

**Зав. кафедрой, д.т.н., проф. Г.Х. Исмайылов, проф. И.В. Прошляков**  
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Московский государственный  
университет природообустройства»

## **ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ БАССЕЙНА АРАЛЬСКОГО МОРЯ**

Проблемы бассейна Аральского моря, Приаралья и самого моря зависят от решения проблем водообеспечения Центральноазиатских республик. В докладе излагается один из возможных путей решения проблемы Арала, включающий в себя оздоровление социальных, экономических, экологических и политических условий в этом регионе и не претендующих на единственное решение данной проблемы.

Известно, что истоки почти всех значительных рек этого региона (Сырдарьи, Нарына, Кызыл-Су, Таласа, Чаткала, Амударьи, Вахша, Пянджа и др.) находятся в горах Киргизии и Таджикистана. Там в годы советской власти были созданы крупные водохранилища (Токтогульское, Кайраккумское, Нурекское и др.) и ГЭС, работающие на весь регион.

В бассейне р. Сырдарьи в настоящее время функционирует Нарын — Сырдарьинский каскад водохранилищ и ГЭС, включающий Токтогульский гидроузел (г/у) (р.Нарын, Республика Киргизия), Андижанский г/у (р. Карадарья, Республика Узбекистан), Кайраккумский г/у (р. Сырдарья, Республика Таджикистан), Чарвакский г/у (р. Чирчик, Республика Узбекистан) и Чардаринский г/у (р.Сырдарья, Республика Казахстан). Река Нарын является основным источником водных ресурсов в бассейне р. Сырдарьи.

Результаты исследований режимов работы Сырдарьинского каскада в составе пяти водохранилищ, осуществляющих сезонное и многолетнее регулирование стока, показали, что по мере роста суммарного водопотребления из главного ствола реки и ее основных притоков от 30 до 35 км<sup>3</sup>/год эффект регулирующего влияния водохранилищ снижается. Особенно, четко это проявляется в режиме работы Токтогульского водохранилища. При этом гарантированная отдача (P=90%) Сырдарьинского каскада водохранилищ составляет 33 км<sup>3</sup>/год.

Таким образом, можно полагать, что ввод новых гидроузлов с водохранилищами в верховьях р. Нарын может резко уменьшить ирригационный эффект от работы Нарын-Сырдарьинского каскада. Поэтому негативная позиция Узбекистана на создание Камбаратинской ГЭС-2 вполне объяснима. Тем более, что при существующей сильной зарегулированности стока р. Нарын ввод ГЭС, работающей в энергетическом режиме, приведёт к усложнению согласования режима работы Нарынского каскада в ирригационном режиме и ухудшению водно-экологической обстановки в Ферганской долине и нижнем течении р. Сырдарьи.

Все эти причины возникновения проблем Арала со всей очевидностью показывают, что необходимо радикальное улучшение социально-экономической, медико-гигиенической и экологической ситуаций здесь и сохранение моря как природного объекта. Очевидно, что достижение поставленной цели может быть осуществлено различными путями. Однако независимо от подходов, прежде всего необходимо

сформулировать те концептуальные положения, которые должны лежать в основе принципиальных решений проблемы Арала. При этом главенствующим общим принципом должно являться оздоровление социальных, экономических, экологических и политических условий во всем бассейне Аральского моря. При этом любое предложение, направленное на решение отдельных аспектов данной проблемы, должно обязательно увязываться в рамках единой концепции и программы.

Решение проблем Арала в значительной мере зависит от решения вопросов природопользования и водных проблем, в особенности на фоне оздоровления всей социальной и экономической деятельности в этом регионе. Поэтому решение данной проблемы требует пересмотра всех производительных, национальных, межрегиональных и политических связей для поиска и обоснования рациональной структуры и территориального размещения производительных сил региона. Реализация этих подходов требует коренного пересмотра политики водо- и землепользования во всем бассейне Арала с обязательным переустройством ирригационных систем. Только в этом случае возможно улучшение социально — экономических условий в Приаралье и всего бассейна Арала и сохранение Аральского моря как природного объекта.

Попытка изолированного решения отдельных задач и тем более для отдельных участков бассейна, не только не дает ожидаемого эффекта, но и может оказаться даже вредной для решения проблемы Арала в целом. Поэтому любой проект, направленный на решение отдельных аспектов Аральской проблемы, должен увязываться с единой концепцией и Программой, базирующейся на вышеизложенных принципах.

**Поэтому основной целью решения проблемы Арала является коренное улучшение социально-экономических, санитарно-гигиенических и экологических условий территории бассейна моря, Приаралья и самого моря.**

Соответственно, на наш взгляд, в основе решения Аральской проблемы должен лежать следующий комплекс взаимосвязанных, организационных и научно-исследовательских задач.

#### **1. Организационные задачи:**

- улучшение демографической ситуации и повышение занятости населения;
- создание нормальных условий для жизни, труда и отдыха в пределах всего бассейна Аральского моря;
- оздоровление санитарно — эпидемиологической обстановки;
- полное переустройство водо-и землепользования в бассейне;
- разработка и внедрение (в широких масштабах) ресурсосберегающих мероприятий и мероприятий по защите окружающей среды;
- обеспечение питьевой водой населения региона, в первую очередь населения Приаралья, создание возможности управления притоком и качеством речных вод с целью регулирования уровня, солености и продуктивности моря;
- разработка механизма реализации предполагаемых мероприятий по улучшению социально — экономической ситуации в Аральском регионе;
- **заключение межреспубликанского договора** об использовании и охране водных, земельных и биологических ресурсов этого региона. В этом договоре должны найти четкое отражение экономические, экологические и политические аспекты использования, охраны и воспроизводства водных ресурсов бассейна Арала и степень участия каждой суверенной республики в финансировании мероприятий по сохранению Арала. Здесь же должны быть определены объемы и качество воды, которые каждая республика имеет право использовать на своей территории для развития хозяйства и улучшения

экологической ситуации, объемы и качество воды, передаваемой соседним республикам, объемы и качество коллекторно-дренажных вод, сбрасываемых в русла рек и, наконец, объемы и качество воды, сбрасываемой в Аральское море;

- **Использование международно-правовых аспектов в управлении водными ресурсами трансграничных рек этого региона.** Учитывая определенную специфику данной задачи, не будем в неё углубляться. В то же время остановимся на следующих постулируемых нами позициях. Здесь прежде всего необходимо исходить из концепции, что правовые аспекты использования водных ресурсов трансграничных рек должны регулироваться международными соглашениями и договорами. Основными документами, на наш взгляд, являются две международные конвенции — Конвенция по оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте (1991г.) и Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер (1992г.). Уместно отметить, что они носят достаточно общий (рекомендательный) характер и затрагивают преимущественно экологические аспекты проблемы трансграничных водных ресурсов и в меньшей степени - они касаются самих проблем управления водными ресурсами трансграничных рек.

Из этих документов следует, что владельцем водных ресурсов, является государство, на территории которого они сформировались. Именно государство – владелец правомочно распоряжаться этими водными ресурсами, причем должно делать это рационально, то есть без ущерба для экологии и хозяйственной деятельности государств, находящихся ниже по течению. Однако в этих документах специально не рассматривается, как государства должны соблюдать требования по сохранению санитарных, экологических и других норм на принадлежащих им частях водосборов, включая очистку загрязненных вод. Кроме того, в упомянутых документах отсутствует механизм возмещения затрат на воспроизводство водных ресурсов на территориях вышерасположенных государств. Здесь же необходимо также отметить, что любые изменения естественного режима водных ресурсов, используемых государствами, должны согласовываться всеми участниками водопользователями.

Следовательно, для эффективной работы этих соглашений, необходима детальная проработка договорной системы управления водными ресурсами трансграничных рек, учитывающей все аспекты проблемы. Для регулирования взаимоотношений создаются межгосударственные структуры, решения которых, принятые при общем согласии, имеют юридическую силу для участников, то есть появляются органы, представляющие собой некоторый международный «Центр» со своим набором критериев. Этот «Центр», по нашим соображениям, должен располагать системой математических моделей функционирования водноресурсной системы бассейнов рек Амударьи и Сырдарьи, учитывающих интересы, как отдельных подсистем (суверенных государств), так и региона в целом. Исходя из вышесказанного понятно, что для международно-правового регулирования использования бассейнов трансграничных рек в настоящее время должно быть характерно стремление к поиску компромисса между требованиями экологии и потребностями хозяйственной деятельности человека.

В рамках рассматриваемой организационной задачи не исключено и рассмотрение в качестве варианта привлечение извне дополнительных водных ресурсов северного соседа (России).

## **2. Научно-исследовательские задачи:**

Прежде всего необходимо отметить, что решение проблемы Аральского моря сводится, в конечном счете, к решению двух ключевых, тесно связанных между собой фундаментальных задач. **Первая из них состоит в установлении тех свойств и функций Аральского моря, включая дельты рек Амударьи и Сырдарьи как природных объектов. Вторая - коренное переустройство водо- и землепользования в бассейне моря, позволяющее не только улучшить его социально — экономические и экологические**

условия, но и обеспечить такой приток речных вод в море, который бы обеспечивал выполнение соответствующих свойств и функций Аральского моря, как природного объекта. От ответа на вопрос о сохранении гидрометеорологических, гидрогеологических и экологических функций моря зависит стратегия и тактика улучшения социально — экономических и экологических условий как Приаралья, так и во всём бассейне моря. Ключевым вопросом здесь является управление водным балансом Аральского моря. При этом варианты и средства управления водным балансом моря должны быть определены в результате специальных исследований. Выполнение морем вышеприведенных функций требует поступления в него соответствующего притока речных вод. Последнее может быть обеспечено за счет поиска дополнительных водных ресурсов, источником которых могут быть как собственные (бассейновые) источники, так и внешние, как об этом указывалось выше. Спектр возможных источников водных ресурсов достаточно широк — от искусственного осаждения атмосферных осадков и таяния ледников (нетрадиционные источники водных ресурсов) до переброски речных вод из смежных и отдаленных речных систем. При этом независимо от источников пополнения водных ресурсов моря, решение проблемы Арала должно исходить из коренного переустройства водо- и землепользования в бассейне моря, включающего в себя изменение стратегии развития производительных сил и инфраструктуры народного хозяйства, в том числе частичная замена посевов хлопка, ликвидация потерь сельскохозяйственной продукции, изменение экспортной политики, развитие перерабатывающих и ряда других отраслей народного хозяйства, снижение площадей под рисом, частичный вывод непродуктивных орошаемых земель из оборота, регулирование химического состава коллекторно-дренажных вод и управление ими, внедрение новых водосберегающих технологий в сельском хозяйстве и промышленности, создание и внедрение новых, более продуктивных сортов растений и, наконец,— всемерного использования современных ГИС-технологий и мониторинга сохранения качества окружающей природной среды.

Подводя итог вышесказанному, можно прийти к выводу, что решение указанных ключевых задач во многом будет зависеть от успешного решения ниже перечисленных фундаментальных и прикладных задач:

- разработка водохозяйственной стратегии для бассейна Арала с учетом новых политических и экономических условий, а также возможных изменений климата;
- обоснование комплекса гидролого — водохозяйственных мероприятий по рационализации водо- и землепользования и улучшения экологической обстановки в бассейне Аральского моря и Приаралье;
- разработка вариантов водообеспечения хозяйства и населения в бассейне Арала с учетом улучшения экологических обстановки в регионе;
- разработка системы эколого — экономических моделей для обоснования принятых решений по улучшению социально-экономической и экологической ситуации в регионе и сохранению Арала как природного объекта;
- анализ и оценка структуры водно-солевого баланса бассейна Аральского моря и самого моря и ее изменения при различных вариантах развития водопотребления;
- анализ и оценка изменений уровня Аральского моря и состояния его экосистемы при различных вариантах развития водопотребления в его бассейне;
- анализ, оценка и прогноз водных ресурсов бассейна Аральского бассейна, как для современных климатических условий, так и для сценариев возможных изменений климата;
- разработка мониторинга Аральского бассейна, включающего в себя автоматизированную информационную систему использования, охраны и воспроизводства водных, земельных и биологических ресурсов (АИС «Арал»).

В заключение отметим следующие положения, которые, на наш взгляд, являются очень важными для водоустройства и сохранения качества окружающей среды стран СНГ и прежде всего, - Центрально - азиатских республик.

Несмотря на изменения, происшедшие в политической и социально — экономической жизни стран СНГ в конце XX-го столетия, роль водного фактора, как элемента производительных сил и как ландшафтообразующего фактора, остается предопределяющей для жизни населения этих стран и развития их экономики. Одновременно становится все более актуальной и все более усложняется проблема водообеспечения развивающихся экономик стран СНГ и управления их водными ресурсами. В связи с этим необходимо проведение комплекса научных исследований в рамках проблемы «Разработка стратегии и определение путей решения водообеспечения стран СНГ в отдаленной перспективе с учетом возможных изменений климата и стратегии развития экономик этих стран».

В сущности, речь идет о разработке «Генеральной схемы комплексного использования, охраны и воспроизводства водных ресурсов» на ближайшие 20-30 лет с учетом новых реалий в России, странах СНГ и мире. Для научного обоснования такого рода «Схемы» могут быть использованы результаты фундаментальных исследований, проводимых институтами России, включая Российскую Академию наук, а также образовательными учреждениями России, в том числе Московским государственным университетом Природообустройства (бывший Московский гидромелиоративный институт).

Излагая методологию системного подхода к управлению водными ресурсами бассейна Аральского моря, остановимся на его прикладном аппарате - математическом моделировании. Совместное использование водных ресурсов речных бассейнов несколькими суверенными государствами, расположенными в пределах этих бассейнов, является конфликтным. Требования отдельных государств к естественному режиму и качеству речных вод различно. Если к этому добавить еще и требования по сохранению качества окружающей природной среды, то становится очевидным, насколько сложным является согласование их интересов в пределах рассматриваемых речных бассейнов. Следовательно, требуется достижение согласия между участниками, использующими водные ресурсы данного речного бассейна, включая интересы окружающей природной среды. Для формализации и решения о выходе из данной конфликтной ситуации при управлении водными ресурсами трансграничных рек, необходимо на формальном математическом языке раскрыть и описать связи между водноресурсной системой (ВРС) с одной стороны и её участниками – с другой. В качестве формального аппарата можно использовать системы математических моделей, работающих в оптимизационном и имитационном режимах. В рамках рассматриваемого подхода нами предлагается использовать связанные между собой двухуровневую оптимизационную модель управления водными ресурсами трансграничных рек и имитационную модель функционирования системы водохранилищ с учетом качества воды в русловой части речного бассейна.

**Двухуровневая оптимизационная модель** На верхнем уровне создается некоторый так называемый «Центр», формулирующий глобальные задачи распределения водных ресурсов всего бассейна, а на нижнем уровне создаются подсистемы, отражающие интересы суверенных государств, устьевых областей и Аральского моря, где формулируются аналогичные задачи, решаемые на этом уровне. «Центр» является координирующим органом, который включает в себя представителей всех суверенных государств и стремится распределить глобальные водные ресурсы между отдельными суверенными государствами (подсистемами) с учетом интересов устьевых областей и Аральского моря. В реальных условиях управления "Центр" имеет общую картину на всей территории речного бассейна, но не обладает информацией об эколого-экономических

процессах, хорошо известных отдельным подсистемам. С другой стороны, на нижнем уровне хорошо известны эколого-экономические аспекты использования водных ресурсов в своих подсистемах, но не известны ситуации в других подсистемах и в целом по бассейну, тем более в замыкающем внутреннем водоеме, включая нижнее течение, дельту и Аральское море. Очевидно, что система таких моделей должна быть построена и взаимоувязана по принципу двухуровневой системы управления водными ресурсами с ярко выраженными вертикальными связями. Последние должны быть двух типов. Первый

тип взаимосвязей - координирующие воздействия  $v_i$ , поступающие от вышестоящей к нижестоящим управляющим системам (Рис.1). Под влиянием координирующих воздействий  $v_i$  системы нижнего уровня вырабатывают локальные плановые решения  $x_i$  и сигналы обратной связи  $\lambda_i$ . Эти сигналы представляют собой реакцию

нижестоящих систем на координирующие воздействия  $v_i$ . Передача наверх этих сигналов порождает второй тип взаимосвязей между управляющими системами. В описываемой системе выработка выходных управляющих решений происходит только на нижнем уровне. Следовательно, в двухуровневой системе управления управляющее

решение  $x$  вырабатывается композицией локальных решений  $x = \{x_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$  отдельных суверенных государств или субъектов этих государств, расположенных в бассейне реки. Вышестоящая система непосредственно не участвует в разработке решения  $x_i$ , она влияет на него с помощью координирующих воздействий  $v_i$ . При этом

следует отметить, что разработка управляющего решения  $x_i$  в двухуровневой системе представляет собой итеративный процесс. Таким образом, в рассматриваемых

двухуровневых системах нахождение планов использования водных ресурсов  $x_i$  и сигналов обратной связи  $\lambda_i$  каждой нижестоящей локальной системой производится с

помощью решения некоторой оптимизационной задачи  $L_i(v_i)$ , которую будем называть локальной оптимизационной задачей. Условимся также, что для выработки

координирующих воздействий  $v = (v_i)$  используется координирующая модель  $L_0(\lambda)$ . Следовательно, для управления водными ресурсами трансграничных рек

двухуровневая система моделей строится с целью расчленения сложной глобальной оптимизационной задачи на ряд локальных подзадач (увязку которых осуществляет координационная модель). В результате функционирования двухуровневой системы

нижестоящие локальные подсистемы вырабатывают решения  $x_i$ , композиция которых должна совпадать или быть максимально приближена к оптимальному глобальному плану. Поэтому построение рассматриваемого класса двухуровневых систем непосредственно связано с проблемой разработки методов согласования локальных оптимумов с глобальными.

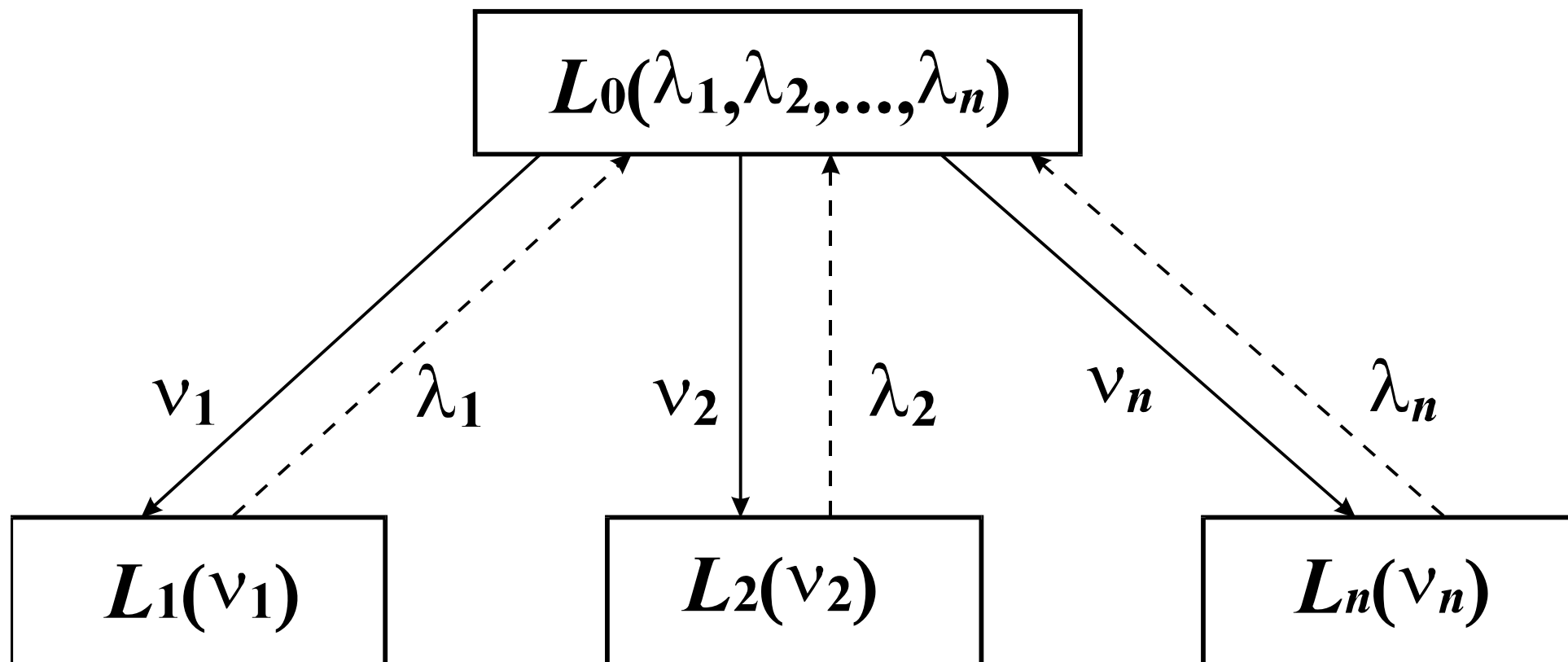


Рис. 1. Общая схема двухуровневой системы управления водными ресурсами речного бассейна.

**Математическая постановка задачи.** Хотя водные ресурсы могут быть использованы для различных целей, в данной постановке рассматривается использование водных ресурсов преимущественно в сельском хозяйстве. Интересы других водопотребителей, особенно населения, задаются в виде ограничений, т.е. удовлетворяются полностью. Задача оптимального распределения водных ресурсов между сельскохозяйственными участниками водохозяйственной системы речного бассейна в матричной записи формулируется так:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Прямая задача} & \text{Двойственная задача} \\
 (C, X) \rightarrow \max & (Y, b) \rightarrow \min \\
 \begin{array}{l} AX \leq b \\ DX \geq B \\ X \geq 0 \end{array} & \begin{array}{l} YA \geq C' \\ Y \geq 0 \end{array}
 \end{array} \quad (1)$$

где  $X = (x_1, \dots, x_n)$  —  $n$ -мерный вектор-столбец (переменная прямой задачи, либо площадь всех категорий орошаемых и богарных земель, либо объем воды, подаваемой  $j$ -му сельскохозяйственному участнику с  $i$ -го створа реки);  $C = (c_1, \dots, c_n)$  —  $n$ -мерный вектор-строка (эффективность);  $A$ - матрица условий (удельные затраты всех видов производственных и природных ресурсов) размерности  $m \times n$ ;  $b$  —  $m$ -мерный вектор-столбец (производственные и природные ресурсы, необходимые для ведения сельхозпроизводства);  $Y = (y_1, \dots, y_m)$  —  $m$ -мерный вектор-столбец (переменная двойственной задачи - система расчетных цен, то есть оценка производственных и природных ресурсов);  $D$  — матрица интенсивности (урожайности) производства, размерностью  $m_D \times n$ ;  $B$  —  $m_D$ -мерный вектор-столбец (объем необходимой сельскохозяйственной продукции, который предприятие получит за год). В дальнейшем задачу (1) будем называть полной информационной (ПИ) задачей координирующего центра, сокращенно — ПИ-задачей (задача верхнего уровня).

Разобьем матрицу  $A$  на подматрицы  $A_1, \dots, A_j, \dots, A_J$ , где при каждом  $j \in J$  матрица  $A_j$  имеет размерность  $m \times n_j$ . Речь идет о разбиении бассейна реки на отдельные подсистемы, каждая из которых является относительно самостоятельной; в то же время она взаимосвязана с некоторыми глобальными ресурсами, и, прежде всего, с водными. Тогда соответственно разбиваются: матрица  $D = (D_1, \dots, D_j, \dots, D_J)$ , векторы  $C = (C_1, \dots, C_j, \dots, C_J)$  и  $X = (X_1, \dots, X_j, \dots, X_J)$ , причем размерность  $C_j, X_j$  для  $j \in J$  равняется  $n_j$ . Тогда ПИ-задача преобразуется к

$$\left. \begin{aligned} \sum_1^J (C_j, X_j) &\rightarrow \max \\ \sum_1^J A_j X_j &\leq b \\ \sum_1^J D_j X_j &\geq B \\ X_j &\geq 0, j \in [1, J] \end{aligned} \right\} \text{ и } \left\{ \begin{aligned} (Y, b) &\rightarrow \min \\ Y_1 A_1 &\geq C_1 \\ &\dots\dots\dots \\ Y_j A_j &\geq C_j \\ &\dots\dots\dots \\ Y_J A_J &\geq C_J \\ Y_j &\geq 0, j \in [1, J] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Вводим  $m$ -мерный вектор-столбец  $u_j, j \in [1, J]$ , удовлетворяющий условию

$$\sum_1^J u_j \leq b \quad (3)$$

Скомпонованный из них план называется ПИ-планом (центральным планом). Вектор  $u_j$  есть план  $j$ -го подсистемного компонента центрального плана  $U$ . Как уже отмечалось, под подсистемой понимается часть бассейна, региона, территории суверенного государства, административная территориальная единица, экономический район и тому

подобное, а  $u_j$  — глобальный водный ресурс, который выделяется «Центром» для  $j$ -ой подсистемы. Далее формулируются задачи линейного программирования для  $j$ -ой подсистемы при центральном плане  $U = (u_1, u_2, \dots, u_j)$ . В дальнейшем задачи (1) и (2) с ограничением (3) сводятся к максиминной задаче, для решения которой используется теоретико-игровая модель. При численном решении рассматриваемых задач используется симплексный алгоритм линейного программирования.

Таким образом, решение двухуровневой модели (1) – (3) позволяет, получить оптимальные планы распределения водных ресурсов между участниками водноресурсных систем (ВРС) с учетом интересов природных комплексов. При этом следует отметить, что решения, принимаемые с помощью рассмотренной двухуровневой модели, получены в предположении, что водные ресурсы не меняются внутри года. В реальности же располагаемые водные ресурсы (как и водопотребление) имеет внутригодовое распределение. Поэтому возникает следующая задача, — окончательного распределения водных ресурсов между участниками ВРС с учетом динамики водных ресурсов и согласование требований водопотребителей (в том числе гидроэнергетики) с внутригодовыми их распределениями. Для достижения этого используется имитационная модель функционирования ВРС с водохранилищами.

**Имитационная модель функционирования ВРС.** Общая постановка задачи функционирования водноресурсной системы с водохранилищами формулируется следующим образом.

Рассматривается водноресурсная система, состоящая из каскада  $N$  водохранилищ с ГЭС, расположенных на основных и боковых притоках реки. Каждое водохранилище имеет  $m$  участников. В качестве участников принимаются: ирригация, гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, санитарные попуски и требования

природных комплексов. Период регулирования разбивается на  $n$  равных (или неравных) отрезков времени. Выбор расчетного отрезка времени зависит от вида регулирования речного стока в пределах одного водохозяйственного года с увязкой его со следующим годом, а продолжительность расчетного интервала полагается равной одному месяцу, декаде или пентаде. Учитывая важность водоснабжения населения, а также малую долю промышленного водоснабжения (не более 5% от общего водопотребления), в рамках данной постановки предусматривается их полное обеспечение и соответственно в модель их требования включаются в виде ограничений.

Предполагается также, что все потребители воды расположенные вдоль реки, формируют загрязненные сбросные и возвратные воды. Сброс этих вод в русло реки, прежде всего, ухудшает показатели качества речной воды, а также сопряжен с ухудшением почвенно-мелиоративных условий в ирригационных системах региона и, как следствие этого, со снижением продуктивности сельскохозяйственных земель.

В связи с этим предполагается, что каждая ирригационная система на выходе имеет накопители (искусственные или естественные), позволяющие в зависимости от аккумулирующей способности реки перераспределять во времени и в пространстве сток возвратных вод и тем самым сохранять нормативы показателей качества речной воды. Основным требованием к накопителям является максимум их опорожнения в конце водохозяйственного года (в зависимости от водности года) при сохранении в контрольных створах водотока, расположенных ниже по течению, концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в речной воде не превышающей предельно допустимую.

Математическая постановка рассматриваемой задачи такова: требуется минимизировать функционал

$$\Phi(\vec{V}, \vec{U}, t) = \min M \left[ \sum_{t=0}^T \left| \frac{\vec{U}_t - \vec{U}_{opt}}{\vec{U}_{opt}} \right| \right], \quad (4)$$

$$\vec{V} = A\vec{W} + B\vec{U}, \quad (5)$$

$$\underline{\vec{V}} \leq \vec{V} \leq \overline{\vec{V}}, \quad (6)$$

$$\vec{U} \geq 0 \quad (7)$$

при  $t = 0, \vec{V} = \vec{V}_0$ , где  $\vec{V}$  - вектор наполнения,  $\vec{U}$  - вектор попусков из водохранилищ,  $\vec{U}_{opt}$  - оптимальные значения попусков,  $\vec{W}$  - вектор водных ресурсов,  $t$  - текущее время,  $A$  и  $B$  - матрицы системных условий.

Решение задачи управления каскадом водохранилищ в постановке

(4) - (7) требует использования прямых методов стохастического программирования. Учитывая неполноту вероятностной характеристики исходной информации, исключительную трудоемкость расчетов (особенно при динамической постановке задачи) для решения поставленной задачи (4) - (7) строится имитационная модель функционирования каскада водохранилищ многоцелевого назначения. Ограничения (6) и (7) применительно ВРС с  $N$  взаимосвязанными водохранилищами и накопителями высокоминерализованного стока возвратных вод описывают:

1. Динамику воды в водохранилище в момент времени  $t$ :

$$\frac{dV_i(t)}{dt} - Q_i(t) + \rho_i(t) + U_i(t) + r_i(t) = 0, V_i(t_0) = V_i^0, i = \overline{1, N}$$

$$V_i = V_i(Q_i, H_i), \quad i = \overline{1, N}$$

2. Кинетику процессов смешения солей в водохранилище в момент времени  $t$  :

$$\frac{dM_i(t)}{dt} - \sum_{j=1}^{n_i} q_{ij}(t)C_{ij}(t) - m_{\text{дн},t} + \rho_i(t)C_i(t) +$$

$$U_i(t)C_i(t) + \alpha_i V_i C_i(t) = 0, \quad M_i(t_0) = M_i^0, \quad i = \overline{1, N}$$

3. Динамику воды в накопителе в момент времени  $t$  :

$$\frac{dV_i^c(t)}{dt} - q_i^c(t) + U_i^c(t) + r_i^c(t) = 0, \quad V_i^c(t_0) = V_i^c{}^0, \quad i = \overline{1, N}$$

$$V_i^c = V_i^c(q_i^c, H_i^c), \quad i = \overline{1, N}$$

С учетом изложенных гидролого-водохозяйственных особенностей речного бассейна задача управления объемом и минерализацией речной воды формулируется следующим образом.

При заданной структуре русловой части ВРС и орошаемой агроэкосистемы требуется найти такие объемы и режимы речного и ирригационно-возвратного стока, при которых обеспечиваются надежное снабжение водой пользователей и надлежащая минерализация речной ( $\leq 1$  г/л), оросительной ( $\leq 1,5$  г/л) и хозяйственно-питьевой ( $\leq 1$  г/л) воды при соблюдении специальных попусков (санитарных, экологических, энергетических) по всей длине реки.

**В заключение** отметим, что использование предложенной нами концепции и его прикладного аппарата математического моделирования позволяет провести более углубленное гидролого-водохозяйственное обоснование комплекса мероприятий, способствующих дальнейшей интенсификации водо- и землепользования в бассейне Аральского моря и улучшению социально-экологической обстановки в этом регионе.