

Гидравлика и инженерная гидрология

УДК 502/504 : 556.182

В. Г. ПРЯЖИНСКАЯ

Институт водных проблем РАН

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИРОДНЫХ ВОД

Статья посвящена методам поддержки принятия решений в области управления качеством вод. В комплексе рассматриваются методология построения моделей и вопросы информационного обеспечения. Выбор состава водоохраных мероприятий иллюстрируется примерами решений задач на конкретных материалах, относящихся к бассейну реки Волги.

Управление качеством вод, бассейн Волги, методология построения моделей, система поддержки принятия решений, информационно-советующие системы, загрязняющие вещества.

The article is connected with the methods of decision making support in the field of water quality management. The methodology of model building and questions of data ware are considered in complex. The choice of water protective measures is illustrated by the examples of problems solving on the particular materials relating to the Volga river basin.

Management of water quality, the Volga basin, methodology of model building, the system of decision making support, informative – advising systems, pollutants.

При разработке методов восстановления качества вод деградированных речных бассейнов следует учитывать, что «наилучшие» технические решения (даже в условиях недостатка финансовых ресурсов) могут быть «наихудшими» в социальном плане (особенно это может проявиться в регионах, характеризующихся серьезной деградацией земельных ресурсов, систем водоподачи и очистки сточных вод).

Основные идеи планирования водоохраных мероприятий исходят из

предпосылок их взаимного положительного влияния в разных местах гидрографической сети и водосборных территорий. Поэтому обоснование мер по охране вод выполняется как для водных объектов (учитываются сосредоточенные или распределенные источники сброса сточных вод), так и на водосборной территории (для диффузных источников загрязнений). В качестве методического аппарата используются системы поддержки принятия решений (СППР) либо информационно-

советующие системы (ИСС). Последние являются как бы «облегченными» вариантами классических систем поддержки принятия решений. Однако на предварительной стадии исследований комплексных водохозяйственных задач применение ИСС может оказаться даже предпочтительным [1].

Остановимся на описании информационно-советующей системы, которая строится как аппарат для анализа водохозяйственной обстановки в бассейне крупной реки и решения задачи улучшения качества воды в ней. Основные ее компоненты – банк математических моделей и функциональных расчетных модулей, блок корректировки параметров отдельных моделей и исходной информации. Используются математические модели трех типов:

оценка всех видов антропогенной нагрузки;

прогноз качества воды;

обоснование водоохранных мероприятий.

Каждая модель описывает соответствующий процесс, учитывая изменчивость пространственно-временных и технологических параметров.

Модели оценки антропогенной нагрузки. Процессы формирования загрязняющих веществ (ЗВ) на сельскохозяйственных водосборах и переноса их в водные объекты плохо формализуются, что затрудняет включение соответствующих закономерностей в математические модели принятия решений. Ситуация осложняется тем обстоятельством, что на одной и той же территории применяются, как правило, разнотипные мероприятия по защите вод от загрязнения и трудно оценить их совместную эффективность. Возможно, именно по этим причинам за рубежом отдают предпочтение так называемым способам наилучшей практики управления производственными процессами, которые косвенно обеспечивают сокращение массы загрязняющих веществ (в растворенной или твердой фазе), поступающих от диффузных

источников. Следует отметить, что процедура выбора наилучшей практики управления не идентична решению задач управления водными хозяйственными системами или задач обоснования типа очистки сточных вод. Большинство мер практики управления, например в США, связано с защитой почв или пастбищ либо с обеспечением экономической стабильности фермерских хозяйств за счет повышения продуктивности производства и сокращения антропогенной нагрузки на водные объекты [2].

Простейшие математические модели для расчета выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий – это балансовые уравнения массопереноса воды и ЗВ. Наиболее разработаны модели, описывающие трансформацию и вынос азота. Аналитические уравнения используются для оценки процессов минерализации и выщелачивания поверхностного стока и движения азота в почве. Одно из упрощенных математических описаний выноса нитратов из почвы имеет следующий вид:

$$f = \left(\frac{P}{P + 10\Theta_m} \right)^{h/10},$$

где f – доля нитратов, вымываемых за пределы корнеобитаемого слоя почвы; h – его мощность; P – количество воды, фильтрующейся сквозь почвенный слой; Θ_m – наименьшая полевая влагемкость почвы.

При более детальных расчетах требуются данные об осадках, испарении, количестве вносимого в почву азота, порозности почвы, трансформации азота в почве и водной среде. Вынос фосфора так же, как и азота, формируется под влиянием стока и агрономического фона. Объем выноса биогенного вещества с единицы площади может быть оценен из соотношений:

$$P_{ijt}^r = 0,1C_i^r Q_{ijt}; Q_{ijt} = \frac{(R_t - 0,2S_{ijt})^2}{R_t + 0,8S_{ijt}},$$

где P_{ijt}^r – количество r -го ЗВ с посева культуры j на почве i в течение периода времени t ; C_i^r – концентрация ЗВ вида r в стоке Q_{ijt} ; R_t – поступление влаги на поверхность почвы за счет естественных осадков и орошения; S_{ijt} – параметр задержания вещества, который зависит от гидрологических и почвенных условий,

способа обработки почвы, а также количества выпавших осадков.

В самом общем виде вынос загрязняющих веществ с сельскохозяйственных водосборов описывается следующим уравнением:

$$U = MSC[1 - \exp(-kH)],$$

где U – масса выноса ЗВ; S – почвенно-морфологический параметр; M – содержание химиката в корневой зоне; H – гидрологический параметр; C – технологический параметр; k – константа переноса (распада) вещества.

При расчете антропогенной нагрузки для крупного речного бассейна в качестве «базовых» водосборных территорий служат субъекты Российской Федерации или их части, формирующие соответствующие гидрологически обусловленные водохозяйственные участки. Детальное описание методов региональной оценки диффузных загрязнений представлено, например, в [3].

Модели прогноза качества воды.

Перенос и трансформация массы загрязняющих веществ при стационарном течении воды в русле с учетом неточечных источников загрязнения описывается так [4]:

$$Z(x) = \frac{vw}{k_1} + \left(Z_0 - \frac{vw}{k_1} \right) \exp\left(-\frac{k_1}{v}x\right),$$

где x – расстояние по длине русла от начального створа; Z – расход массы загрязняющих веществ через поперечное сечение русла; v – скорость течения; k_1 – скорость распада ЗВ; w – распределенный по длине русла приток ЗВ (модуль диффузного стока), Z_0 – расход массы ЗВ через начальное сечение.

Очевидно, что полученное решение применимо только для расчета переноса неконсервативных ЗВ, когда коэффициент скорости распада k_1 отличен от нуля, поскольку функция Z_1 не определена при $k_1 = 0$.

Качество воды в выделенных створах реки оценивается до и после строительства очистных сооружений для контролируемых загрязняющих веществ с использованием упрощенных моделей их трансформации. Решения соответствующих уравнений являются параметрами моделей оптимизации, входящими в ограничения на концентрации загрязняющих веществ в выделенных створах реки. Подобная оцен-

ка гидрохимических процессов характеризует реакцию водного объекта на планируемые мероприятия и позволяет выявить дальнейшую потребность в них.

Модели обоснования водоохраных мероприятий. Рассматриваемые далее математические модели обоснования способов очистки сточных вод не включают процессы производственного водопользования, совершенствование которых может существенно снизить антропогенную нагрузку на водные объекты. Принято, что сбросы сточных вод осуществляются в главную реку в маловодные периоды водности без анализа ситуаций и процессов на ее притоках, не включенных в расчетную схему. В качестве расчетного обычно выбирают меженный расход заданной высокой обеспеченности, что способствует определению «запасу надежности» при выборе параметров системы водоохраных сооружений. Использование таких предпосылок означает, что нагрузка от диффузных источников, а также реальные характеристики водосбора (например, уклоны, схемы землепользования) в соответствующих моделях играют второстепенную роль и ими можно пренебречь. Базовые гидравлические и морфометрические характеристики также могут быть упрощены.

Результаты расчетов позволяют разработать сценарии действий по достижению экологически безопасного состояния водных объектов и обосновать направление приоритетного инвестирования водоохраных мероприятий. В качестве критериев оптимальности задач планирования мер по охране вод используют, как правило, минимизацию приведенных затрат (при заданных ограничениях на суммарные массы сбрасываемых загрязняющих веществ) либо минимизацию массы загрязняющих веществ (при ограничениях капиталовложений на строительство очистных сооружений) [5].

Приведем математическую постановку задачи обоснования способов очистки сточных вод применительно к крупным речным бассейнам. Все точечные

источники сбросов ЗВ агрегируются здесь для каждого водохозяйственного участка, примыкающего к r -му участку реки. Предполагается, что соответствующий суммарный сброс осуществляется на вершине участка. Используются следующие обозначения: t – индекс способа очистки сточных вод, j – индекс учитываемого загрязняющего вещества (например, железа, нефтепродуктов и др.).

Реализована следующая постановка задачи:

$$S = \sum_r \sum_t (S_{rt} x_{rt}) \rightarrow \min; r \in \overline{1, R}; t \in \overline{1, T}; \quad (1)$$

$$c_{jr} = c_{jr}^0 + \sum_t \frac{x_{rt} \cdot m_{rjt} \cdot e^{-k_j \tau_r}}{Q_r + q_r} \leq \overline{C_{jr}};$$

$$\tau_r = \frac{L_r}{v_r}; \quad (2)$$

$$\sum_t x_{rt} = 1; M_{jr} = \sum_t m_{rjt} x_{rt} \leq \overline{M_{jr}};$$

$$r \in \overline{1, R}; \sum_r M_{jr} \leq \overline{M_j}, \quad (3)$$

где k_j – скорость разложения j -го ЗВ; t_r – время движения речного потока на r -м участке; L_r – протяженность r -го участка реки; v_r – средняя скорость течения воды на r -м участке; $\overline{C_{jr}}$ и $\overline{M_{jr}}$ – заданные величины неперевышения концентраций и масс j -го ЗВ в створе r соответственно; $\overline{M_j}$ – ограничение масс сброса j -го ЗВ в целом по бассейну; x_{rt} – способ очистки вида t ; S – суммарные приведенные затраты на мероприятия по охране вод.

Содержание в воде растворенного кислорода измеряется через его биохимическое потребление (БПК – биохимически потребленный кислород). Оцениваются также сбросы железа, азота, фосфора и других ЗВ, очистка которых осуществляется одновременно с БПК в соответствии с эффективностью разных способов очистки (механической, биологической, биохимической и пр.). Сравнительный анализ показывает, что за счет оптимизации распределения капиталовложений между водопользователями экономия средств на водоохранную деятельность может быть значительной. Технология конструирования и анализа подобного типа моделей хорошо известна и многократно

применялась при анализе использования природных ресурсов. Дорогостоящей частью использования математических моделей является не столько их разработка и программная реализация, сколько получение необходимых исходных данных и их организация.

Представленная модель апробирована для условий Волжского бассейна, где антропогенная нагрузка на водные и экологические ресурсы значительно превышает среднюю нагрузку по стране. Загрязнения поступают от неочищенных сточных вод жилищно-коммунальных, промышленных, сельскохозяйственных и прочих предприятий. Большое количество токсичных соединений, включая тяжелые металлы, нефтепродукты и другие, аккумулируется в донных отложениях водохранилищ. Попытки очистить Волгу или, по крайней мере, предотвратить дальнейшую ее деградацию предпринимаются постоянно, но из-за недостатка средств, материалов и технических ресурсов меры остаются неэффективными. Несистемное планирование, ориентированное на решение одной какой-либо проблемы, часто создает другие. Развитие современного подхода к решению комплекса задач управления водными ресурсами Волги может стать хорошей базой для решения близких проблем других больших рек страны и мира.

Во многих городах Волжского бассейна значительная часть сточных вод сбрасывается без очистки из-за недостаточной мощности общегородских и локальных очистных сооружений, их перегрузки и низкой эффективности. Проведенные в 1990-х годах исследования показали, что ни одно из эксплуатируемых городских сооружений и ни одна из локальных станций очистки не в состоянии обеспечить предельно допустимые или временно согласованные сбросы сточных вод.

Моделирование в масштабе речного бассейна обеспечивает адекватность оценки речного стока и формирования масс ЗВ на водосборных территориях и является поэтому важным инструментом для управления водными ресурсами и

качеством вод. Для Волги или ее притоков, например Оки и Камы, приходится оперировать не отдельными очистными сооружениями (которых существует тысячи), а их комплексами. Определяются преобладающие способы очистки на предприятиях, функционирующих на территориях различных водохозяйственных участков. Это обстоятельство отражено в модели (1)...(3) уравнениями: $\sum x_{rt} = 1$; $t \in \overline{1, T}$; $r \in \overline{1, R}$, хотя в целом формулировки задач оптимизации практически не меняются для объектов разной крупности. Основные трудности связаны с правильностью гидрологического районирования водосборной территории и принятыми принципами агрегирования технико-экономических показателей. Для объектов меньшей крупности (притоки 2, 3-го порядка) в оптимизационную модель могут быть включены уже характеристики крупных загрязняющих производств, их сточных вод и характеристики различных способов очистки.

При расчетах для бассейна реки Волги использована достаточно грубая схема районирования. Все точечные источники сбросов загрязняющих веществ агрегированы для водосборной территории каждого водохозяйственного участка, примыкающего к соответствующему участку русла реки. Предполагается, что суммарный сброс ЗВ осуществляется на вершине участка. Важен вопрос о специфике формирования качества воды Волги. Так, за счет функционирования водохранилищ качество воды улучшается по таким показателям, как прозрачность, цветность, содержание взвешенных веществ, количество сапрофитных бактерий. В то же время в донных отложениях водохранилищ аккумулируются такие ЗВ, как тяжелые металлы, пестициды, нефтепродукты, стойкие органические соединения. При отсутствии водохранилищ практически весь объем загрязнений перемещался бы по речной системе в Каспий, и при современных объемах их поступления в

маловодные меженные периоды река представляла бы собой просто огромную сточную канаву.

Исследовано несколько стратегий водоохранной деятельности для четырех различных технических альтернатив очистки сточных вод. Использовались данные по химическому составу вод и режимам водности в выделенных створах бассейна по среднемесечным расходам определенной обеспеченности. Одна из стратегий реализовывала прямое директивное управление, при котором обязательным было условие повсеместного использования одного и того же способа очистки. В результате при механической очистке объем сброса биохимически потребленного кислорода сократился на 70 %, железа – почти вдвое, а нефтепродуктов – в три раза.

При обязательном повсеместном переходе от механического к биологическому способу очистки капиталовложения и приведенные затраты увеличатся примерно на 60 %, сбросы железа сократятся на 15 %, нефтепродуктов – на 40 %, БПК – в 2,5 раза. При переходе к биохимическому способу очистки исходные массы сбросов БПК сократятся в 10 раз, железа – в 2 раза, нефтепродуктов – более чем в 6 раз. Физико-химическая очистка – наиболее эффективна, объем сброса биологически потребленного кислорода в этом случае сокращается в 20 раз по сравнению с первоначальным объемом (табл. 1).

В табл. 2 представлены показатели оптимальных планов, в каждом из которых выбраны сочетания разных способов очистки, соответствующие пяти разным вариантам сокращения сбросов масс БПК (их величины приведены в первой строке).

Сравнение представленных результатов показывает, что сбросы сокращаются: первый вариант – на 62 %; второй – более чем втрое; третий – в 7 раз; четвертый – в 9 раз; пятый – в 18 раз. Среди способов очистки преобладают механический, биологический и биохимический. При этом, принимая капитальные

Таблица 1

**Затраты на очистку сбросных вод и эффективность очистки
(директивное управление)**

Показатели	Неочищенные сбросы	Способ очистки			
		Механическая	Биологическая	Биохимическая	Физико-химическая
Объемы сбросов, тыс. т:					
БПК	360,0	250,0	109,0	36,0	18,0
Железо	40,0	28,0	24,0	20,0	13,0
Нефтепродукты	18,0	7,0	4,5	2,3	1,8
Капиталовложения, %	–	100,0	162,6	152,0	256,0
Приведенные затраты, %	–	100,0	160,0	180,0	273,3

Таблица 2

**Затраты на очистку сбросных вод по БПК и массы сбросов
загрязняющих веществ в оптимальных планах**

Показатели	Неочищенные сбросы	Варианты расчетов				
		1	2	3	4	5
Объемы сбросов БПК, тыс. т	360,0	224,0	100,0	50,0	40,0	20,0
Капиталовложения, %	–	100,0	108,5	126,8	132,9	170,7
Приведенные затраты, %	–	100,0	115,6	143,7	156,2	200,0

затраты первого варианта за 100 %, получаем, что в вариантах со второго по пятый они увеличиваются с 108,5 до 170,7 %, а приведенные затраты – с 115,6 до 200 %. Таким образом, при углублении степени очистки сточных вод с 30 до 95 % приведенные затраты возрастают быстрее, чем капитальные.

В результате оптимизационных расчетов получены и такие показатели, как распределение затрат на осуществление водоохраных мероприятий по отдельным регионам или административным единицам бассейна реки Волги. Так, в соответствии с одним из оптимальных планов при снижении массы сбросов БПК на одну треть предпочтительны методы биологической и биохимической очистки примерно на 60 % предприятий. Установлены также приоритеты инвестирования водоохранной деятельности в бассейне. Оказалось, что распределение капиталовложений на реализацию мероприятий по охране водных ресурсов среди областей и республик соответствует в основном выполненному вне модели ранжированию административных единиц в бассейне реки по их суммарной антропогенной нагрузке на водные объекты. Апробация модели проведена с использованием частично

условной информации. Для принятия конкретных решений требуется подготовка адекватных исходных данных.

1. **Пряжинская В. Г., Васильченко О. В.** Информационно-советующая система как основа управления качеством вод крупных речных бассейнов // Водное хозяйство России. – 2002. – № 2. – С. 118–135.

2. **Novotny V., Olem H.** Water quality// Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution. – Van Nostrand Reinhold, New York. – 1994. – 1054 p.

3. **Пряжинская В. Г., Ярошевский Д. М., Левит-Гуревич Л. К.** Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. – М.: Физмалит, 2002. – 496 с.

4. **Готовцев А. В.** Модели прогноза качества вод // Обоснование стратегий управления водными ресурсами. – М.: Научный мир, 2006. – С. 197–206.

5. **Пряжинская В. Г.** Планирование водоохраных мероприятий в бассейне реки Волги // Обоснование стратегий управления водными ресурсами. – М.: Научный мир, 2006. – С. 235–246.

Материал поступил в редакцию 29.04.09.

Пряжинская Валентина Гавриловна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник

Тел. 8-499-135-60-11

E-mail: 1356011@mail.ru