

МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ «ГИДРОМЕНЕДЖЕР» ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

А.А. Цхай, М.Н. Веревкин, Ю.Н. Городилов, К.Б. Кошелев

1. Введение.

Речной бассейн представляет собой единое геозкосистемное пространство, включая, в частности, водосбор и речную сеть. В бассейнах рек исторически формировались административно-экономические образования. И сейчас территория государства может рассматриваться как система речных бассейнов, причем бассейновые водохозяйственные комплексы являются достаточно обособленными его структурными единицами.

Управляющей основой в водохозяйственном комплексе выступает единая водохозяйственная система. Она включает в себя природно-антропогенный комплекс взаимосвязанных природных объектов и техногенных сооружений (по регулированию речного стока, транспортировке, очистке воды и т. д.) Водохозяйственные системы (ВХС) имеют значительные территориальные границы и характеризуются сложными связями со всеми другими отраслями экономики страны.

Планирование деятельности ВХС строится на основе системы экологических нормативов, правил, стандартов и тем самым направлено на достижение требуемого состояния водных ресурсов и решение соответствующих проблем экологической безопасности. Однако, прежде чем разрабатывать и осуществлять планы водоохранной деятельности в бассейне реки, необходимо определить конечную, промежуточные цели, основные принципы, критерии целесообразности выполнения водоохранных и водохозяйственных мероприятий, главные направления работ, их региональную специфику и разработать механизмы, позволяющие достичь намеченные цели в реальные сроки.

Под целью деятельности ВХС может пониматься максимальное снижение уровня загрязнения водных объектов при обязательном удовлетворении потребностей населения и объектов экономики в водных ресурсах в условиях ограниченных финансовых средств за счет использования внутренних возможностей системы.

В ВХС предприятия решается задача воспроизводства воды.

В ВХС промузла (города) – задача комплексного использования и охраны водных

ресурсов реки, на которой расположен промузел.

В ВХС бассейна - задача комплексного использования, воспроизводства и охраны водных ресурсов всего бассейна.

Критерием оптимальности водохозяйственной деятельности для предприятия-водопользователя может быть максимум его чистой прибыли после осуществления всех видов платежей за использование водных ресурсов. Этот оптимум достигается в зависимости от уровня финансирования водоохранных мероприятий из всех возможных источников. С другой стороны, водопользование на бассейновом уровне должно характеризоваться минимальным уровнем загрязнений в контрольных створах речной сети.

Значит, задача оптимального выбора сводится к поиску наиболее эффективного набора “правил игры”, т. е. административно-экономического механизма осуществления водопользования в речном бассейне.

Процесс выработки управляющего решения в ВХС весьма сложен, затрагивает интересы многих хозяйствующих субъектов и населения. Этим объясняется необходимость создания специальной автоматизированной системы поддержки принятия решений (СППР), представляющей собой блок программных продуктов, объединенных в единой методологии оптимального выбора.

СППР “Гидроменеджер” позволяет для конкретных речных бассейнов сравнивать по уровню прогнозируемого загрязнения природных вод различные гипотетические варианты административно-экономического механизма водопользования, в случае их реализации. Это осуществляется на основе использования реальных исходных данных о водохозяйственном комплексе и в предположении о том, что все субъекты водопользования действуют исходя из собственных экономических интересов.

Воздействие на водопотребителей может осуществляться как за счет изменения нормативов и дифференцированных ставок платежей за соответствующие уровни загрязнения различными видами поллютантов, так и в результате внедрения специальных меха-

МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ «ГИДРОМЕНЕДЖЕР»
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

низмов управления, например, адресной поддержки или лицензирования.

Владея расчетными методами прямой и обратной связи между экологической и экономической составляющими процессов становится возможным выбирать наилучшие варианты “правил игры” по их влиянию на качество воды в бассейне реки. Инструментальными средствами в СППР “Гидроменеджер” являются системный подход, методы имитационного и оптимизационного моделирования, а также ГИС-технологии [1-4].

2. Модель качества воды.

Основные допущения

- Промежуток времени моделирования разбивается на периоды, в течение каждого из которых течение в руслах рек полагается стационарным.
- Точечные и распределенные сбросы полагаются заданными.
- Течение в реках полагается квазиодномерным, с ограничениями, позволяющими моделировать движение уравнением Сен-Венана.
- Русла рек имеют непризматический профиль.
- Химические процессы в реках моделируются равновесными реакциями.
- Впадение рек не влияет на впадающую реку.

Математическое описание модели

Модель качества воды, воспроизводящая пространственное распределение содержания в реке химических загрязнителей имеет следующий вид:

Уравнение движения (Сен-Венана)

$$\left(1 - \frac{Q^2 \cdot B}{g \cdot w^3}\right) \cdot \frac{w}{2} \cdot \frac{dw^2}{dx} - \left(i_0 - \frac{\partial h}{\partial x}\right) \cdot B \cdot w^2 = -B \cdot \left(\frac{q \cdot Q}{g} + \frac{Q}{C^2 R}\right) \quad (1)$$

Уравнение неразрывности

$$q = \frac{dQ}{dx} \quad (2)$$

Уравнения неразрывности для компонент

$$\frac{d(Q \cdot C_j)}{dx} = \frac{d}{dx} \left(E \cdot w \cdot \frac{dC_j}{dx} \right) + w \cdot H_j + G_j, \quad (3)$$

где Q — расход воды, м³/с;
 B — ширина свободной поверхности водотока, м;
 g — ускорение силы тяжести, м/с²;
 w — площадь поперечного сечения водотока, м²;
 x — продольная координата вдоль русла, м;
 i_0 — уклон дна;
 h — глубина реки, м;
 q — боковая приточность на единицу длины, м²/с;
 C — коэффициент Шези, вычисляемый по формуле Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1.3\sqrt{n}}, \text{ с размерностью м}^{0.5} \cdot \text{с},$$

где n — шероховатость русла;

$$R — гидравлический радиус, м: R = \frac{w}{X},$$

где X — смоченный периметр, м:

$$X = b(x, 0) + 2 \cdot \int_0^h \sqrt{1 + \left(0.5 \cdot \frac{\partial b}{\partial z}\right)^2} dz,$$

где $b(x, z)$ — ширина реки на расстоянии z от дна, м;

C_j — концентрация j -того химического соединения, г/м³;

$j \in [1..N]$, N — число компонентов;

$$E = \beta \cdot h \cdot \sqrt{g} \cdot \frac{u}{C} \quad (\text{представление Елдера}$$

для коэффициента продольной дисперсии), м²/с ($\beta = 5.93$ для бассейна верхней Оби);

$u = \frac{Q}{w}$ — средняя по сечению скорость водотока, м/с;

H_j — член, характеризующий неконсервативность рассматриваемого j -того соединения, г/м³·с;

G_j — путевая нагрузка на единицу длины водотока, характеристика неточечных источников загрязнений, г/м·с.

Химическими показателями, обязательными к рассмотрению, являются: БПК₅, дефицит кислорода, взвеси, ХПК, аммоний, нитриты, нитраты и фосфаты; которые связаны между собой процессами трансформации. Остальной набор поллютантов – на выбор пользователя.

Величина H_j в (3) определена по типу реакции первого порядка с коэффициентами

неконсервативности K_j ; причем, в простейшем приближении, явлениями, вызванными изменениями условий химического равновесия, пренебрегают. Тогда

$$\begin{aligned} H_j &= -K_j \cdot C_j, \text{ для } j=3,4,8 \div 19,21 \div \infty; \\ H_1 &= -(K_1 + K_3) \cdot C_1, \\ H_2 &= -K_2 \cdot C_2 + K_1 \cdot C_1 + P_1 \cdot K_5 \cdot C_5 + \\ &+ P_2 \cdot K_6 \cdot C_6 + J \cdot \frac{B}{w}, \end{aligned}$$

где K_3 — коэффициент седиментации; P_1 и P_2 — коэффициенты пересчета потерь кислорода при нитрификации; J — плотность потока кислорода, обусловленный поглощением донными отложениями и фотосинтезом.

При расчете трансформации азотных соединений ($j=5 \div 7$) используется следующая схема нитрификации

$$\begin{aligned} H_5 &= -K_5 \cdot C_5 + P_3 \cdot K_4 \cdot C_4, \\ H_6 &= -K_6 \cdot C_6 + K_5 \cdot C_5, \\ H_7 &= -K_7 \cdot C_7 + K_6 \cdot C_6 \end{aligned}$$

где P_3 — коэффициент пересчета для процесса аммонификации.

Процесс минерализации фосфора описывается как:

$$H_{20} = -K_{20} \cdot C_{20} + P_4 \cdot K_4 \cdot C_4,$$

где P_4 — коэффициент пересчета в фосфорные единицы.

Температурная и скоростная зависимость коэффициентов задана соответственно, при $j=3$ и всех остальных значениях индекса j как

$$\begin{aligned} K_3(T) &= K_{03} \cdot u^{\theta_j}, \\ K_j &= K_{0j} \cdot A_j^{T-20} \cdot u^{\theta_j} h^{\theta_j^h} \end{aligned}$$

где T — температура воды, °С, задаваемая из базы данных. Константа A_j и зависимость величин K_{0j} от гидрологических характеристик определяется при параметризации модели. Величины P_j оцениваются в соответствии с реальными стехиометрическими соотношениями.

Величина G_j может быть определена как

$$G_j = C_{jb} \cdot q$$

где C_{jb} — содержание j -того соединения в водах, характеризующихся величиной боковой приточности q (в случае $q < 0$ имеем $C_{jb} = C_j$).

При наличии притока (точечного источника загрязнений) с постоянной интенсивностью в течение расчетного периода величина C в узле впадения притока определяется как

$$C_{if} = \frac{C_{is} \cdot Q_s + C_{ia} \cdot Q_a}{Q_s + Q_a}$$

Здесь C_{ia} и Q_a — содержание i -го соединения и расход воды в притоке. Индекс "f" отличает величину параметра ниже узла впадения притока, "s" — значение параметра выше узла впадения притока.

Граничные условия имеют вид

$$\omega(x_{k_j}) = \omega_{k_j}, C_j(x_0) = C_{0j}, \frac{dC_j}{dx}(x_1) = 0$$

Здесь x_0 и x_1 — соответственно, начальный и замыкающий створы моделируемого участка реки.

Разностная схема для уравнения (1) имеет вид:

$$\frac{\alpha}{x_i - x_{i-1}} (\omega_i^2 - \omega_{i-1}^2) - \beta \omega^2 = \gamma,$$

где

$$\alpha = \left(1 - \frac{Q^2 B}{g \omega^3} \right) \frac{\omega}{2}, \quad \beta = \left(i - \frac{\partial h}{\partial x} \right) B,$$

$$\gamma = -B \left(\frac{qQ}{g} + \frac{Q^2}{C^2 R} \right)$$

Поскольку оно нелинейно, для его решения используется итерационный процесс.

Система уравнений (3) линейна и ее разностный аналог решается методом прогонки с учетом граничных условий.

3. Модель эколого-экономической деятельности предприятия

С точки зрения водохозяйственной деятельности, осуществляемой предприятиями, можно выделить два типа предприятий — "обычные" предприятия и предприятия водокommunального хозяйства (ВКХ). Кроме того,

МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ «ГИДРОМЕНЕДЖЕР»
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

“обычные” предприятия различаются по способу водопотребления и водоотведения:

- предприятие может осуществлять водосброс (водозабор) только в природный водный объект;
- предприятие может быть абонентом предприятия водокоммунального хозяйства и осуществлять водосброс (водозабор) только в систему водокоммунального хозяйства;
- предприятие может быть абонентом предприятия водокоммунального хозяйства, в тоже время, осуществлять водосброс (водозабор) в природный водный объект.

Экономическая модель рассматривает водохозяйственную деятельность предприятия с точки зрения финансовых ресурсов, затрачиваемых предприятием на оплату водоотведения и водопотребления в соответствии с законами о платности водопользования.

Пусть существует n возможных мероприятий, каждое из которых независимо от остальных может быть включено в план при соответствующем финансовом обеспечении. Введем вектор x размерности n , каждый элемент которого x_k , $k=1, \dots, n$ может принимать значения 0 или 1, причем $x_k=1$, если k -тое мероприятие вошло в план, и $x_k=0$ в противном случае. Ясно, что число всевозможных значений, принимаемых вектором x , равно 2^n .

Обозначим через λ_k , $k=1, \dots, n$ затраты на проведение k -того мероприятия, а через

$\Lambda(x) = \sum_{k=1}^n \lambda_k x_k$ суммарные затраты на осуществление комплекса мероприятий, определяемого вектором x .

В этом случае экономические показатели деятельности предприятия могут быть записаны в виде зависимостей от x :

Плата за сброс загрязнений в природный водный объект взимается в зависимости от соотношения между фактическим сбросом $m_i(x)$ загрязняющего вещества i -того вида и нормативно заданными предельно допустимыми $M_{\alpha i}$, либо временно согласованными $M_{\beta i}$ сбросами.

Расчет платы за сброс загрязнений в природные водные объекты

Основой для расчета платы за сброс загрязняющих веществ (ЗВ) в природный водный объект является масса загрязнений, содержащаяся в сточных водах предприятия.

$$P_m^s(x) = \sum_i r_{\alpha i} \cdot \min(m_i(x), M_{\alpha i});$$

$$P_t^s(x) = \sum_i r_{\beta i} \min(M_{\beta i} - M_{\alpha i}, \max(0, m_i(x) - M_{\alpha i}))$$

$$P_e^s(x) = 5 \cdot \sum_i r_{\beta i} \cdot \max(0, m_i(x) - M_{\beta i})$$

Часть массы загрязняющих веществ, лежащая в пределах годового предельно допустимого сброса (ПДС) $M_{\alpha i}$ (отдельно по каждому загрязняющему веществу), оплачивается с минимальными ставками $r_{\alpha i}$ и относится на себестоимость продукции предприятия. Оплата превышения предельно допустимого сброса ПДС и временного согласованного сброса ВСС ($M_{\beta i}$) осуществляется из прибыли предприятия со ставками $r_{\beta i} > r_{\alpha i}$ и $5 \cdot r_{\beta i}$, соответственно.

Расчет платы за забор воды из природного водного объекта

Основой для расчета платы за забор воды из природного водного объекта является фактический объем потребленной воды

$$P_m^w(x) = t_{\alpha} \cdot \min(V^w(x), V_{\alpha}^w);$$

$$P_t^w(x) = t_{\beta} \cdot \min(V_{\beta}^w - V_{\alpha}^w, \max(0, V^w(x) - V_{\alpha}^w));$$

$$P_e^w(x) = 5 \cdot t_{\beta} \cdot \max(0, V^w(x) - V_{\beta}^w)$$

Расчет платы за водоотведение в систему водокоммунального хозяйства

Основой для расчета платы за водоотведение в систему водокоммунального хозяйства является фактический объем сточных вод, принимаемый предприятием водокоммунального хозяйства от абонента. Договор, заключаемый предприятием-абонентом и предприятием водокоммунального хозяйства, как правило, на год, предусматривает три вида лимитов водоотведения: для населения – V_0^{sp} , для бюджетных организаций – V_0^{sb} , для прочих потребителей и промышленных предприятий – V_0^{sf} . Исчисление объемов (по договору) осуществляется в $m^3/мес$.

$$P^{sp}(x) = t^{sp} \cdot \min(V^{sp}(x), V_0^{sp})$$

$$P^{sb}(x) = t^{sb} \cdot \min(V^{sb}(x), V_0^{sb})$$

$$P^{sf}(x) = t^{sf} \cdot \min(V^{sf}(x), V_0^{sf})$$

$$P_e^{sp}(x) = 3 \cdot t^{sp} \cdot \max(0, V^{sp}(x) - V_0^{sp})$$

$$P_e^{sb}(x) = 3 \cdot t^{sb} \cdot \max(0, V^{sb}(x) - V_0^{sb})$$

$$P_e^{sf}(x) = 3 \cdot t^{sf} \cdot \max(0, V^{sf}(x) - V_0^{sf})$$

Оплата объемов сточных вод в пределах установленных лимитов осуществляется по тарифам t^{sp} , t^{sb} , t^{sf} соответственно и относится на себестоимость продукции предприятия. Повышенная плата взимается из прибыли абонента и образует прибыль предприятия водокommunального хозяйства в следующих случаях:

- при превышении установленных лимитов в трехкратном размере действующего тарифа за каждый кубометр сверхлимитного сброса;
- при превышении допустимой концентрации по к загрязнителям, с тарифом увеличенным в $k+1$, но не более чем в 10 раз, за фактический объем водоотведения;
- при сбросе веществ, не удаляемых на очистных сооружениях предприятия водокommunального хозяйства, а также за залповый сброс любого вида загрязнений с 10-кратным тарифом за каждый кубометр сточных вод.

Повышенная плата начисляется отдельно по каждому виду нарушений.

Расчет платы за водопотребление из системы водокommunального хозяйства.

Основой для расчета платы за водопотребление из системы водокommunального хозяйства, также как и за забор воды из природного водного объекта, является фактический объем потребленной воды. Договор между предприятием-абонентом и предприятием водокommunального хозяйства, наряду с тремя видами лимитов водоотведения, предусматривает три аналогичных вида лимитов водопотребления: для населения – V_0^{wp} , для бюджетных организаций – V_0^{wb} , для прочих потребителей и промышленных предприятий – V_0^{wf} .

$$P^{wp}(x) = t^{wp} \cdot \min(V^{wp}(x), V_0^{wp})$$

$$P^{wb}(x) = t^{wb} \cdot \min(V^{wb}(x), V_0^{wb})$$

$$P^{wf}(x) = t^{wf} \cdot \min(V^{wf}(x), V_0^{wf})$$

$$P_e^{wp}(x) = 5 \cdot t^{wp} \cdot \max(0, V^{wp}(x) - V_0^{wp})$$

$$P_e^{wb}(x) = 5 \cdot t^{wb} \cdot \max(0, V^{wb}(x) - V_0^{wb})$$

$$P_e^{wf}(x) = 5 \cdot t^{wf} \cdot \max(0, V^{wf}(x) - V_0^{wf})$$

Оплата водопотребления в пределах установленных лимитов осуществляется по тарифам t^{wp} , t^{wb} , t^{wf} соответственно и относится на себестоимость продукции предприятия. За сверхлимитное водопотребление взимается плата из прибыли абонента в размере пятикратного тарифа, исходя из объемов фактически израсходованной воды за расчетный период.

Кроме снижения сброса ЗВ, в результате мероприятий могут быть снижены объем забора воды из природного водного объекта (V^w), объемы водоотведения в систему водокommunального хозяйства (V^{sp} , V^{sb} , V^{sf}) и объемы водопотребления из системы водокommunального хозяйства (V^{wp} , V^{wb} , V^{wf}). Обозначим через Δv_{jk} снижение j -того объема ($j \in \{w, sp, sb, sf, wp, wb, wf\}$) в результате k -того мероприятия ($k=1, \dots, n$). Соответственно, суммарное снижение j -того объема

$$\zeta_j(x) = \sum_{k=1}^n \Delta v_{jk} x_k.$$

В этом случае, выражение для фактического сброса i -того ЗВ предприятием может быть записано как

$$m_i(x) = \max(0, m_i(0) - \sigma_i(x)),$$

где $m_i(0)$ – сброс i -того ЗВ в отсутствие мероприятий, а выражение для фактического сброса/забора j -того объема воды как

$$V^j(x) = \max(0, V^j(0) - \zeta_j(x)).$$

Платежи за использование природных водных ресурсов рассчитываются по формуле

$$P(x) = S(x) + O(x), \quad (4)$$

причем

$$S(x) = P_m^s(x) + P_m^w(x)$$

$$O(x) = P_t^s(x) + P_e^s(x) + P_t^w(x) + P_e^w(x).$$

МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ «ГИДРОМЕНЕДЖЕР»
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

Платежи за пользование услугами предприятия водоканализационного хозяйства рассчитываются по формуле

$$\tilde{P}(x) = \tilde{S}(x) + \tilde{O}(x);$$

$$\tilde{S}(x) = P^{sp}(x) + P^{sb}(x) + P^{sf}(x) + P^{wp}(x) + P^{wb}(x) + P^{wf}(x),$$

$$\tilde{O}(x) = P_e^{sp}(x) + P_e^{sb}(x) + P_e^{sf}(x) + P_e^{wp}(x) + P_e^{wb}(x) + P_e^{wf}(x).$$

Налог на прибыль может быть записан как

$$T(x) = \mu \cdot B(x) - \min(0.3 \cdot \mu \cdot \Lambda(x); 0.5 \cdot \mu \cdot B(x)) \quad (5)$$

где второй член характеризует налоговые льготы предприятию, осуществляющему капитальные вложения на водоохранную деятельность.

Здесь и далее для упрощения принято, что $R(x)=R$ (не зависит от состава мероприятий), а все мероприятия субсидируются как капитальные вложения, (это позволяет записать налоговые льготы в форме (5)). Учет эксплуатационных и других затрат при расчете размера налога возможен при незначительной корректировке формулы (5).

При этих предпосылках имеем

$$C(x) = C(0) - S(0) - \tilde{S}(0) + S(x) + \tilde{S}(x) + \nu \cdot \Lambda(x)$$

где ν — коэффициент амортизационных отчислений на восстановление водоохранных сооружений, а $B(x)=R - C(x)$.

Параметр $F(x)$ определяется по значению вектора x на основе выполнения двух условий.

Во-первых, проведение водоохранных мероприятий за счет чистой прибыли не должно приводить к убыточности предприятия, откуда

$$0 \leq F(x) \leq B(x) - T(x) - O(x) - \tilde{O}(x) + L(x) \quad (6)$$

Во-вторых, возможность осуществления мероприятий ограничена объемом финансирования водоохранной деятельности

$$\Lambda(x) \leq J(x) + E(x) + \nu \Lambda(x) + F(x) \quad (7)$$

где $J(x)$ — бюджетные поступления на компенсацию мероприятий по восстановлению и охране водных объектов, $E(x)$ — поступления из бассейнового центра.

Принцип распределения средств бассейнового центра (т. е. вид функции $E(x)$) должен быть задан априорно. Так, например, $E(x)$ может вычисляться, как $E(x) = d \cdot P(x)$, где $d \geq 0$ — заданная константа.

Амортизационные отчисления $\nu \Lambda(x)$ на вновь введенные водоохранные сооружения входят в себестоимость продукции и могут быть использованы для финансирования природоохранной деятельности предприятия.

Из соотношений (6) и (7) следует, что для $F(x)$ должно быть

$$F_1(x) \leq F(x) \leq F_2(x),$$

$$F_1(x) = \max\{0; \Lambda(x) - J(x) - E(x) - \nu \Lambda(x)\}, \quad (8)$$

$$F_2(x) = B(x) - T(x) - O(x) - \tilde{O}(x) + L(x).$$

В случае $F_1(x) \leq F_2(x)$ предприятию выгодно принять $F(x)$ равным $F_1(x)$, что соответствует отчислению минимального объема средств из чистой прибыли предприятия в его собственный фонд для финансирования водоохранных мероприятий.

В противном случае, т. е. при $F_1(x) > F_2(x)$, очевидно, что набор x не входит в область допустимых значений решения.

Целевая функция оптимизационной задачи формулируется как

$$N(x) = B(x) - T(x) - O(x) - \tilde{O}(x) - F(x) + L(x) \rightarrow \max \quad (9)$$

Ограничение на сверхнормативные сбросы выражается лишь условием остановки предприятия, если будет нарушено соотношение

$$O(x) + \tilde{O}(x) \leq B(x) - T(x) \quad (10)$$

Итак, экстремальная задача максимизации функционала (9) при ограничениях (8), (10) и условии $x_i \in \{0; 1\}$ характеризует в укрупненном виде рассматриваемую модель водопользования предприятия. В этой дискретной задаче целевая функция и ограничения нелинейны из-за нелинейности слагаемых определяющих платежи.

Для решения задачи осуществляется прямой перебор возможных значений вектора x с проверкой ограничений (8) и (10). В процессе перебора сохраняется вариант, обеспечивающий текущий максимум (9). Возможность решения задачи прямым перебором обусловлена тем, что для отдельно рассматриваемого предприятия размерность вектора x невелика: редко, когда число n достигает 10-15.

3. Оптимизация водоохранной деятельности на бассейновом уровне

Механизм управления качеством вод речного бассейна, представленный в СППР "Гидроменеджер", содержит следующие элементы:

- порядок взаимодействия водопользователей между собой и органами управления для конкретного речного бассейна на основании действующей в России нормативной базы;
- процедуру определения экономических регуляторов поведения водопотребителей: принципов использования средств бассейнового центра, спецсчета бюджета и т.д.;
- процедуру учета возможности "экологического банкротства" предприятия, анализ и прогнозирование экологических последствий его закрытия;
- дополнительные меры снижения уровня концентраций приоритетных загрязнителей в контрольных створах реки;
- учет затрат на инвестиции в реализацию долгосрочных проектов, эффект от внедрения которых проявится только через несколько лет;
- учет влияния неточечных источников загрязнений на качество воды в реке;
- схему управления водоохранной деятельностью в масштабе бассейна реки с системой информационной поддержки принимаемых решений.

Используя подобные информационно-моделирующие системы, становится возможным прогнозировать качество воды в бассейне реки в зависимости от задаваемого экономического механизма управления природопользованием на основе знаний о складывающемся водохозяйственном комплексе.

Оценка гидрохимического стока и смыва загрязнений с различных ландшафтных элементов речного бассейна с осуществлением целенаправленных мероприятий, ограничивающих рассредоточенное попадание загрязнений в природные воды, — важная экологическая проблема.

Так, например, антропогенным неточечным источником загрязнений может считаться использование удобрений на водосборе сельскохозяйственным предприятием. При этом соответствующим параметром в СППР "Гидроменеджер" является рассчитываемая концентрация загрязнений V_i в боковой приречности реки.

Объектом управления на бассейновом уровне являются предприятия, осуществляющие водозабор и отвод стоков в речную сеть. Источником средств на реализацию водоохранной деятельности в общем случае являются платежи предприятий за водопользование и загрязнение, аккумулирующиеся в бассейновом центре и на спецсчете бюджета.

Критерий сравнения управленческих решений

В расчетах в качестве критерия сравнения различных вариантов управленческих решений Cr для рассматриваемого набора действующих предприятий был выбран следующий

$$Cr = \max_t \sum_i \left(\gamma \cdot \frac{C_{it}^B}{P_i} + (1 - \gamma) \cdot \frac{C_{it}^K}{P_i} \right) \rightarrow \min \quad (11)$$

где t — обозначает расчетный период года;
 i — номер конкретного химического ингредиента;
 P_i — предельно допустимая концентрация i -того ингредиента;
 C_{it}^B — концентрация i -того ингредиента в t -тый период года в районе административного центра региона;
 C_{it}^K — концентрация i -того ингредиента в t -тый период года в районе выхода реки в соседний административный регион;
 γ — относительный коэффициент значимости створа: $0 \leq \gamma \leq 1$.

Следует отметить, что вопрос о выборе критерия сравнения различных вариантов управленческих решений в масштабе речного бассейна заслуживает специального рассмотрения. Вид критерия может меняться, соответствующие изменения должны произойти в информационной системе.

Параметры управления в СППР "Гидроменеджер"

В качестве параметров управления в СППР "Гидроменеджер" выбраны, прежде всего, коэффициенты экологической ситуации и доли возврата платежей за загрязнение

МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ «ГИДРОМЕНЕДЖЕР» ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

предприятиям на реализацию водоохраных мероприятий.

Величины $r_{\alpha i}$ и $r_{\beta i}$ — ставок платежей за загрязнение i -тым ЗВ в пределах установленных j -тому предприятию предельно допустимых и временно согласованных сбросов, соответственно, — по действующему законодательству, определяются как $r_{\alpha i} = a \cdot l_i$ и $r_{\beta i} = a \cdot k_i$, где l_i и k_i — соответствующие базовые нормативы за загрязнение i -тым ЗВ, единые по всей стране.

Используемое выше a и есть коэффициент экологической ситуации, устанавливаемый местными органами власти, меняющийся в фиксированных пределах $[a_o, a_j]$ (так, например, для Алтайского края в 1992 г. интервал изменения a был определен как [1,02; 1,06]).

В СППР «Гидроменеджер» коэффициенты экологической ситуации имеют вид a^j , т. е. могут быть различны для разных предприятий региона. При этом было бы логичным увеличивать значения a^j в зонах с высокой степенью экологической напряженности, а также для рентабельных производств, отличающихся высокой антропогенной нагрузкой на окружающую среду.

В этом случае субсидии бассейнового центра j -тому предприятию $E^j = d^j \cdot (S^j + O^j)$, где d^j — доля возврата платежей за загрязнение предприятию на реализацию природоохранной деятельности, меняющаяся в пределах от 0 до 0,9 (здесь и далее учитывается 10%-ное отчисление средств бассейнового центра на федеральный уровень).

Доли возврата, как и коэффициенты экологической ситуации, в СППР «Гидроменеджер» индивидуальны для каждого предприятия. Естественно должны быть сформулированы принципы назначения тому или иному предприятию конкретного, отличающегося по сравнению с другими водопользователями, норматива.

Таким образом, в числе управляющих параметров в предлагаемой схеме выбраны индексы α и β , меняющиеся от 1 до M_1 и от 1 до M_2 , соответственно. Под построением производственной функции предприятия понимается решение оптимизационной задачи (см. раздел 2) для каждого из возможных наборов управляющих параметров (α, β) .

Административные элементы влияния на экологическую ситуацию

В описываемой схеме управления реализуется несколько процедур, которые можно было бы охарактеризовать как административные элементы влияния на экологическую ситуацию.

На практике нередко целый ряд предприятий в регионе может быть закрыт из-за своей неплатежеспособности.

Речь идет о ситуации, когда платежи j -того предприятия за загрязнение окружающей среды превышают его чистую прибыль после уплаты налогов в бюджет, т. е. $E^j > V^j - T^j$. Более того, в последнее время встречаются случаи, когда себестоимость предприятия превышает его выручку, т. е. $C^j < 0$, и, тем не менее, такие убыточные предприятия работают, т. к. вступает в силу социальный фактор: стремление избежать массовой безработицы.

Работа с СППР «Гидроменеджер» позволяет указать лицу, принимающему решения: какие, в принципе, возможны варианты решений и каковы их экологические последствия. Сравнение «цены» экологических и социальных последствий закрытия предприятия остается за пределами нашей работы.

Сначала определяется список неплатежеспособных при всех наборах управляющих параметров (α, β) предприятий. Число последних составляет $m_n \leq m$, где m — общее число предприятий, загрязняющих речной бассейн.

Для анализа с помощью СППР «Гидроменеджер» экологических последствий закрытия той или иной группы неплатежеспособных предприятий, ЛПР отмечает на экране дисплея те из них, которые будут продолжать работу. Назовем их «условно закрытыми», их число $(m_n - m_s)$, где m_s — число закрываемых предприятий.

Нормативные платежи «условно закрытых» предприятий будут вычисляться обычным образом (4), а сверхнормативные платежи будут составлять максимально возможную сумму — до 75% от чистой прибыли. Если предприятие убыточно, т. е. не имеет чистой прибыли, платежи для него будут состоять только из нормативной части. Для «условно закрытых» предприятий также будет выполняться поиск оптимальных наборов водоохраных мероприятий, если таковые имеются. Остальные неплатежеспособные предприятия объявляются «экологическими банкротами» и подлежат закрытию.

Под “долгосрочными” природоохранными мероприятиями далее понимаются те, эффект от внедрения которых проявится лишь через несколько лет. В СППР “Гидроменеджер” предусмотрена возможность, когда ЛПР из своих внешних по отношению к СППР соображений отмечает на экране дисплея “долгосрочные” мероприятия, подлежащие безусловному финансированию из бассейнового центра. При этом разумно применять эту льготу в случае мероприятий, реализация которых приведет к качественному улучшению состояния водной среды региона.

Под “приоритетными” ингредиентами далее подразумеваются химические соединения, среднегодовое содержание которых в контрольном(ых) створе(ах) превышает уровень ПДК в несколько раз. Мероприятия предприятий, снижающие уровень сбросов “приоритетных” загрязнителей в реке, могут также пользоваться безусловной поддержкой бассейнового центра. Использование только экономических рычагов может оказаться недостаточным стимулом для предприятий в силу ограниченности директивных максимальных ставок платежей.

Уточнение производственных функций предприятий

Как для “приоритетных” мероприятий, так и для “долгосрочных мероприятий”, мы сразу же можем столкнуться с недостатком оборотных средств, которыми располагает бассейновый центр, по сравнению с общей стоимостью мероприятий по “приоритетным” ингредиентам в бассейне. Поэтому необходимо ранжирование мероприятий по степени эффективности вложенных средств: влиянию их внедрения на содержание “приоритетных” ингредиентов в контрольных створах. При этом возможности СППР “Гидроменеджер” позволяют оценить варианты загрязнения речного бассейна при осуществлении каждого из наборов “приоритетных” мероприятий в отдельности. Сравнение по критерию (например, (11)) для отдельно взятых “приоритетных” ингредиентов укажет тот, что наиболее ухудшает значение интегрального показателя качества воды.

Следует отметить, что на соответствующих этапах исключаются пары (α, β) , при которых возникают неплатежеспособные предприятия, помимо банкротств, или появляется перерасход средств бассейнового центра. Последнее может быть из-за уменьшения платежей вследствие закрытия предприятий-банкротов и/или целевой поддержки

“долгосрочных” и “приоритетных” мероприятий, что приводит к изменению общего объема средств бассейнового центра.

Каждый из оставшихся наборов управляющих параметров определяет конкретный сценарий сбросов действующих предприятий, что позволяет моделировать пространственно-временные распределения загрязнений в бассейне и сравнивать последние по критерию (11).

Схема управления качеством вод речного бассейна

Таким образом, схема управления, подерживаемая СППР “Гидроменеджер” включает ряд процедур:

а) ЛПР устанавливает количество уровней и пределы изменения коэффициента экологической ситуации M_1, a_0, a_1 и доли возврата платежей M_2, d_0, d_1 предприятиям, для которых будет осуществляться моделирование ситуации в бассейне. Следует отметить, что в ходе уточняющих расчетов можно сужать области изменения управляющих параметров и увеличивать количество уровней, добиваясь уменьшения загрязнения речного бассейна;

б) в ходе построения производственных функций для каждого из m предприятий речного бассейна, ЛПР определяет неплатежеспособные предприятия для пар всех (α, β) из $(M_1 \times M_2)$ возможных. Пусть их число составляет m_n ;

в) для оценки последствий закрытия той или иной группы предприятий ЛПР выбирает s -тый вариант набора действующих $(m - m_s)$ предприятий, в том числе $(m_n - m_s)$ “условно закрытых” предприятий, а m_s предприятий — “экологических банкротов” считаются закрытыми и далее в расчетах не учитываются;

г) из $(M_1 \times M_2)$ пар (α, β) исключаются те, в которых число неплатежеспособных предприятий больше, чем $(m_n - m_s)$. Число оставшихся пар (α, β) обозначим через $(M_1 \times M_2)^*$;

д) ЛПР выбирает для безусловного финансирования наборы мероприятий: “долгосрочных” с общей стоимостью $Y^{(d)}$ и “приоритетных” с общей стоимостью $Y^{(p)}$. Обозначим суммарные затраты на осуществление мероприятий этих наборов через $Y^{(i)}$. Индекс “ s ” здесь и далее из-за перегруженности символами опускается.

е) ЛПР реализует стратегию селективной поддержки выбранных на предыдущем

МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ «ГИДРОМЕНЕДЖЕР» ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

этапе (д) мероприятий. Для этой цели в каждом узле (α, β) из $(M_1 \times M_2)^*$ оставшихся пар решаются переопределенные задачи оптимизации для каждого из действующих $(m-m_s)$ предприятий.

В их оптимальных планах x^* на месте “приоритетных” мероприятий обязательно стоит 1, остальные переменные варьируются. В оптимизируемые затраты предприятия $\Lambda(y)$ “целевые” вложения бассейнового центра не входят, однако амортизационные отчисления на вновь введенные в эксплуатацию “приоритетные” сооружения могут быть использованы предприятием для финансирования своей природоохранной деятельности;

ж) в результате выполнения этапа (е) строятся дискретные производственные функции действующих предприятий бассейна, ставящие в соответствие каждой паре (α, β) из $(M_1 \times M_2)^*$ рассматриваемых оптимальный для предприятия план мероприятий, который определяет соответствующий набор сбросов загрязнений, их состав и мощность.

з) рассчитывается объем средств бассейнового центра после отчисления на федеральный уровень $Y^{(r)}$ в каждом узле (α, β) из $(M_1 \times M_2)^*$ рассматриваемых, причем

$$Y^{(r)} = 0,9 \sum_{j=1}^{m-m_s} R^j. \text{ Знак “*” здесь отличает}$$

платежи j -го предприятия при реализации оптимального для него набора мероприятий.

и) в каждом узле (α, β) из $(M_1 \times M_2)^*$ рассматриваемых проверяется выполнение условия финансовой состоятельности бассейнового центра

$$d_{\beta} Y^{(r)} \leq Y^{(r)} - Y^{(i)} \quad (12)$$

т. е. бассейновый центр не может возвращать предприятиям средств больше, чем у него остается в наличии после субсидирования “долгосрочных” и “приоритетных” мероприятий. Узлы (α, β) из $(M_1 \times M_2)^*$ рассматриваемых, в которых нарушается условие (12) из дальнейшего рассмотрения исключаются. Оставшиеся $(M_1 \times M_2)^{**}$ узлов считаются допустимой областью определения решения.

к) применяя прогнозирующий блок СППР “Гидроменеджер” для речного бассейна строятся, соответственно, $(M_1 \times M_2)^{**}$ простран-

венно-временных распределений химических загрязнений в водной среде региона, после чего по критерию (11) выбирается искомая пара (α, β) .

В качестве выходной информации по расчетам выдается следующее: данные об оптимальных наборах мероприятий для действующих предприятий, экономических показателей и сбросах; данные о бассейновом центре (объемы средств фонда, финансирования “приоритетных” и “долгосрочных” мероприятий, остаток средств после инвестирования, описанного в приведенной схеме).

Таким образом, ЛПР имеет возможность сравнивать экологические последствия реализации своих управленческих решений. При этом варьируемые параметры управления — это s, α, β , а также перечни “долгосрочных” и “приоритетных” мероприятий, формируемые ЛПР.

4. Заключение.

Сформулированы эколого-экономические модели, составляющие содержательную часть системы поддержки принятия решений «Гидроменеджер» для управления водными ресурсами речного бассейна.

В настоящее время эти исследования поддерживаются программой ИНТАС научно-сотрудничества Комиссии Европейских обществ со странами бывшего СССР (проект *INTAS-2001-768* «Информационные средства управлением качества вод речных бассейнов, основанные на экологическом и экономическом рассмотрении»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цхай А.А. Мониторинг и управление качеством вод речного бассейна: модели и информационные системы. – Барнаул: Алтайское книжное изд-во, 1995, 174 с.
2. Цхай А.А., Цхай Т.В., Лейтес М.А. Оптимизационная модель водоохранной деятельности предприятия. // Водные ресурсы, 1996, т. 23, № 3, с.346-350
3. Цхай А.А. Модель регионального управления качеством воды в речном бассейне. // Водные ресурсы, 1997, т.24, № 5, с.617-623
4. Вода России. Математическое моделирование в управлении водопользованием / А.М. Черняев, Н.Б. Прохорова, А.А. Цхай и др. (под ред. А.М. Черняева). - Екатеринбург, 2001, 519 с.