
**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ***

© 2010 г. В.И. Данилов-Данильян, С.А. Иванков, И.Л. Хранович

(Москва)

Рассмотрен подход к выработке согласованных стратегий использования трансграничных водных ресурсов. Исследуется принцип открытого управления в ситуациях, когда соглашение между государствами об использовании трансграничного водного объекта отсутствует и требуется пересмотреть существующие соглашения. В обоих вариантах достигается совершенное согласование.

Ключевые слова: согласованные стратегии, трансграничные водные ресурсы, открытое управление, соглашение между государствами, международный конфликт.

Водные ресурсы являются одним из основных лимитирующих факторов развития человечества. Ускоренная индустриализация, нарастающие урбанизационные процессы, рост населения в развивающихся странах, глобальное потепление и расширение в связи с этим вероятности засушливых территорий, плачевное состояние внутренней водной инфраструктуры в большинстве сельскохозяйственных районов мира привели к повышенному спросу на воду и, следовательно, росту соперничества 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 таких межгосударственных структурах, как Дунайская, Рейнская, Индская комиссии. Постановления, принимаемые этими структурами (далее будем называть их 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, потребляющих водные ресурсы. Предполагается, что центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений, а водопользователи знают возможные стратегии и принципы стимулирования принятия решений. Открытое управление – вполне реальный процесс, так как такой центр является надгосударственным органом и формируется всеми государствами – пользователями трансграничного водного объекта. В данной работе принцип открытого управления применяется в двух возможных ситуациях разработки стратегий использования трансграничных водных ресурсов:

а) соглашение об использовании трансграничного водного объекта либо отсутствует, либо заключено между частью водопользователей этого объекта;

б) такое соглашение существует, но требует пересмотра.

Анализ этих ситуаций проводится с привлечением 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, где потребности в водных ресурсах согласуются с возможностью их удовлетворения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-06-00078).

ВХС – пространственно распределенная система, функционирующая в стохастических условиях. Оценки этих условий содержат как объективные вероятности, обусловленные стохастической природой речного стока, так и субъективные вероятности, отражающие экспертные оценки возможных условий хозяйственной деятельности.

В данной работе множество 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 определяется местами расположения источников, водохранилищ, соединений рек и каналов, изъятия и возврата воды и т.д., а множество дуг S изображают пользователей, участки рек и каналов. Элементы $\Gamma(J, S)$ обладают собственными параметрами и характеристиками, отвечающими параметрам и характеристикам элементов ВХС. Их взаимодействие описывается как взаимодействие потоков, соответствующих потокам воды.

Поток x_s^ω на входе дуги s моделирует объем воды, поступающий пользователю на участок реки или канала при реализации ω стохастических условий, он связан с потоком, изображающим объем возвращаемой в систему воды $x_s^{k\omega}$, равенством

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

где k_s^ω – неотрицательный коэффициент усиления. Его значение соответствует доле возвращаемого объема воды и не превышает единицу.

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 $\underline{x}_s^\omega$ соответствуют санитарным попускам, требованиям промышленного производства, заданиям по производству сельскохозяйственной продукции, минимальным суходоходным и рыбохозяйственным глубинам и т.п.; ограничения сверху $\bar{x}_s^\omega$ – пропускным способностям и условиям безопасности сооружений, технологическим особенностям использования воды и т.п. Ограничения только на величины входных потоков не нарушают 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 $\underline{x}_s^\omega$ и $\bar{x}_s^\omega$.

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

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

где ограничения снизу $\underline{X}_s$ и сверху $\bar{X}_s$ обусловлены физическими и технологическими возможностями водных ресурсов. Гарантированные потоки на выходах дуг в модели не вводятся, так как они в отличие от потоков, изображающих реальное перемещение воды, принадлежат только моделируемой дуге и из нее не вытекают.

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

ФУНКЦИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты эксплуатации водных ресурсов оцениваются в (Данилов-Данильян, Хранович, 2009) с помощью производственных функций $f_s(X_s, x_s)$, зависящих от гарантированных X_s и текущих объемов водных ресурсов x_s^ω , поступающих пользователям. Они определяют 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 переменным X_s и x_s^ω в силу закона убывающей эффективности (Самуэльсон, 1964), в соответствии с которым с увеличением количества ресурса не возрастает эффективность использования единицы его объема. Однако это не гарантирует вогнутости $f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$ 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 (Елаховский, 1979; Богачева, Хранович, Чэнь, 2000)). 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 эксплуатации водных ресурсов различными пользователями сопоставимы в одних и тех же единицах (для определенности – в рублях):

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

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 эксплуатации водных ресурсов или при наличии соглашений, заключенных между частью водопользователей (при этом интересы некоторых пользователей игнорируются), ВХС рассматривается как активная система. Объектами управления этой системы являются активные элементы, реализующие собственные предпочтения и целенаправленно манипулирующие информацией о своих возможностях, целях и эффективностях.

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

Центр – метаигрок с правом первого хода – управляет ВХС (активная система), назначением стратегии и тем самым влияет на выбор, который делают пользователи (игроки второго уровня). 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 вырабатывает план системы. На третьем этапе элементы выбирают свои состояния. На четвертом определяются достигнутые значения целевых функций элементов и всей ВХС.

В данной работе механизм открытого управления предполагается постоянным. Его изменение требует существенных материальных, временных, трудовых, психологических и других затрат. Инструментами управления являются объемы воды, выделяемые пользователям, и цены на них. Объемы воды находят из решения базовой задачи, описывающей оптимальное функционирование

ние ВХС, а цены определяются двойственными переменными этой задачи. Рассматриваемая в данной работе базовая задача моделирует рациональное использование водных ресурсов.

Базовая задача. Функционирование ВХС представлено двухэтапной задачей стохастического программирования для поиска 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, соответствующие их гарантированным значениям.

Функции эффективности использования водных ресурсов зависят как от переменных, характеризующих 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 принадлежат только своим пользователям. 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. Тактическими переменными (второго этапа), которые определяются при известных реализациях стохастических условий, являются значения потоков, соответствующих реализуемым объемам водных ресурсов.

В базовой задаче D_0 , описывающей оптимальное использование водных ресурсов, определяется вектор потоков X^D, x^D в сети $\Gamma(J, S)$, составляющие которого – вектор гарантированных потоков $X^D = \{X_s^D \mid s \in S\}$ и вектор реализуемых потоков $x^D = \{x_s^{\omega D} \mid s \in S, \omega \in \Omega\}$ – моделируют гарантированное и реализуемое распределение водных ресурсов. Вектор X^D, x^D принадлежит допустимому множеству G , выделяемому ограничениями (2)–(4), и максимизирует функцию цели системы (6).

В решении задачи D_0 наряду с оптимальными значениями гарантированных X^D и текущих объемов 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 возникает как “побочный” результат решения задачи подобно тому, как при решении задач оптимального использования ресурсов в качестве “побочного” результата получаются 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 находится по формуле

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

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, вызванные отклонением объемов потребляемых водных ресурсов от гарантируемого значения. При $P_s > P_s^0$ затраты увеличиваются из-за неполного учета возможностей использования водных ресурсов.

Формируемая задача. Задача D_0 является задачей 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 задача D , отличающаяся от D_0 целевой функцией, которая формируется в виде суммы функций предпочтения $\phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$, сообщаемых элементами-пользователями центру. Функции $\phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$ 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

$$\phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) = f_s^\omega(X_s, x_s^\omega) + \psi_s^\omega(X_s, x_s^\omega).$$

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 являются двухэтапными задачами стохастического программирования. В них стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий, выступают гарантированные значения водных ресурсов X_s . Тактическими переменными второго этапа, которые выбирают при известных реализациях стохастических условий, служат потоки x_s^ω . В этих задачах находят максимум вогнутых функций

$$\phi(X, x) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} \phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$$

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

Оптимальные значения переменных задачи D и двойственной ей связаны соотношениями (Богачева, Хранович, Чэнь, 2000):

$$\begin{aligned} k_s u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} &= \partial \phi_s^\omega(X_s^D, x_s^{\omega D}) / \partial x_s^\omega - \underline{\lambda}_s^{\omega D} + \bar{\lambda}_s^{\omega D}, \\ \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \partial \phi_s^\omega(X_s^D, x_s^{\omega D}) / \partial X_s &= \underline{\Lambda}_s^D - \bar{\Lambda}_s^D, \end{aligned} \quad (8)$$

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

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) являются условиями оптимальности допустимого вектора задачи D , равенства (9) – условиями 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:

$$\begin{cases} \partial \phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) / \partial x_s^\omega \leq k_s u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} & \text{при } x_s^\omega = x_s^{\omega D}; \\ \partial \phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) / \partial x_s^\omega = k_s u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} & \text{при } x_s^\omega < x_s^{\omega D} < \bar{x}_s^\omega; \\ \partial \phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) / \partial x_s^\omega \geq k_s u_j^{\omega D} - u_i^{\omega D} & \text{при } x_s^{\omega D} = \bar{x}_s^\omega, \end{cases} \quad (10)$$

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

и 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 . Пользователи тратят выделенные ресурсы наилучшим образом, для этого они решают свои локальные задачи. Оптимальный режим получается в виде решения задачи наилучшего использования выделенных ресурсов X_s^D, x_s^D :

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

Здесь C_s^D – цена, по которой ресурсы отпускаются элементу s . 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 при помощи оптимальных значений двойственных переменных задач D , удовлетворяющих условиям оптимальности (10), по правилу

$$c_s^{\omega D} = \left[u_i^{\omega D} - k_s^{\omega} u_j^{\omega D} \right] x_s^{\omega} + \left[\underline{\Lambda}_s^D - \overline{\Lambda}_s^D \right] X_s, \quad (12)$$

$$c_s^D = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} c_s^{\omega D}.$$

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 элемент s за единицу водных ресурсов, поступающих ему из вершины i , и ценой $k_s^{\omega} u_j^{\omega D}$, которую платит система элементу s за сброс в вершину j единицы водных ресурсов. Коэффициент k_s^{ω} показывает, какую часть получаемого ресурса элемент возвращает. Выражение во вторых скобках оценивает удельное изменение величины гарантированного объема водных ресурсов. В силу условий дополняющей нежесткости (9) значения $\overline{\Lambda}_s^D$ и $\underline{\Lambda}_s^D$ одновременно не могут быть отличными от нуля.

При выполнении гипотезы слабого влияния (отсутствие монопольного эффекта) назначение цен по правилу (12) приводит к согласованному принятию решений центром и пользователями. Суть гипотезы состоит в том, что, изменяя функцию предпочтения $\phi_s(X_s, x_s)$, сообщаемую центру, пользователь не может существенно повлиять на цену C_s^D . Это происходит вследствие того, что цена определяется двойственными оценками, зависящими от функций предпочтения всех пользователей, на которые пользователь влиять не может (Бурков, 1977). 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, отражающая слабое воздействие отдельного элемента на общие для всей системы показатели управления, обычно выполняется при большом числе элементов. Обоснование справедливости этой гипотезы приведено в (Хранович, 1979) и основано 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).

Равенства и неравенства (10) являются условиями минимума функций

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

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 механизма открытого управления центр выделяет ресурсы каждому элементу в соответствии с решением задачи D , что обеспечивает минимум оценки (13) целевой функции каждого элемента. Предпочтительной стратегией пользователей является сообщение истинных функций затрат. Пользователи будут сообщать центру достоверную информацию об эффективности использования водных ресурсов, т.е. $\phi_s(X_s, x_s) = f_s(X_s, x_s)$.

Таким образом, процедура распределения водных ресурсов в результате решения базовой задачи D и назначения цен за водные ресурсы в соответствии с правилом (12) является механизмом открытого управления, с помощью которого достигается совершенное согласование целей системы с целями всех ее элементов.

Оценка платы за водные ресурсы. Задача D служит инструментом адаптивного управления. Она позволяет выбрать оптимальную стратегию управления X^D и ее корректировки $\Delta x^{\omega D} = x^{\omega D} - X^D$, которые обеспечивают наименьшую потерю эффективности функционирования

ВХС в различных стохастических условиях. Для осуществления выработанной стратегии нужен механизм взаимодействия равноправных участников (центра и элементов-пользователей). Регулятором взаимоотношений между продавцом ресурсов (центром) и покупателями (пользователями) выступают цены за гарантированные поставки водных ресурсов и плата за отклонения от них. Наиболее простой для анализа вариант – жесткая, полностью регулируемая центром монополия, в основе которой лежит решение задачи о “справедливых” ценах, аналогичной задаче D_0 .

Цена C_s^1 , по которой центр “продает” пользователю s выделяемый в соответствии с решением задачи D_0 гарантированный объем 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 – некоторый коэффициент, который определяет часть получаемой пользователем s прибыли, отчисляемой за гарантированное водопользование, $0 \leq \alpha_s < 1$.

Сложнее решить проблему назначения платы за отклонения 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 объемов форвардных контрактов. Этот подход опирается на принцип предельной полезности – оценку 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 единицы. В терминах задачи D_0 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 функций при условии, что отклонения значений поставляемых объемов водных ресурсов от их гарантируемых величин незначительны. Эффективности пользователей $f_s^\omega(X, x^\omega)$ являются вогнутыми нелинейными функциями (Данилов-Данильян, Хранович, 2009). Реализуемые объемы могут намного отличаться от гарантированных величин. При таком подходе потери эффективности, обусловленные дефицитом ресурсов, значительно превосходят компенсацию, получаемую за их недопоставку. Оплата пользователем профицита водных ресурсов будет больше, чем 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 компенсирует пользователю за недопоставку каждой единицы водного ресурса по цене усредненного ущерба:

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

где $[u]^+ = \max\{u; 0\}$,

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

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

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

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

В результате при реализации стохастических условий ω пользователь за излишки водных ресурсов ($\Delta_s^\omega > 0$) платит $\Phi_s^{\omega+}(X_s^D, x_s^\omega) = C_s^+(X_s^D, x_s^D) \Delta x_s^\omega$, а недостаток водных ресурсов ($\Delta_s^\omega < 0$) 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 пользователей использовать излишки водных ресурсов, а систем – минимизировать дефициты этих ресурсов регулирующему органу (центру) можно предложить назначать цены при отклонении объемов поставляемых водных ресурсов от их гарантированных величин по наименьшему шансу и наибольшему ущербу от использования их единицы:

$$\begin{aligned}\overline{C}_s^+(X_s^D, x_s^D) &= \min_{\omega \in \Omega} d_s^\omega(X_s^0, x_s^{\omega 0}) / [x_s^{\omega D} - X_s^D]^+, \\ \overline{C}_s^-(X_s^D, x_s^D) &= \max_{\omega \in \Omega} r_s^\omega(X_s^D, x_s^{\omega D}) / [X_s^D - x_s^{\omega D}]^+.\end{aligned}$$

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 путем назначения цен за ресурсы по правилу (12) при маржиналистском подходе, в данном случае значительно облегчается. Пользователям, не склонным к рискам (а хозяйственные субъекты именно такие), не выгодно искажать информацию об эффективности использования водных ресурсов. Если функции предпочтения, передаваемые в центр, выбрать такими, что $\phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) > f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$, то это может повысить эффективность гарантированного водопользования и связанное с этим использование ресурсов в идеальных условиях. Однако в этом случае отклонения поставляемых ресурсов от их гарантированных значений при реализациях стохастических условий $\omega \in \Omega$ могут привести к ущербам, значительно превышающим “дополнительную” эффективность гарантированного водопользования. Выбор $\phi_s^\omega(X_s, x_s^\omega) < f_s^\omega(X_s, x_s^\omega)$ уменьшает размеры ущербов, однако при этом падает эффективность гарантированного водопользования.

СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ПРИ ПЕРЕСМОТРЕ СОГЛАШЕНИЙ (СИТУАЦИЯ Б)

Соглашения об использовании трансграничных водных ресурсов заключаются на определенный срок. Однако в течение этого срока появляются новые пользователи и закрываются ранее функционировавшие, развивается производство, меняются технология и отношение общества к использованию водных ресурсов. Возникает проблема пересмотра действующих соглашений, решение которой видится в формировании рынка соглашений об использовании водных ресурсов.

Рассмотрим 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. Предположим, что потоки удовлетворяют условиям

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

$$\underline{x}_s^\omega \leq x_s^{\omega 0} \leq \overline{x}_s^\omega, \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad (15)$$

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):

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

$$\underline{x}_s^\omega \leq x_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega \leq \overline{x}_s^{\omega D}, \quad s \in S. \quad (17)$$

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

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

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

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

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

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

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

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 распределенности и возможных потерь воды во фрагментах ВХС пользователь s может получить только $\beta_{sl}^\omega y_{sl}^\omega$ водных ресурсов при покупке у пользователя l величины y_{sl}^ω , где β_{sl}^ω – коэффициент влияния пользователя l на пользователя s . Например, пользователю, расположенному ниже по течению реки, при покупке водных ресурсов у пользователя, расположенного выше по течению, из-за потерь воды “по дороге” достанется только часть купленной им воды. В этом случае хотя бы один из коэффициентов усиления дуг k_s^ω , изображающий участок реки “по дороге”, будет отличен от единицы. А разрешение на потребление водных ресурсов, приобретенное у пользователя, расположенного ниже по течению, даст возможность применить их 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

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

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

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

где $c_{sl}^{\omega+}$ – цена, по которой пользователь s покупает у пользователя l разрешение на использование водных ресурсов; $c_{sl}^{\omega-}$ – цена, по которой пользователь s 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

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

Эти условия означают, что ни одному участнику 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) выполняются как строгие (иначе зачем продавать и покупать!), в ВХС присутствуют “пассивные” пользователи, на эффективность функционирования которых влияют сделки, которые заключают “активные” участники 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. Интересы фонда 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 продаже. Коэффициенты $d_s^{\omega+}$ и $d_s^{\omega-}$ неотрицательны, так как выигрывают продавец и покупатель, и оба пополняют фонды стабилизации и развития.

В согласовании стратегий использования водных ресурсов трансграничного водного объекта участвуют центр, “активные” и “пассивные” участники рынка. 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 обязан проверить возможность таких обменов. Для этого решается задача определения допустимых потоков δ_s^{ω} , которые возникают в результате предполагаемых сделок и должны удовлетворять условиям (18) и (19). Если таких допустимых потоков не существует, 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 им компенсируется снижение эффективности использования водных ресурсов $c_{sl}^{\omega-}$ или которые они должны заплатить за повышение результативности использования водных ресурсов:

$$\begin{aligned} c_s^{\omega-} &= \Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega}) / \delta_s^{\omega-} + \Delta_s^{\omega-}, \\ c_s^{\omega+} &= \Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega}) / \delta_s^{\omega+} - \Delta_s^{\omega+}. \end{aligned} \quad (24)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega-}) &= f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0} + \delta_s^{\omega-}) - c_s^{\omega-} \delta_s^{\omega-}, \\ \Delta f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0}, \delta_s^{\omega+}) &= f_s^{\omega}(X_s^0, x_s^{\omega 0} + \delta_s^{\omega+}) - c_s^{\omega+} \delta_s^{\omega+} \end{aligned} \quad (25)$$

соответствовали требованиям (22). Средства для компенсации потерь эффективности использования водных ресурсов пассивных пользователей формируются из отчислений активных пользователей (эффективность функционирования которых повышается) и средств стабилизационного фонда.

Из всех сделок купли-продажи разрешений на использование водных ресурсов, удовлетворяющих условиям (18) и (19) и требованиям (22) с учетом корректировки функций эффективности (25), выделяется совокупность сделок, в которых отчисления центру оказываются наибольшими. Эта совокупность характеризуется вектором $\delta^{\omega 1} = \{\delta_s^{\omega 1} | s \in S\}$ – решением задачи максимизации функции (23) на выпуклом множестве, выделяемом условиями (18)–(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, а у активных пользователей даже повышаются. Иными словами, 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 использования 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 потокам $x^{\omega 1}$ влечет за собой пересмотр величин гарантированного водопользования X_s , оценивающих объемы водных ресурсов, на которые ориентируются водопользователи. Их значения принадлежат конкретным пользователям и не связаны с другими пользователями. При закрепленных величинах $x_s = x_s^1$ осуществляется переход от X_s^0 к X_s^1 . Значения X_s^1 составляют 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, определяемых 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

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

Неравенства (28) и (30) совместно означают, что эффективность использования водных ресурсов трансграничного водного объекта при переходе от начального 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. Иными словами,

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

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 $f_s^\omega(X_s^1, x_s^{\omega 1})$ могут привести к появлению пользователей, которые стремятся продать или купить разрешения на использование водных ресурсов. В этом случае процедура купли-продажи повторяется с X^1, x^1 так же, как она описана ранее с X^0, x^0 . 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, итерационный процесс рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов сходится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богачева Н.Ю., Хранович И.Л., Чэнь Ц. (2000): Обоснование стратегий рационального использования водных ресурсов в условиях риска // *Инженерная экология*. № 6.
- Бурков В.Н. (1977): Основы математической теории активных систем. М.: Наука.
- Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. (2009): Гарантированное водопользование в рыночных условиях // *Водные ресурсы*. Т. 36. № 2.
- Елаховский С.Б. (1979): Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. М.: Энергия.
- Самуэльсон П. (1964): Экономика. М.: Прогресс.
- Хранович И.Л. (1979): Транспортная задача на сети с усилением в дугах. Влияние возмущений исходных данных // *Автоматика и телемеханика*. № 2.

Поступила в редакцию
10.12.2009 г.

Coordination of Transboundary Water Use Strategies

V.I. Danilov-Danilian, S.A. Ivankov, I.L. Khranovich

The approach to the elaboration of coordinated transboundary water use strategies is analyzed. The principle of open control is investigated in situations when between countries there are no agreements on the transboundary water use or when existing agreements are reconsidered. In both cases the perfect coordination is achieved.

Key words: coordinated strategies, transboundary **water resources**, open control, agreements between countries, international conflict.