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

УДК 556.18:626/628

**ТРАНСГРАНИЧНЫЕ ВОДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ. ПОДХОД К ИХ РЕШЕНИЮ
2. ПЕРЕСМОТР СОГЛАШЕНИЙ¹**

© 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.

Предложены и обоснованы механизмы согласования интересов государств, использующих трансграничные водные объекты, при необходимости пересмотра соглашений о совместных стратегиях управления. Согласование проводится с учетом количественных и качественных показателей водных ресурсов в стохастических условиях. Функционирование водных объектов рассматривается в статике и в дискретном времени. Согласование осуществляется в рамках управляемого рынка водных ресурсов.

Ключевые слова: водный ресурс, трансграничный водный объект, водохозяйственная система, управление, рынок, цена

DOI: 10.7868/S0321059613040020

Настоящая статья — продолжение [1]. Используются понятия, обозначения и формулы, введенные в [1]. При ссылках на формулы из [1] перед номером формулы добавляется цифра 1. (так (1.7) означает формулу (7) из [1]).

**СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ
ПРИ ПЕРЕСМОТРЕ СОГЛАШЕНИЙ
(СИТУАЦИЯ Б)**

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

Рассматривается рынок водных ресурсов с начальным распределением потоков $W^0 = V^0, v^0$, где $V^0 = Y^0, X^0, Z^0, v^0 = y^0, x^0, z^0$, в описанной в [1] сети $\Gamma(J, S)$; этот рынок соответствует пересматриваемому соглашению об использовании ресурсов трансграничного водного объекта. Предполагается, что потоки, моделирующие объемы воды и массы примесей в ВХС, удовлетворяют условиям (1.1),

(1.2), (1.4)–(1.7), (1.9)–(1.11). Аналогичным условиям должны удовлетворять потоки $v = y, x, z$ при изменении водохозяйственной ситуации, связанной с заключением сделок купли-продажи разрешений на использование водных ресурсов λ_s^{ω} и сброс загрязняющих веществ μ_{sl}^{ω} ; такие разрешения могут продаваться и покупаться как совместно, так и порознь. При этом $y_s^{\omega 0}$ заменяется на $y_s^{\omega} = y_s^{\omega 0} + \delta_s^{\omega}$, а $x_{sl}^{\omega 0}$ и $z_{sl}^{\omega 0}$ на $x_{sl}^{\omega} = x_{sl}^{\omega 0} + \pi_{sl}^{\omega}$ и $z_{sl}^{\omega} = z_{sl}^{\omega 0} + \eta_{sl}^{\omega}$ (вообще говоря, величина δ_s^{ω} не тождественна λ_s^{ω} , значения η_{sl}^{ω} не совпадают с μ_{sl}^{ω}). Приращения потоков δ_s^{ω} , π_{sl}^{ω} и η_{sl}^{ω} складываются из приращений δ_{sr}^{ω} , π_{slr}^{ω} и η_{sl}^{ω} — они задают те части разрешений на использование водных ресурсов и сброс загрязняющих веществ r -х пользователей, которые делегируются им s -ми пользователями:

$$\delta_s^{\omega} = \sum_{r \in R_s} \delta_{sr}^{\omega}, \quad \pi_{sl}^{\omega} = \sum_{r \in R_s} \pi_{slr}^{\omega}, \quad \eta_{sl}^{\omega} = \sum_{r \in R_s} \eta_{slr}^{\omega}, \quad R_s \in S.$$

Из соотношений (1.1), (1.2), (1.4)–(1.7), (1.9)–(1.11), которым удовлетворяют начальные потоки v^0 и потоки v , образуемые в результате рыночно-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-06-00002).

го обмена, следуют ограничения на приращения потоков δ_s^ω , π_{sl}^ω и η_{sl}^ω :

$$\sum_{s \in S_i^+} k_s^\omega \delta_s^\omega - \sum_{s \in S_i^-} \delta_s^\omega = 0, \quad \sum_{s \in S_i^+} \pi_{sl}^\omega - \sum_{s \in S_i^-} \eta_{sl}^\omega = 0,$$

$$i \in J, \quad l \in L,$$

$$\underline{\delta}_s^\omega \leq \delta_s^\omega \leq \bar{\delta}_s^\omega, \quad s \in S, \quad \eta_{sl}^\omega - \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma/\omega} \pi_{s\gamma}^\omega = 0, \quad s \in S_1,$$

$$\sum_{l \in L_v} d_{sl} \pi_{sl}^\omega - \delta_s^\omega \leq 0, \quad \sum_{l \in L_v} d_{sl}^k \eta_{sl}^\omega - k_s^\omega \delta_s^\omega \leq 0, \quad s \in S, \quad (1)$$

$$\pi_{sl}^\omega \geq \underline{\pi}_{sl}^\omega, \quad \eta_{sl}^\omega \geq \underline{\eta}_{sl}^\omega, \quad s \in S, \quad l \in L,$$

$$\pi_{sl}^\omega y_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega x_{sl}^{\omega 0} + \pi_{sl}^\omega \delta_s^\omega = \pi_{sl}^\omega y_s^{\omega 0} + \delta_s^\omega x_{sl}^{\omega 0} + \pi_{sl}^\omega \delta_s^\omega,$$

$$s, \hat{s} \in S_i^-, \quad i \in J, \quad l \in L,$$

где $\delta_s^\omega = x_s^\omega - x_s^{\omega 0}$, $\bar{\delta}_s^\omega = \bar{x}_s^\omega - x_s^{\omega 0}$, $\underline{\delta}_s^\omega = x_s^\omega - x_s^{\omega 0}$, $\underline{\pi}_{sl}^\omega = \underline{x}_{sl}^\omega - x_{sl}^{\omega 0}$, $\underline{\eta}_{sl}^\omega = \underline{z}_{sl}^\omega - z_{sl}^{\omega 0}$.

Разрешения на использование водных ресурсов y_s^ω и сброс загрязняющих веществ z_{sl}^ω продаются и покупаются на рынке, в этом процессе ориентиры Y_s и Z_{sl} в явном виде не участвуют.

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

Состав примесей z_{sl}^ω в сбросах пользователей z_s^ω для каждого пользователя индивидуален. Он характеризуется коэффициентами ρ_{sl}^ω , которые показывают долю l -й примеси в массе сброса s -го пользователя $z_s^\omega = \rho_{sl}^\omega |z_s^\omega|$, где $|z_s^\omega| = \sum_{l \in L} z_{sl}^\omega$.

Так как в сбросах разных пользователей содержится различные составы примесей, то s -й пользователь, купивший разрешение (квоту) на сброс $\eta_s^{\omega n}$ у r -го пользователя, может воспользоваться им частично. Возможная для использования доля

купленного разрешения определяется наименьшим соотношением примесей в составе сбросов

$$\text{продавца и покупателя } \alpha_s^{or} = \min_{l \in L} \frac{\rho_{sl}^\omega}{\rho_{sl}^\omega}.$$

Коэффициенты α_s^{or} преобразования приобретенных разрешений на сброс загрязняющих веществ образуют квадратную матрицу α^ω коэффициентов приращения квот. Ее размерность соответствует числу пользователей с очистными сооружениями.

Приобретаемые квоты образуют приращения разрешений на использование водных ресурсов и сброс загрязняющих веществ в виде сумм $\lambda_s^{\omega+} = \sum_{r \in S} \beta_s^{or} \lambda_s^{or+}$, $\mu_{sl}^{\omega+} = \sum_{r \in S} \alpha_s^{or} \mu_{sl}^{or+}$, продаваемые – $\lambda_s^{\omega-} = \sum_{r \in S} \lambda_s^{or-}$, $\mu_{sl}^{\omega-} = \sum_{r \in S} \mu_{sl}^{or-}$ (величины $\lambda_s^{\omega+}$ и $\mu_{sl}^{\omega+}$ неотрицательные, $\lambda_s^{\omega-}$ и $\mu_{sl}^{\omega-}$ – неположительные), где $u^+ = \max[u, 0]$, $u^- = \min[u, 0]$.

Приращения разрешений на использование водных ресурсов и сброс загрязняющих веществ пользователей формируются из продаваемых и приобретаемых квот в виде $\lambda_s^\omega = \lambda_s^{\omega+} + \lambda_s^{\omega-}$, $\mu_{sl}^\omega = \mu_{sl}^{\omega+} + \mu_{sl}^{\omega-}$.

При покупке и продаже разрешений преобразуются возможности пользователей. Начальные квоты объемов водных ресурсов $y_s^{\omega 0}$, поступающих пользователям, заменяются новыми значениями $y_s^\omega = y_s^{\omega 0} + \lambda_s^\omega = y_s^{\omega 0} + \sum_{r \in S} [\beta_s^{or} \lambda_s^{or+} + \lambda_s^{or-}]$.

Разрешенные вначале величины сбросов загрязняющих веществ $z_s^{\omega 0}$ преобразуются в квоты $z_s^\omega = \{z_{sl}^\omega | l \in L\}$:

$$z_s^\omega = z_s^{\omega 0} + \mu_s^\omega, \quad \mu_s^\omega = \{\mu_{sl}^\omega | l \in L\},$$

$$z_{sl}^\omega = z_{sl}^{\omega 0} + \mu_{sl}^\omega = z_{sl}^{\omega 0} + \sum_{r \in S} [\alpha_s^{or} \mu_{sl}^{or+} + \mu_{sl}^{or-}].$$

Происходит изменение эффективности использования водных ресурсов. Целевые функции пользователей со значениями $f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0})$ до обмена квотами преобразуются в функции

$$f_s^\omega(V_s^0, v_s^\omega, \lambda_s^\omega, \mu_s^\omega) = f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}) - \sum_{r \in S} [c_{sy}^{or+} \lambda_s^{or+} - c_{sy}^{or-} \lambda_s^{or-} + c_{sz}^{or+} \mu_s^{or+} - c_{sz}^{or-} \mu_s^{or-}],$$

где c_{sy}^{or+} и c_{sz}^{or+} – цены, по которым s -й пользователь покупает у r -го пользователя разрешение соответственно на использование водных ресурсов и сброс загрязняющих веществ, c_{sy}^{or-} и c_{sz}^{or-} – цены, по которым s -й пользователь продает свою долю разрешений, $c_{sy}^{or+} > 0$, $c_{sy}^{or-} > 0$, $c_{sz}^{or+} > 0$, $c_{sz}^{or-} > 0$.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЫНКА

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

$$\Delta f_s(V_s^0, v_s^0, \lambda_s, \mu_s) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \Delta f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \lambda_s^\omega, \mu_s^\omega) \leq 0 \quad (2)$$

(здесь $\Delta f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \lambda_s^\omega, \mu_s^\omega) = f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \lambda_s^\omega, \mu_s^\omega) - f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0})$, $s \in S$), означающие, что ни одному из участников рынка не будет нанесен ущерб. Заметим, что целевые функции $f_s(W_s)$ описывают затраты водопользователей. В них учитывается также эффект от использования водных ресурсов, входящий в виде слагаемых с отрицательным знаком. Включение условий (2), выполнение которых обеспечивает центр, отражает особенность ВХС как пространственно-распределенной природно-технической системы. Наряду с активными участниками актов купли-продажи, непосредственно обменивающимися разрешениями, для которых условия (2) выполнены как строгие (иначе зачем продавать и покупать?), в ВХС присутствуют пассивные пользователи, на эффективность функционирования которых влияют сделки, заключаемые активными участниками рынка.

Центр заинтересован в рациональном и справедливом (с позиций трансграничных пользователей) 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 для ее совершенствования. Его интересы заключаются в наибольших отчислениях в фонд — максимизации функции

$$\varphi(\lambda, \mu) = \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega \sum_{s \in S} [d_{s\lambda}^{\omega+} \lambda_s^{\omega+} - d_{s\lambda}^{\omega-} \lambda_s^{\omega-} + d_{s\mu}^{s+} \mu_s^{\omega+} - d_{s\mu}^{\omega-} \mu_s^{\omega-}], \quad (3)$$

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

В согласовании стратегий использования водных ресурсов трансграничного водного объекта участвуют активные и пассивные участники рынка, а также центр. При возникновении хотя бы одной пары активных участников рынка (или нескольких активных пользователей), которые договорились об обмениваемых объемах водных ре-

сурсов λ_s^ω , сбросах загрязняющих веществ μ_s^ω и их ценах, центр проверяет возможность таких обменов. Для этого решается задача определения потоков δ_s^ω , π_{sl}^ω , η_{sl}^ω , возникающих в результате предполагаемых сделок, которые должны удовлетворять условиям (1) и (2) допустимости таких распределений водных ресурсов. Если не существуют допустимые δ_s^ω , π_{sl}^ω , η_{sl}^ω , соответствующие предполагаемым актам купли-продажи, пользователи, учитывающие возникающие дисбалансы между желаемым и возможным для обмена разрешениями на использование водных ресурсов и сброс загрязняющих веществ, корректируют свои предложения до получения приращений δ_s^ω , π_{sl}^ω , η_{sl}^ω , удовлетворяющих условиям (1) и (2).

При приращениях δ_s^ω , π_{sl}^ω , η_{sl}^ω , удовлетворяющих условиям (1) и (2), для пассивных участников рынка разрешений устанавливаются цены, по которым либо им компенсируется снижение эффективности использования водных ресурсов ($c_{sv}^{\omega-}$), либо они платят за повышение эффективности их использования ($c_{sv}^{\omega+}$):

$$c_{sv}^{\omega-} = \Delta f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \Delta_{sv}^\omega) / \Delta_{sv}^{\omega-} + \Delta c_s^{\omega-} \quad (4)$$

и $c_s^{\omega+} = \Delta f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \Delta_{sv}^\omega) / \Delta_{sv}^{\omega+} - \Delta c_s^{\omega+}$,

где приращения Δ_{sv}^ω определяются формулой (1.19), $\Delta_{sv}^{\omega+} = \max[\Delta_{sv}^\omega, 0]$, $\Delta_{sv}^{\omega-} = \min[\Delta_{sv}^\omega, 0]$, $\Delta c_s^{\omega-}$ и $\Delta c_s^{\omega+}$ — назначаемые центром положительные величины, стимулирующие заинтересованность пассивных пользователей в совершении сделок активными пользователями. Они назначаются такими, чтобы приращения функций эффективности после совершения актов купли-продажи

$$\Delta f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \Delta_{sv}^\omega) = f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \Delta_{sv}^\omega) - c_{sv}^{\omega-} \Delta_{sv}^{\omega-}, \quad (5)$$

$$\Delta f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \Delta_{sv}^\omega) = f_s^\omega(V_s^0, v_s^{\omega 0}, \Delta_{sv}^\omega) + c_{sv}^{\omega+} \Delta_{sv}^{\omega+}$$

удовлетворяли требованиям (2). Средства, необходимые для компенсации потерь эффективности использования водных ресурсов пассивных пользователей, формируются из отчислений, производимых активными пользователями и пассивными пользователями, эффективность функционирования которых повышается, дополненных средствами стабилизационного фонда центра.

Из всех сделок купли-продажи разрешений на использование водных ресурсов, удовлетворяющих условиям (1) и требованиям (2) с учетом корректировки функций эффективности (5), выделяется совокупность сделок, при которых отчисления центру наибольшие. Эта совокупность характеризуется вектором $v^{\omega 1} = \{v_s^{\omega 1} | s \in S\}$ — решением задачи максимизации функции (3) на множестве, выделяемом условиями (1) и (2).

Описанная процедура рыночного обмена разрешениями на использование трансграничных водных ресурсов характеризуется тем, что при каждой реализации стохастических условий оценки эффективности использования водных ресурсов всех пользователей не повышаются, при этом у некоторых, в частности у активных, — снижаются; а именно — переход от начального распределения водных ресурсов $v^{\omega 0} = \{v_s^{\omega 0} | s \in S\}$ к распределению $v^{\omega 1} = \{v_s^{\omega 1} | s \in S\} = \{v_s^{\omega 0} + \Delta_{sv}^{\omega} | s \in S\}$ означает, что

$$\sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} f_s^{\omega}(V_s^0, v_s^{\omega 1}) \leq \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} f_s^{\omega}(V_s^0, v_s^{\omega 0}), \quad s \in S, \quad (6)$$

и найдутся такие $\hat{s} \in S$, что

$$\sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} f_{\hat{s}}^{\omega}(V_{\hat{s}}^0, v_{\hat{s}}^{\omega 1}) < \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} f_{\hat{s}}^{\omega}(V_{\hat{s}}^0, v_{\hat{s}}^{\omega 0}). \quad (7)$$

Из соотношений (6) и (7) следует, что математическое ожидание эффективности использования ресурсов трансграничного водного объекта в результате совершенных сделок возрастает (затраты снижаются), т.е.

$$\begin{aligned} F(V^0, v^1) &= \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} f_s^{\omega}(V_s^0, v_s^{\omega 1}) > F(V^0, v^0) = \\ &= \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} \sum_{s \in S} f_s^{\omega}(V_s^0, v_s^{\omega 0}). \end{aligned} \quad (8)$$

Переход от потоков $v^{\omega 0}$ к потокам $v^{\omega 1}$ влечет за собой пересмотр величин гарантированного водопользования V_s , оценивающих объемы водных ресурсов и массы сбросов, на которые ориентируются водопользователи. Их значения соотношены с конкретными пользователями и не связаны с другими пользователями. Осуществляется переход (при закрепленных величинах $v_s = v_s^1$) от значений ориентиров V_s^0 к значениям V_s^1 (решениям задач минимизации математического ожидания затрат, связанных с использованием водных ресурсов v_s^1 , которые выделяются пользователям в результате рыночного обмена разрешениями):

$$F_s(V_s, v_s^1) = \sum_{\omega \in \Omega} p^{\omega} f_s^{\omega}(V_s, v_s^{\omega 1}) \quad (9)$$

на множествах G_V , определяемых ограничениями (1.3) и (1.8). Так как в задачах (1.3), (1.8), (9) отыскивается минимум функции $F_s(V_s, v_s^1)$ на множестве G_V , содержащем вектор V_s^0 , то

$$F_s(V_s^1, v_s^1) \leq F_s(V_s^0, v_s^1). \quad (10)$$

Неравенства (8) и (10) совместно означают, что эффективность использования водных ресурсов трансграничного водного объекта при переходе от начального распределения V^0, v^0 к распределению V^1, v^1 , полученному в результате описанной

процедуры рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов и сбросов загрязняющих веществ, строго возрастает (затраты строго убывают), т.е.

$$\begin{aligned} F(V^1, v^1) &= \sum_{s \in S} F_s(V_s^1, v_s^1) \leq \sum_{s \in S} F_s(V_s^0, v_s^1) < \\ &< \sum_{s \in S} F_s(V_s^0, v_s^0) = F(V^0, v^0). \end{aligned} \quad (11)$$

Замена начального распределения водных ресурсов и примесей V^0, v^0 на V^1, v^1 , а также переход от начальных оценок $f_s^{\omega}(V_s^0, v_s^{\omega 0})$ эффективности их использования к оценкам $f_s^{\omega}(V_s^1, v_s^{\omega 1})$ могут привести к появлению пользователей, стремящихся продать/купить разрешения на использование водных ресурсов и сброс загрязняющих веществ. В этом случае описанная процедура купли-продажи повторяется с V^1, v^1 так же, как она описана выше с V^0, v^0 и т.д. На каждом шаге этого итерационного процесса оценка эффективности использования водных ресурсов повышается, значения функции затрат $F(V, v)$ убывают. Эффективность использования водных ресурсов ограничена. Затраты неотрицательны. Так как убывающая ограниченная снизу последовательность имеет предел, то описанный итерационный процесс рыночного обмена разрешениями на использование водных ресурсов сходится.

Таким образом, в рамках управляемого центром рынка использования трансграничных водных объектов в ситуации, когда требуется пересмотр существующих соглашений о водопользовании, достигается согласование интересов государств, заинтересованных в использовании трансграничных водных ресурсов.

СОГЛАСОВАНИЕ СТРАТЕГИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Выше рассмотрены механизмы согласования интересов государств, использующих трансграничные водные объекты, в статической постановке, в которой временные особенности поступления водных ресурсов и потребностей в них в явном виде не представлены. Во многих случаях такое согласование недостаточно полно отражает специфику использования трансграничных водных ресурсов из-за несоответствия сезонных вариаций стока рек и потребностей водопользования. Зачастую конфликтные ситуации создают также противоречивые требования пользователей ко времени поступления водных ресурсов. Интересы Узбекистана, Казахстана и Туркмении, расположенных в среднем и нижнем течении Сырдарьи и Амударьи — основных источников водных ресурсов Центрально-Азиатского региона, про-

тиворечат интересам Таджикистана и Киргизии, расположенных в верховьях этих рек. Таджикистан и Киргизия заинтересованы в использовании водных ресурсов для выработки электроэнергии. Для этого требуется воду накапливать летом и сбрасывать через турбины ГЭС зимой. Узбекистану, Казахстану и Туркмении вода нужна в вегетационный период: ее надо накапливать зимой и использовать летом. Необходимость согласованного использования трансграничных водных ресурсов обуславливает потребность в механизмах выработки стратегий управления трансграничными водными объектами в динамических условиях.

Построение механизмов согласования интересов государств, использующих трансграничные водные объекты, в динамических условиях, так же как в статике, основывается на потоковом структурировании ВХС. Функционирование ВХС рассматривается в дискретном времени, в котором расчетный период $T = [T_0, T_N]$ точками $t = 0, 1, \dots, N$ разбит на N временных отрезков $[t, t + 1]$ длительностью h_t . К элементам $\Gamma(J, S)$, рассматриваемым в статической постановке, добавляются находящиеся в вершинах сети J “склады”, которые изображают водохранилища (с расположенными на них пользователями), призванные перераспределять водные ресурсы во времени. Запасы y_i^0 и x_{il}^0 в “складах” моделируют объемы воды и массы примесей в водохранилищах.

Взаимосвязи между потоками, соответствующими потокам воды и примесей в ВХС, на входах и выходах дуг, моделирующих пользователей, на участках рек и каналов аналогичны взаимосвязям (1.1) и (1.4) между потоками в статике:

$$\begin{aligned} y_s^{k\omega}(t) &= k_s^\omega(t) y_s^0(t - \theta_s^\omega), \quad s \in S, \\ z_{sl}^0(t) &= \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma l \omega}(t) x_{s\gamma}^0(t - \theta_s^\omega), \quad s \in S_1 \end{aligned} \quad (12)$$

с неотрицательным запаздыванием θ_s^ω .

Динамические потоки и запасы в “складах” $v^0(t) = y^0(t)$, $x^0(t)$, $z^0(t)$ удовлетворяют требованиям, аналогичным (1.2), (1.5)–(1.7), предъявляемым к статическим потокам:

$$\begin{aligned} \underline{y}_r^0(t) \leq y_r^0(t) \leq \bar{y}_r^0(t), \quad \sum_{l \in L_v} d_{rl} x_{rl}^0(t) - y_r^0(t) &\leq 0, \\ \sum_{l \in L_v} d_{sl}^k z_{sl}^0(t) - y_s^{k\omega}(t) &\leq 0, \\ x_{rl}^0(t) \geq \underline{x}_{rl}^0(t), \quad z_{sl}^0(t) \geq \underline{z}_{sl}^0(t), \\ s \in S, \quad r \in R = S \cup J, \quad l \in L, \quad \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (13)$$

Диапазоны возможных значений потоков в дугах и запасов в складах сети $\Gamma(J, S)$, моделирующих гарантированные значения объемов водных ресурсов и масс примесей в водоемах в динамических условиях $V(t) = Y(t)$, $X(t)$, $Z(t)$, выделяются

системой равенств и неравенств, аналогичных ограничениям (1.3) и (1.8) на гарантированные статические потоки:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_r(t) \leq Y_r(t) \leq \bar{Y}_r(t), \quad \underline{Y}_r(t) - \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{rl} X_{rl}(t) &\leq 0, \\ \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{rl} X_{rl}(t) - \bar{Y}_r(t) &\leq 0, \\ \underline{Y}_s^k(t) - \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl}^k Z_{sl}(t) \leq 0, \quad \sum_{l \in L_v} \tilde{d}_{sl}^k Z_{sl}(t) - \bar{Y}_s^k(t) &\leq 0, \\ s \in S, \quad r \in R = S \cup J. \end{aligned} \quad (14)$$

Изменения запасов в “складах” сети, моделирующих объемы воды $y_i^0(t)$ и массы примесей $x_i^0(t) = \{x_{il}^0(t) | l \in L\}$ в водохранилищах ($i \in J$), связывают между собой водные ресурсы “соседних” временных сечений. Уравнения (1.9) и (1.10), описывающие законы сохранения масс воды и примесей в статике, в динамических условиях принимают вид:

$$\begin{aligned} y_i^0(t+1) - k_i^0 y_i^0(t) &= \sum_{s \in S_i^+} y_s^{k\omega}(t) - \sum_{s \in S_i^-} y_s^0(t) + b_{i0}^0(t), \\ x_{il}^0(t+1) - \sum_{\gamma \in L} A_i^{\gamma l \omega}(t) x_{i\gamma}^0(t) &= \\ = \sum_{s \in S_i^+} x_{sl}^0(t) - \sum_{s \in S_i^-} z_{sl}^0(t) + b_{il}^0(t), \quad i \in J, \quad \omega \in \Omega, \quad l \in L, \end{aligned} \quad (15)$$

где $A_i^{\gamma l \omega}(t)$ – коэффициенты, характеризующие трансформацию запасов, моделирующих массы примесей в водохранилищах, они аналогичны коэффициентам $A_s^{\gamma l \omega}$ преобразования потоков, соответствующих массам примесей в статической постановке.

Запасы в складах $\Gamma(J, S)$ должны удовлетворять начальным условиям, отражающим объемы воды и массы примесей, содержащихся в водохранилищах в начале расчетного периода:

$$\begin{aligned} y_i^0(T_0) = y_i^0(T_0), \quad x_{il}^0(T_0) = x_{il}^0(T_0), \\ i \in J, \quad l \in L, \quad \omega \in \Omega. \end{aligned} \quad (16)$$

Рассматривается управление с запаздыванием поступления водных ресурсов и, следовательно, примесей в них. Поэтому потоки в дугах сети $\Gamma(J, S)$ – аналоги потоков воды и примесей в ВХС – должны удовлетворять начальным условиям на полуинтервалах первоначального запаздывания:

$$\begin{aligned} y_s^0(t) = y_s^0(t), \quad x_{sl}^0(t) = x_{sl}^0(t), \\ t \in [T_0 - \theta_s^0, T_0 - 1], \quad s \in S, \quad l \in L, \quad \omega \in \Omega \end{aligned} \quad (17)$$

Затраты водопользователей за расчетный период складываются из затрат, связанных с ис-

пользованием водных ресурсов в выделенных временных отрезках:

$$\begin{aligned}
 f_s(W_s) &= \sum_{t \in T} f_{st}(W_s(t)) = \sum_{t \in T} f_{st}(V_s(t), v_s(t)) = \\
 &= \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega} p^\omega f_{st}^\omega(V_s(t), v_s(t)), \quad s \in S.
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Описанное представление ВХС в виде соотношений (12)–(18) как потоковой системы на сети, конфигурация которой воспроизводит конфигурацию сети системы, предоставляет возможность интерпретировать функционирование ВХС в динамических условиях в виде функционирования эквивалентной потоковой системы в статических условиях. Для этого сеть $\Gamma(J, S)$ трансформируется в расширенную сеть $\Gamma(\bar{J}, \bar{S})$, которая формируется из $\Gamma(J, S)$ повторением ее по числу временных сечений – концов отрезков времени, на которые разбит расчетный период. Подсети t -х временных сечений $\Gamma_t(\bar{J}, \bar{S})$, конфигурации которых совпадают с конфигурацией исходной сети $\Gamma(J, S)$, связаны дугами, моделирующими склады, и дугами с ненулевым запаздыванием в сети $\Gamma(J, S)$. Каждому складу, расположенному в вершине $\Gamma(J, S)$, в сети $\Gamma(\bar{J}, \bar{S})$ соответствует набор дуг $\{i_j\}$, которые связывают подсети $\Gamma_t(\bar{J}, \bar{S})$ различных временных сечений. Дуги исходят из вершин t -х подсетей $\Gamma_t(\bar{J}, \bar{S})$ и заходят в соответствующие им вершины в $(t + 1)$ -х подсетях $\Gamma_{t+1}(\bar{J}, \bar{S})$. Потоки в них моделируют объемы воды в водохранилищах в t -тые моменты времени; потери воды из водохранилищ учитываются коэффициентами усиления этих дуг k_{it}^ω . Дугам сети $\Gamma(J, S)$, моделирующим элементы ВХС с запаздыванием между моментами изъятия и возврата воды в систему, в сети $\Gamma(\bar{J}, \bar{S})$ соответствуют дуги, исходящие из вершин подсетей $\Gamma_t(\bar{J}, \bar{S})$, соответствующих створам изъятия воды, и заходящие в вершины подсетей $\Gamma_{t+\theta}(\bar{J}, \bar{S})$, изображающих створы возврата воды.

Начальные условия на объемы воды и массы примесей в водохранилищах имитируются потоками $y_i^0(T_0)$ и $x_{it}^0(T_0)$ в дугах i_0 , исходящих из подсети $\Gamma_0(\bar{J}, \bar{S})$ и заходящих в подсеть $\Gamma_1(\bar{J}, \bar{S})$. Начальные условия на объемы водных ресурсов и массы примесей на интервалах первоначального запаз-

дывания пользователей на участках рек, каналах моделируются источниками потоков $b_{s0}^\omega(\theta_s^\omega - \tau) = y_s^{\omega 0}(\theta_s^\omega - \tau)$ и $b_{st}^\omega(\theta_s^\omega - \tau) = x_{st}^{\omega 0}(\theta_s^\omega - \tau)$, где $\tau \in [1, \theta_s^\omega]$, в вершинах подсетей $\Gamma_{\theta-\tau}(\bar{J}, \bar{S})$, соответствующих створам, куда поступают запаздывающие потоки s -х дуг, заходящих в i -тые вершины.

Представление функционирования ВХС в динамических условиях в виде функционирования системы, эквивалентной той, которая соответствовала статическим условиям, означает, что механизмы согласования интересов государств, использующих трансграничные водные объекты и формирующих стратегии использования водных ресурсов в статических условиях, в равной степени пригодны и для случая динамических условий.

ВЫВОДЫ

Предложен рыночный механизм согласования интересов государств, претендующих на использование трансграничных водных ресурсов в ситуации, когда целесообразен пересмотр существующих соглашений. В процессе рыночного обмена “ведущими” выступают объемы водных ресурсов и массы содержащихся в них примесей. Ориентиры – гарантированные значения этих показателей – под них подстраиваются (являются “ведомыми”). Доказана сходимость описанного процесса.

Результаты согласования интересов трансграничных водопользователей в статической постановке, как при формировании новых соглашений, так и при пересмотре существующих, перенесены на выработку согласованных стратегий управления в динамике, которая рассматривается в дискретном времени.

Подход к выработке стратегий управления трансграничными водными ресурсами, изложенный в [1] и данной статье, применим к согласованию интересов “самостоятельных” пользователей ресурсов внутригосударственных водных объектов. В этом случае процесс достижения компромисса упрощается. Центр уже создан, он представлен государственными организациями. Согласование не обременено сложными международными коллизиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Трансграничные водные проблемы и подход к их решению // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 3. С. 306–319.