

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ,  
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ**

---

---

УДК 556.18:626/628

**ТРАНСГРАНИЧНЫЕ ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОДХОД  
К ИХ РЕШЕНИЮ. 1. ФОРМИРОВАНИЕ СОГЛАШЕНИЙ<sup>1</sup>**

© 2013 г. В. И. Данилов-Данильян, И. Л. Хранович

*Институт водных проблем РАН*

*119333 Москва, ул. Губкина, 3*

*E-mail: khran@bk.ru*

Поступила в редакцию 22.09.2011 г.

Рассмотрены конфликтные ситуации трансграничного водопользования и связанные с ними проблемы согласования интересов пользователей, претендующих на ресурсы трансграничных водных объектов. Предложены и обоснованы механизмы согласования интересов государств, использующих трансграничные водные объекты при отсутствии соглашений о совместных стратегиях управления. Согласование осуществляется с учетом количественных и качественных показателей водных ресурсов в стохастических условиях.

*Ключевые слова:* водный ресурс, трансграничный водный объект, водохозяйственная система, активная система, риск, шанс, несовершенная конкуренция, двухэтапная стохастическая задача, согласующая цена

DOI: 10.7868/S0321059613030036

### ПРОБЛЕМА

Водные ресурсы – один из основных лимитирующих факторов развития человечества. Исторически сложилось так, что человечество в первую очередь осваивало плодородные долины в нижнем течении рек, используя их в качестве основного источника водных ресурсов для орошения. Здесь создавались государства, которые закрепляли за собой право на эти водные ресурсы. Интересы малочисленного населения, проживающего на территории среднего течения и верховий рек, не принимались во внимание. С ростом населения и образованием государств в этих частях бассейнов рек возникла потребность в освоении своих водных ресурсов. Вода Нила вначале использовалась, в основном, Египтом, расположенным в его низовье. Затем к нему “присоединился” расположенный в среднем течении Судан. В настоящее время на водные ресурсы Нила претендуют расположенные выше по течению Эфиопия, Эритрея, Руанда, Уганда, Бурунди, Танзания и Демократическая республика Конго.

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.

Для ряда стран дефицит пресной воды стал реальным ограничителем экономического роста, причиной усиления нищеты и социальной напряженности. Проблемы использования трансграничных рек Ближнего и Среднего Востока (региона преимущественно пустынного с незначительным количеством осадков и быстро растущим населением): Иордана, Нила, Тигра, Евфрата – уже оказывались причиной весьма серьезных разногласий между странами. Серьезные разногласия возникают также при использовании трансграничных рек водообеспеченных регионов, таких как Амур и Дунай, из-за рисков и угроз, обусловленных загрязнением вод и хозяйственной деятельностью на водосборе. Приведенный список имеет тенденцию к расширению за счет Ганга, Брахмапутры, Нигера, Лимпопо, Меконга, Сенегала, Замбези, Иртыша, Куры, Амударьи, Сырдарьи, Аракса. Подобные разногласия акти-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-06-00002).

визируются при любом обострении межгосударственных отношений, если имеется хотя бы малейший повод вспомнить о дефиците воды.

Отметим четыре типа географических ситуаций, чреватых конфликтами по поводу водных объектов и ресурсов пресной воды.

Во-первых, граница двух государств может проходить по водоразделу. В этом случае водообеспеченность по двум сторонам водораздела редко бывает одинаковой, что дает повод говорить о “неравномерности” распределения водных ресурсов. Если же на одном склоне имеется дефицит воды, а на другом он отсутствует, то обычно возникает желание исправить природную “несправедливость”. Для удовлетворения такого желания известно два способа: захват части водообеспеченной территории посредством применения военной силы и перераспределение стока путем переброски того или иного количества воды через водораздел. Перераспределение стока (даже внутри одного бассейна, например в случае канала им. Москвы) обходится чрезвычайно дорого. Кроме того, в случае трансграничной переброски необходимо строить гидротехнические сооружения на чужой территории, а это не только дополнительные затраты, но и трудные, длительные переговоры. Применение военной силы кажется многим государственным деятелям (прежде всего в развивающихся странах) более доступным по требуемым ресурсам – вопреки урокам истории. Стремление идти таким путем, кроме того, подогревается надеждой заодно решить и какие-либо иные, не только водные проблемы.

Во-вторых, достаточно часто граница двух государств проходит по реке (например, русло р. Амур на протяжении более 1000 км служит природной границей между Россией и Китаем). В этом случае для споров по поводу водопотребления (то есть забора свежей воды из водного объекта) особых причин нет, зато регулярно возникают конфликты из-за водопользования, прежде всего это касается согласования правил судоходства, рыбной ловли, гидротехнического строительства, сброса загрязнений. Резкие обострения конфликтов такого рода случаются нечасто, зато разногласия из-за принадлежности речных островов (разновидность пограничных территориальных споров) нередко приводят к вооруженным столкновениям, но к собственно водным проблемам они имеют лишь опосредованное отношение. Существенно то, что отношения между странами, расположенными на разных берегах трансграничного водотока, в принципе как бы симметричны – в том смысле, что воздействия на водный объект, осу-

ществляемые одной страной, как правило, доступны и другой стране. Отсюда не следует, что реальные воздействия одинаковы или хотя бы близки. Если водосборные территории по разным берегам реки существенно различаются по физико-географическим характеристикам, то это и вовсе невозможно.

В-третьих, специфическая ситуация характерна для международных озер (в частности, на ресурсы Каспия претендуют Россия, Азербайджан, Казахстан, Туркмения и Иран). Все причины для разногласий, встречающиеся в случае пограничных рек, имеют место и в данном случае, однако добавляется и новая причина. Она связана с разведкой и добычей полезных ископаемых, месторождения которых расположены под дном озера. Встает проблема принадлежности таких месторождений, “разделения дна” между государствами, владеющими частями побережья. Некой симметрии, характерной для предыдущего случая, уже нет хотя бы потому, что межгосударственные границы обычно делят побережье на неравные и неравноценные части.

В-четвертых, самая распространенная географическая ситуация, провоцирующая возникновение коллизий по поводу водных ресурсов, – пересечение рекой государственной границы (Днепр, берущий начало в России, пересекает границу с Белоруссией и границу Белоруссии с Украиной). Страна, расположенная выше по реке (“верхняя”), имеет два весьма существенных преимущества перед страной, на территорию которой водоток приходит, миновав границу (“нижней”). Одно из них определяется тем, что загрязнения распространяются вниз по течению и ущерб от сбросов “верхней” страны терпит не имеющая к ним никакого отношения “нижняя” страна. Первая экономит на природоохранных затратах и получает за счет этого конкурентные преимущества, вторая расплачивается за чужую экономию, поскольку несет дополнительные издержки на подготовку воды для коммунального сектора, а также промышленности и сельского хозяйства, недополучает доходы от рыбной ловли и т.п. Другое преимущество “верхнего” государства состоит в том, что, забирая из реки воду, оно уменьшает часть стока, доступную для использования в “нижнем” государстве. В принципе можно и полностью “зарегулировать” сток, так что на выходе останется только сухое русло (во всяком случае, до того пункта, начиная с которого формируется сток с части водосборной территории, расположенной ниже границы). В ответ как на загрязнение реки, так и на регулирование стока “нижняя” страна не в состоянии воздействовать на этот водный объ-

ект, ее реакция может проявиться только в какой-либо другой сфере.

Разрешение конфликтных ситуаций, связанных с использованием трансграничных водных объектов, происходит в образуемых трансграничными государствами 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. Компромисс, если он удастся, достигается в результате неформализованного переговорного процесса. Формализованные механизмы согласования интересов государств, использующих трансграничные водные объекты, отсутствуют.

Так как центр – надгосударственный орган – создается всеми государствами, использующими ресурсы трансграничных водных объектов, то процедуры формирования согласованных стратегий использования водных ресурсов принципиально могут быть только открытыми. Это означает, что центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений, а водопользователи знают возможные стратегии и принципы стимулирования принимаемых решений. Предлагаемые в данной статье механизмы согласования интересов государств при решении трансграничных проблем рассматриваются для двух следующих возможных ситуаций:

А – соглашение об использовании трансграничного водного объекта либо отсутствует, либо заключено между частью водопользователей этого объекта;

Б – такое соглашение существует, требуется пересмотр.

Предлагаемые механизмы согласования водохозяйственных интересов в этих ситуациях являются обобщением результатов, представленных в [6], для случая согласования использования трансграничными пользователями объемов водных ресурсов в статической постановке. В настоящей работе согласование интересов трансграничных водопользователей, объединенных водохозяйственной сетью, осуществляется с учетом количественных и качественных показателей водных ресурсов как в статической, так и в динамической постановке (в дискретном времени).

Работа представлена в виде двух взаимосвязанных частей. В первой части, составляющей содержание настоящей статьи, рассмотрены механизмы согласования интересов трансграничных государств при отсутствии соглашений (ситуация А). Во второй части, подготовленной к публикации,

представлены механизмы пересмотра соглашений (ситуация Б) и согласование интересов трансграничных водопользователей в дискретном времени.

Согласование интересов трансграничных водопользователей при отсутствии соглашения происходило в предположении, что справедлива гипотеза слабого влияния (отсутствует монопольный эффект), отражающая незначительное воздействие отдельных элементов на общие для всей системы показатели управления [6]; при большом числе элементов эта гипотеза обычно выполнена. Отсутствие монопольного эффекта в системе дает возможность пользователям выбирать стратегии, руководствуясь своими интересами, независимо от поведения других элементов (конкуренция совершенная). Центр, пользуясь такой особенностью водохозяйственной системы (ВХС), добивается совершенного согласования своих целей и целей пользователей [6]. В данной работе такое предположение не используется.

В действительности возможны ситуации, в которых гипотеза слабого влияния не выполнена. Монопольный эффект проявляется обычно в ВХС, включающих небольшое число пользователей. Трансграничные ВХС, как правило, именно такие. Государства, претендующие на водные ресурсы трансграничных объектов, могут влиять на показатели управления, общие для всей системы, в частности на цены за водные ресурсы. Конкуренция среди немногих (олигополия/олигополия) заставляет пользователей ориентироваться на предполагаемые стратегии поведения других участников (конкуренция несовершенная). Общая теория несовершенной конкуренции отсутствует. Рассматриваются отдельные модели-схемы поведенческих ситуаций. В модели олигополии Курно фирмы конкурируют, выбирая объемы производства, цены устанавливает рынок [15]. В модели Бертрана фирмы назначают цены, оставляя рынку возможность определять объемы производимой продукции [14]. В модели Штаккельберга предполагается существование ведущей фирмы, которая первой устанавливает объем своего производства, остальные фирмы ориентируются на нее [17]. Водопользователи – суверенные государства в процессе конкурентного согласования стратегий использования трансграничного водного объекта могут руководствоваться любыми моделями-схемами. Набор предполагаемых стратегий поведения конкурентов непредсказуем. Это означает, что согласование интересов трансграничных водопользователей с использованием отдельных моделей-схем конкурентного поведения (или их комбинаций) – более чем про-

блематично. Для выработки стратегий управления трансграничными водными объектами требуется другой подход.

В ситуациях конкурентного согласования интересов участники прилагают усилия для обеспечения себе условий наилучшего использования ресурсов. При этом они стремятся минимизировать свой риск и не упустить шанс. Однако во всех моделях согласования, описывающих как совершенную, так и несовершенную конкуренции, риск и шанс в явном виде не представлены. Начиная с работ Курно и Бертрана в моделях согласования незримо присутствует концепция “вначале требуется разработать механизмы разрешения конфликтов в детерминированных условиях, а затем можно будет переходить к более общим ситуациям, в частности к согласованию интересов в условиях порождающей риски и шансы стохастической неопределенности”. Этот принцип “от простого к сложному” вошел в противоречие с необходимостью учета всех существенных факторов исследуемого процесса. В рамках детерминистского подхода невозможно формализованное представление рисков и шансов и, следовательно, нереально ожидать появления “общей теории” согласования конкурирующих субъектов.

В данной работе согласование интересов конкурирующих субъектов рассматривается применительно к стохастическим условиям. Использование, наряду со значениями реальных показателей водных ресурсов, величин их ориентиров – гарантированных значений этих показателей – дало возможность оценивать риски и шансы в виде функций, значения которых зависят от принимаемых решений. Это привело к построению более общей, чем ранее рассматривалось, модели разрешения конфликтных проблем, возникающих при использовании несколькими субъектами общих ресурсов.

Развиваемый далее подход свободен от необходимости ориентироваться на предполагаемые стратегии поведения конкурентов. Согласование интересов трансграничных водопользователей основывается на теоретико-игровом подходе, методологии активных систем [2], принципе открытого управления и учете особенностей поступления и эффективности использования водных ресурсов. Центральное место занимают зависимости результатов водопользования (производственные функции) как от объемов водных ресурсов и масс содержащихся в них примесей, используемых в различных стохастических условиях, так и от их ориентиров. Построенные математические модели основаны на естественном представлении вод-

ных объектов в виде сети с потоками, соответствующими потокам воды и примесей.

### ПОТОКОВАЯ СТРУКТУРИЗАЦИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Средства получения, перераспределения и использования трансграничных водных ресурсов объединяются в ВХС – водный инфраструктурный комплекс, согласующий потребности в водных ресурсах с возможностью их удовлетворения. ВХС – пространственно распределенная система, функционирующая в стохастических условиях, оценки которых включают в себя 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  $\Omega$  представлено конечным числом элементов  $\omega$ . ВХС изображается сетью  $\Gamma(J, S)$ , геометрическое начертание которой согласуется со схематическим изображением моделируемой системы. Вершины (множество  $J$ ) соответствуют местам расположения источников, водохранилищ, соединений рек и каналов, изъятия и возврата воды и т.д. Дуги (множество  $S$ ) изображают пользователей, 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 и примесей. Вначале рассматривается функционирование в статической постановке, затем полученные результаты переносятся на управление ВХС с учетом динамики в дискретном времени. Оптимальное функционирование ВХС описывается задачами определения оптимальных потоков в  $\Gamma(J, S)$ .

Функционирование ВХС описывается двухэтапными задачами стохастического программирования, в которых в качестве переменных величин, наряду с потоками, изображающими реальные объемы воды и масс примесей, включены потоки, изображающие их гарантированные значения. В отличие от реальных потоков, которые удовлетворяют системе уравнений неразрывности в вершинах  $\Gamma(J, S)$ , гарантированные потоки – виртуальные переменные, соотношенные только соответствующим водопользователям. Они соответствуют объемам водных ресурсов и масс примесей, на которые ориентируются пользователи при проведении необходимых подготовительных работ и планировании использования других не-

водных ресурсов. В базовых задачах они играют роль стратегических переменных (первого этапа), выбираемых при неизвестных конкретных реализациях стохастических условий. Тактическими переменными (второго этапа), определяемыми при известных реализациях стохастических условий, являются значения потоков, соответствующих реализуемым объемам водных ресурсов и массам примесей.

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

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

с неотрицательным коэффициентом усиления  $k_s^\omega$ . 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

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

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

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

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

с ограничениями снизу  $\underline{Y}_s$  и сверху  $\bar{Y}_s$ , обусловленными физическими и технологическими возможностями использования водных ресурсов. Гаран-

тированные потоки на выходах дуг в модели не вводятся, так как они, в отличие от потоков, изображающих реальное перемещение воды, соответствуют ориентировочным значениям и принадлежат только моделируемой дуге и из нее не “вытекают”.

В модели включаются потоки, имитирующие массы примесей на входах  $x_{sl}^\omega$  и выходах  $z_{sl}^\omega$  дуг. Вместе с ними вводятся переменные  $X_{sl}$  и  $Z_{il}$ , соответствующие их гарантированным величинам. Переменные  $X_{sl}$  и  $Z_{il}$ , в отличие от переменных  $x_{sl}^\omega$  и  $z_{sl}^\omega$ , которые могут принимать различные значения при различных исходах стохастических условий, принимают одни и те же значения при всех  $\omega \in \Omega$ . Множество видов примесей  $L$  – конечно,  $l \in L$ .

Описание сложных процессов переноса и трансформации примесей аппроксимируется системой линейных дифференциальных уравнений [3, 18]. Из решения этой системы получается следующая зависимость между потоками примесей на входах и выходах дуг, образующих множество  $S_1$  и изображающих в модели пользователей без очистных сооружений, участки рек и каналов:

$$z_{sl}^\omega - \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma\omega} x_{s\gamma}^\omega = 0, \quad s \in S_1 \subset S, \quad (4)$$

где  $A_s^{\gamma\omega}$  – коэффициенты, характеризующие перенос и преобразование примесей.

Функциональная связь типа (4) между потоками примесей на входах и выходах дуг, образующих множество  $S_{11} = S/S_1$  и изображающих пользователей с очистными сооружениями, отсутствует. В зависимости от режимов функционирования очистных сооружений при одних и тех же значениях  $x_s^\omega = \{x_{sl}^\omega | l \in L\}$  могут быть получены различные значения  $z_s^\omega = \{z_{sl}^\omega | l \in L\}$ . Потоки  $x_s^\omega$  и  $z_s^\omega$  дуг множества  $S_{11}$  взаимосвязаны с затратами на очистку воды.

Взаимосвязи между потоками  $X_s = \{X_{sl} | l \in L\}$  и  $Z_s = \{Z_{sl} | l \in L\}$ , моделирующими гарантированные величины масс примесей, поступающих пользователям без очистных сооружений, на участки рек и каналов и отводимых от них, отсутствуют. Их значения не столько соответствуют реальным величинам масс примесей, сколько являются ориентирами, на которые рассчитывают пользователи. Потоки  $X_s$  и  $Z_s$  пользователей с очистными сооружениями взаимосвязаны с затратами, производимыми в процессе очистки воды.

Требования, предъявляемые к качеству водных ресурсов, задаются в виде ограничений на вели-

чины масс примесей в водоемах и на их гарантированные значения. Множество видов примесей  $L$  делится по лимитирующим показателям на подмножества  $L_v$ , такие, что их объединение  $\bigcup_v L_v = L$ . Примеси множеств  $L_v$  образуют  $v$ -тые дозы загрязнений, величины которых не должны превышать единицы [12]. В терминах потоков это означает, что на входе  $s$ -й дуги

$$\sum_{l \in L_v} d_{sl} x_{sl}^\omega - y_s^\omega \leq 0, \quad s \in S, \quad (5)$$

где  $d_{sl}$  – величина, обратная предельно допустимой концентрации  $l$ -й примеси в  $s$ -м элементе. Требования к качеству воды, возвращаемой в ВХС, задаются такими же условиями:

$$\sum_{l \in L_v} d_{sl}^k z_{sl}^\omega - y_s^{k\omega} \leq 0, \quad s \in S. \quad (6)$$

Условия (5) и (6) предъявляют более жесткие требования к качеству водных ресурсов, чем превышение значениями концентраций примесей  $n_{sl}^\omega = x_{sl}^\omega / y_s^\omega$  и  $n_{sl}^{k\omega} = z_{sl}^\omega / y_s^{k\omega}$  предельно допустимых значений  $\bar{n}_{sl}$  и  $\bar{n}_{sl}^k$  всех примесей порознь. Из этих условий в силу неотрицательности  $n_{sl}^\omega$  и  $n_{sl}^{k\omega}$  следует, что концентрации  $n_{sl}^\omega$  и  $n_{sl}^{k\omega}$ , удовлетворяющие условиям (5) и (6), удовлетворяют также неравенствам  $n_{sl}^\omega \leq \bar{n}_{sl}$  и  $n_{sl}^{k\omega} \leq \bar{n}_{sl}^k$ . Обратное, вообще говоря, неверно. На величины потоков  $x_{sl}^\omega$  и  $z_{sl}^\omega$  накладываются также ограничения снизу:

$$x_{sl}^\omega \geq \underline{x}_{sl}^\omega, \quad z_{sl}^\omega \geq \underline{z}_{sl}^\omega, \quad s \in S, \quad l \in L, \quad (7)$$

которые отражают технологические особенности функционирования элементов ВХС, в частности максимально возможные степени очистки сточных вод.

Диапазоны возможных значений показателей гарантированного качества водных ресурсов задаются в виде ограничений, аналогичных (5)–(7), на потоки, соответствующие гарантированным значениям масс примесей в водоемах:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_s - \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl} X_{sl} \leq 0, \quad \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl} X_{sl} - \bar{Y}_s \leq 0, \\ \underline{Y}_s^k - \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl}^k Z_{sl} \leq 0, \quad \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl}^k Z_{sl} - \bar{Y}_s^k \leq 0, \quad s \in S, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\tilde{d}_{sl}$  и  $\tilde{d}_{sl}^k$  – неотрицательные коэффициенты, отражающие взаимосвязи технологий использования воды с гарантированными величинами масс содержащихся примесей.

Законы сохранения масс водных ресурсов и содержащихся в них примесей в моделях пред-

ставлены в виде систем уравнений неразрывности потоков в вершинах сети:

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega y_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} y_s^\omega + b_{i0}^\omega = 0, \quad (9)$$

$$\sum_{s \in S_i^+} x_{sl}^\omega - \sum_{s \in S_i^-} z_{sl}^\omega + b_{il}^\omega = 0, \quad i \in J, \quad \omega \in \Omega, \quad l \in L, \quad (10)$$

где  $S_i^+$  – множество дуг, заходящих в  $i$ -тую вершину;  $S_i^-$  – множество дуг, исходящих из нее;  $b_{i0}^\omega$  – поток  $i$ -й вершины, моделирующий фиксированный объем водных ресурсов, при  $b_{i0}^\omega \geq 0$  – поступающих в  $i$ -тую вершину, при  $b_{i0}^\omega \leq 0$  – изымаемых из нее;  $b_{il}^\omega$  – поток  $l$ -й примеси, поступающей в  $i$ -тую вершину. В системе уравнений (9) учтены условия (1).

Так как вместе с водой пользователям, на участки рек и каналов поступают также примеси, причем их концентрации совпадают с концентрациями примесей в створах ВХС, в вершинах сети  $\Gamma(J, S)$  должны быть выполнены условия:

$$\begin{aligned} B_{il}^\omega = x_{sl}^\omega y_s^\omega - x_{sl}^\omega y_s^\omega = x_{sl}^\omega / y_s^\omega - x_{sl}^\omega / y_s^\omega = 0, \\ s, \hat{s} \in S_i^-, \quad i \in J, \quad \omega \in \Omega, \quad l \in L, \end{aligned} \quad (11)$$

означающие требование совпадения соотношений между концентрациями разнородных потоков на входах дуг, исходящих из одной вершины.

### ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ

Результативность функционирования элементов ВХС, которые в модели изображаются дугами, характеризуется функциями затрат  $f_s(W_s)$ . Аргументами этих функций являются векторы  $W_s = (Y_s, X_s, Z_s, y_s, x_s, z_s)$ ;  $y_s = \{y_s^\omega | \omega \in \Omega\}$ ;  $x_s = \{x_s^\omega | \omega \in \Omega\}$  и  $z_s = \{z_s^\omega | \omega \in \Omega\}$ . Функции  $f_s(W_s)$  включают издержки на получение, доставку и очистку воды, а также затраты, обусловленные отклонением количества и качества предоставляемых элементам водных ресурсов от наиболее выгодных значений, а также вызванные снижением выработки продукции, объема перевозок, эффекта от предотвращения вредного воздействия вод и т.п. В функциях  $f_s(W_s)$  учитывается также эффект от использования водных ресурсов, который входит в них в виде слагаемых с отрицательным знаком. Они образуют функцию затрат всей трансграничной ВХС, которая складывается из производственных функций ее элементов в предположении, что эффекты от использования водных ресур-

сов различными пользователями сопоставимы в одних и тех же единицах:

$$f(W) = \sum_{s \in S} f_s(W_s) = \sum_{s \in S} f_s(V_s, v_s), \quad (12)$$

где  $V_s = Y_s, X_s, Z_s, v_s = y_s, x_s, z_s$ .

Функции затрат элементов оценивают математическое ожидание затрат, производимых в различных стохастических условиях:

$$f_s(W_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f_s^\omega(W_s) = \sum_{s \in S} \left[ f_s^1(V_s) + \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f_s^{2\omega}(V_s, v_s^\omega) \right],$$

где  $p^\omega$  – вероятность реализации стохастических условий  $\omega$ , векторы:  $V_s = Y_s, X_s, Z_s$  и  $v_s^\omega = y_s^\omega, x_s^\omega, z_s^\omega$ .

Функции  $f_s^1(V_s)$  описывают затраты, связанные с использованием гарантированных объемов водных ресурсов гарантированного качества. Зависимости  $f_s^{2\omega}(V_s, v_s^\omega)$ , обычно называемые функциями ущербов, описывают затраты в элементах ВХС, вызванные отклонением показателей реализуемых режимов от гарантированных величин.

Свойства функций  $f_s^\omega(W_s^\omega)$  рассмотрены в [7]. Они выпуклы по каждому из переменных  $Y_s, X_{sl}, Z_{sl}, y_s^\omega, x_{sl}^\omega, z_{sl}^\omega$  в силу закона об убывающей эффективности [11], в соответствии с которым с увеличением количества водных ресурсов у пользователя падает эффективность использования единицы их объема и с ростом степени их очистки растут удельные затраты на доочистку. Это не означает выпуклость  $f_s^\omega(W_s^\omega)$  по их совокупности. Тем не менее, все известные функции  $f_s^\omega(w_s^\omega) = f_s^\omega(Y_s, y_s^\omega)$  – частные случаи функций  $f_s^\omega(W_s^\omega)$ , которыми оценивается эффективность использования водных ресурсов без учета их качества, – выпуклы по совокупности переменных  $Y_s, y_s^\omega$ , образующих вектор  $w_s^\omega$  (например, описанные в [1] и [8]).

Эффективность использования водных ресурсов с учетом их качества зависит от соотношений между различными примесями, содержащимися в воде. Также функционально взаимосвязаны степени очистки различных примесей в очистных сооружениях. Вводятся комплексы примесей  $\bar{X}_s, \bar{Z}_s, \bar{x}_s^\omega$  и  $\bar{z}_s^\omega$ :

$$\begin{aligned} \bar{X}_s &= \sum_{l \in L} \bar{\sigma}_{sl} X_{sl}, & \bar{Z}_s &= \sum_{l \in L} \bar{\delta}_{sl} Z_{sl}, & \bar{x}_s^\omega &= \sum_{l \in L} \sigma_{sl} x_{sl}^\omega, \\ & & & & \bar{z}_s^\omega &= \sum_{l \in L} \delta_{sl} z_{sl}^\omega, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\bar{\sigma}_{sl}, \sigma_{sl}, \bar{\delta}_{sl}$  и  $\delta_{sl}$  – коэффициенты, показывающие значимость  $l$ -й примеси в комплексе. Их введение сокращает число аргументов функций затрат элементов  $f_s^\omega(W_s^\omega) = \bar{f}_s^\omega(\bar{W}_s^\omega) = \bar{f}_s^\omega(Y_s, \bar{X}_s, \bar{Z}_s, y_s^\omega, \bar{x}_s^\omega, \bar{z}_s^\omega)$ . Характер зависимостей  $\bar{f}_s^\omega(\bar{W}_s^\omega)$  от  $\bar{X}_s, \bar{Z}_s, \bar{x}_s^\omega, \bar{z}_s^\omega$ , описывающих содержание масс примесей в водных ресурсах, при фиксированных величинах  $w_s^\omega = Y_s, y_s^\omega$  пока не установлен. По аналогии с зависимостями  $f_s^\omega(w_s^\omega)$  можно полагать функции  $\bar{f}_s^\omega(\bar{W}_s^\omega)$  выпуклыми по совокупности переменных  $\bar{X}_s, \bar{Z}_s, \bar{x}_s^\omega, \bar{z}_s^\omega$  при фиксированных величинах  $\bar{w}_s^\omega$ . Для дуг множества  $S_I$  достаточно выпуклости только по одной из групп переменных  $\bar{X}_s, \bar{x}_s^\omega$  или  $\bar{Z}_s, \bar{z}_s^\omega$ . Линейные соотношения (4) и (14) в этом случае обеспечивают выпуклость  $\bar{f}_s^\omega(\bar{W}_s^\omega)$  по совокупности  $\bar{X}_s, \bar{Z}_s, \bar{x}_s^\omega, \bar{z}_s^\omega$ . Для дуг множества  $S_{II}$  достаточно выпуклости по группам переменных  $\bar{X}_s, \bar{x}_s^\omega$  и  $\bar{Z}_s, \bar{z}_s^\omega$  порознь. Комплексы  $\bar{X}_s, \bar{x}_s^\omega$  описывают массы примесей, поступающих пользователям. С ними связаны затраты на водоподготовку. Комплексы  $\bar{Z}_s, \bar{z}_s^\omega$  соответствуют массам примесей после очистки, их значения определяют затраты на нее.

#### СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ СОГЛАШЕНИЯ (СИТУАЦИЯ А)

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. Объектами управления для него являются активные элементы, реализующие собственные предпочтения, целенаправленно манипулируя информацией о своих возможностях, целях и эффективности. Центр влияет на эффективность функционирования элементов назначением показателей водопользования и водоотведения. 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, управляет ВХС — активной системой — назначением стратегии и тем самым влияет на выбор игроками второго уровня (пользователями) своих состояний. Центр использует 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 существенных материальных, временных, трудовых, социально-психологических и других затрат.

Инструментами управления являются объемы воды, выделяемые пользователям, и массы примесей, отводимых ими в водные объекты, а также цены за эти ресурсы. Величины объемов воды и масс примесей, а также цены определяются в результате решения базовой задачи, описывающей функционирование ВХС.

Рассматриваются три варианта согласования интересов трансграничных водопользователей и соответствующие им базовые задачи: рациональное использование водных ресурсов (без явного учета его качества), управление качеством водных ресурсов (в предположении, что их количественные показатели фиксированы) и совместное управление количеством и качеством водных ресурсов.

### РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Базовая модель рационального использования водных ресурсов описывается задачей  $D_0$  определения вектора потоков  $w^0 = Y^0, y^0$ , составляющие которого — вектор гарантированных потоков  $Y^0 = \{Y_s^0 | s \in S\}$  и вектор реализуемых потоков  $y^0 = \{y_s^{00} | s \in S, \omega \in \Omega\}$ . На векторе  $w^0$  достигается минимум функции

$$f(w) = \sum_{s \in S} f_s(w_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} f_s^\omega(w_s^\omega),$$

оценивающей затраты, связанные с функционированием ВХС без учета качества водных ресурсов. Функция  $f(w)$  — частный случай функции  $f(W)$ . В ней отсутствуют переменные  $X, Z, x, z$ ,

“ответственные” за качество водных ресурсов. Вектор  $w^0$  принадлежит множеству  $G_D$ , выделяемому условиями (2), (3) и (9). Этим вектором описывается оптимальное распределение водных ресурсов в ВХС.

Задача  $D_0$  является задачей центра, которую он должен был бы решать, если бы ему были известны истинные функции затрат элементов  $f_s^\omega(w_s^\omega)$ . Однако вместо задачи  $D_0$  решается некоторая другая задача  $D$ , отличающаяся от  $D_0$  целевой функцией, которая формируется в виде суммы функций предпочтения  $\varphi_s^\omega(w_s^\omega)$ , сообщаемых элементами центру. Функции  $\varphi_s^\omega(w_s^\omega)$  выпуклые, так же как  $f_s^\omega(w_s^\omega)$ . Они должны правдоподобно характеризовать эффективность использования водных ресурсов. Их удобно представить в виде  $\varphi_s^\omega(w_s^\omega) = f_s^\omega(w_s^\omega) + \psi_s^\omega(w_s^\omega)$ . Функции  $\psi_s^\omega(w_s^\omega)$  оценивают искажение информации, сообщаемой элементами об эффективности их функционирования. Семейство задач  $\{D\}$  включает в себя также задачу  $D_0$ , в которой  $\psi_s^\omega(w_s^\omega) \equiv 0$ .

Задачи  $D$  — двухэтапные стохастического программирования. В них стратегическими переменными первого этапа, выбираемыми при неизвестных конкретные реализации стохастических условий, выступают потоки  $Y_s$ , соответствующие гарантированным значениям объемов водных ресурсов. Tактическими переменными второго этапа, выбираемыми при известных реализациях стохастических условий, являются потоки  $y_s^\omega$ , моделирующие величины реализуемых объемов водных ресурсов. В этих задачах ищется минимум выпуклых функций

$$\varphi(w) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} \varphi_s^\omega(w_s^\omega)$$

на выпуклом множестве  $G_D$ , выделяемом линейными ограничениями (2), (3) и (9).

Центр распределяет водные ресурсы в соответствии с решением задачи  $D$ . Элементы используют выделенные им ресурсы. Оптимальные режимы элементов получаются в результате решения задач наилучшего использования выделенных ресурсов  $w^D$ , в которых минимизируются функции затрат элементов

$$f_s(w) + C_s^D, \quad s \in S. \tag{14}$$

Здесь  $C_s^D$  — цена, по которой вода отпускается  $s$ -му элементу. Назначением цен  $C_s^D$  центр добивается согласования решений, принимаемых от-



дельными элементами для достижения целей ВХС — решения исходной задачи  $D_0$ .

### УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

В согласовании интересов центра и пользователей при управлении качеством водных ресурсов реализуется тот же принцип открытого управления, что и при рациональном их использовании. Отличие состоит в присутствии в базовой модели разнородных взаимодействующих потоков, соответствующих различным видам примесей.

Базовая модель управления качеством водных ресурсов описывается задачей  $E_0$  определения вектора потоков  $Q^0 = X^0, Z^0, x^0, z^0$ , составляющие которого — векторы, соответствующие гарантированным величинам масс примесей на входах и выходах дуг  $X^0 = \{X_{sl}^0 | l \in L, s \in S\}$ ,  $Z^0 = \{Z_{sl}^0 | l \in L, s \in S\}$  и их реализуемым значениям  $x^0 = \{x_{sl}^{\omega} | l \in L, s \in S, \omega \in \Omega\}$ ,  $z^0 = \{z_{sl}^{\omega} | l \in L, s \in S, \omega \in \Omega\}$ . На векторе  $Q^0$  достигается минимум функции

$$f(Q) = \sum_{s \in S} f_s(Q) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} f_s^{\omega}(Q_s^{\omega}),$$

оценивающей затраты, связанные с обеспечением требуемого качества водных ресурсов в предположении, что объемы используемых водных ресурсов фиксированы. Функция  $f(Q)$  — частный случай функции  $f(W)$ , описанной формулой (12). В ней отсутствуют переменные  $Y, y$ , моделирующие количество водных ресурсов. Вектор  $Q^0$  принадлежит множеству  $G_{E_0}$ , выделяемому условиями (4)–(8), (10) и (11). Важно отметить, что в данной модели в ограничениях типа равенств (11) величины  $y_s^{\omega}$  и  $y_s^0$  фиксированы, они выступают в роли положительных коэффициентов при  $x_{sl}^{\omega}$  и  $x_{sl}^0$ , поэтому функция  $B_{il}^{\omega}(x_l^{\omega}, y^{\omega})$  принимает вид  $B_{il}^{\omega}(x_l^{\omega})$ . Это предопределяет линейность ограничений (11) в задаче  $E_0$ . Вектором  $Q^0$  описывается оптимальное содержание примесей в воде и, следовательно, ее качество.

Центр заинтересован в решении задачи  $E_0$ . Однако информацией об истинных функциях затрат элементов  $f_s^{\omega}(Q_s^{\omega})$  он не обладает. Ему известны функции предпочтения, сообщаемые элементами:  $\varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega}) = f_s^{\omega}(Q_s^{\omega}) + \psi_s^{\omega}(Q_s^{\omega})$ . Функции  $\varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega})$  выпуклые. Они так же, как  $f_s^{\omega}(Q_s^{\omega})$ , должны правдоподобно оценивать затраты, связанные с использованием водных ресурсов и их очисткой.

Вместо задачи  $E_0$  центр решает некоторую другую задачу  $E$ , допустимое множество которой  $G_E$  совпадает с допустимым множеством задачи  $E_0$ , а в качестве целевой выступает функция

$$\varphi(Q) = \sum_{s \in S} \varphi_s(Q_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} \varphi_s^{\omega}(Q_s^{\omega}).$$

Семейство задач  $\{E\}$  включает в себя также задачу  $E_0$ , в которой функции, описывающие искажение информации:  $\psi_s^{\omega}(Q_s^{\omega}) \equiv 0$ .

Задачи  $E$  — двухэтапные задачи стохастического программирования. Стратегическими переменными первого этапа выступают потоки  $X_s, Z_s$  на входах и выходах дуг сети  $\Gamma(J, S)$ , соответствующие гарантированным величинам масс примесей, поступающих пользователям, на участки рек и каналов и отводимых от них. Тактическими переменными второго этапа являются потоки  $x_s^{\omega}, z_s^{\omega}$ , моделирующие реализуемые значения масс примесей. В задачах  $E$  определяется минимум выпуклых функций  $\varphi(Q)$  на выпуклом множестве, выделяемом линейными ограничениями (31).

Назначением цен центр добивается требуемого качества воды в водоемах, выделяя пользователям допустимые величины масс примесей, которые соответствуют координатам оптимального вектора  $Q^E$  задачи  $E$ . Пользователи распоряжаются этими ресурсами наилучшим образом, решая свои (локальные) задачи, минимизируя свои функции затрат

$$f_s(Q_s) + C_s^E, \quad s \in S_{II}, \quad (15)$$

где  $C_s^E$  — цена, которую платит  $s$ -й элемент за качество водных ресурсов.

### РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И УПРАВЛЕНИЕ ИХ КАЧЕСТВОМ

Согласование стратегий центра и пользователей при рациональном использовании водных ресурсов и управлении их качеством основывается, так же как и в двух выше рассмотренных случаях, на принципе открытого управления. Этот процесс выработки стратегий управления ВХС, включающий в себя как частные случаи процедуры использования водных ресурсов без учета их качества и управления качеством водных ресурсов при закреплённом их количестве, принципиально отличается от них. Его базовая модель описывается задачей невыпуклого программирования. В ней возможно существование локальных экстремумов, не совпадающих с глобальным.

Базовая модель рационального использования водных ресурсов и управления их качеством описывается задачей  $G_0$  определения вектора потоков  $W^0$ , составляющие которого – векторы, соответствующие объемам водных ресурсов  $y^0$  и массам содержащихся в них примесей  $x^0$  и  $z^0$ , а также их гарантированным значениям  $Y^0, X^0, Z^0$ , описанным выше. Вектор  $W^0$  принадлежит множеству  $G_G$ , выделяемому условиями (2)–(11), и минимизирует на нем функцию  $f(W)$ , оценивающую затраты, связанные с функционированием ВХС.

Центр, заинтересованный в выделении ресурсов, величины которых соответствуют оптимальным векторам задачи  $G_0$ , информацией о действительных функциях затрат элементов не обладает. Ему известны функции предпочтения, сообщаемые элементами  $\varphi_s^0(W_s^0) = f_s^0(W_s^0) + \psi_s^0(W_s^0)$ , которые должны правдоподобно оценивать затраты водопользования и водоотведения. Они принадлежат тому же классу функций, что и  $f_s^0(W_s^0)$ .

Вместо задачи  $G_0$  центр решает некоторую задачу  $G$ , допустимое множество которой  $G_G$  совпадает с допустимым множеством задачи  $G_0$ , а целевой является функция

$$\varphi(W) = \sum_{s \in S} \varphi_s(W_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} \varphi_s^\omega(W_s^\omega).$$

Семейство задач  $\{G\}$  содержит также задачу  $G_0$ , в которой функции искажения информации –  $\psi_s^0(W_s^0) \equiv 0$ .

Центр выделяет пользователям водные ресурсы и назначает поступающие и отводимые массы примесей в соответствии с решением задачи  $G$ , а также назначает цены за водопользование  $C_s^G$ . Пользователи употребляют эти ресурсы наилучшим образом, решая свои (локальные) задачи, в которых минимизируются свои функции затрат

$$f_s(W_s) + C_s^G. \quad (16)$$

Предлагаемый подход к назначению цен  $C_s^D, C_s^E$  и  $C_s^G$  основывается на использовании решений  $w^D, Q^E$  и  $W^G$  задач  $D, E$  и  $G$ .

### РЕАЛИЗУЕМОСТЬ БАЗОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Задачи  $D$  и  $E$  – базовые задачи, описывающие рациональное использование водных ресурсов без явного учета их качества и управление качеством водных ресурсов при закрепленных их количественных показателях, представляют собой задачи выпуклого программирования. Решение выпуклых задач математического программиро-

вания  $D$  и  $E$  может быть осуществлено с применением любого метода нахождения минимума выпуклой функции на выпуклом множестве [4, 9]. Использование потоковой структуры допустимых множеств  $G_D$  и  $G_E$  (весьма простых линейных ограничений, накладываемых на переменные  $Y, X$  и  $Z$ ), а также бисепарабельности целевых функций (представимости  $f(w)$  и  $f(Q)$  в виде сумм функций  $f_s^0(w_s^0) = f_s^0(Y_s, y_s^0)$  и  $f_s^0(Q_s^0) = f_s^{10}(X_s, x_s^0) + f_s^{20}(Z_s, z_s^0)$ , каждая из которых зависит от двух переменных) дает возможность применить для решения задач  $D$  и  $E$  весьма эффективный метод групповой покоординатной оптимизации [5, 10], являющийся развитием метода координатного спуска [16]. В нем последовательно уточняются стратегические ( $Y, X, Z$ ) и тактические ( $y, x, z$ ) переменные.

Задачи  $G$  состоят в минимизации невыпуклых, вообще говоря, функций  $\varphi(W)$  на невыпуклом из-за нелинейности ограничений типа равенства (11) множестве  $G_G$ . Эти задачи – многоэкстремальные. Общих методов решения таких задач не существует. Однако специфика задач  $G$ , заключающаяся в обобщенной сепарабельности целевых функций (т.е. представимости их в виде суммы функций, каждая из которых зависит от небольшого числа переменных) и билинейности ограничений (11), дает возможность построить метод их решения. В этом методе нахождение оптимальных векторов задач  $G$  сводится к решению конечной последовательности задач выпуклого программирования, формирование которых основано на построении выпуклых оболочек отдельных слагаемых функций цели и ограничений на системе сужающихся прямоугольных множеств. Этот метод, подробно описанный в [13], является детализацией схемы ветвей и границ для решения многоэкстремальных задач. В результате применения этого метода получается  $\epsilon, \delta$ -приближенное решение  $\tilde{W} = \tilde{Y}, \tilde{X}, \tilde{Z}, \tilde{y}, \tilde{x}, \tilde{z}$  задачи  $G$ , на котором значение целевой функции отличается от оптимального не более, чем на заданную погрешность  $\epsilon > 0$ :

$$\varphi(\tilde{W}) - \min_{W \in G} \varphi(W) \leq \epsilon. \quad (17)$$

Вектор  $\tilde{W}$  принадлежит множеству, отличающемуся от допустимого множества  $G_G$  задачи  $G$  требованием выполнения ограничений (11) с погрешностями, не превосходящими  $\delta_i > 0$ . Такое расширенное понимание допустимого множества

эквивалентно замене каждого из ограничений (11) двумя неравенствами

$$\begin{aligned} x_{s_l}^{\omega} y_s^{\omega} - x_{\hat{s}l}^{\omega} y_s^{\omega} &\leq \delta_i \quad \text{и} \\ x_{s_l}^{\omega} y_s^{\omega} - x_{s_l}^{\omega} y_{\hat{s}}^{\omega} &\leq \delta_i, \quad s, \hat{s} \in S_i^-, \quad i \in J, \quad \omega \in \Omega, \quad l \in L. \end{aligned} \quad (18)$$

Вектор  $\tilde{W}$ , удовлетворяющий условиям (17) и (18), получается как оптимальный вектор “последней” оценочной задачи итерационного процесса указанного метода. В решении оценочных задач, обладающих такими же особенностями, какими характеризуются задачи  $D$  и  $E$ , применим метод групповой покоординатной оптимизации.

### НАЗНАЧЕНИЕ СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕН

Задача  $G$ , ее частные случаи  $D$  и  $E$  являются инструментом адаптивного управления<sup>2</sup>. Они позволяют выбрать оптимальную стратегию управления  $W^G$  и ее корректировки  $\Delta w^{\omega G} = w^{\omega G} - W^G$ , обеспечивающую наименьшую потерю эффективности функционирования трансграничной ВХС в различных стохастических условиях. Для осуществления выработанной стратегии ее требуется дополнить механизмом взаимодействия равноправных участников: центра и элементов-пользователей. Регулятором взаимоотношений “продавца” ресурсов – центра и “покупателей” – пользователей 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 представления которой о “справедливых” ценах лежат решения задач, аналогичных задаче  $G_0$ .

Цена  $C_s^1$ , по которой центр “продает”  $s$ -му пользователю выделяемую в соответствии с решением задачи  $G_0$  величину гарантированного водопользования  $V^0 = Y^0, X^0, Z^0$ , определяется эффективностью использования ресурса  $f_s^1(V_s^0)$ . Целесообразно назначать  $C_s^1(V_s^0) = \alpha_s f_s^1(V_s^0)$ , где  $\alpha_s$  – положительный коэффициент, меньше 1. Коэффициент  $\alpha_s$  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.

<sup>2</sup> Ниже назначение цен рассматривается для наиболее общего случая рационального использования водных ресурсов и управления их качеством (базовая задача  $G$ ). Цены при раздельном управлении количеством (базовая задача  $D$ ) и качеством (базовая задача  $E$ ) водных ресурсов получаются как очевидные частные случаи.

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 – оценивания изменения результатов производства при бесконечно малом изменении количества используемого ресурса. В соответствии с этим подходом цена дополнительной поставки (сверх гарантируемой величины) или недопоставки каждой единицы водного ресурса является ценой “последней” планируемой к использованию единицы. В терминах задачи  $G_0$  цены, определяемые этим “последним” пользователем, при реализации стохастических условий  $\omega$  соответствуют производным  $C_{sy}^{\omega} = \partial f_s^{2\omega}(V_s^G, v_s^{\omega G}) / \partial y_s^{\omega}$ ,  $C_{sx}^{\omega} = \partial f_s^{2\omega}(V_s^G, v_s^{\omega G}) / \partial x_s^{\omega}$  и  $C_{sz}^{\omega} = \partial f_s^{2\omega}(V_s^G, v_s^{\omega G}) / \partial z_s^{\omega}$ . Назначаемые цены формируются из цен  $C_{sy}^{\omega}$ ,  $C_{sx}^{\omega}$  и  $C_{sz}^{\omega}$ , например в виде  $C_{sy} = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} C_{sy}^{\omega}$  или  $C_{sy} = \max_{\omega \in \Omega} C_{sy}^{\omega}$  при  $y_s^{\omega G} < Y_s^G$  и  $C_{sy} = \min_{\omega \in \Omega} C_{sy}^{\omega}$  при  $y_s^{\omega G} > Y_s^G$ .

Этот подход корректен для линейных целевых функций, а также для нелинейных при условии, что отклонения значений поставляемых объемов водных ресурсов и показателей их качества от гарантируемых величин незначительны. Функции эффективности пользователей  $f_s^{\omega}(W_s^{\omega})$  – нелинейные [13]. Величины реализуемых объемов воды и масс примесей  $v_s^{\omega}$  могут намного отличаться от их ориентиров  $V_s$ . При таком подходе потери эффективности, обусловленные дефицитом ресурсов, значительно превосходят компенсацию, получаемую за их недопоставку. Оплата пользователем профицита водных ресурсов превосходит результат их использования. Аналогичная ситуация – с потерей эффективности, связанной с отклонениями величин масс примесей в водных объектах от ориентиров. Не спасает дело умножение  $C_{sy}^{\omega}$ ,  $C_{sx}^{\omega}$  и  $C_{sz}^{\omega}$  на некоторые коэффициенты, так как отсутствуют объективные предпосылки выбора значений этих коэффициентов. Поэтому предлагается перейти от назначения цен, формируемых в [6] оптимальными двойственными переменными базовой задачи, к ценам за водные ресурсы, соответствующим их ценности при производстве продукции.

Отклонения как объемов воды, так и масс примесей, поступающих пользователям и отводимых от них, от ориентиров приводят к изменениям результатов использования водных ресурсов. Возникает потребность во введении в процесс платежей за отклонения величин текущих поставок ре-

сурсов от гарантированных величин – оценок сопоставления эффективности воздействий этих отклонений. Сопоставление оценивается коэффициентами, отражающими влияние количества и качества водных ресурсов на результативность их использования элементами ВХС в различных условиях. Коэффициенты значимости отклонений объемов водных ресурсов  $\chi_{sy}^{\omega}$ , а также масс поступающих  $\chi_{sx}^{\omega}$  и отводимых  $\chi_{sz}^{\omega}$  примесей неотрицательны и образуют выпуклую комбинацию ( $\chi_{sy}^{\omega} + \chi_{sx}^{\omega} + \chi_{sz}^{\omega} = 1$ ). Они оценивают вклад отклонений от ориентиров объемов водных ресурсов  $y_s^{\omega}$  и описанных в (13) комплексов функционально взаимосвязанных используемых ( $\bar{x}_s^{\omega}$ ) и отводимых ( $\bar{z}_s^{\omega}$ ) примесей. С помощью введенных коэффициентов формируются комплексные оценки отклонений показателей, характеризующих водные ресурсы, от ориентиров в виде:

$$\Delta_{sv}^{\omega} = \chi_{sy}^{\omega} \Delta_{sy}^{\omega} + \chi_{sx}^{\omega} \Delta_{sx}^{\omega} + \chi_{sz}^{\omega} \Delta_{sz}^{\omega}, \quad (19)$$

где  $\Delta_{sy}^{\omega} = y_s^{\omega} - Y_s^0$ ,  $\Delta_{sx}^{\omega} = \bar{x}_s^{\omega} - \bar{X}_s^0$ ,  $\Delta_{sz}^{\omega} = \bar{z}_s^{\omega} - Z_s^0$ .

В основном варианте ВХС платит пользователю за каждую единицу комплексного отклонения  $\Delta_{sv}^{\omega} = \{\Delta_{sv}^{\omega} | \omega \in \Omega\}$ , приводящего к потере результативности использования водных ресурсов, по цене риска – усредненного ущерба, определенного в результате решения задачи G:

$$\begin{aligned} r_s^{\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G}) &= [f_s^{\omega}(V_s^G, V_s^G) - f_s^{\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G})]^+ = \\ &= [f_s^{2\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G})]^+, \text{ где } [u]^+ = \max\{u, 0\}, \\ C_s(V_s^G, V_s^G) &= \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} r_s^{\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G}) / \Delta_{sv}^{\omega G}. \end{aligned}$$

За поставку водных ресурсов, приводящую к увеличению эффективности их использования, пользователь оплачивает каждую единицу комплексного отклонения  $\Delta_{sv}^+ = \{\Delta_{sv}^+ | \omega \in \Omega\}$  по усредненной цене шанса ее использования:

$$\begin{aligned} d_s^{\omega}(V_s^D, V_s^{\omega D}) &= [f_s^{\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G}) - f_s^{\omega}(V_s^G, V_s^G)]^+ = \\ &= [f_s^{2\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G})]^+, \\ C_s^+(V_s^G, V_s^G) &= \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} d_s^{\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G}) / \Delta_{sv}^{\omega G+}. \end{aligned}$$

В результате при реализации стохастических условий  $\omega$  пользователь за “излишки” водных ресурсов  $\Delta_{sv}^+$  платит  $\Phi_s^{\omega+}(V_s^G, \Delta_{sv}^+) = C_s^+(V_s^G, V_s^G) \Delta_{sv}^{\omega+}$ , а “недостаток” водных ресурсов  $\Delta_{sv}^-$  центр компенсирует в виде платы  $\Phi_s^{\omega}(V_s^G, \Delta_{sv}^-) = C_s(V_s^G, V_s^G) \Delta_{sv}^{\omega}$ .

Для стимулирования стремлений использовать излишки водных ресурсов (если таковые стремления высказаны трансграничными пользователями) регулирующему органу (центру) можно предложить назначать цены при комплексных отклонениях водных ресурсов от их гарантированных величин  $\Delta_{sv}^{\omega}$  по наименьшему шансу и наибольшему ущербу единицы их использования:

$$\begin{aligned} \bar{C}_s^+(V_s^G, V_s^G) &= \min_{\omega \in \Omega} d_s^{\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G}) / \Delta_{sv}^{\omega G+} \\ \text{и } \bar{C}_s(V_s^G, V_s^G) &= \max_{\omega \in \Omega} r_s^{\omega}(V_s^G, V_s^{\omega G}) / \Delta_{sv}^{\omega G}. \end{aligned}$$

Назначение функций предпочтения  $\phi_s^{\omega}(W_s^{\omega}) > f_s^{\omega}(W_s^{\omega})$ , сообщаемых центру, может повлечь за собой увеличение значений гарантированного водопользования и связанного с этим увеличением показателей использования ресурсов в идеальных условиях. В этом случае комплексные отклонения величин поставляемых ресурсов от гарантированных значений при реализациях стохастических условий  $\omega \in \Omega$  могут привести к ущербам, значительно превышающим “дополнительную” эффективность использования гарантированного водопользования. Назначение  $\phi_s^{\omega}(W_s^{\omega}) < f_s^{\omega}(W_s^{\omega})$  уменьшает величины ущербов, однако при этом падает эффективность гарантированного водопользования. В обоих случаях отклонения сообщаемых функций предпочтения  $\phi_s^{\omega}(W_s^{\omega})$  от истинных функций  $f_s^{\omega}(W_s^{\omega})$  риск увеличивается. Поэтому пользователям, не склонным к рискам (трансграничные пользователи, представляющие собой суверенные государства, – именно такие), невыгодно исказить информацию об эффективности использования водных ресурсов. Они будут сообщать центру истинные функции предпочтения.

Таким образом, при раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов, где базовыми являются задачи выпуклого программирования D и E, назначение цен за водные ресурсы, соответствующее их ценности при производстве продукции, обеспечивает достижение совершенного согласования интересов трансграничных водопользователей – суверенных государств и сформированного ими центра. При совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов согласование получается приближенным, с погрешностью, определяемой точностью решения базовой многоэкстремальной задачи G.

## ВЫВОДЫ

Соперничество за трансграничные водные ресурсы происходит в условиях несовершенной

конкуренции немногих государств-водопользователей. В данной работе представлен подход к выработке согласованных стратегий управления трансграничными водными объектами, в котором учитываются интересы всех участников. Этот подход предоставляет пользователям возможность выбирать стратегии, руководствуясь своими интересами независимо от поведения других участников, так же как в условиях совершенной конкуренции. Предложенный подход основывается на учете особенностей управления функционированием трансграничных водных объектов и включает в себя следующие положения:

– для выработки согласованных стратегий использования трансграничных водных объектов требуется структура (центр), в рамках которой происходит разрешение конфликтных ситуаций; центр образуется всеми государствами, претендующими на водные ресурсы трансграничного объекта; его решения обязательны для всех участников;

– центр – надгосударственный орган, созданный всеми государствами, использующими ресурсы трансграничных водных объектов; процедуры согласования интересов водопользователей могут быть только открытыми; центр обладает информацией, необходимой для принятия компромиссных решений, а государства-водопользователи знают возможные стратегии и принципы стимулирования принимаемых решений;

– ВХС трансграничного водного объекта рассматривается как активная система; ее элементы – водопользователи реализуют собственные предпочтения, целенаправленно манипулируя информацией о своих возможностях, целях и эффективности;

– ВХС трансграничного водного объекта функционирует в стохастических условиях;

– эффективность водопользования зависит как от объемов используемых водных ресурсов и масс содержащихся в них примесей, так и от ориентиров, т.е. их гарантированных величин;

– функционирование ВХС трансграничного водного объекта в стохастических условиях порождает риск, связанный с потерей эффективности использования водных ресурсов из-за отклонений объемов водных ресурсов и масс примесей от гарантированных величин;

– трансграничные водопользователи – суверенные государства не склонны к рискам;

– согласованные цены за водные ресурсы назначаются в соответствии с ценностью этих ресурсов при производстве продукции.

Рассмотрены конфликтные ситуации, связанные со стремлением трансграничных государств использовать общие водные ресурсы в своих интересах, приведена их классификация и показаны проблемы согласования интересов этих госу-

дарств. Предложены и обоснованы механизмы согласования интересов государств, претендующих на использование трансграничных водных ресурсов при отсутствии соглашений о совместных стратегиях управления водными объектами. Согласование интересов трансграничных водопользователей осуществляется с учетом количественных и качественных показателей водных ресурсов. При раздельном управлении количеством и качеством водных ресурсов достигается совершенное согласование. При совместном управлении количеством и качеством водных ресурсов согласование получается приближенным.

С позиций согласования интересов пользователей в условиях несовершенной конкуренции (олигополия/олигопсония) полученный результат означает появление модели поведения участников, в которой необходимость ориентироваться на предполагаемые стратегии конкурентного поведения других участников, присутствующая во всех известных моделях, заменяется одним естественным условием – конкурирующие субъекты предпочитают минимизировать свой риск.

С позиций теории активных систем полученный результат означает возможность достижения согласования интересов центра и пользователей при отказе от предположения о выполнении гипотезы слабого влияния отдельных элементов на показатели управления, общие для всей системы (основного в теории активных систем), в пользу значительно более мягкого и естественного условия – отсутствия у пользователей склонности неоправданно рисковать.

## 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. 255 с.
3. *Вавилин В.А., Циткин М.Ю.* Математическое моделирование управления качеством водной среды // Вод. ресурсы. 1977. № 5. С. 114–132.
4. *Васильев Ф.П.* Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1981. 400 с.
5. *Гольштейн Е.Г., Юдин Д.Б.* Методы расчета и синтеза импульсных автоматических систем II // Автоматика и телемеханика. 1963. № 12. С. 1643–1659.
6. *Данилов-Данильян В.И., Иванков С.А., Хранович И.Л.* Согласование стратегий использования трансграничных водных ресурсов // Экономика и математические методы. 2010. Т. 26. № 2. С. 49–59.

7. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Производственные функции в условиях неопределенности // Экономика и математические методы. 2007. Т. 43. № 1. С. 16–26.
8. Елаховский С.Б. Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. М.: Энергия, 1979. 176 с.
9. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. 384 с.
10. Райков Л.Д. Вопросы построения и применения АВМ для решения многовариантных задач. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МИЭМ, 1966. 239 с.
11. Самуэльсон П. Экономика. М.: Прогресс, 1964. 667 с.
12. Указания по методам расчета смешения и разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах. М.: ВОДГЕО, 1971. 224 с.
13. Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Потоковые модели. М.: Науч. мир, 2001. 295 с.
14. Bertrand J. Book review of *theorie mathematiques de la richesse sociale* and of *recherches sur les principes mathematiques de la theorie des richesses* // J. Savants. 1883. V. 67. P. 499–508.
15. Cournot A. *Recherches sur les principes mathematiques de la theorie des richesses*. Paris: Hachette L., 1838. 198 p.
16. D'Esopo D.I. A convex programming procedure // Naval Res. Logistics Quart. 1959. V. 6. № 4. P. 33–42.
17. Stackelberg H. *Marktform und Gleichgewicht*. Wien, Berlin: Verlag von Julius Springer, 1934. 469 p.
18. Streeter H.W., Phelps E.B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River // U. S. Publ. Health Service Bull. 1925. V. 146. P. 1–75.