

УДК 519:87:681.8

Ф.И.Ерешко*, С.Т.Наврузов

**ПРИНЦИПЫ КООПЕРАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ
БАССЕЙНОВ ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК***(Представлено академиком АН Республики Таджикистан З.Д.Усмановым 11.02.2008 г.)*

Введение. Проблема водodelения трансграничных рек особенно актуальна в Центральной Азии, где исторически современное водное хозяйство сформировалось в условиях централизованного государственного регулирования. После приобретения независимости республики Центральной Азии столкнулись с проблемой дележа воды. Водные ресурсы рек региона используются в основном для удовлетворения потребностей энергетики, ирригации и коммунального хозяйства. При этом каждое из государств выставляет свои требования к использованию водных ресурсов. Эти требования входят в противоречие как с возможностями самого водного бассейна, так и с существующими в настоящее время нормами межгосударственного водораспределения, то есть дележа воды.

Эти и другие проблемы, связанные с управлением водными ресурсами трансграничных бассейнов, приобрели принципиальное значение, и главной задачей в данной проблеме является методология нахождения компромиссных решений на базе различных теоретических подходов с учётом неопределенности стока, что является природным неопределённым фактором, и действий стран с различными интересами, что является следствием целенаправленной деятельности всех участников процесса.

Одним из возможных методов поиска компромиссного решения является создание коалиции, объединяющей страны бассейна трансграничной реки, которая обеспечивает им суммарный результат не хуже (осторожно с теоретической точки зрения, а на практике строго лучше), чем результат, получаемый суммарно, когда каждая из стран действует независимо. И тогда важной становится проблема выработки устойчивого механизма дележа общего достояния.

Для разработки необходимого программного обеспечения можно обратиться к опыту создания Систем поддержки принятия решений в Институте водных проблем РАН [1,2].

В Международном институте системного анализа (IIASA) в Австрии были проведены разнообразные изыскания по применению теории игр к выработке механизмов совместного использования общего водного объекта [3]. Принимался принцип: минимальное требование **справедливого распределения** должно быть *индивидуально рациональным*, то есть любой игрок должен получить выигрыш в коалиции не меньше, чем он получил бы, не участвуя в ней (в противном случае он не будет участвовать в коалиции).

Иерархический компромисс. В вопросах формирования коалиций в настоящее время не существует однозначного решения. Можно приводить различные доводы в пользу того или иного способа формирования единого критерия или принципа компромисса, что будет конкретизировать тот или иной конечный выбор, однако в значительной степени последнее слово остается за неформальным решением. Опыт стран, имеющих трансграничные речные бассейны, свидетельствует, что устойчивое управление водными ресурсами и освоение их потенциала может быть эффективно осуществлено путём создания совместного органа речного бассейна (Совет или Водный комитет) с представительством в нем высших государственных органов управления Сторон при четко обозначенных правах и обязанностях.

Приведем формальные конструкции, которые могут быть использованы для создания такого механизма. Рассмотрим группу из n стран, расположенных вдоль водной артерии и загрязняющих ее вследствие промышленной деятельности. Предположим, что страны стремятся к увеличению функций

$$f_i = x_i - \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ji} z_j \quad (i = 2, \dots, n), \quad f_1 = x_1,$$

где переменные z_j , $j = 1, \dots, i-1$, характеризуют загрязнение реки j -ми странами, расположенными выше по течению i -й страны; коэффициент β_{ji} отражает вред от этого загрязнения для i -й страны, а $\{x_i\}$ – выпуски продукции стран.

Будем полагать, что загрязнение пропорционально уровню промышленной активности, то есть $x_i = \alpha_i z_i$. Поэтому

$$W_i = \alpha_i z_i - \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ji} z_j, \quad 0 \leq z_i \leq \alpha_i.$$

Ограничимся случаем двух стран и будем считать, что $\beta_1 > \alpha_1$. Введем в качестве метабели суммарное загрязнение $W_C^z = z_1 + z_2$ и примем, что страны могут обмениваться побочными платежами, так что выигрыши принимают вид

$$\begin{aligned} W_1 &= f_1(\cdot) - s_1(z_1) + s_2(z_2), \\ W_2 &= f_2(\cdot) + s_1(z_1) - s_2(z_2). \end{aligned}$$

Обусловленность этих платежей уровнями загрязнения устанавливает наднациональный орган. Тогда страны будут стремиться к $\max_{0 \leq z_i \leq \alpha_i} [f_i(\cdot) - s_i(z_i)]$, $i = 1, 2$, а задачей наднационального органа будет выбор таких функций $\{s_1, s_2\}$, то есть правил обмена, чтобы суммарное загрязнение было минимальным. Рассмотрим следующую точку

$$z_1^1 = 0, \quad z_2^1 = \frac{\alpha_1 a_1 + \alpha_2 a_2 - \beta_1 a_1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\alpha_2},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – произвольные малые числа. В этой точке первая страна ничего не производит, а вторая осуществляет промежуточный выпуск, причем

$$f_1^1 = 0, \quad f_2^1 = f_1^* + f_2^* + \varepsilon_1 + \varepsilon_2,$$

где f_1^*, f_2^* – гарантированные выигрыши стран, когда они действуют независимо.

Введем следующие правила:

$$s_1(z_1) = \begin{cases} 0, & z_1 = 0, \\ -k_1 z_1, & z_1 > 0, \quad k_1 > \alpha_1, \end{cases}$$

$$s_2(z_2) = \begin{cases} f_1^* + \varepsilon_1, & z_1 \leq z_2^1, \\ f_1^* + \varepsilon_1 + k_2(z_2 - z_2^1), & z_2 > z_2^1. \end{cases}$$

В этих условиях страны неизбежно выберут состояния (z_1^1, z_2^1) и получат выигрыш строго больше, чем в изоляции (на ε_1 и ε_2), причем компромиссное решение диктует первой стране минимум промышленной активности, а превышение на ε_1 гарантированного результата происходит за счет передачи ей части выигрыша второй страной. Такое функционирование обеспечивает минимум суммарного загрязнения.

Модель обоснования создания коалиции. Предлагаемый подход ориентирован на исследование целесообразности кооперации при управлении водными ресурсами на качественном уровне. Рассмотрим страны, расположенные в «линейном» бассейне одной реки. Пронумеруем их натуральными числами от 1 до n сверху вниз по течению. Будем предполагать, что в рассматриваемой стране имеется одна электростанция и при ней водохранилище, позволяющее создавать запасы воды. Рассмотрим функционирование водной системы на конечном отрезке времени. Каждому году присвоим номер (натуральное число) t , изменяющийся на интервале $1, \dots, T$. Введем обозначения. Пусть $A_u^k(t)$ – площадь, занятая под сельскохозяйственные культуры и расположенная выше водохранилища по течению в k -ой стране в году t , а $A_d^k(t)$ – площадь, занятая под сельскохозяйственные культуры и расположенная ниже водохранилища в той же стране и том же году. Обе эти величины являются управлениями соответствующей страны.

Обозначим $w^k(t)$ – объем воды, приходящей на территорию k -ой страны через государственную границу в году t , $w_o^k(t)$ – объем осадков, выпадающих непосредственно на территории данной страны в году t . Величины $w_o^k(t)$ будем считать случайными с известными распределениями вероятностей, которое определяется природными факторами. Пусть $w_b^k(t)$

– сброс воды через плотину водохранилища k -ой страны до периода полива в году t , $w_w^k(t)$ – сброс воды через ту же плотину в период полива в том же году, $w_a^k(t)$ – сброс воды через плотину водохранилища этой страны после периода полива в году t . Эти три величины считаем управлениями данной страны.

Аналогично $e_b^k(t)$ – производство электроэнергии на электростанции до периода полива, $e_w^k(t)$ – производство электроэнергии на электростанции в период полива, $e_a^k(t)$ – производство электроэнергии на электростанции после периода полива (все относится к k -ой стране и году t). Будем считать, что производство электроэнергии определяется производственными функциями выработки $e_b^k(t) = \varphi^k(w_b^k(t))$, $e_w^k(t) = \psi^k(w_w^k(t))$, $e_a^k(t) = \varphi^k(w_a^k(t))$. Считаем, что функции φ^k и ψ^k являются монотонно возрастающими от своих аргументов. Обозначим p_e^k – денежные затраты на производство единицы электроэнергии в k -ой стране. Обозначим $c_u^k(t)$ – объем воды, затрачиваемый на полив из источников, находящихся в k -ой стране выше по течению от водохранилища в году t , а $c_d^k(t)$ – объем воды затрачиваемый на полив из источников, находящихся в той же стране, но ниже по течению от водохранилища в том же году. Эти величины тоже являются управлениями. Примем ограничения на выбор управлений в форме вероятностных ограничений, что обеспечивает уровень гарантированной отдачи водного объекта: $Вер(c_u \leq w_u + w_o, c_d \leq w_w) > b$, где уровень b характеризует гарантию, на которую рассчитывает управляющий орган страны. Пусть $C_u^k(t)$ – объем сельскохозяйственной продукции, произведенной в k -ой стране на площадях, расположенных выше водохранилища, в году t , а $C_d^k(t)$ – объем сельскохозяйственной продукции, произведенной в той же стране на площадях, расположенных ниже водохранилища в том же году. Будем считать, что объемы производства определяются производственными функциями $C_u^k(t) = \Phi^k(A_u^k(t), c_u^k(t))$ и $C_d^k(t) = \Psi^k(A_d^k(t), c_d^k(t))$ и предполагать, что при фиксированных $A_u(t)$ и $A_d(t)$ функции Φ и Ψ монотонно возрастают и вогнуты по $c_u(t)$ и $c_d(t)$ соответственно.

Пусть $p_c^k(t)$ – денежные затраты на производство единицы сельхозпродукции в k -ой стране в году t . Предположим, что в году t k -я страна получает от $k+1$ -ой страны сумму $m^{k+1}(t)$ в уплату за пропускаемую воду в объеме $w^{k+1}(t)$.

Относительно водных потоков примем балансовое соотношение $w^{k+1}(t) = w_b^k(t) + w_w^k(t) + w_a^k(t) - c_d^k(t)$. Естественно считать, что $w^1 = 0$.

Примем следующие условия: а) при прочих равных условиях сельскохозяйственное производство выгоднее размещать ниже по течению, поскольку при этом вода, до того как будет использована на полив, обеспечит выработку электроэнергии; б) доходы от производ-

ства электроэнергии должны окупать затраты, что при современных технологиях выполняется, если нет дефицита мощностей; в) если поступающая вода дешевле продаваемой, то увеличение притока воды только увеличивает значение критерия страны.

Пусть $W^k(t)$ – объём воды в водохранилище страны k на конец года t . Тогда $W^k(t) = W^k(t-1) + w^k(t) + w_o^k(t) - c_u^k(t) - w_b^k(t) - w_w^k(t) - w_a^k(t)$.

В данной модели именно это ограничение определяет динамический характер задачи. Величину запасов воды в начале планового периода $W^k(0)$ будем считать заданным параметром. Будем считать, что цели k -ой страны описываются следующими вспомогательными критериями

- производством сельхозпродукции $C^k(t) = C_u^k(t) + C_d^k(t)$;
- объемами производства электроэнергии $e_b^k(t)$, $e_w^k(t)$ и $e_a^k(t)$;
- вероятностью чрезвычайного положения в результате засухи в будущем, которая монотонно зависит от запаса воды $W^k(t)$;
- финансовыми затратами $f^k(t) = p_e^k(t)(e_b^k(t) + e_w^k(t) + e_a^k(t)) + p_c^k(t)C^k(t)$;
- средствами $m^{k+1}(t) - m^k(t)$, вырученными за воду.

Предположим, что страны пользуются сверткой критериев

$\sum_{t=1}^T \lambda_t g_t^k(C^k(t), e_b^k(t), e_w^k(t), e_a^k(t), W^k(t), f^k(t), m^{k+1}(t) - m^k(t))$. Предполагаем, что функция g_t^k

убывает по аргументу f и возрастает по остальным аргументам. Величины λ_t интерпретируются как коэффициенты дисконтирования. Будем предполагать, что в условиях неопределённости страна ориентируется на математическое ожидание, причем в момент принятия решения о размере посевных площадей $A_u^k(t)$ и $A_d^k(t)$ в году t стране известны конкретные реализации случайных величин за все предыдущие годы. А при выборе всех остальных управлений, кроме того, известны и реализации случайных величин за текущий год. Учитывая данные предположения, задача выбора оптимального поведения носит характер двух-этапной задачи стохастического программирования.

Для обоснования принципа рациональности объединения в коалицию воспользуемся схемой динамического программирования. Введем обозначения. Пусть $P_t(\xi_t^1, \dots, \xi_t^n | \eta_{t-1}^1, \dots, \eta_{t-1}^n, \dots, \eta_1^1, \dots, \eta_1^n)$ обозначает вероятность того, что выполняется система неравенств

$$w_o^k(t) \leq \xi_t^k, \quad k = 1, \dots, n,$$

при условии, что имеют место равенства

$$w_o^k(\tau) = \eta_\tau^k, k = 1, \dots, n, \tau = t-1, \dots, 1.$$

Обозначим M_t оператор вычисления математического ожидания по распределению $P_t(\xi_t^1, \dots, \xi_t^n | \eta_{t-1}^1, \dots, \eta_{t-1}^n, \dots, \eta_1^1, \dots, \eta_1^n)$.

Схема метода динамического программирования для вычисления оптимальных результатов игроков при *изолированных действиях* и их оптимальных стратегий выглядит следующим образом. Положим $G_{T+1}^k(w^k(T), W^k(T-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(T), \dots, w_o^n(T)) = 0$. Пусть

$$\begin{aligned} H_t^k(A_u^k(t), A_d^k(t), w^k(t), W^k(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t), \dots, w_o^n(t)) = \\ = \max_{w_b^k(t), w_w^k(t), w_a^k(t), c_u^k(t), c_d^k(t)} [G_{t+1}^k(w^k(t), W^k(t), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t), \dots, w_o^n(t)) + \\ + \lambda_t g_t^k(C^k(t), e_b^k(t), e_w^k(t), e_a^k(t), W^k(t), f^k(t), m^{k+1}(t) - m^k(t))], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_t^k(A_u^k(t), A_d^k(t), w^k(t), W^k(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t-1), \dots, w_o^n(t-1)) = \\ = M_t H_t^k(A_u^k(t), A_d^k(t), w^k(t), W^k(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t), \dots, w_o^n(t)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_t^k(w^k(t), W^k(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t-1), \dots, w_o^n(t-1)) = \\ = \max_{A_u^k(t), A_d^k(t)} I_t^k(w^k(t), W^k(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t), \dots, w_o^n(t)), \end{aligned}$$

$$k = 1, \dots, n, t = T, \dots, 1.$$

Здесь максимумы вычисляются по всем значениям управлений, удовлетворяющих перечисленным выше ограничениям последовательно, начиная с $k=1, t=T$, до $k=n, t=T$, затем с $k=1, t=T-1$, и так далее, пробегая в возрастающем порядке все значения k , и потом уменьшая на 1 значение t .

Величина $G_0^k(W^k(0))$ равна оптимальному значению критерия k -ой страны, а величины, доставляющие максимумы в предыдущих выражениях, дают оптимальные стратегии в изоляции. Совокупность состояний стран, принимающих изоляционистское поведение в соответствии с вышеизложенными вычислениями, определим как состояние status quo для группы стран.

Аналогичным образом вычисляется максимум математического ожидания суммарного *коалиционного* результата стран:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^T \lambda_t g_t^k(C^k(t), e_b^k(t), e_w^k(t), e_a^k(t), W_a^k(t), f^k(t), p^{k+1}(t)w^{k+1}(t) - p^k(t)w^k(t)).$$

Положим $G_{T+1}^k(w^k(T), W^1(T-1), \dots, W^n(T-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(T), \dots, w_o^n(T)) = 0$. Пусть

$$\begin{aligned}
 & H_t(A_u^k(t), A_d^k(t), w^k(t), W^1(t-1), \dots, W^n(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t), \dots, w_o^n(t)) = \\
 & = \max_{\substack{w_b^k(t), w_w^k(t), w_a^k(t), c_u^k(t), c_d^k(t), p^k(t) \\ k=1, \dots, n}} [G_{t+1}(w^k(t), W^1(t-1), \dots, W^n(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t), \dots, w_o^n(t))] + \\
 & \quad + \sum_{k=1}^n \lambda_t g_t^k(C^k(t), e_b^k(t), e_w^k(t), e_a^k(t), W_a^k(t), f^k(t), m^{k+1}(t) - m^k(t)),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & I_t(A_u^k(t), A_d^k(t), w^k(t), W^1(t-1), \dots, W^n(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t-1), \dots, w_o^n(t-1)) = \\
 & = M_t H_t(A_u^k(t), A_d^k(t), W^1(t-1), \dots, W^n(t-1), w^k(t), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t), \dots, w_o^n(t)),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & G_t(w^k(t), W^1(t-1), \dots, W^n(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t-1), \dots, w_o^n(t-1)) = \\
 & = \max_{\substack{A_u^k(t), A_d^k(t) \\ k=1, \dots, n}} I_t(w^k(t), W^1(t-1), \dots, W^n(t-1), w_o^1(1), \dots, w_o^n(1), \dots, w_o^1(t), \dots, w_o^n(t)), \quad t=T, \dots, 1.
 \end{aligned}$$

Искомый результат равен $G_1(W^1(0), \dots, W^n(0))$, а оптимальные стратегии находятся при решении задач максимизации в промежуточные моменты.

По индукции, начиная с $t=T$ и кончая $t=1$, проверяется, что на каждом шаге описанных алгоритмов, опираясь на сделанные предположения, мы можем установить эффективность объединения стран в коалицию и возможность улучшения положения стран по сравнению с состоянием status quo. Решающим фактором является возможность использования нижележащими странами «доброжелательных» попусков вышележащих стран, а также возможность прямых обменов товарами и ресурсами без денежных расчётов. Разумеется, эффект от кооперации будет накапливаться от года к году.

Для случая, когда рассматриваемая река имеет притоки и в каждой стране находится несколько электростанций, все полученные качественные выводы относительно эффекта объединения в коалицию и целесообразности кооперации сохраняются. Как и в линейном каскаде, найдем состояние status quo. Для этого придется последовательно решить несколько задач оптимизации. Зафиксируем на рассматриваемой реке одну точку в устье и одну точку в истоке. Выделим на единственном простом пути, соединяющем эти точки, по одной электростанции на территории каждой страны. Управления, относящиеся ко всем другим электростанциям и прилегающим к ним сельскохозяйственным угодьям, положим равными соответствующим значениям в точке status quo и зафиксируем. Получим задачу, полностью аналогичную рассмотренной выше. В силу установленных свойств, найдутся управления, которые дают всем игрокам выигрыши большие, чем в точке status quo. Если мы теперь «отпустим» ранее зафиксированные управления, то выигрыши всех игроков могут только увеличиться.

*Вычислительный Центр РАН

Поступило 11.02.2008 г.

Институт математики АН Республики Таджикистан

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Пряжинская В.Г., Ярошевский Д.М., Левит-Гуревич Л.К. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.- 496с.
2. Хранович И.Л. Управления водными ресурсами. Поточные модели. – М.: Научный мир, 2001. 295 с.
3. Yong H.P., Okada N., Hashimoto T. Cost Allocation in Water Resources Development-A Case Study of Sweden. RR-80-32. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied System Analysis. September, 1980.

Ф.И.Ерешко, С.Т.Наврұзов

**ПРИНЦИПИ ҲАМКОРӢ ОИДИ ИСТИФОДАИ ЗАХИРАИ ОБИ ҲАВЗАИ
ДАРӚҲОИ БАЙНИСАРҲАДӢ**

Дар мақола усули ёфтани роҳҳои ҳалли мусолимадомези тақсимои захираҳои обҳои дарёҳои байнисарҳадӣ бо назардошти талаботи ҳар як давлати мустақил, омӯхта мешавад.

F.I.Ereshko, S.T.Navruzov

**PRINCIPLES OF COOPERATION FOR UTILIZATION OF WATER RESOURCES
IN THE BASINS OF TRANSBOUNDARY RIVERS**

The problem of complex use of water resources in Central Asia by taking into consideration the sovereignty of the states and increasing demand on use of water for economic are considered. The technique of finding a compromise solution among the needs of the states on management of transboundary water resources is studied.