

УДК 556.18(084.2), 519.8

Е. Т. Оразов¹, А. И. Твердовский²

¹ГНС, к.ф.-м.н. (Институт математики МОН РК, Алматы, Казахстан)

²Зав. отделом (ПК «Казгипроводхоз», Алматы, Казахстан)

ИМИТАЦИОННОЕ И ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЛГОСРОЧНОЙ ДИНАМИКИ ОБЪЕКТОВ ВОДНОГО ФОНДА БАССЕЙНА ОЗЕРА БАЛКАШ

Аннотация. Статья посвящена расширенному воспроизводству нормативно чистых возвратных вод как альтернативы китайской стратегии неограниченного водозабора. Рассматриваются некоторые типы производственных функций, имитирующих процессы очищения.

Ключевые слова: расширенное воспроизводство, нормативно чистые воды, изъятие части стока трансграничных вод, неограниченный водозабор.

Введение. Как показывают расчеты водного баланса, если к уровню 2050 года дефицит воды достигнет 4–6 км³, то покрыть его будет нечем. А это приведет к снижению уровня оз. Балкаш на 40–50 см и даже до 70 см со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Таким образом, единственно верным решением, которое должны уяснить все организации, решающие вопросы водной безопасности, в том числе на международном уровне, является замораживание отбора воды в КНР на современном уровне – 5,027 км³. Но замораживание отбора воды не входит в стратегические планы КНР, поэтому нужно найти решение вопроса, связанное с увеличением ресурсов вод на собственной территории. Таким решением может оказаться промышленное производство нормативно чистых возвратных вод [1, 2].

1. Цель и задачи моделирования долгосрочной динамики Водного фонда. Исследуем кратко одну из модификаций имитационной модели долгосрочного планирования деятельности по производству экологически чистых возвратных вод. Рассмотрим три основных источника поступления поверхностных вод в бассейн р. Иле [3, 4].

Таблица 1 – Основные источники поступления поверхностных вод в бассейн р. Иле [3, 4]

Среднегодовые в базовом периоде ресурсы поверхностных вод, формируемых в КНР, $\Phi_{\tau 0}^{КНР}$	Среднегодовые в базовом периоде ресурсы поверхностных вод, формируемых в РК, $\Phi_{\tau 0}^{РК}$	Среднегодовые в базовом году поступления воды в оз. Балкаш по бас. р. Иле, $\Phi_0^{Блх}$
$\Phi_{\tau 0}^{КНР} = 12,646 \text{ км}^3/\text{Г}$	$\Phi_{\tau 0}^{РК} = 6,165 \text{ км}^3/\text{Г}$	$\Phi_0^{Блх} = 12,015 \text{ км}^3/\text{Г}$

Как видно из таблицы 1, более трети запасов пресной или мало соленой воды в бассейне р. Иле сосредоточено в озерной системе. Поэтому и решение основных проблем охраны и рационального использования вод в этом регионе должно быть связано не только со стоком рек, но и с очисткой и использованием минерализованных озерных вод и пополнением их запасов.

Далее, возможна ситуация, когда прирост Водного фонда за счет эффективности его использования не обеспечит всех потребностей растущей экономики региона, тогда Стратегия – 2050 должна предусматривать переброску части стока реки Ертис в бассейн оз. Балкаш, но это уже геополитическая проблема, поскольку реки Ертыс и Иле являются трансграничными. Таким образом, мы

формулируем следующую главную цель: **прогноз (планирование) состояния озерной части Водного фонда бассейна р. Иле на долгосрочную перспективу (до 2050 года).**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие четыре задачи:

1. Выбрать временной шаг отображения состояния динамической системы соответственно горизонту прогнозирования.

2. Построить имитационную модель динамики Водного фонда бассейна р. Иле, отражающую основные требования Стратегии-2050.

3. Построить теоретико-игровую модель Соглашения между РК и КНР о величине допустимого изъятия Водного фонда бассейна р. Иле.

4. Разработать программное обеспечение решения задач 1–3.

1.1. Выбор временного шага имитационной модели. Обозначим через τ_i – эквидистантное разбиение времени от 2000 до 2050 года на периоды квазистационарности гидрологических параметров развития водохозяйственной системы бассейна р. Иле. В этом контексте предлагается этот полувековой отрезок времени разбить на 5 периодов:

τ_0 – с 2001 по 2010 г.;

τ_1 – с 2011 по 2020 г.;

τ_2 – с 2021 по 2030 г.;

τ_3 – с 2031 по 2040 г.;

τ_4 – с 2041 по 2050 г.

Период τ_0 будем называть базовым периодом, имея в виду что начальные условия динамической системы задаются мониторингом, а все остальные показатели состояния динамической системы будут определяться рекурсивно исходя из состояния в базовом периоде, коэффициента допустимого изъятия водных ресурсов на нужды экономики и социальной сферы, а также сценария восполнения изъятых водных ресурсов природного комплекса. Обозначим через: Φ_{τ_0} – средний годовой объем Водного фонда поверхностных вод Республики Казахстан базового периода. Так как годовой объем Водного фонда может колебаться в зависимости от водности года, то величину Φ_{τ_0} естественней называть нормой накопления в базовом периоде. Так, по данным таблицы 1 объем Φ_{τ_0} примерно равен 15 км³. При этом распределение запасов по водным объектам следующее:

1) $\Phi_{\tau_0}^1 = 11$ км³ – норма накопления запасов воды озерного фонда (55% от Φ_{τ_0});

2) $\Phi_{\tau_0}^2 = 7,7$ км³ – норма накопления неочищенных сточных вод (7% от $\Phi_{\tau_0}^1$).

1.2. Имитационное моделирование процессов формирования и использования Водного фонда бассейна р. Иле на долгосрочную перспективу. Динамику Водного фонда в имитационной модели будем задавать последовательно, с помощью следующего рекуррентного уравнения:

$$\Phi_{\tau_{i+1}} = \Phi_{\tau_i} \cdot (1 - \mu_{\tau_i}) + \Delta_{\tau_{i+1}}^1 + \Delta_{\tau_{i+1}}^2 \quad i=0, 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

где Φ_{τ_i} – объем фонда в предыдущем периоде; μ_{τ_i} – норматив допустимого изъятия вод из фонда Φ_{τ_i} ; $\Delta_{\tau_{i+1}}^1$ – природно-климатическое пополнение запасов поверхностных вод за счет осадков и инфильтрации подземных вод; $\Delta_{\tau_{i+1}}^2$ – антропогенное пополнение запасов поверхностных вод за счет производства (очистки) нормативно чистых возвратных вод.

$\Phi_{\tau_i} \cdot (1 - \mu_{\tau_i})$ интерпретируется как переходящий на следующий период остаток фонда Φ_{τ_i} . Для введения основных математических характеристик производственной функции и выяснения их экономической интерпретации рассмотрим двухфакторную производственную функцию. Обозначим через K объем основных фондов в стоимостном выражении либо в натуральном (скажем, суммарного осмотического давления очистных сооружений). Пусть L – числовое выражение объема трудовых ресурсов, т.е. число рабочих, число человеко-дней, человеко-часов и т. д.; Y – объем выпущенной продукции в стоимостном выражении либо в натуральном, если мы имеем дело с отраслью, выпускающей один продукт (скажем, воду). Тогда производственная функция будет иметь вид

$$Y = F(K, L) \text{ млн м}^3/\text{год.}$$

В качестве примера будем рассматривать одну из наиболее распространенных двух факторных функций – функцию Кобба–Дугласа:

$$Y = AK^{\alpha}L^{\beta},$$

где $A > 0$ – константа, $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$, $\alpha + \beta = 1$. Обычные требования на производственную функцию заключаются в требованиях гладкости и условиях:

$$\frac{\partial F}{\partial K} > 0, \frac{\partial F}{\partial L} > 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial K^2} < 0, \frac{\partial^2 F}{\partial L^2} < 0, K, L > 0. \quad (3)$$

Смысл условий (2) ясен: при увеличении объема одного из факторов и неизменном объеме другого выпуск продукции возрастает. Условия (3) означают, что при фиксированном объеме одного из факторов последовательное увеличение другого приводит ко все меньшим приростам произведенного продукта.

Иногда отказываются от требования дифференцируемости производственной функции F . В таком случае вместо условий (2) и (3) требуют монотонности и вогнутости F по каждому аргументу.

Перейдем к перечислению основных экономико-математических характеристик производственной функции. Важными характеристиками являются:

средняя производительность труда $y = Y/L$ – отношение объема произведенного продукта к количеству затраченного труда;

средняя фондоотдача $z = Y/K$ – отношение объема произведенного продукта к величине основных фондов.

Для функции Кобба–Дугласа, например, средняя производительность труда равна $AK^{\alpha}L^{\beta-1}$ и в силу условия $\beta < 1$ является убывающей функцией аргумента L . Другими словами, с увеличением затрат средняя производительность труда падает. Этот вывод допускает естественное объяснение: поскольку величина второго фактора K остается неизменной, то значит вновь привлекаемая рабочая сила не обеспечивается дополнительными средствами производства, что и приводит к снижению производительности труда. Таким образом, становится ясным и значение такой характеристики, как фондо-вооруженность труда $k = K/L$, показывающая объем основных фондов, приходящийся на одного рабочего.

1.3. Конструирование производственной функции экологической опасности вида деятельности. Рассмотрим задачу параметризации некоторой совокупности видов деятельности в пространстве двух измерений: их экономической полезности и их отрицательного воздействия на природную среду. Назовем для определенности этот параметр индексом экологической опасности. В содержательном смысле этот индекс должен обладать следующими свойствами:

1. Непрерывность в пространстве строго положительных значений двух упомянутых измерений. Действительно, «близкие» по экономической полезности и отрицательному воздействию на природную среду виды деятельности должны иметь «близкую» оценку их экологической опасности.

2. При фиксированном значении экономической полезности экологическая опасность вида деятельности должна возрастать с увеличением ее отрицательного воздействия на природную среду.

3. При фиксированном значении отрицательного воздействия на природную среду индекс экологической опасности вида деятельности должен убывать с повышением экономической полезности.

4. Нормированность, то есть сумма индексов экологической опасности по всем видам деятельности, должна быть равной единице. Это делается для того, чтобы шкалы, в которых измеряются экономическая полезность и отрицательное воздействие, были соизмеримы.

Далее, не вдаваясь в вопросы существования таких индексов и в вопросы их идентификации по статистическим данным, укажем один формализм, удовлетворяющий всем четырем изложенным свойствам. Этот формализм предложили в 1988 году сотрудники Всесоюзного института системных исследований А. В. Дончева и Л. А. Семенова [5].

Для расчета индекса экологической опасности вида деятельности они предложили использовать следующую формулу:

$$I_{0j} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{1j} K_{2j} \left(\frac{a_{ij} A_i}{b_j B} \right)}{n},$$

где – I_{0j} индекс экологичности j -й деятельности; i – виды воздействия на природную среду; a_{ij} – абсолютные показатели воздействия j -й деятельности (i – землеемкость, тыс. га; водопотребление, млн m^3 ; выброс загрязняющих вещества в атмосферу, тыс. т/год; сброс сточных вод, млн m^3 /год); A_i – показатели землеемкости отрасли, водопотребления, выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, водные объекты по отраслям промышленности; K_{1j} – коэффициент токсичности выбросов j -й отрасли в атмосферу (величина, обратная ПДК); K_{2j} – коэффициент токсичности сбросов сточных вод j -й отрасли в водные объекты; b_j – объем валовой продукции j -й отрасли; B – валовая продукция промышленности в целом; n – число абсолютных показателей воздействия отрасли (в данном случае $n = 4$).

2. Матрица сценариев. Коэффициенты μ_{τ_i} – допустимого изъятия водных ресурсов из природной среды будут определены с помощью специально построенной для этой цели теоретико-игровой модели (арбитражной схемы).

Параметры пополнения водных запасов, присутствующие в уравнении (1), будем задавать в виде матрицы 2, построенной по данным института «Казгипроводхоз». Эту матрицу будем называть «Базовым сценарием прогнозной динамики Водного фонда р. Иле». Разумеется, возможны и другие матрицы сценариев, основанные на других материалах, однако макет у них должен быть одинаковый (таблица 2).

Таблица 2 – Макет (образец сценариев) очищения сточных вод

№ объекта	Объекты	Запасы очищенных сточных вод, км ³	Пополнение запасов за счет оценки сточных и коллекторно-дренажных вод, км ³			
			$\Delta^1 \tau_1^*$	$\Delta^1 \tau_2$	$\Delta^1 \tau_3$	$\Delta^1 \tau_4$
1	Пруды-накопители сельских населен. пунктов	$\Phi \tau_0^1$	$\Delta^1 \tau_1^*$	$\Delta^1 \tau_2$	$\Delta^1 \tau_3$	$\Delta^1 \tau_4$
2	Пруды-накопители городских населен. пунктов	$\Phi \tau_1^2$	$\Delta^2 \tau_1$	$\Delta^2 \tau_2$	$\Delta^2 \tau_2$	$\Delta^{12} \tau_4$
* $\Delta^1 \tau_1$ – производство чистой возвратной воды в соответствующем периоде фиксируется в прудах-накопителях соответствующего профиля.						

Так, 1500 тыс.км³ – это расчетные требования на воду оз. Балкаш и дельты для поддержания горизонта воды в озере на отметке 341 м БС с учетом дополнительных потерь стока, сброса коллекторных вод в понижения рельефа для удовлетворения спроса диких животных и перелетных птиц.

3. Численный расчет параметров «Базового сценария». Численный расчет параметров «Базового сценария» динамики Водного фонда Республики Казахстан был выполнен сотрудниками Института математики и математического моделирования совместно со специалистами института «Казгипроводхоз» на основании анализа двух документов: «Схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Иле на территории Республики Казахстан (декабрь 2011 г.) и ее уточнения по данным обзора за 2014 г. » и «Водные ресурсы Казахстана в новом тысячелетии».

Что касается параметров прогнозируемого пополнения запасов по другим периодам, заметим следующее.

Накопители очищенных сточных и ливневых вод. Данные для расчета параметров сценария будем брать из таблицы 2. Хотя временной шаг и горизонты планирования имитационной модели и СКИОВР отличаются, но в результате несложных вычислений и пролонгирования данных с помощью циклического индекса физического объема получим сценарий динамики сточных и ливневых вод (таблица 3).

Таблица 3 – Численный расчет параметров «Базового сценария»

Объекты	Требования, км ³	Пополнение запасов, км ³			
	τ_0	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
Поверхностные воды Казахстана	15,000	0,095	0,182	0,450	1,337

4. Правовой режим изъятия и пополнения запасов Водного фонда международных водотоков. Как известно, правовой режим международных водотоков регламентируется в основном следующими конвенциями: Конвенцией по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер от 17 марта 1992 г. и Конвенцией ООН о праве несудоходных видов использования международных водотоков 1997 г.

Обе конвенции в разной детализации определяют следующие общие принципы использования водотоков:

1. Справедливое и разумное использование. Государство водотока использует в пределах своей территории международный водоток справедливым и разумным образом. При этом должны быть приняты во внимание географические, гидрографические, экологические социально-экономические и другие критерии.

2. Обязательство не наносить значительного ущерба. Государство водотока при использовании его на своей территории принимает все надлежащие меры для предотвращения нанесения значительного ущерба другому государству водотока. Если же государству водотока нанесён значительный ущерб, то вступает в действие механизм консультаций с потерпевшим государством для ликвидации или уменьшения ущерба.

3. Общее обязательство сотрудничать. Государство водотока обязано сотрудничать на основе равенства, территориальной целостности, взаимной выгоды и добросовестности в целях достижения оптимального использования международного водотока. При определении способа сотрудничества государства должны рассмотреть вопрос о создании комиссий для разрешения спорных вопросов.

4. Для разрешения споров по поводу использования предписаний конвенции предусмотрены учреждения международного арбитража, в функцию которого входит принятие окончательного решения.

Комментарий. Согласно Европейской конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озёр 1992 г. трансграничные воды – это любые поверхностные или подземные воды, которые пересекают границы. Трансграничными водами являются озера, крупные водоёмы, реки, водные бассейны, естественные и искусственные водные резервуары и т.д. между двумя или более государствами или расположенные на таких границах. Таким образом, рассмотренные водные объекты (казахстанская часть бассейна р. Иле и его водные объекты) являются трансграничными водами.

4.1. Арбитражная схема Нэша – математическая модель справедливого и разумного использования трансграничных вод. Арбитражная схема – правило, по которому каждой кооперативной игре без побочных платежей ставится в соответствие единственный дележ этой игры, называемый арбитражным решением. Первоначально арбитражные схемы были рассмотрены Дж. Нэшем для случая игры двух лиц. Пусть $R = \{(u_1, u_2) \mid 0 \leq u_i \leq 1, u_1 + u_2 = 1\}$ – множество дележей, $d = (d_1, d_2)$ – точка status quo, т. е. точка, соответствующая случаю, когда никакой дележ не осуществляется (иногда точку status quo интерпретируют как выигрыш игроков, которые они могут обеспечить себе самостоятельно без согласия другого игрока).

Пару $[R, d]$ называют арбитражной схемой, а дележ u^* называется решением Нэша, если

$$P_i(u_i^* - d_i) = \max_{u \in R} P_i(u_i - d_i). \quad (4)$$

Решение Нэша и только оно удовлетворяет следующим аксиомам:

- 1) $u^* \geq d$ – индивидуальная рациональность;
- 2) если f – линейное неубывающее преобразование, то $f u^*$ есть арбитражное решение игры $[fR, fd]$ (инвариантность относительно преобразований полезности);
- 3) $\bar{u} \geq d, \bar{u} \in R$ и нет такого $u \in R$, чтобы $u \geq \bar{u}$ (оптимальность по Парето);
- 4) если $R' \in R, d' = d, \bar{u}' \in R'$, то $\bar{u}' = \bar{u}$ (независимость от посторонних альтернатив);
- 5) если $d_i = d_j, i, j = 1..n$ и R симметрична, то $\bar{u}_i = \bar{u}_j, i, j = 1..n$ (симметрия).

Прокомментируем аксиомы Нэша применительно к водной проблематике, руководствуясь некоторыми объективными представлениями о «справедливости».

Аксиома 1 – индивидуальная рациональность. В самом деле, если какая-либо сторона договора может обеспечить себе дополнительные водные ресурсы за счет их экономного использования,

очистки вод или иных мероприятий, не наносящих ущерб другой стороне, то решение арбитра должно учесть это обстоятельство (увеличением выигрыша).

Аксиома 2 – линейности. Она утверждает, что в разных шкалах измерения полезности арбитра руководствуется одним и тем же принципом оптимальности. Так, арбитра все равно, измеряются ли водные ресурсы, подлежащие делению, в км³ или млн м³.

Аксиома 3 – оптимальности по Парето. Выполняется автоматически, поскольку множество допустимых решений в нашем случае – это дележи.

Аксиома 4 – независимость от посторонних альтернатив. Она означает, что, имея большие возможности для выбора и*, договаривающиеся стороны согласятся на этот же вектор выигрышей при меньших возможностях, если этот вектор допустим.

Аксиома 5 – симметрия. Эта аксиома, иногда называемая аксиомой анонимности, постулирует равноправие сторон.

4.2. Арбитражные схемы расчета максимально допустимых изъятий водных ресурсов из Водного фонда по периодам заданного горизонта прогнозирования. Пусть в бассейне некоторой трансграничной реки находятся два государства. Назовем их Верхним – расположенным преимущественно выше по течению реки, и Нижним – расположенным ниже по течению реки. Предположим далее, что Верхнее государство, для того чтобы обеспечить свою водную безопасность, накапливает на своей территории запасы естественных и техногенных вод, т.е. вод искусственного происхождения, например, к таким водам можно отнести очищенные сточные, дренажные ливневые воды и т.д. Сюда же можно отнести воды, привлекаемые из других территорий Верхнего государства. Возникает вопрос: какую часть накопленных вод Верхнее государство может потратить на свои экономические или социальные нужды, а какую оставить в природных объектах или передать Нижнему государству? Речь, таким образом, идет о нормативе допустимого изъятия собственных вод из собственных водных объектов. Упростим определение арбитражных схем применительно к конфликтной ситуации, возникающей в задаче отыскания максимально допустимого изъятия μ_{ci} водных ресурсов из фонда Φ_{τ_i} Верхнего государства в периоде τ_i .

Заметим, во-первых, что множество допустимых дележей во всех арбитражных схемах отыскания максимально допустимого изъятия μ_{ci} одинаково для всех периодов. Поэтому его можно не оговаривать каждый раз при переходе к новому периоду. Во-вторых, вторая координата вектора status quo равна нулю для всех арбитражных схем (поскольку второй игрок не может обеспечить себе положительный выигрыш без согласия первого игрока). В принятых обозначениях вектор status quo имеет вид:

$$d_1^0 = \frac{\Phi_{\tau_0}^5 + \Phi_{\tau_0}^6 + \Phi_{\tau_0}^7}{\Phi_{\tau_0}} - \text{в базовом периоде первая координата вектора status quo} - \text{это доля техно-}$$

генных вод в общем объеме водного фонда базового периода;

$$d_2^0 = 0 - \text{в базовом периоде вторая координата вектора status quo равна нулю;}$$

$$d_1^i = \frac{\Delta_{\tau_i}^5 + \Delta_{\tau_i}^6 + \Delta_{\tau_i}^7}{\Phi_{\tau_i}} - \text{во всех остальных периодах первая координата} - \text{это доля суммарного по-}$$

полнения объема техногенных вод к общему объему фонда рассматриваемого периода. Поскольку КНР не собирается накапливать техногенные воды, положим:

$$d_1^i = 0;$$

$$d_2^i = 0, \text{ во всех остальных периодах вторая координата вектора status quo равна нулю.}$$

Шаг 1. Определим вектор status quo для базового периода:

$$d_1^0 = \frac{\Phi_{\tau_0}^5 + \Phi_{\tau_0}^6 + \Phi_{\tau_0}^7}{\Phi_{\tau_0}} - \text{в базовом периоде первая координата вектора status quo} - \text{это доля техно-}$$

генных вод в общем объеме водного фонда базового периода;

$$d_2^0 = 0 - \text{в базовом периоде вторая координата вектора status quo равна нулю;}$$

$$d_1^i = \frac{\Delta_{\tau_i}^5 + \Delta_{\tau_i}^6 + \Delta_{\tau_i}^7}{\Phi_{\tau_i}} - \text{во всех остальных периодах первая координата} - \text{это доля суммарного по-}$$

полнения объема техногенных вод к общему объему фонда рассматриваемого периода. Поскольку КНР не собирается накапливать техногенные воды, положим:

$$d_1^i = 0;$$

$d_2^i = 0$, во всех остальных периодах вторая координата вектора status quo равна нулю.

Шаг 2. Определим вектор status quo для базового периода в цифровом виде:

$$d_1^0 = \frac{\Phi_{\tau_0}^5 + \Phi_{\tau_0}^6 + \Phi_{\tau_0}^7}{\Phi_{\tau_0}} = \frac{(0+0+0)}{5,340} = 0;$$

$$d_2^0 = 0.$$

Таким образом, уравнение (4), определяющее решение Нэша в базовом периоде, примет вид:

$$\begin{aligned} u_1^* \cdot u_2^* &= \max \{u_1 \cdot u_2\}; \\ 0 &\leq u_1, u_2 \leq 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Далее, выразим вторую координату через первую, получим:

$$\begin{aligned} u_1^* \cdot u_2^* &= \max \{u_1 \cdot (1 - u_1)\}; \\ 0 &\leq u_1, u_2 \leq 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Найдем максимум произведения в задаче:

$$\begin{aligned} \max \{u_1 \cdot (1 - u_1)\} &= \frac{d}{dx} \cdot (u_1 - u_1^2) = 0; \\ 0 &\leq u_1, u_2 \leq 1; \\ 1 - 2u_1 &= 0, \text{ отсюда } u_1 = \frac{1}{2} \text{ и } u_2 = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Далее, переходя на терминологию максимально допустимых изъятий, получаем $\mu_{\tau_0} = 0,5$.

Вывод 1. В базовом периоде ввиду отсутствия техногенных вод Верхнее государство (КНР) только половину своего водного фонда может использовать на социально-экономические цели. Таким образом, $u_1^* = \frac{1}{2} \cdot (12,6 + 6,7) = 9,65 \text{ км}^3$.

Рассчитаем с использованием матрицы сценариев водный фонд бассейна р. Иле в периоде τ_1 (2011–2020 гг.). Далее ситуация повторяется, поскольку климатические пополнения равномерны во всех периодах, а антропогенные отсутствуют вовсе. Поэтому справедливы расчеты и шаг 2.

$$\Phi_{\tau_1} = \Phi_{\tau_0} \cdot (0,5) + 0 = 18 \cdot (0,5) = 9 \text{ км}^3.$$

Вывод 2. Поскольку КНР не сохраняет свои возвратные воды и не очищает их до нормативно приемлемых уровней, то арбитражный суд не разрешит ему увеличивать изъятия намного больше базовой $\mu_{\tau_0} = \frac{9 \text{ км}^3}{\text{год}}$. Таким образом, $\mu_{\tau_0} = \mu_{\tau_1} = \mu_{\tau_2} = \mu_{\tau_3} = \mu_{\tau_4} = 9 \text{ км}^3$.

А это уже вполне приемлемая ситуация для Казахстана, поскольку, добавив сюда свои внутренние воды (в объеме около 10 км^3), он в состоянии будет обеспечить устойчивый уровень оз. Балкаш (0,341 м), требуемое увлажнение его дельты и бездефицитный водохозяйственный баланс в будущем.

Вывод 3. Даже если КНР не согласится отдавать около половины своих внутренних водных ресурсов Казахстану, ссылаясь на абстрактность представлений о справедливости Нэша, Казахстан все же имеет шансы наверстать упущенное за счет развития индустрии очистки возвратных вод.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Оразов Е.Т., Поспелова В.К. Моделирование трансграничных перетоков суверенных вод // Труды XI международной азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем». – Чолпон-Ата, 2015. – С. 507-516.

[2] Оразов Е.Т., Твердовский А.И., Литвиненко Г.Г. Теория игр при разрешении конфликтов в водопользовании. – Алматы, 2012. – 270 с.

[3] Мальковский И.М. География конфликтов в водопользовании. – Алчские основы водообеспечения природно-хозяйственных систем Казахстана. – Алматы, 2008. – 248 с.

[4] Рябцев А.Д., Твердовский А.И. Проведение сценарного моделирования различных вариантов развития ситуации в сфере использования и охраны трансграничных рек с КНР и разработка конкретных вариантов реагирования на них. – Алматы, 2008. – 248 с.

[5] Дончева А.В., Семенова Л.А. Методические вопросы оценки интенсивности воздействий на природную среду // Глобальные проблемы современности: региональные аспекты. Сборник трудов. – М.: ВНИСИ, 1988. – Вып. 5. – С. 158-163.

REFERENCES

- [1] Orazov E.T., Pospelova V.K. Sovereign waters cross-border flows modeling // Proceedings of the 11th International Asian School-Seminar "Problems of optimization of complex systems". Cholpon-Ata, 2015. P. 507-516 (in Russian).
- [2] Orazov E.T., Tverdovsky A.I., Litvinenko G.G. Games theory in water use conflicts resolution. Almaty, 2012. 270 p. (in Russian).
- [3] Malkovsky I.M. Geographical basis of water situation in provision of natural and Deconomic systems in Kazakhstan. Almaty, 2008. 248 p. (in Russian).
- [4] Ryabtsev A.D., Tverdovsky A.I. Scenario modeling conduction and development of specific response options to the different situations in protection and consumption of transboundary rivers with China. Almaty, 2008. 248 p. (in Russian).
- [5] Doncheva A.V., Semenova L.A. Methodological issues of assessing the intensity of technogenic impacts to the natural environment // Global problems of contemporaneity: regional aspects. Collection of scientific papers. Moscow, 1988. Issue 5. P. 158-163 (in Russian).

Е. Т. Оразов¹, А. И. Твердовский²

¹ БҒК, ф.-м.ғ.к. (ҚР БҒМ Математика институты, Алматы, Қазақстан)

² Бөлім меңгерушісі («Казгипроводхоз» ӨК, Алматы Қазақстан)

БАЛКАШ ӨЗ. АЛАБЫ СУ ҚОРЫНЫҢ НЫСАНДАРЫН ИМИТАЦИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ-ОЙЫН ТҰРҒЫСЫНДАУЛҒІЛЕУДІҢ ҰЗАҚМЕРЗІМДІ ДИНАМИКАСЫ

Аннотация. Мақала шектеусіз су алудың қытайлық стратегиясының баламасы – таза судың қайтарым нормативін молайтуға кеңінен арналған. сондай-ақ тазарту үрдісіне ұқсас өндірістік қызметтердің кейбір түрлері қарастырылған.

Түйін сөздер: ұдайы кеңейту, нормативті таза су, трансшекаралық су ағындарының бөлімін алып тастау, шектеусіз су алу.

Ye. T. Orazov¹, A. I. Tverdovskiy²

Principle research worker, ¹Institute of mathematics of Ministry of Education and Sciences of the Republic of Kazakhstan,

Head of department² «KazGIPROVODHOZ»

SIMULATIVE AND THERETICAL-PLAYING MODELLING OF LONG-TERM DYNAMIC OF THE OBJECTS OF WATER FUND OF BALKASH LAKE BASIN

Abstract. The article is devoted to the issue of extended reproduction of normatively pure return waters – as an effective alternative to the Chinese strategy of unlimited water supply intake. Some types of production functions that simulate the water self-clarification processes are also considered.

Key words: extended reproduction, normatively pure waters, taking of part of runoff of transboundary waters, unlimited water supply intake.