
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.18:626

СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ¹

© 2012 г. В. И. Данилов-Данильян, С. А. Иванков, И. Л. Хранович

Институт водных проблем РАН

119333 Москва, ул. Губкина, 3

Поступила в редакцию 27.04.2010 г.

Рассмотрен подход к выработке согласованных стратегий использования трансграничных водных ресурсов. Исследован принцип открытого управления в двух возможных ситуациях выработки стратегий – либо соглашение между государствами об использовании трансграничного водного объекта отсутствует, либо требуется пересмотр существующего. В обоих вариантах достигается совершенное согласование.

Ключевые слова: трансграничные водные ресурсы, водохозяйственная система, стохастические условия, открытое управление, активная система, совершенное согласование, управляемый рынок.

Водные ресурсы являются одним из основных лимитирующих факторов развития человечества. Ускоренная индустриализация, нарастающие урбанизационные процессы, рост населения в развивающихся странах, глобальное потепление и увеличение в связи с этим вероятности засухи, плачевное состояние внутренней водной инфраструктуры в большинстве сельскохозяйственных районов мира привели к повышенному спросу на воду и, следовательно, к увеличивающемуся соперничеству за этот ресурс. Соперничество государств, использующих трансграничные водные ресурсы, является источником потенциальных международных конфликтов.

Разрешение конфликтных ситуаций, связанных с использованием трансграничных водных объектов, происходит в межгосударственных структурах таких, как Дунайская, Рейнская, Индская комиссии. Решения, принимаемые этими структурами, далее называемыми центрами, имеют юридическую силу для их участников – суверенных государств, делегирующих центру такие полномочия.

Формирование стратегий использования трансграничных водных объектов связано с необходимостью согласования интересов предприятий и организаций государств, использующих водные ресурсы. Предполагается, что центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений, а водопользователи знают возможные стратегии и принципы стимулирования принимаемых решений. Такое откры-

тое управление более, чем реально, так как центр – надгосударственный орган – формируется всеми государствами, использующими ресурсы трансграничного водного объекта. В данной работе этот принцип открытого управления применяется в двух возможных ситуациях разработки стратегий использования трансграничных водных ресурсов.

Соглашение об использовании трансграничного водного объекта либо отсутствует, либо заключено между частью водопользователей этого объекта, и необходимо распространить его на всех участников (ситуация А).

Такое соглашение существует, требуется пересмотр (ситуация Б).

Анализ этих ситуаций проводится с использованием математических моделей, основанных на потоковой структуризации водных объектов.

ПОТОКОВАЯ СТРУКТУРИЗАЦИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Средства получения, перераспределения и использования трансграничных водных ресурсов объединяются в водохозяйственную систему (ВХС), представляющую собой водную инфраструктуру, согласующую потребности в водных ресурсах с возможностью их удовлетворения. ВХС – пространственно распределенная система, функционирующая в стохастических условиях, оценки которых включают как объективные вероятности, обусловленные стохастической природой речного стока, так и субъективные вероятности, отражающие экспертные оценки возможных условий хозяйственной деятельности. В данной работе

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-06-0002).

множества возможных реализаций стохастических условий Ω представлено конечным числом элементов ω . ВХС изображается сетью $\Gamma(J, S)$, геометрическое начертание которой согласуется со схематическим изображением моделируемой системы. Множество вершин J соответствует местам расположения источников, водохранилищ, соединений рек и каналов, изъятия и возврата воды и т.д. Множество дуг S изображает пользователь, участки рек и каналов. Элементы $\Gamma(J, S)$ обладают собственными параметрами и характеристиками, соответствующими параметрам и характеристикам элементов ВХС. Их взаимодействие описывается как взаимодействие потоков, соответствующих потокам воды.

Поток на входе s -й дуги x_s^ω , моделирующей объем воды, поступающей пользователю, на участок реки или канала при реализации ω стохастических условий, связан с потоком в ее конце $x_s^{k\omega}$, изображающим объем возвращаемой в систему воды, равенством

$$x_s^{k\omega} = k_s^\omega x_s^\omega, \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega \quad (1)$$

с неотрицательным коэффициентом усиления k_s^ω . Его значение соответствует доле возвращаемого объема воды и не превосходит единицы.

Требования пользователей и ограничения на объемы воды на участках рек и каналов выделяют диапазоны возможных значений потоков

$$\underline{x}_s^\omega \leq x_s^\omega \leq \bar{x}_s^\omega, \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega \quad (2)$$

Ограничения снизу \underline{x}_s^ω соответствуют санитарным попускам, требованиям промышленного производства, заданиям по производству сельскохозяйственной продукции, судоходным минимальным судоходным и рыбохозяйственным глубинам и т.п. Ограничения сверху \bar{x}_s^ω соответствуют пропускным способностям и условиям безопасности сооружений, технологическим особенностям использования воды и т.п. Задание ограничений на величины только входных потоков не нарушает общности заданий условий функционирования элементов ВХС, так как требования к объемам водных ресурсов на любом участке реки, канала или пользователя приводятся к входу, т.е. пересчитываются в значения \underline{x}_s^ω и \bar{x}_s^ω .

Кроме потоков x_s^ω , величины которых при различных исходах стохастических условий ω могут принимать различные значения, на входах дуг рассматриваются потоки X_s , принимающие одни и те же значения при всех $\omega \in \Omega$. Они соответствуют гарантированным объемам водных ресурсов. Их величины принадлежат диапазону

$$\underline{X}_s \leq X_s \leq \bar{X}_s, \quad s \in S \quad (3)$$

с ограничениями снизу \underline{X}_s и сверху \bar{X}_s , обусловленными физическими и технологическими возможностями использования водных ресурсов. Гарантированные потоки на выходах дуг в модели не вводятся, так как они, в отличие от потоков, изображающих реальное перемещение воды, они – виртуальная принадлежность моделируемых дуг.

Закон сохранения масс водных ресурсов представлен в виде системы уравнений неразрывности потоков в вершинах сети

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega x_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} x_s^\omega + b_{i0}^\omega = 0, \quad (4)$$

где S_i^+ – множество дуг, заходящих в i -ю вершину, S_i^- – множество дуг, исходящих из нее; b_{i0}^ω – поток i -й вершины, моделирующий фиксированный объем водных ресурсов, при $b_{i0}^\omega \geq 0$ – поступающих в i -ю вершину, при $b_{i0}^\omega \leq 0$ – изымаемых из нее. В системе уравнений (4) учтены условия (1).

ФУНКЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты использования водных ресурсов оцениваются подробно рассмотренными в [3] производственными функциями $f_s(X_s, x_s)$, зависящими от гарантированных X_s и текущих объемов водных ресурсов x_s^ω , поступающих пользователям. Они оценивают совокупный результат хозяйственной деятельности водопользователей в различных стохастических условиях

$$f_s(X_s, x_s) = M f_s^\omega(X_s, x_s^\omega), \quad (5)$$

где M – символ математического ожидания.

Функции $f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$ вогнуты по каждому из переменных X_s и x_s^ω в силу закона об убывающей эффективности [5], в соответствии с которым с увеличением количества ресурса не возрастает эффективность использования единицы его объема. Однако это не гарантирует вогнутость $f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$ по их совокупности. Тем не менее, все известные функции $f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$, которыми оценивается эффективность использования водных ресурсов, вогнуты по совокупности переменных X_s и x_s^ω (например, описанные в [4] и [1]). Поэтому в данной работе можно предполагать вогнутость $f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$ по совокупности X_s и x_s^ω .

Функция цели трансграничной ВХС складывается из производственных функций ее элементов в предположении, что эффекты от использования водных ресурсов различными пользовате-

лями сопоставимы в одних и тех же единицах, для определенности в рублях

$$f(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} f_s(X_s, x_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} f_s^\omega(X_s, x_s^\omega), \quad (6)$$

где p^ω – вероятность реализации ω .

СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ СОГЛАШЕНИЯ (СИТУАЦИЯ А)

Разработка стратегий использования водных ресурсов трансграничных водных объектов основывается на согласовании интересов водопользователей – элементов ВХС, обладающих свободой выбора своего состояния. Для этого при отсутствии соглашения о правилах использования водных ресурсов либо при наличии таких соглашений, заключенных между частью водопользователей (при этом игнорируются интересы некоторых пользователей), ВХС рассматривается как активная система. Объекты управления такой системы – активные элементы, реализующие собственные предпочтения, целенаправленно манипулируя информацией о своих возможностях, целях и эффективности.

ВХС представлена как активная двухуровневая система, в которой продукция производится элементами, взаимосвязанными условиями перемещения и использования водных ресурсов. Центр в ее работе непосредственно участия не принимает. Он влияет на эффективность функционирования элементов назначением показателей водопользования. Элементы стремятся максимизировать показатели эффективности, связанные с их функционированием. Центр максимизирует функцию, которой оценивается эффективность функционирования всей ВХС. Он добивается согласованности, при которой элементы, преследуя собственные цели, реализуют состояния, обеспечивающие достижение целей системы.

Центр – метаигрок с правом первого хода (первый уровень управления) – управляет активной системой ВХС путем назначения стратегии и тем самым влияет на выбор игроками второго уровня – пользователями своих состояний (второй уровень). Центр проводит встречный способ планирования и реализует механизм открытого управления. Каждый цикл планирования состоит из четырех этапов. На первом этапе элементы сообщают в центр свои функции предпочтения. На втором – центр на основании полученных функций предпочтения определяет план системы. На третьем этапе элементы выбирают свои состояния. На четвертом – определяются достигнутые значения целевых функций элементов и всей ВХС. Механизм управления в данной работе предполагается постоянным. Его изменение требует суще-

ственных материальных, временных, трудовых, психологических и других затрат.

Инструментами управления являются объемы воды, выделяемые пользователям, и цены за эти ресурсы. Объемы воды определяются в результате решения базовой задачи, описывающей оптимальное функционирование ВХС. Цены формируются двойственными переменными этой задачи. Рассматриваемая в данной работе базовая задача моделирует рациональное использование водных ресурсов.

БАЗОВАЯ ЗАДАЧА

Функционирование ВХС представлено двухэтапной задачей стохастического программирования определения оптимальных потоков в сети $\Gamma(J, S)$.

В качестве вероятностных оценок ситуаций функционирования в задачу включаются как объективные, так и субъективные вероятности. Переменные величины, наряду с потоками, изображающими реальные перемещения воды и примесей, содержат также потоки, изображающие их гарантированные значения.

Функции эффективности использования водных ресурсов зависят как от переменных, изображающих реальные потоки водных ресурсов, так и от переменных, соответствующих их гарантированным величинам. В отличие от реальных потоков, которые удовлетворяют системе уравнений неразрывности в вершинах $\Gamma(J, S)$, гарантированные потоки лишь виртуально принадлежат своим пользователям, уравнения баланса масс для них отсутствуют. Они соответствуют объемам водных ресурсов, на которые ориентируются пользователи при проведении необходимых подготовительных работ и планировании использования других неводных ресурсов. В базовой задаче они играют роль стратегических переменных (первого этапа), выбираемых при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий. Тактические переменные (второго этапа), определяемые при известных реализациях стохастических условий, – значения потоков, соответствующих объемам водных ресурсов.

В базовой задаче D_0 , описывающей оптимальное использование водных ресурсов, определяется вектор потоков X^D, x^D в сети $\Gamma(I, S)$, составляющие которого – вектор гарантированных потоков $X^D = \{X_s^D | s \in S\}$ и вектор реализуемых потоков $x^D = \{x_s^{\omega D} | s \in S, \omega \in \Omega\}$, моделируют гарантированное и реализуемое распределение водных ресурсов. Вектор X^D, x^D принадлежит допустимому множеству G , выделяемому ограничениями (2)–(4).

Вектор X^D, x^D максимизирует функцию цели системы (6).

В решении задачи D_0 наряду с оптимальными значениями гарантированного X^D и текущих объемов использования водных ресурсов $x^{\omega D}$ неявным образом содержатся также значения оптимальной надежности гарантированной отдачи P^0 , при которой функционирование ВХС осуществляется с наибольшей эффективностью. Она получается как “побочный” результат решения задачи, подобно тому, как при решении задач оптимального использования ресурсов в качестве “побочного” результата получают оценки этих ресурсов. Надежность гарантированной отдачи, под которой понимается вероятность ненарушения благоприятных режимов, следует из распределения случайных величин $x_s^{\omega D} \geq X_s^D$. Характерная для дефицитных систем оптимальная надежность отсутствия дефицитов по объему водопользования равна

$$P_s^0 = \sum_{\{\omega \in \Omega \mid x_s^{\omega D} \geq X_s^D\}} p^{\omega}, \quad s \in S. \quad (7)$$

Задание надежностей водопользования, отличных от оптимальных, приводит к увеличению затрат в ВХС. При $P_s < P_s^0$ затраты возрастают из-за необходимости чаще, чем при P_s^0 , проводить дорогостоящие корректирующие мероприятия, обусловленные отклонением величин объемов используемых водных ресурсов от гарантируемого значения. При $P_s > P_s^0$ затраты возрастают из-за неполного учета возможностей использования водных ресурсов.

ФОРМИРУЕМАЯ ЗАДАЧА

Задача D_0 – задача центра, которую он должен был бы решать, если бы ему были известны истинные функции эффективности $f_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega})$. Однако вместо задачи D_0 решается некоторая другая задача D , отличающаяся от D_0 целевой функцией, которая формируется в виде суммы функций предпочтения $\varphi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega})$, сообщаемых элементами – пользователями центра. Функции $\varphi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega})$ вогнутые, так же, как $f_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega})$. Они должны правдоподобно характеризовать использование ресурсов элементами моделируемой системы. Для упрощения записи эти функции предполагаются также дифференцируемыми. Функции предпочтения удобно представить в виде

$$\varphi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega}) = f_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega}) + \psi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega}).$$

Функции $\psi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega})$ характеризуют искажение информации, сообщаемой центру об эффективности функционирования элементов системы.

Семейство задач $\{D\}$ включает также задачу D_0 , в которой $\psi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega}) \equiv 0$.

Задачи D – двухэтапные стохастического программирования. В них стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, выступают потоки X_s , соответствующие гарантированным значениям водных ресурсов. Тактические переменные второго этапа, выбираемые при известных реализациях стохастических условий, потоки x_s^{ω} , моделирующие величины выделяемых ресурсов. В этих задачах ищется максимум вогнутых функций

$$\varphi(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} \rho^{\omega} \sum_{s \in S} \varphi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega})$$

на выпуклом множестве G_D , выделяемом линейными ограничениями (2)–(4).

Оптимальные значения переменных задачи D и ей двойственной связаны соотношениями [1]

$$k_s u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} = \partial \varphi_s^{\omega}(X_s^D, x_s^{\omega D}) / \partial x_s^{\omega} - \underline{\lambda}_s^{\omega D} + \bar{\lambda}_s^{\omega D}, \quad (8)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \partial \varphi_s^{\omega}(X_s^D, x_s^{\omega D}) / \partial X_s = \underline{\Lambda}_s^D - \bar{\Lambda}_s^D,$$

$$\underline{\lambda}_s^{\omega D} [x_s^{\omega} - x_s^{\omega D}] = \bar{\lambda}_s^{\omega D} [x_s^{\omega D} - \bar{x}_s^{\omega}] =$$

$$= \underline{\Lambda}_s^D [\underline{X}_s - X_s^D] = \bar{\Lambda}_s^D [X_s^D - \bar{X}_s] = 0, \quad (9)$$

в которых потенциалы вершин u_i^{ω} имеют смысл дифференциальных экономических оценок водных ресурсов в соответствующих вершинах системы. Неотрицательные двойственные переменные $\underline{\lambda}_s^{\omega}$, $\bar{\lambda}_s^{\omega}$, $\underline{\Lambda}_s$ и $\bar{\Lambda}_s$ оценивают требования, предъявляемые пользователями к поставляемым и гарантируемым объемам ресурсов.

Равенства (8) – условия оптимальности допустимого вектора задачи D , равенства (9) – условия дополняющей нежесткости. При исключении неотрицательных двойственных переменных $\underline{\lambda}_s^{\omega D}$, $\bar{\lambda}_s^{\omega D}$, $\underline{\Lambda}_s^D$ и $\bar{\Lambda}_s^D$, связанных равенствами (9), условия (8) принимают простой вид

$$\begin{cases} \partial \varphi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega}) / \partial x_s^{\omega} \leq k_s^{\omega} u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} \\ \text{при } x_s^{\omega} = x_s^{\omega D}, \\ \partial \varphi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega}) / \partial x_s^{\omega} = k_s^{\omega} u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} \\ \text{при } x_s^{\omega} < x_s^{\omega D} < \bar{x}_s^{\omega} \\ \partial \varphi_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega}) / \partial x_s^{\omega} \geq k_s^{\omega} u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} \\ \text{при } x_s^{\omega D} = \bar{x}_s^{\omega} \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 \partial\phi(X^D, x^D)/\partial X_s = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \partial\phi_s^\omega(X_s^D, x_s^{\omega D})/\partial X_s \leq 0 \\
 \text{при } \underline{X}_s = X_s^D, \\
 \partial\phi(X^D, x^D)/\partial X_s = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \partial\phi_s^\omega(X_s^D, x_s^{\omega D})/\partial X_s = 0 \\
 \text{при } \underline{X}_s < X_s^D < \bar{X}_s, \\
 \partial\phi(X^D, x^D)/\partial X_s = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \partial\phi_s^\omega(X_s^D, x_s^{\omega D})/\partial X_s \geq 0 \\
 \text{при } X_s^D = \bar{X}_s.
 \end{cases} \quad (10)$$

Неравенства и равенства (10) представляют собой условия потенциальности оптимальных векторов транспортной задачи на сети с усилением в дугах (первая группа равенств и неравенств), дополненные условиями минимума функций ϕ_s^ω по переменным, соответствующим гарантированным величинам ресурсов (вторая группа равенств и неравенств).

СОГЛАСОВАНИЕ РЕШЕНИЙ

Центр распределяет водные ресурсы в соответствии с решением задачи D. Элементы используют выделенные им ресурсы наилучшим образом. Для этого они решают свои локальные задачи. Их оптимальные режимы получаются в результате решения задач наилучшего использования выделенных ресурсов X_s^D, x_s^D , в которых максимизируются производственные функции пользователей

$$f_s(X_s, x_s) + C_s^D. \quad (11)$$

Здесь C_s^D – цена, по которой ресурсы опускаются s-му элементу. Назначением цен C_s^D центр добивается согласования решений, принимаемых отдельными элементами для достижения своей цели – решения исходной задачи D_0 .

Цены C_s^D определяются с использованием оптимальных значений двойственных переменных задач D, удовлетворяющих условиям оптимальности (9), по правилу

$$\begin{aligned}
 c_s^{\omega D} &= [u_i^{\omega D} - k_s^\omega u_j^{\omega D}]x_s^\omega + [\underline{\Lambda}_s^D - \bar{\Lambda}_s^D]X_s, \\
 c_s^D &= \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega c_s^{\omega D}.
 \end{aligned} \quad (12)$$

Выражение в первых скобках $u_i^{\omega D} - k_s^\omega u_j^{\omega D}$ интерпретируется как разность между ценой $u_i^{\omega D}$, которую платит s-й элемент за единицу водных ресурсов, поступающих ему из i-й вершины, и це-

ной $k_s^\omega u_j^{\omega D}$, которую платит система s-му элементу за сброс в j-ю вершину единицы водных ресурсов.

Коэффициент k_s^ω показывает, какую часть получаемого ресурса элемент возвращает. Вторая скобка оценивает удельное изменение величины гарантированного объема водных ресурсов. В силу условий дополняющей нежесткости (9) значения $\bar{\Lambda}_s^D$ и $\underline{\Lambda}_s^D$ одновременно не могут быть отличными от нуля.

При выполнении гипотезы слабого влияния (отсутствии монопольного эффекта) назначение цен по правилу (12) приводит к согласованному принятию решений центром и пользователями. Суть гипотезы в том, что, изменяя функцию предпочтения $\phi_s(X_s, x_s)$, сообщаемую центру, пользователь не может существенно повлиять на цену C_s^D в виду того, что цена определяется двойственными оценками, зависящими от функций предпочтения всех пользователей, на которые он повлиять не может [2]. Это приводит к тому, что, сообщая функцию предпочтения, пользователь не учитывает ее влияния на цену, по которой ему будут выделяться водные ресурсы. Гипотеза слабого влияния, которая отражает слабое воздействие отдельного элемента на общие для всей системы показатели управления, выполнена обычно при большом числе элементов. Обоснование справедливости этой гипотезы, основанное на рассмотрении влияния возмущений исходных данных на решения задач, обладающих свойствами задачи D (выпуклость целевой функции, сетевая структура допустимого множества и линейность ограничений величин потоков), приведено в [6].

Равенства и неравенства (9) – условия минимума функций

$$\begin{aligned}
 \tilde{\phi}_s(X_s, x_s) &= \phi_s(X_s, x_s) + c_s^D = \\
 &= \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega [\phi_s^\omega(X_s, x_s) + c_s^{\omega D}] = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega [\phi_s^\omega(X_s, x_s) + \\
 &+ [u_i^{\omega D} - k_s^\omega u_j^{\omega D}]x_s^\omega + [\bar{\Lambda}_s^D - \underline{\Lambda}_s^D]X_s], \quad s \in S
 \end{aligned} \quad (13)$$

на множествах, выделяемых ограничениями (2) и (3). Значения этих функций зависят только от информации, сообщаемой в центр пользователями, так как в силу выполнения гипотезы слабого влияния отдельные элементы не могут воздействовать на цены ресурсов. Поэтому при реализации описанного механизма открытого управления, руководствуясь которым центр каждому элементу выделяет ресурсы в соответствии с решением задачи D, обеспечивающим минимум оценки (13) целевой функции каждого элемента, предпочтительная стратегия всех пользователей – сообщение истинных функций затрат. Пользователи будут

сообщать центру достоверную информацию об эффективности использования водных ресурсов, т.е. $\varphi_s(X_s, x_s) = f_s(X_s, x_s)$.

Таким образом, процедура распределения водных ресурсов в результате решения базовой задачи D и назначения цен за водные ресурсы в соответствии с правилом (12) – механизм открытого управления, при котором достигается совершенное (полное) согласование целей системы и всех ее элементов.

ОЦЕНКА ПЛАТЫ ЗА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Задача D – инструмент адаптивного управления. Она позволяет выбрать оптимальную стратегию управления X^D и ее корректировки $\Delta x^{\omega D} = x^{\omega D} - X^D$, обеспечивающие наименьшую потерю эффективности функционирования ВХС в различных стохастических условиях. Для осуществления выработанной стратегии требуется дополнить механизм взаимодействия равноправных участников: центра и элементов-пользователей. Регулятором взаимоотношений продавца ресурсов (центра) и “покупателей” (пользователей) выступают цены гарантированных поставок водных ресурсов и плата за отклонения от них. Наиболее простой для анализа вариант – жесткая, полностью регулируемая центром монополия, в основе представления которой о “справедливых” ценах лежат решения задач, аналогичных задаче D₀.

Цена C_s^1 , по которой центр “продает” s -му пользователю выделяемую в соответствии с решением задачи D₀ величину гарантированного водопользования X_s^0 , определяется эффективностью использования ресурса $f_s^1(X_s^0)$. Целесообразно назначать $C_s(X_s^0) = \alpha_s f_s^1(X_s^0)$, где α_s – положительный коэффициент, меньше 1. Коэффициент α_s отражает часть получаемой s -м пользователем прибыли, которой он оплачивает гарантированное водопользование. Сложнее обстоит дело с решением проблемы назначения платы за отклонения величин текущих поставок ресурсов от их гарантированных величин.

Традиционным является маржиналистский подход к оценке изменений результатов производства и назначения цен при отклонениях значений спотовых поставок от величин форвардных контрактов. В нем реализуется принцип предельной полезности – оценки изменения результатов производства при бесконечно малом изменении количества используемого ресурса. В соответствии с этим подходом цена поставки дополнительной (сверх гарантируемой величины) или недопоставки каждой единицы водного ресурса является ценой “последней” планируемой к использованию

единицы. В терминах задачи D₀ цена, определяемая этим “последним” пользователем, при реализации стохастических условий ω равна $G_s^{\omega} = \partial f_s^{\omega}(X_s^D, x_s^{\omega D}) / \partial x_s^{\omega}$. Назначаемая цена формируется из цен G_s^{ω} . Например, в виде $G_s = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} G_s^{\omega}$ или $G_s = \max_{\omega \in \Omega} G_s^{\omega}$ при $x_s^{\omega D} < X_s^D$ и $G_s = \min_{\omega \in \Omega} G_s^{\omega}$ при $x_s^{\omega D} > X_s^D$.

Этот подход корректен для линейных целевых функций, а также для нелинейных при условии, что отклонения значений поставляемых объемов водных ресурсов от их гарантируемых величин незначительны. Функции эффективности пользователей $f_s^{\omega}(X, x^{\omega})$ – вогнутые нелинейные [3]. Величины реализуемых объемов могут намного отличаться от их ориентиров. При таком подходе потери эффективности, обусловленные дефицитом ресурсов, значительно превосходят компенсацию, получаемую за их недопоставку. Оплата пользователем профицита водных ресурсов превосходит результат их использования. Не спасает дела умножение G_s на некоторые коэффициенты – большой при $x_s^{\omega D} < X_s^D$ и малый – при $x_s^{\omega D} > X_s^D$, так как отсутствуют объективные предпосылки выбора значений этих коэффициентов.

Предлагается назначать цены за недопоставку водных ресурсов и их поставку сверх гарантированных величин в соответствии с ценностью этих ресурсов при производстве продукции. В основном варианте ВХС платит пользователю за недопоставку каждой единицы водного ресурса по цене усредненного ущерба

$$r_s^{\omega}(X_s^D, x_s^{\omega D}) = [f_s^{\omega}(X_s^D, X_s^D) - f_s^{\omega}(X_s^D, x_s^{\omega D})]^+,$$

где $[u]^+ = \max\{u, 0\}$,

$$C_s^-(X_s^D, x_s^D) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} r_s^{\omega}(X_s^D, x_s^{\omega D}) / [x_s^{\omega D} - X_s^D]^+.$$

За поставку водных ресурсов сверх гарантированных значений пользователь оплачивает каждую единицу объема по усредненной цене шанса ее использования

$$d_s^{\omega}(X_s^D, x_s^D) = [f_s^{\omega}(X_s^D, x_s^{\omega D}) - f_s^{\omega}(X_s^D, X_s^D)]^+$$

$$C_s^+(X_s^D, x_s^D) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} d_s^{\omega}(X_s^D, x_s^{\omega D}) / [x_s^{\omega D} - X_s^D]^+.$$

В результате при реализации стохастических условий ω пользователь за излишки водных ресурсов ($\Delta x_s^{\omega} > 0$) платит $\Phi_s^{\omega+}(X_s^D, x_s^{\omega}) = C_s^+(X_s^D, x_s^D) \times \Delta x_s^{\omega}$, а недостаток водных ресурсов ($\Delta x_s^{\omega} < 0$) центр компенсирует в виде платы $\Phi_s^{\omega-}(X_s^D, x_s^{\omega}) = C_s^-(X_s^D, x_s^D) |\Delta x_s^{\omega}|$.

Для стимулирования стремлений пользователей использовать излишки водных ресурсов и систем минимизировать их дефициты регулирующие органы (центру) можно предложить назначать цены при отклонении объемов поставляемых водных ресурсов от их гарантированных величин по наименьшему шансу и наибольшему ущербу единицы их использования

$$\bar{C}_s^+(X_s^D, x_s^D) = \min_{\omega \in \Omega} d_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 0}) / [x_s^{\omega D} - X_s^D]^+$$

и

$$\bar{C}_s^-(X_s^D, x_s^D) = \max_{\omega \in \Omega} r_s^\omega(X_s^D, x_s^{\omega D}) / [X_s^D - x_s^{\omega D}]^-.$$

При описанных денежных отношениях, в которых, наряду с платой за водные ресурсы, присутствует плата за невыполнение обязательств по их поставкам, Центр и пользователи выступают как равноправные участники рынка ресурсов (насколько могут быть «равноправны» монополист и другие участники рынка).

Проблема согласования интересов центра и пользователей в условиях неопределенности, решаемая при назначении цен за ресурсы в маргиналистском подходе по правилу (12), в данном случае облегчается. Пользователям, не склонным к рискам (хозяйственные субъекты именно такие), не выгодно искажать информацию об эффективности использования водных ресурсов. Назначение функций предпочтения $\varphi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) > f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$, сообщаемых центру, может повлечь увеличение значений гарантированного водопользования и связанного с этим увеличением показателей использования ресурсов в идеальных условиях. В этом случае отклонения величин поставляемых ресурсов от гарантированных значений при реализациях стохастических условий $\omega \in \Omega_s$ могут привести к ущербу, значительно превышающим «дополнительную» эффективность использования гарантированного водопользования. Назначение $\varphi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) < f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$ уменьшает величины ущербов, однако при этом также падает эффективность гарантированного водопользования.

СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ПРИ ПЕРЕСМОТРЕ СОГЛАШЕНИЙ (СИТУАЦИЯ Б)

Соглашения об использовании трансграничных водных ресурсов заключаются на определенный срок, в течение которого появляются новые пользователи и закрываются ранее функционировавшие. Развивается производство, меняется технология и отношение общества к использованию водных ресурсов. Возникает проблема пересмотра действующих соглашений, решение кото-

рой видится в формировании рынка соглашений на использование водных ресурсов.

Рассматривается рынок водных ресурсов с начальным распределением потоков X^0, x^0 в сети $\Gamma(J, S)$, соответствующим пересматриваемому соглашению об использовании ресурсов трансграничного водного объекта. Предполагается, что потоки удовлетворяют условиям

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega x_s^{\omega 0} - \sum_{s \in S_i^-} x_s^{\omega 0} + b_i^\omega = 0, \quad i \in J, \quad (14)$$

$$\underline{x}_s^\omega \leq x_s^\omega \leq \bar{x}_s^\omega, \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad (15)$$

следующим из ограничений (2) и (4). Аналогичным условиям должны удовлетворять потоки при изменении водохозяйственной ситуации, связанной с заключением сделок купли – продажи разрешений y_s^ω на использование водных ресурсов, при которых $x_s^{\omega 0}$ заменяется на $x_s^\omega = x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega$ (величина δ_s^ω не тождественна y_s^ω)

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega (x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega) - \sum_{s \in S_i^-} (x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega) + b_i^\omega = 0, \quad i \in J, \quad (16)$$

$$\underline{x}_s^\omega \leq x_s^\omega + \delta_s^\omega \leq \bar{x}_s^{\omega D}, \quad s \in S. \quad (17)$$

Из соотношений (14) – (17) следуют ограничения на приращения потоков δ_s^ω

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega \delta_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} \delta_s^\omega = 0, \quad i \in J, \quad (18)$$

$$\underline{\delta}_s^\omega \leq \delta_s^\omega \leq \bar{\delta}_s^\omega, \quad s \in S \quad (19)$$

где $\delta_s^\omega = x_s^\omega - x_s^{\omega 0}$, $\bar{\delta}_s^\omega = \bar{x}_s^{\omega 0} - x_s^{\omega 0}$.

Приращения потоков δ_s^ω складываются из приращений δ_{sl}^ω , моделирующих части разрешений l -х пользователей, которые делегируются s -му пользователю

$$\delta_s^\omega = \sum_{l \in L_s} \delta_{sl}^\omega, \quad L_s = s \in S. \quad (20)$$

Заметим, что $\delta_{sl}^\omega > 0$ означает увеличение потока по s -й дуге, обусловленное «покупкой» водных ресурсов у l -го пользователя, а $\delta_{sl}^\omega < 0$ – уменьшение величины потока, описывающее «продажу» водных ресурсов s -м пользователем l -му пользователю.

На рынке трансграничных водных ресурсов продаются и покупаются разрешения на их использование y_{sl}^ω . Ориентиры X_s в этом процессе не участвуют. Из-за пространственной распределен-

ности и возможных потерь воды в фрагментах ВХС s -й пользователь может получить только $\beta_{sl}^{\omega} y_{sl}^{\omega}$ водных ресурсов при покупке у l -го пользователя y_{sl}^{ω} . Здесь β_{sl}^{ω} – коэффициент влияния l -го пользователя на s -го. Например, пользователь, расположенный ниже по течению реки, при покупке водных ресурсов у пользователя, расположенного выше, из-за потерь воды “по дороге” может использовать только ту часть покупки, которая дойдет до него. В этом случае хотя бы один из коэффициентов усиления дуг k_s^{ω} , изображающий участи рек «дороги» отличен от единицы. И наоборот, разрешение на использование водных ресурсов, купленное у пользователя, расположенного ниже по течению, может быть использовано в большем объеме. Коэффициенты β_{sl}^{ω} образуют квадратную матрицу взаимного влияния β^{ω} .

При покупке и продаже разрешений на использование водных ресурсов преобразуются возможности пользователей. Значения $x_s^{\omega 0}$ заменяются на

$$x_s^{\omega 0} + \delta_s^{\omega} = x_s^{\omega 0} + \sum_{l \in L_s} [\delta_{sl}^{\omega} y_{sl}^{\omega+} + y_{sl}^{\omega-}],$$

где $y_{sl}^{\omega+} = \max[y_{sl}^{\omega}, 0]$, $y_{sl}^{\omega-} = \min[y_{sl}^{\omega}, 0]$.

Происходит трансформация эффективности их использования. Функция эффективности $f_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega 0})$ преобразуется в функцию

$$\begin{aligned} f_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega}) &= \\ &= f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega}) - \sum_{l \in L_s} [c_{sl}^{\omega+} y_{sl}^{\omega+} - c_{sl}^{\omega-} y_{sl}^{\omega-}], \end{aligned} \quad (21)$$

где: $c_{sl}^{\omega+}$ – цена, по которой s -й пользователь покупает у l -го пользователя разрешение на использование водных ресурсов, $c_{sl}^{\omega-}$ – цена, по которой s -й пользователь продает свою долю разрешений, $c_{sl}^{\omega+} > 0$, $c_{sl}^{\omega-} > 0$.

При совершении актов купли-продажи разрешений на использование водных ресурсов необходимо соблюдать условия

$$\begin{aligned} \Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega}) &= \\ &= f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega}) - f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}) \geq 0, \quad s \in S, \end{aligned} \quad (22)$$

означающие, что ни одному из участников рынка не будет нанесен ущерб. Включение условий (22), выполнение которых обеспечивает центр, отражает особенность ВХС – пространственно-распределенной природно-технической системы. Наряду с “активными” участниками актов купли – продажи, непосредственно обменивающимися разрешениями, для которых условия (22) выполнены как строгие (иначе, зачем продавать и покупать?),

в ВХС присутствуют “пассивные” пользователи, на эффективность функционирования которых влияют сделки, заключаемые “активными” участниками рынка.

Центр заинтересован в рациональном и справедливом распределении водных ресурсов, а также в средствах для обеспечения функционирования ВХС, которые поступают в виде отчислений при совершении актов купли-продажи. Они аккумулируются в фонде стабилизации, предназначенном для компенсации возможных потерь у пассивных участников рынка при совершении актов купли-продажи активными участниками, а также в фонде развития системы, средства которого используются для поддержания ВХС в рабочем состоянии и ее совершенствования. Его интересы заключаются в максимизации функции

$$\varphi(\delta^{\omega}) = \sum_{s \in S} [d_s^{\omega+} \delta_s^{\omega+} - d_s^{\omega-} \delta_s^{\omega-}], \quad (23)$$

где $d_s^{\omega+}$ и $d_s^{\omega-}$ тарифы отчислений, соответственно, при покупке и при продаже. Коэффициенты $d_s^{\omega+}$ и $d_s^{\omega-}$ неотрицательны, так как выигрывают продавец и покупатель, они оба пополняют фонды стабилизации и развития.

В согласовании стратегий использования водных ресурсов трансграничного водного объекта участвуют активные и пассивные участники рынка, а также центр. При возникновении хотя бы одной пары активных участников рынка (или нескольких активных пользователей), которые договорились об обмениваемых объемах y_{sl}^{ω} водных ресурсов и их ценах, центр проверяет возможность таких обменов. Для этого решается задача определения потоков δ_s^{ω} , возникающих в результате предполагаемых сделок, которые должны удовлетворять условиям (18) и (19) допустимости таких распределений водных ресурсов. Если не существуют допустимые δ_s^{ω} , соответствующие предполагаемым актам купли-продажи, пользователи, учитывающие возникающие дисбалансы между желаемым и возможным для обмена разрешениями на использование водных ресурсов, корректируют свои предложения до получения приращений δ_s^{ω} , удовлетворяющих условиям (18) и (19).

При приращениях δ_s^{ω} , удовлетворяющих условиям (18) и (19), для пассивных участников рынка разрешений устанавливаются цены, по которым либо им компенсируется снижение эффективности использования водных ресурсов $c_{sl}^{\omega-}$, либо они платят за повышение результативности их использования.

$$c_s^{\omega-} = \Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega}) / \delta_s^{\omega-} + \Delta_s^{\omega-}$$

и (24)

$$c_s^{\omega+} = \Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega}) / \delta_s^{\omega+} - \Delta_s^{\omega+}.$$

Где $\Delta_s^{\omega-}$ и $\Delta_s^{\omega+}$ – определяемые центром положительные величины, стимулирующие заинтересованность пассивных пользователей в совершении сделок активными пользователями. Они назначаются такими, чтобы их функции эффективности после совершения актов купли–продажи

$$\Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega-}) = f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0} + \delta_s^{\omega-}) - c_s^{\omega-} \delta_s^{\omega-},$$

и (25)

$$\Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega+}) = f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0} + \delta_s^{\omega+}) - c_s^{\omega+} \delta_s^{\omega+}$$

удовлетворяли требованиям (22). Средства, необходимые для компенсации потерь эффективности использования водных ресурсов пассивных пользователей, формируются из отчислений активных пользователей, эффективность функционирования которых повышается, дополненных средствами стабилизационного фонда центра.

Из всех сделок купли–продажи разрешений на использование водных ресурсов, удовлетворяющих условиям (18) и (19) и требованиям (22) с учетом корректировки (25) функций эффективности, выделяется совокупность сделок, при которых отчисления центру наибольшие. Эта совокупность характеризуется вектором $\delta^{\omega 1} = \{\delta^{\omega 1} | s \in S\}$ – решением задачи максимизации функции (23) на выпуклом множестве, выделяемом условиями (18), (19) и (20).

Описанная процедура рыночного обмена разрешениями на использование трансграничных водных ресурсов характеризуется тем, что при каждой реализации стохастических условий $\omega \in \Omega$ оценки эффективности использования водных ресурсов всех пользователей не снижаются, при этом у некоторых, в частности у активных, повышаются. То есть переход от начального распределения водных ресурсов $x^{\omega 0} = \{x_s^{\omega 0} | s \in S\}$ к распределению $x^{\omega 1} = \{x_s^{\omega 1} | s \in S\} = \{x_s^{\omega 0} + \delta_s^{\omega 1} | s \in S\}$ означает, что

$$f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 1}) \geq f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}), \quad s \in S \quad (26)$$

и найдутся такие $\hat{s} \in S$, что

$$f_{\hat{s}}^{\omega}(X_{\hat{s}}^0, x_{\hat{s}}^{\omega 1}) > f_{\hat{s}}^{\omega}(X_{\hat{s}}^0, x_{\hat{s}}^{\omega 0}). \quad (27)$$

Из соотношений (26) и (27) следует, что математическое ожидание эффективности использо-

вания водных ресурсов в результате совершенных сделок возрастает, т. е.

$$F(X^0, x^1) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 1}) > F(X^0, x^0) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}). \quad (28)$$

Переход от потоков $x^{\omega 0}$ к $x^{\omega 1}$ влечет пересмотр величин гарантированного водопользования X_s , оценивающие объемы водных ресурсов, на которые ориентируются водопользователи. Их значения принадлежат конкретным пользователям и не связаны с другими пользователями. Осуществляется переход (при закрепленных величинах $x_s = x_s^1$) от значений X_s^0 к X_s^1 , представляющих собой решения задач максимизации математического ожидания эффективности использования водных ресурсов x_s^1 , выделяемых пользователям в результате рыночного обмена разрешениями,

$$F_s(X_s, x_s^1) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} f_s^{\omega}(X_s, x_s^{\omega 1}) \quad (29)$$

на множествах, выделяемых условиями (3).

Так как в задачах (3), (29) ищется максимум функции $F_s(X_s, x_s^1)$ на множестве (3), содержащем вектор X_s^0 , то

$$F_s(X_s^1, x_s^1) \geq F_s(X_s^0, x_s^1). \quad (30)$$

Неравенства (28) и (30) совместно означают, что эффективность использования водных ресурсов трансграничного водного объекта при переходе от начального их распределения X^0, x^0 к распределению X^1, x^1 , полученному в результате описанной процедуры рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов, строго возрастает, т.е.

$$F(X^1, x^1) = \sum_{s \in S} F_s(X_s^1, x_s^1) \geq \sum_{s \in S} F_s(X_s^0, x_s^1) > \sum_{s \in S} F_s(X_s^0, x_s^0) = F(X^0, x^0). \quad (31)$$

Замена начального распределения водных ресурсов X^0, x^0 на X^1, x^1 и переход от начальных оценок $f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0})$ эффективности их использования к оценкам $f_s^{\omega}(X_s^1, x_s^{\omega 1})$ может привести к появлению пользователей, стремящихся продать и купить разрешения на использование водных ресурсов. В этом случае описанная процедура купли–продажи повторяется с X^1, x^1 так же, как она описана выше с X^0, x^0 и т.д. На каждом шаге этого итерационного процесса оценка эффективности использования водных ресурсов повышается. Эффективность использования водных ресурсов ограничена. Так как возрастающая ограниченная

сверху последовательность имеет предел, описанный итерационный процесс рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов сходится.

ВЫВОДЫ

Предложены и обоснованы механизмы согласования интересов государств, использующих водные ресурсы трансграничных водных объектов в условиях неопределенности, основанные на принципе открытого управления. Согласование осуществляется в ситуациях отсутствия соглашения об использовании трансграничного водного объекта и при необходимости его пересмотра. Анализ этих ситуаций проводится с использованием математических моделей, основанных на потоковой структуризации водных объектов. Средства получения, перераспределения и использования трансграничных водных ресурсов объединяются в ВХС, в рамках которой происходит согласование интересов государств, использующих трансграничный водный объект. В случае отсутствия соглашения трансграничная водная система представлена как активная двухуровневая система, в которой продукция производится государствами — элементами ВХС, взаимосвязанными

условиями перемещения и использования водных ресурсов. Пересмотр соглашений описывается рынком разрешений на использование водных ресурсов государствами-участниками. При этом обеспечивается учет особенностей пространственно-распределенных ВХС, функционирующих в стохастических условиях. В обоих случаях удается достичь компромисса (согласование совершенное).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богачева Н.Ю., Хранович И.Л., Чэнь Ци.* Обоснование стратегий рационального использования водных ресурсов в условиях риска // Инженерная экология. 2000. № 6. С. 2–21.
2. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. 255с.
3. *Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л.* Гарантированное водопользование в рыночных условиях // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. №2. С.228–239.
4. *Елаховский С.Б.* Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. М.: Энергия, 1979. 176 с.
5. *Самуэльсон П.* Экономика. М.: Прогресс, 1964. 667 с.
6. *Хранович И.Л.* Транспортная задача на сети с усилением в дугах. Влияние возмущений исходных данных // А и Т. 1979. № 2. С. 90–99.