водоема или альтернатива; X - показатель состояния водоема или критерий; $\mu_{Y_i}(x)$ - функция принадлежности альтернативы Y_i значению x критерия X , характеризующая степень соответствия альтернативы Y_i понятию, определяемому критерием X и принимающая значения в диапазоне $[0, 1]$; $[0, 1] - \{0 \leq x \leq 1\}$, замкнутый интервал; i - номер альтернативы. Изменяется от 1 до m ; m - количество альтернатив; Z - значение критерия для конкретного объекта (водоема); $\mu_Z(x)$ - функция

принадлежности измеренного значения критерия на конкретном объекте, характеризующая степень отклонения истинного значения от измеренного и принимающая значение в диапазоне $[0, 1]$; $\mu_{Y_i}(x)$ - подмножество $\mu_{Y_i}(x)$, ограниченное областью значений критерия X для конкретного объекта; $\mu_{D_i}(x)$ - функция принадлежности оценки альтернативы Y_i по группе критериев; * - композиционное правило, определяющее тип операций над нечеткими множествами; D_i - четкое число, отражающее оценку альтернативы Y_i по группе критериев; k - номер дискретного участка области измерений критерия; p - количество дискретных участков области измерений критерия; $\ln 0,5$ - натуральный логарифм числа 0,5; β - среднеарифметическая относительная ошибка измерений; G - пороговое значение критерия (показателя состояния водоема), используемое при выборе альтернативы (технологии восстановления водоема). В настоящее время это единственное значение, по которому происходит такой выбор; L - нижняя экологически значимая граница области применимости альтернативы; H - верхняя экологически значимая граница области применимости альтернативы; L - возрастающий (нижний) участок $\mu_{Y_i}(x)$; H - убывающий (верхний) участок $\mu_{Y_i}(x)$; $f(x)$ - функция, описывающая изменение $\mu_Y(x)$ на участках между L и H .

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябов А.К., Сиренко Л.А. Искусственная аэрация природных вод. Киев: Наук. Думка, 1982.
2. Сиренко Л.А. // Антропогенное эвтрофирование природных вод. Черноголовка, 1985. С. 153-172.
3. Йоргенсен С.Э. Управление озерными системами. М.: Агропромиздат, 1985.
4. Клаппер Х. // Антропогенное эвтрофирование природных вод. Черноголовка, 1985. С. 172-197.
5. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеоздат, 1990.
6. Карасик В.М., Стывбун И.И. Установка для аэрации воды // Гидробиологический журнал. 1974. № 6. С. 108-111.
7. Лопотко М.З. Озера и сапропель. Минск: Наука и техника, 1979.
8. Гуйяш Н., Сабо М. // Антропогенное эвтрофирование природных вод. Черноголовка, 1985.
9. Шамардина И.П. // Общая экология, биоценология, гидробиология. Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1975. Т. 2.
10. Брагинский Л.П. Принципиальные препятствия к применению химического метода борьбы с "цветением" воды в водохранилищах // Водные ресурсы, 1977. № 2. С. 5-16.
11. Сиренко Л.А., Гавриленко М.Я. "Цветение" воды и эвтрофирование. Киев: Наук. Думка, 1978.
12. Силин Н.А., Карасик В.М. // "Цветение" воды. Киев: Наук. Думка, 1968. С. 321-326.
13. Карасик В.М., Кондаков В.Н. // Формирование и контроль качества поверхностных вод. Киев: Наук. Думка, 1976. С. 45-50.
14. Оксик О.П., Стальберг Ф.В. Управление качеством воды в каналах. Киев: Наук. Думка, 1986.
15. Эйвор Л.О., Дмитриева Н.Т. // Проблемы экологии Прибайкалья. Иркутск, 1988. Ч. 2. С. 134-138.
16. Шевцова Л.В., Харченко Г.А. О роли дрейссены в переработке взвешенных органических веществ Северо-Крымского канала // Гидробиологический журнал. 1981. Т. 17. № 5. С. 53-57.
17. Шевцова Л.В. Роль дрейссены бутской в осаждении взвеси и трансформации органического вещества // Гидробиологический журнал. 1989. № 2. С. 44-48.
18. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982.
19. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. М.: Химия, 1995.
20. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. 1990.

Поступила в редакцию 29 апреля 1996 г.