

УДК 556.01+504.4.062.2 (574)

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ БЕССТОЧНЫХ БАССЕЙНОВ БАЛКАША И АРАЛА

И. М. Мальковский¹, Л. С. Толеубаева², Т. Е. Сорокина³, А. З. Таиров³, А. Толекова⁴,
М. В. Долбешкин⁵, Е. М. Пузиков⁵, Р. Д. Поветкин⁵, Д. У. Абдибеков⁴

¹Докт. геогр. наук, профессор, главный менеджер по управлению проектами
(Институт географии, Алматы, Казахстан)

²Докт. географ. наук, руководитель лаборатории водообеспечения природно-хозяйственных систем
и математического моделирования (Институт географии, Алматы, Казахстан)

³Канд. географ. наук, старший научный сотрудник лаборатории водообеспечения природно-хозяйственных
систем и математического моделирования (Институт географии, Алматы, Казахстан)

⁴Научный сотрудник лаборатории водообеспечения природно-хозяйственных систем и математического
моделирования (Институт географии, Алматы, Казахстан)

⁵Младший научный сотрудник лаборатории водообеспечения природно-хозяйственных систем
и математического моделирования (Институт географии, Алматы, Казахстан)

Ключевые слова: Арал, Балкаш, бессточный бассейн, геопрограммное имитационное моделирование, метод Монте–Карло, системы водообеспечения.

Аннотация. Разработан «первый эскиз» имитационной модели развития системы водообеспечения (СВО) Иле-Балкашского бассейна на период до 2050 года. Сформулированы проблемы развития СВО и определены цели и задачи моделирования. Обосновано применение методологии имитационного динамико-стохастического моделирования к решению поставленных задач и приведено логико-математическое описание СВО. Дана оценка адекватности модели исследуемой СВО путем ручных прогонов модели. Выполнены компьютерная реализация модели и двумерная анимация процесса моделирования. Численными экспериментами подтверждены функциональные возможности модели и достоверность получаемых результатов в реальном диапазоне входных параметров.

Введение. Проблемы развития систем водообеспечения Республики Казахстан типичны для трансграничных бессточных бассейнов аридных и полупустынных территорий Центральной Азии. Основными угрозами и вызовами в области водообеспечения природно-хозяйственных систем таких бассейнов являются глобальные и региональные изменения климата, несогласованность межгосударственных водных отношений, использование водозатратных технологий и несовершенство технических средств водорегулирования и водораспределения. Следствиями реализации водных угроз могут стать «водные кризисы», проявляющиеся в обострении межгосударственных водных противоречий, развитии новых очагов экологической нестабильности, срыве программ социально-экономического развития.

Осуществление стратегических мероприятий по водообеспечению бассейновых природно-хозяйственных систем Казахстана требует длительного времени: проектирование, строительство и ввод системообразующих объектов в эксплуатацию занимают до 10–15 лет. Это означает, что научное обеспечение стратегических мероприятий должно начинаться с большой заблаговременностью (порядка 25 лет). Игнорирование этого принципиального положения может привести к крупным просчетам в развитии Национального водохозяйственного комплекса с тяжелыми экономическими ущербами и недопустимыми нарушениями природной среды. В свете изложенного проблемы водообеспечения природно-хозяйственных систем приобретают важнейшее социально-экономическое и экологическое значение, являясь одним из основных условий перехода Казахстана к устойчивому развитию [1–3].

В основу концепции устойчивого водообеспечения природно-хозяйственных бессточных бассейнов Республики Казахстан предложена новая водная парадигма развитых стран, сочетающая управление ресурсом (увеличением располагаемых водных ресурсов) с управлением спросом на воду (снижением нагрузки на природные водоисточники). При этом сохранение устойчивости регенерационных функций водоресурсных систем рассматривается как приоритетная задача управления водными ресурсами. Приоритеты в использовании водных ресурсов меняются в пользу решений социальных и экологических проблем относительно производственных задач. Экологические аспекты управления водными ресурсами реализуются в двух направлениях: предотвращение вредного воздействия вод и соблюдение требований природы и экологических комплексов к воде. Рыночные механизмы управления водными ресурсами предполагается сочетать с административными рычагами, определяющими границы действия рынка посредством нормирования и стандартизации [2].

Формулировка проблемы. Системы водообеспечения (СВО) Иле-Балкашского и Арало-Сырдаринского бассейнов, представляющие собой совокупность водоисточников и водопользователей с объединяющими их средствами водорегулирования и водораспределения, являются ключевыми звеньями национального водохозяйственного комплекса. В бассейновых СВО формируется 46% возобновляемых ресурсов речного стока, сосредоточено 44% разведанных запасов подземных вод. При этом бассейны являются наиболее водозатратными системами – интегральный спрос на воду населения, производства, природных объектов составляет половину общереспубликанского.



Рисунок 1 – Карта-схема бассейновых систем водообеспечения Республики Казахстан с выделением бассейна-донора и бассейнов-реципиентов

Идентичность проблем развития СВО определяется схожестью их хронологических структур (рисунок 1):

- возобновляемые ресурсы речного стока бассейнов слагаются из местного и трансграничного стока (с территории КНР и РУ);
- в бассейнах находятся существенные разведанные запасы подземных вод, гидравлически связанные с поверхностными водами;
- основными производственными водопользователями в бассейнах являются промышленность, сельское и коммунальное хозяйство, а также рыбное хозяйство и гидроэнергетика;
- лимитирующими природными компонентами бассейновых СВО служат концевые бессточные водоемы: озеро Балкаш и Малое Аральское море, воспринимающие интегральную нагрузку изменений климата и хозяйственной деятельности на водосборах;
- крупными водопользователями в бассейнах являются природные комплексы дельт и пойм рек Иле и Сырдария;

- системными узлами управления водными ресурсами служат гидроузлы с водохранилищами длительного регулирования стока: Капшагайский (многолетний) и Шардаринский (сезонный);
- бассейны являются потенциальными «реципиентами» перебросок речного стока из Ертисского бассейна «донора».

Типовой путь развития водопользования и формирования водных кризисов в полной мере реализовался в трансграничном бессточном бассейне Аральского моря. На первой стадии развития (1960–1991 гг.) за счет увеличения объемов сельскохозяйственного водопотребления (на орошение) в условиях климатически обусловленного маловодья произошло нарушение естественного водно-ресурсного равновесия в бассейне, при котором речной приток в конечной водоем – Аральское море – сократился более чем в три раза (в отдельные годы до нуля), что явилось причиной снижения уровня моря с 53,0 до 40,0 м и уменьшения акватории с 66,0 до 39,6 тыс. км². Развитие водного дисбаланса в бассейне с усыханием и осолонением моря привело к нарастанию гаммы негативных последствий, что явилось основанием официального признания Приаралья зоной экологического кризиса [1–3].

Программа улучшения социально-экономического и экологического состояния Приаралья, утвержденная главами пяти государств Центральной Азии, реализована в создании нового устойчивого природно-антропогенного комплекса Приаралья путем обводнения, лесомелиорации, а также сохранения Аральского моря как природного объекта поддержанием его уменьшенной акватории на экологически приемлемом уровне.

Потенциальной зоной водного кризиса является трансграничный бессточный бассейн озера Балкаш, где развитие водопользования напоминает Аральский сценарий. 1971–1990 годы стали периодом острой дестабилизации состояния Иле-Балкашской водной системы, обусловленной активизацией хозяйственной деятельности в регионе, совпавшей по времени с наступлением естественной фазы маловодья в многолетнем режиме речного стока. Ресурсы речного стока в казахстанской части бассейна за этот период составили в среднем около 92% многолетней нормы. При этом хозяйственное безвозвратное водопотребление возросло за счет увеличения водозаборов из речной сети для орошения земель и наполнения Капшагайского водохранилища. Обусловленные процессами усыхания и осолонения оз. Балкаш негативные последствия для экологии и экономики заставили пересмотреть концепцию и программу развития Иле-Балкашского региона и определить как приоритетную задачу восстановления и сохранения озера [1–3].

Системы водообеспечения Иле-Балкашского и Арало-Сырдаринского бассейнов характеризуются свойствами сложных систем: неопределенностью и стохастичностью, обусловленными однозначной непредсказуемостью масштабов водохозяйственной деятельности в сопредельных странах и вероятностной природой гидрометеорологических процессов и явлений, определяющих величину располагаемых водных ресурсов.

Эффективным средством исследования сложных систем, подверженных случайным воздействиям, является имитационное моделирование, влияние случайных факторов в котором учитывается с помощью задания вероятностных характеристик процессов (законов распределения вероятностей) [4–7]. При этом результаты, полученные при воспроизведении на имитационной модели рассматриваемого процесса, являются случайными реализациями. Поэтому для получения устойчивых характеристик процесса проводится его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой полученных данных. Динамико-стохастическое моделирование (метод Монте-Карло), являясь современным способом изучения сложных систем в математике, физике, естественных науках, используется также в теории регулирования речного стока и водно-энергетических расчетов [8–10]. В настоящей работе метод впервые применен к решению долгосрочных задач развития систем водообеспечения Республики Казахстан.

Изложенные предпосылки определили цель реализованного проекта как создание инструмента стратегического планирования систем водообеспечения Иле-Балкашского и Арало-Сырдаринского бассейнов в условиях вероятностной изменчивости водных ресурсов и динамики спроса на воду населения, производства, объектов природы, ориентированного на решение взаимосвязанных задач.

1. Разработка прогностических сценариев динамики располагаемых водных ресурсов на основе моделирования многолетних рядов годового стока рек бассейнов Балкаша и Северного Араль-

ского моря на расчетные этапы развития с учетом климатически обусловленного изменения местного стока и антропогенной трансформации трансграничного стока с территории сопредельных государств (Китай и Узбекистана).

2. Разработка и оценка долгосрочных сценариев динамики водопользования природно-хозяйственных систем Иле-Балкашского и Арало-Сырдаринского бассейнов на основе прогнозных тенденций роста населения и гипотез развития водоемких производств.

3. Разработка и оценка мероприятий по управлению гидрологическим режимом внутренних водоемов – озера Балкаш и Северного Аральского моря в условиях климатически и антропогенно нарушенного речного притока.

4. Разработка и оценка альтернативных сценариев реконструкции проектных параметров и правил эксплуатации системных узлов управления – Капшагайского и Шардаринского водохранилищ в условиях изменения ресурсов речного стока и спроса на воду в Иле-Балкашском и Арало-Сырдаринском бассейнах.

5. Разработка и оценка альтернативных сценариев широкомасштабного освоения подземных вод и территориального перераспределения речного стока в условиях ожидаемого дефицита водных ресурсов в Иле-Балкашском и Арало-Сырдаринском бассейнах.

Методика исследований. Имитационное моделирование систем водообеспечения представляет собой метод проведения на ЭВМ вычислительных экспериментов с математическими моделями, имитирующими поведение реальных объектов во времени в течение заданного периода. При этом функционирование водных объектов описывается набором алгоритмов, которые имитируют вероятностную природу формирования ресурсов речного стока и динамику спроса на воду природно-хозяйственных систем [4, 8].

Процесс последовательной разработки имитационной модели системы водообеспечения начинается с создания простой модели, которая затем постепенно усложняется в соответствии с требованиями, предъявляемыми решаемой проблемой.

Первой задачей имитационного исследования являются точное определение проблемы и детальная формулировка целей исследования. Определение проблемы – непрерывный процесс, который осуществляется в течение всего исследования и пересматривается по мере более глубокого понимания проблемы и возникновения новых ее аспектов.

После сформулированного начального определения проблемы начинается этап построения модели исследуемой системы, включающий стохастическое и динамическое описание системы. В стохастическом описании определяются вероятностные элементы системы и их характеристики, а в динамическом – взаимодействия элементов системы, в результате которых происходит изменение ее состояния во времени.

Процесс динамико-стохастического моделирования во многом является искусством, в ходе которого понимается структура системы, выявляются правила ее функционирования и выделяется в них самое существенное, исключая ненужные детали. Модель формируется простой для понимания и в то же время достаточно сложной, чтобы адекватно отображать характерные черты реальной системы. Наиболее важными являются решения относительно достоверности принимаемых упрощений и допущений, определяющих состав элементов и взаимодействий между ними. Уровень детализации модели зависит от цели ее создания. Рассмотрению подлежат только те элементы системы, которые имеют существенное значение для решения исследуемой проблемы. «Первый эскиз» модели анализируется и обсуждается. Эволюционный процесс моделирования позволяет быстрее обнаруживать допущенные неточности и более эффективно их конкретизировать.

На этапе разработки модели определяются требования к входным данным. Некоторые из этих данных могут уже быть в распоряжении разработчика модели, в то время как для сбора других потребуются время и усилия. Обычно значения таких входных данных задаются на основе некоторых гипотез или предварительного анализа. В некоторых случаях точные значения одного (и более) входных параметров оказывают небольшое влияние на результаты прогонов модели. Чувствительность получаемых результатов к изменению входных данных может быть оценена путем проведения серии имитационных прогонов для различных значений входных параметров. Имитационная модель, следовательно, может использоваться для уменьшения затрат времени и средств на уточнение входных данных.

После разработки модели и сбора начальных входных данных следующей задачей является перевод модели в форму, доступную для ЭВМ. Основным критерием выбора языка программирования для компьютерной реализации модели является объектная ориентированность. Эта парадигма языка предполагает абстрагирование реальных объектов путем представления их в виде образов того или иного класса [8].

На этапе верификации осуществляется оценка функционирования имитационной модели определением соответствия запрограммированной для ЭВМ модели замыслу разработчика путем ручной проверки вычислений [11–14]. Адекватность имитационной модели исследуемой системе устанавливается на этапе валидации, обычно выполняемой на уровне входных данных, элементов модели, подсистем и их взаимосвязей. Проверка адекватности разработанной модели включает сравнение ее структуры со структурой системы, а также сравнение результатов реализации элементарных функций и решений в модели и системе. Адекватность определяется также путем оценивания чувствительности выходов к изменению входных данных. В процессе валидации сравнение осуществляется на основе анализа как реальных, так и экспериментальных данных о функционировании системы [12]. Следует отметить, что реальные данные о функционировании системы являются всего лишь выборкой из того, что могло произойти в прошлом.

Условия машинных прогонов модели определяются на этапах стратегического и тактического планирования. Задача стратегического планирования заключается в разработке эффективного плана эксперимента, в результате которого либо выясняется взаимосвязь между управляемыми переменными, либо находится комбинация значений управляющих переменных, минимизирующая или максимизирующая отклик имитационной модели. В тактическом планировании в отличие от стратегического решается вопрос о том, как в рамках плана эксперимента провести каждый имитационный прогон, чтобы получать наибольшее количество информации из выходных данных. Важное место в тактическом планировании занимает определение начальных условий имитационных прогонов [4].

Следующие этапы в процессе имитационного исследования – проведение машинного эксперимента и анализ результатов включают прогон имитационной модели на компьютере и интерпретацию полученных выходных данных. При использовании результатов имитационных экспериментов для подготовки выводов или проверки гипотез о функционировании реальной системы применяются статистические методы.

Последним этапом в процессе имитационного исследования являются реализация полученных решений и документирование имитационной модели и ее использования. Успех реализации во многом зависит от того, насколько правильно разработчик модели выполнил все предыдущие этапы имитационного исследования. Если разработчик и пользователь работали в тесном контакте и достигли взаимопонимания при разработке модели и ее исследовании, то результаты проекта скорее всего будут успешно внедряться.

Названные этапы имитационного исследования редко выполняются в строго заданной последовательности, начиная с определения проблемы и кончая документированием. В ходе имитационного изучения могут быть сбои в прогонах модели, ошибочные допущения, от которых в дальнейшем приходится отказываться, переформулировки целей исследования, повторные оценки и перестройки модели. Такой итеративный процесс позволяет разработать имитационную модель, которая дает верную оценку альтернатив и облегчает процесс принятия решения [4].

На рисунке 2 схематически представлена концепция динамико-стохастической модели бассейновой системы водообеспечения, где использованы укрупненные временные интервалы развития системы T , агрегированные показатели водных ресурсов W и спроса на воду V , укрупненные пространственные единицы i , оцениваемые совокупностью статистических критериев Φ [2].

Состояние объекта управления бассейновой системы в любой момент времени T однозначно определяется многомерным вектором – располагаемыми водными ресурсами в целом и распределением их между компонентами $W_{i,m}^T$, а также спросом на воду $V_{i,n}^T$. В результате определенного воздействия система может переходить из одного состояния в другое с определенной степенью эффективности с точки зрения принятых критериев. Эти воздействия представляются в виде многомерного вектора $Y_{i,y}^T$, где его составляющие являются совокупностью средств регулирования и распределения водных ресурсов. Происходящие в системе процессы протекают под влиянием ряда

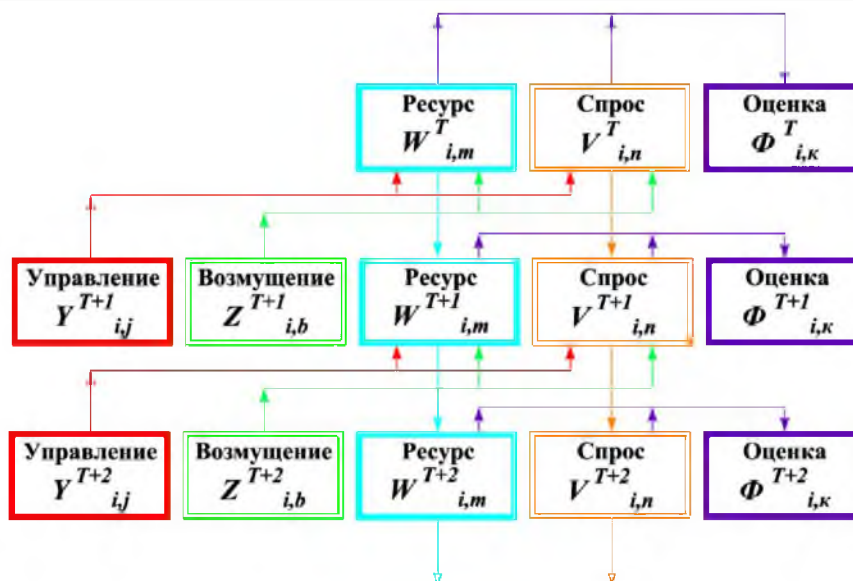


Рисунок 2 – Имитационная динамико-стохастическая модель сценариев водообеспечения бассейновых ПХС

случайных факторов, образующих вектор возмущений $Z_{i,b}^T$, компонентом которого служит одно-значно непредсказуемый режим водоисточников.

Реализация предложенного метода в настоящей статье показана на примере динамико-стохастического моделирования системы водообеспечения Иле-Балкашского бассейна – потенциального региона «водного кризиса» в Казахстане.

Логико-математическое описание системы. Структура модели. Разработанная структура имитационной модели ориентирована на решение долговременных (стратегических) задач развития СВО Иле-Балкашского бассейна и основана на высоком уровне агрегирования информации в пространстве и времени. Основными укрупненными элементами системы являются агрегированные водоисточники (трансграничный и местный речной сток, подземные воды); агрегированные водопользователи: социально-экономические (коммунально-бытовые, промышленные, сельскохозяйственные) и экологические (пойменные, дельтовые, озерные); системные узлы управления (водохранилища длительного регулирования речного стока), конечные водоемы системы (озеро Балкаш).

Расчетный период исследования системы составляет 35 лет (2016–2050 гг.), в котором выделены три этапа τ , фиксирующих динамику системы на уровнях 2030, 2040 и 2050 гг. с описанием стохастической изменчивости системы временным шагом в один год T , т.е.

$$\tau = 1, 2016 \leq T \leq 2030;$$

$$\tau = 2, 2031 \leq T \leq 2040;$$

$$\tau = 3, 2041 \leq T \leq 2050.$$

Хронологическая структура имитационной динамико-стохастической модели системы водообеспечения Иле-Балкашского бассейна представлена на рисунке 3.

Водоисточники поверхностные. Трансграничный сток р. Иле представляет собой экспертную оценку части стока Иле, формирующегося на китайской территории и поступающего в казахстанскую часть бассейна в размерах, согласованных на межгосударственном уровне.

Местный сток притоков р. Иле, формирующийся на территории Казахстана, объединяет ресурсы рек Текес, Шарын, Курты, северного склона Кетменского хребта, южного склона Жетысу Ала-тау, зоны БАКа.

Сток восточных рек, формирующийся в республике, включает ресурсы рек Каратал, Лепсы, Аксу, Биен, Аягуз, Токрау.

Суммарные ресурсы поверхностных вод бассейна (бытовой сток) за период наблюдений 1974–2008 гг. составляют $25,6 \text{ км}^3$ (50% обеспеченности), из которых $11,9 \text{ км}^3$ поступает из сопредельного государства.

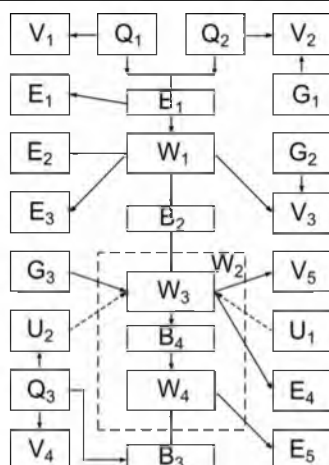


Рисунок 3 – Структура имитационной динамико-стохастической модели системы водообеспечения Иле-Балкашского бассейна

На рисунке 3 обозначены:

Водоисточники поверхностные: Q_1 – трансграничный сток р. Иле; Q_2 – местный сток притоков р. Иле; Q_3 – сток восточных рек.

Водоисточники подземные: G_1 – Копа-Илейское месторождение; G_2 – Южно-Балкашское месторождение; G_3 – приток подземных вод в озеро Балкаш.

Водопользователи коммунально-бытовые, промышленные, сельскохозяйственные: V_1 – китайская часть бассейна р. Иле; V_2 – верховья бассейна р. Иле; V_3 – низовья бассейна р. Иле; V_4 – бассейн восточных рек; V_5 – Северное Прибалкашье.

Перераспределение речного стока: U_1 – Буктырма – Балкаш; U_2 – Каратал – Иле.

Наполнение водоемов: W_1 – Капшагайское водохранилище; W_2 – озеро Балкаш; W_3 – Западный Балкаш; W_4 – Восточный Балкаш.

Русловый сток: B_1 – приток р. Иле в Капшагайское вдхр.; B_2 – приток Иле в Западный Балкаш; B_3 – приток восточных рек в Восточный Балкаш; B_4 – балансовый переток Западный Балкаш – Восточный Балкаш.

Водопользователи экологические: E_1 – верховья бассейна; E_2 – Капшагайское вдхр.; E_3 – низовья бассейна; E_4 – Западный Балкаш; E_5 – Восточный Балкаш.

Естественный климатический сток (восстановленный) равен соответственно 29,0 и 12,7 км³/год. Таким образом, за счет хозяйственной деятельности ресурсы речного стока бассейна уменьшились на 3,4 км³/год (на 12%), в том числе трансграничного стока – на 0,8 км³/год (на 6%).

Исходя из возможности неблагоприятной реализации климатических и трансграничных гидрологических угроз в перспективе реально уменьшение ресурсов речного стока в бассейне к 2030 году до 21,4 км³/год, в том числе трансграничного – до 6,0 км³/год.

Для решения стратегических задач водообеспечения природно-хозяйственной системы Иле-Балкашского бассейна использованы сценарные прогнозы ресурсов трансграничного и местного речного стока на 2030 и 2050 гг., полученные по экспертным оценкам и климатическим сценариям [15].

Расчетные значения годового стока различной обеспеченности на прогнозные уровни для использования в имитационной модели аппроксимированы функцией биномиального асимметричного распределения вероятностей, табулированной в широком диапазоне входных параметров $\Phi(k, C_V, C_S)$ [16].

Модель формирования рядов годового стока рек методом Монте–Карло основана на использовании полученных функций распределения вероятностей стока и генерировании на ЭВМ «псевдослучайных чисел», равномерно распределенных в диапазоне $0 \leq \varphi^T \leq 99$ (в прогнозируемом периоде $2016 \leq T \leq 2050$ гг.).

Моделирование модульных коэффициентов годового стока k_i^T проводится по заданному закону и параметрам распределения вероятностей Φ :

$$k_i^T = \Phi(\varphi^T, C_V, C_S), \quad (1)$$

где φ^T – псевдослучайное равномерно распределенное число; C_V и C_S – коэффициенты вариации и асимметрии.

Моделирование псевдослучайных рядов годового стока при заданных значениях нормы стока $\overline{Q_i}$ осуществляется по формуле

$$Q_i^T = k_i^T \cdot \overline{Q_i}, \quad (2)$$

где Q_i^T – величина годового стока i -го водоисточника в T -м году.

По всем агрегированным водоисточникам моделируются серии 35-летних рядов годового стока на период 2016–2050 гг. с выделением этапов 2030, 2040 и 2050 гг.

Водоисточники подземные. В условиях климатически и антропогенно обусловленного сокращения ресурсов речного стока в Иле-Балкашском бассейне существенно повышается значимость освоения разведанных запасов подземных вод, сосредоточенных преимущественно в южной части бассейна (Южно-Балкашское и Копя-Илейское месторождения), где находится основная часть населения, промышленного и сельскохозяйственного производства [17]. Принятая гипотеза в перспективе предлагает использовать часть разведанных запасов подземных вод, гидравлически не связанных с поверхностными водами, для решения проблемы качественного питьевого водоснабжения населения.

Водопользователи социально-экономические (рисунок 4). Водопользователь «китайская часть бассейна р. Иле» представляет собой экспертную оценку объема изъятия речного стока китайской стороной, подлежащего согласованию на межгосударственном уровне.



Рисунок 4 – Карта-схема агрегированных водопользователей Иле-Балкашского бассейна

Агрегированный водопользователь «верховья Иле» объединяет водопользователей городских агломераций Алматы и Капшагай, а также девяти административных районов (Енбекшиказахский, Жамбылский, Карасайский, Райымбекский, Талгарский, Уйгурский, Илийский, Кербулакский, Панфиловский).

Агрегированный водопользователь «низовья Иле» включает Балкашский административный район, агрегированный водопользователь «бассейн восточных рек» – шесть административных районов (Аксуский, Алакольский, Коксуский, Каратайский, Саркандский, Ескельдинский) и две городские агломерации (Текели, Талдыкорган), агрегированный водопользователь «Северное Прибалкашье» – Актогайский административный район и городские агломерации Балкаш и Приозерск.

На основе современных тенденций роста численности населения и гипотез развития водоемких производств разработана динамическая модель формирования перспективного спроса на воду в разрезе агрегированных водопользователей Иле-Балкашского бассейна [18].

Спрос на воду агрегированных водопользователей на каждом этапе развития системы определяется суммированием спроса административных районов:

$$V_i^T = \sum_{j=1}^n (V_{i,j,k}^T + V_{i,j,n}^T + V_{i,j,c}^T), \quad (3)$$

где i – агрегированные водопользователи (1 – китайская часть бассейна, 2 – верховья Иле, 3 – низовья Иле, 4 – бассейн восточных рек, 5 – Северное Прибалкашье); j – административные районы в составе i -го водопользователя; k, n, c – соответственно коммунально-бытовой, промышленный, сельскохозяйственный компоненты.

Разработка долгосрочных сценариев динамики спроса на воду в имитационной модели основана на следующих гипотезах и допущениях:

– спрос на воду в долгосрочной перспективе коммунально-бытового $V_{i,j,k}^T$ и промышленного $V_{i,j,n}^T$ компонентов бассейна увеличивается пропорционально росту численности населения с учетом мероприятий по водосбережению, т.е.

$$\begin{aligned} V_{i,j,k}^T &= \mu_{i,j,k}^T V_{i,j,k}^0 \cdot \frac{N_{i,j}^T}{N_{i,j}^0}, \\ V_{i,j,n}^T &= \mu_{i,j,n}^T V_{i,j,n}^0 \cdot \frac{N_{i,j}^T}{N_{i,j}^0}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $N_{i,j}^0$ и $N_{i,j}^T$ – численность населения в границах i -го водопользователя j -го административного района – начальное значение и на расчетные этапы развития ($T = 2030, 2040, 2050$ гг.); $\mu_{i,j,k}^T$ и $\mu_{i,j,n}^T$ – коэффициенты водосбережения коммунально-бытового и промышленного компонентов на расчетные этапы;

– сельскохозяйственный компонент в перспективе развивается без увеличения существующих водозаборов путем повышения продуктивности используемой воды за счет проведения агротехнических, гидромелиоративных и гидротехнических мероприятий, т.е.

$$\rho_{i,j,c}^T = \frac{y_{i,j,c}^T}{y_{i,j,c}^0} \cdot \frac{M_{i,j,c}^0}{M_{i,j,c}^T} \cdot \frac{\eta_{i,j,c}^T}{\eta_{i,j,c}^0}, \quad (5)$$

где ρ^T – целевой показатель коэффициента повышения продуктивности используемого объема воды относительного начального значения; y^T, M^T, η^T – целевые показатели урожайности, оросительной нормы, коэффициента полезного действия оросительных систем на расчетные этапы; y^0, M^0, η^0 – начальные условия имитационных прогонов.

Водопользователи экологические. В первом эскизе имитационной модели экологические затраты речного стока в бассейне (непроизводительные потери на испарение и фильтрацию) определяются по укрупненным показателям как произведение эмпирически установленных удельных потерь воды на величину руслового стока или площадь поверхности водоемов:

$$E_1^T = e_1^T (Q_1^T + Q_2^T), \quad (6)$$

$$E_2^T = e_2^T F_1^T, \quad (7)$$

$$E_3^T = e_3^T (Q_1^T + Q_2^T), \quad (8)$$

$$E_4^T = e_4^T F_3^T, \quad (9)$$

$$E_5^T = e_5^T F_4^T, \quad (10)$$

где e_1^T, e_3^T – эмпирические коэффициенты русловых потерь стока в «верховьях» и «низовьях» Иле на этапе T , б.р.; e_2^T, e_4^T, e_5^T – норма видимого испарения из Капшагайского водохранилища, Западного Балкаша, Восточного Балкаша на этапе T , км/год; Q_1^T, Q_2^T – годовой объем трансграничного и местного стока бассейна р. Иле на T -м шаге, км³/год; F_1^T, F_3^T, F_4^T – площадь водной поверхности Капшагайского водохранилища, Западного Балкаша, Восточного Балкаша в начале T -го года, км².

Узел управления – Капшагайское водохранилище. Модель функционирования системного узла управления – Капшагайского водохранилища имитирует процессы регулирования и распределения речного стока в бассейновой природно-хозяйственной системе в интересах агрегированных водопользователей «низовьев», а также природных объектов: дельты Иле и озера Балкаш. Модель учитывает возможность оптимизации проектных параметров и режимов отдачи водохранилища в условиях изменения спроса на воду и вероятностной изменчивости речного притока, осадков и испарения. Основными проектными параметрами гидроузла, определяющими его регулирующие возможности и подлежащие оптимизации, являются полная емкость и мертвый объем водохранилища (W_1'' и W_1').

Межгодовая динамика наполнения Капшагайского водохранилища в зависимости от определяющих факторов рассчитывается по уравнению водохозяйственного баланса:

$$W_1^{T+1} = W_1^T + B_1^T + G_2^T - E_2^T - E_3^T - V_3^T - B_2^T, \quad (11)$$

$$2016 \leq T \leq 2050,$$

где W_1^T и W_1^{T+1} – объемы водохранилища в начале T -го и $T+1$ -го годов.

При этом если $W_1' \leq W_1^{T+1} \leq W_1''$, то имеют место нормальный режим отдачи водохранилища и полное удовлетворение спроса всех водопользователей. В случаях предельно наполненного $W_1^{T+1} \geq W_1''$ либо опорожненного $W_1^{T+1} \leq W_1'$ водохранилища межкомпонентное распределение избытка либо дефицита водных ресурсов производится согласно установленным правилам (управляющим таблицам).

На стадиях долгосрочного планирования наиболее часто используются следующие схемы водораспределения:

1. Схема безусловного приоритета предусматривает водоограничение только менее ответственного компонента вплоть до его полного отключения при глубоких дефицитах речного стока. При безусловном приоритете водопотребителей речных низовьев (таблица 1) весь дефицит водных ресурсов выпадает на водопотребителей верхнего и среднего течения реки. Возможна и другая интерпретация схемы, когда в силу более выгодного расположения безусловный приоритет имеет верховой водопотребитель (таблица 2).

Таблица 1 – Управляющая таблица «приоритет озера»

	W_1^{T+1}	E_2^T	E_3^T	V_3^T	B_2^T
$W_1' \leq W_1^{T+1} \leq W_1''$	W_1^{T+1}	E_2	E_3	V_3	B_2
$W_1' > W_1^{T+1}$	W_1'	E_2	E_3	$V_3 - W_1' + W_1^{T+1}$	B_2
$W_1^{T+1} > W_1''$	W_1''	E_2	E_3	V_3	$B_2 - W_1'' + W_1^{T+1}$

Таблица 2 – Управляющая таблица «приоритет водосбора»

	W_1^{T+1}	E_2^T	E_3^T	V_3^T	B_2^T
$W_1' \leq W_1^{T+1} \leq W_1''$	W_1^{T+1}	E_2	E_3	V_3	B_2
$W_1' > W_1^{T+1}$	W_1'	E_2	E_3	V_3	$B_2 - W_1' + W_1^{T+1}$
$W_1^{T+1} > W_1''$	W_1''	E_2	E_3	V_3	$B_2 - W_1'' + W_1^{T+1}$

2. Схема условного приоритета предполагает водоограничение менее ответственного компонента лишь до определенной согласованной глубины дефицита, после чего начинается водоограничение другого компонента.

3. Схема равномерного компромисса предусматривает распределение дефицита водных ресурсов, обеспечивающее равенство относительных ущербов компонентов при их водоограничении. При равенстве удельных ущербов компонентов и постоянстве их значений при различной глубине дефицита данная схема вырождается в распределение дефицита водных ресурсов пропорционально объемам гарантированной водоподачи компонентам (таблица 3).

Таблица 3 – Управляющая таблица «компромисс вододеления»

	W_1^{T+1}	E_2^T	E_3^T	V_3^T	B_2^T
$W_1' \leq W_1^{T+1} \leq W_1''$	W_1^{T+1}	E_2	E_3	V_3	B_2
$W_1' > W_1^{T+1}$	W_1'	E_2	E_3	$V_3 - (1 - \frac{V_3}{V_3 + B_2})(W_1' - W_1^{T+1})$	$B_2 - (1 - \frac{B_2}{V_3 + B_2})(W_1' - W_1^{T+1})$
$W_1^{T+1} > W_1''$	W_1''	E_2	E_3	V_3	$B_2 - W_1'' + W_1^{T+1}$

4. Схема оптимального компромисса предполагает распределение дефицита водных ресурсов, обеспечивающее минимальный суммарный ущерб компонентов при любой глубине дефицита. Схема предполагает использование водных ресурсов в случае их дефицита тем компонентом, который получает наибольший экономический эффект (минимальный ущерб) при водопользовании. При этом приоритетный компонент компенсирует потери другого компонента в размерах, обеспечивающих выравнивание их относительных ущербов.

Концевой элемент системы – озеро Балкаш. Динамико-стохастическая модель водного баланса озера Балкаш имитирует межгодовую динамику наполнения (уровня) водоема как интегрального показателя климатических изменений и хозяйственной деятельности на материковой части бассейна. Модель ориентирована на возможность реконструкции озера путем отчленения и осушения зон акватории, не имеющих существенного экологического и социально-экономического значения, а также регулированием водо- и солеобмена между различными частями акватории и перераспределением притока по периметру водоема для распределения нуждающихся в этом частей его акватории.

Рассматриваются две принципиально различные альтернативы сохранения озера – экологическая и хозяйственная, различающиеся величиной ресурсов речного стока, выделяемых для питания озера и соответствующими лимитами водопользования на материковой части бассейна [1].

Сценарий «целостное озеро». Он предполагает сохранение целостного озера в размерах, обеспечивающих выполнение им основных экологических и социально-экономических функций путем поддержания нормативно установленных уровня и солености озера.

Межгодовая динамика наполнения целостного озера оценивается по уравнению водохозяйственного баланса:

$$W_2^{T+1} = W_2^T + B_2^T + B_3^T + G_3^T + U_1^T + U_2^T - E_4^T - E_5^T - V_5^T, \quad (12)$$

$$2016 \leq T \leq T',$$

где W_2^T и W_2^{T+1} – объемы воды в озере в начале T -го и $T+1$ -го годов; T' – год ввода в эксплуатацию водорегулирующего сооружения между западной и восточной частями озера.

Балансовый переток в озере «запад–восток», характеризующий степень проточности Западного Балкаша как косвенного показателя минерализации вод, определяется по формуле

$$B_4^T = W_3^T - W_3^{T+1} + B_2^T + G_3^T + U_1^T + U_2^T - V_5^T, \quad (13)$$

$$2016 \leq T \leq 2050,$$

где W_3^T и W_3^{T+1} – объемы воды в западной части озера в начале T -го и $T+1$ -го годов.

Сценарий «приоритет Западного Балкаша». Он предполагает преимущественное сохранение западной части озера в установленном проектном объеме W_3'' как наиболее важной в социально-экономическом плане и более подверженной нарушениям гомеостаза.

Динамика наполнения Западного Балкаша оценивается по уравнению водохозяйственного баланса:

$$W_3^{T+1} = W_3^T + B_2^T + G_3^T + U_1^T + U_2^T - E_4^T - V_5^T - B_4^T, \quad (14)$$

$$T' \leq T \leq 2050.$$

Величина водоперетока «запад – восток» определяется по установленным правилам (таблица 4).

Таблица 4 – Управляющая таблица «приоритет западной части»

	W_3^{T+1}	E_4^T	V_5^T	B_4^T
$W_3^n \leq W_3^{T+1}$	W_3^n	E_4	V_5	$W_3^{T+1} - W_3^n$
$W_3^{T+1} < W_3^n$	W_3^{T+1}	E_4	V_5	0

Наполнение Восточного Балкаша, определяемое по остаточному принципу, рассчитывается как

$$W_4^{T+1} = W_4^T + Q_3^T + B_3^T - U_2^T - E_5^T - V_4^T, \quad (15)$$

$$T' \leq T \leq 2050,$$

где W_4^T и W_4^{T+1} – объемы воды в котловине восточной части озера в начале T -го и $T+1$ -го годов.

Статистические критерии водной безопасности. Разработанные критерии водной безопасности для оценки и сравнения альтернативных сценариев развития бассейновых систем водообеспечения характеризуют надежность водообеспечения – вероятность бесперебойного удовлетворения спроса на воду компонентов системы, гидрологический риск – относительную величину недодачи воды компонентам по средневзвешенному и максимальному значению недодачи, устойчивость водного режима озера Балкаш – вероятность характерных наполнений озера: оптимального, критического, катастрофического. Численные значения критериев определяются путем статистической обработки машинных экспериментов.

1. Критерий надежности системы водообеспечения:

$$P_i = 1 - \frac{n_i}{N}, \quad (16)$$

где N – количество лет расчетного периода; n – количество перебойных лет, т.е. случаев, когда фактическая водоподача i -му компоненту меньше заявленного (гарантированного) спроса на воду Q^T .

2. Критерий гидрологического риска системы водообеспечения, вычисляемый по формулам:

Лапласа (оптимистический критерий) – по математическому ожиданию дефицитов воды i -му компоненту

$$\overline{R}_i = \frac{1}{N} \sum_{T=1}^N (1 - \frac{Q_i^T}{Q_i}); \quad (17)$$

Вальда (пессимистический критерий) – по максимальному значению дефицита воды i -му компоненту

$$R_i^n = \max(1 - \frac{Q_i^T}{Q_i}), \quad (18)$$

где Q_i и Q_i^T – заявленная (гарантированная) и фактическая величина водоподдачи i -му компоненту; N – продолжительность в годах расчетного периода.

3. Критерии устойчивости наполнения озера Балкаш:

– вероятность оптимального наполнения, соответствующего среднемноголетней и более величине наполнения в естественный период:

$$P_{2O} = \frac{n_{2O}}{N}, \quad (19)$$

где n_{2O} – количество лет расчетного периода N , в которых $W_2^T \geq W_{2O}$;

– вероятность критического наполнения, при котором сохраняются основные экологически значимые мелководные площади озера, где интенсивно протекают биопродукционные процессы:

$$P_{2K} = \frac{n_{2K}}{N}, \quad (20)$$

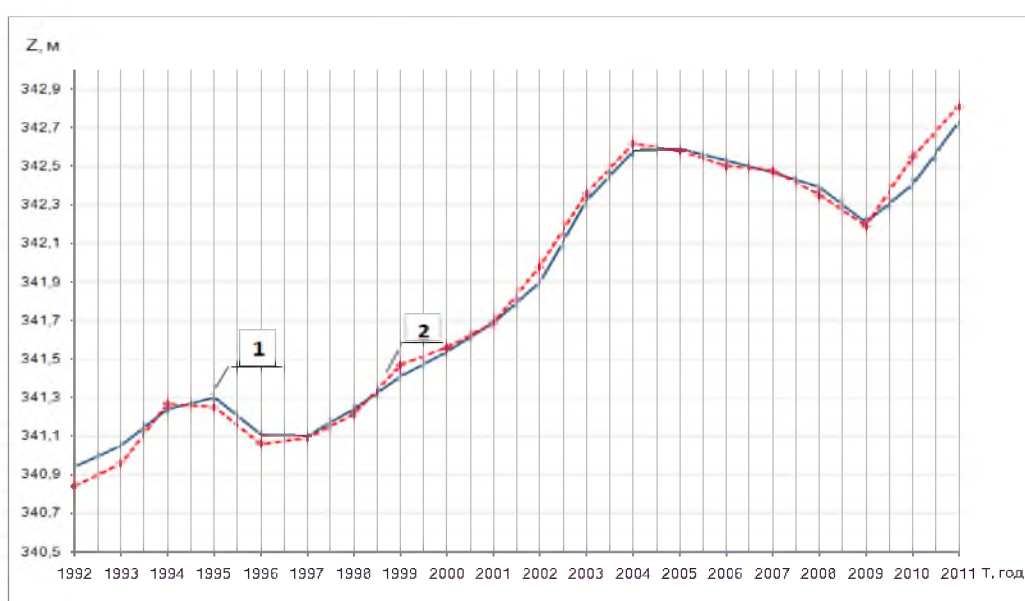
где n_{2K} – количество лет расчетного периода N , в которых $W_2^T \geq W_{2K}$;

– вероятность катастрофического наполнения, при котором акватория озера естественным образом расчленилась на западную и восточную части:

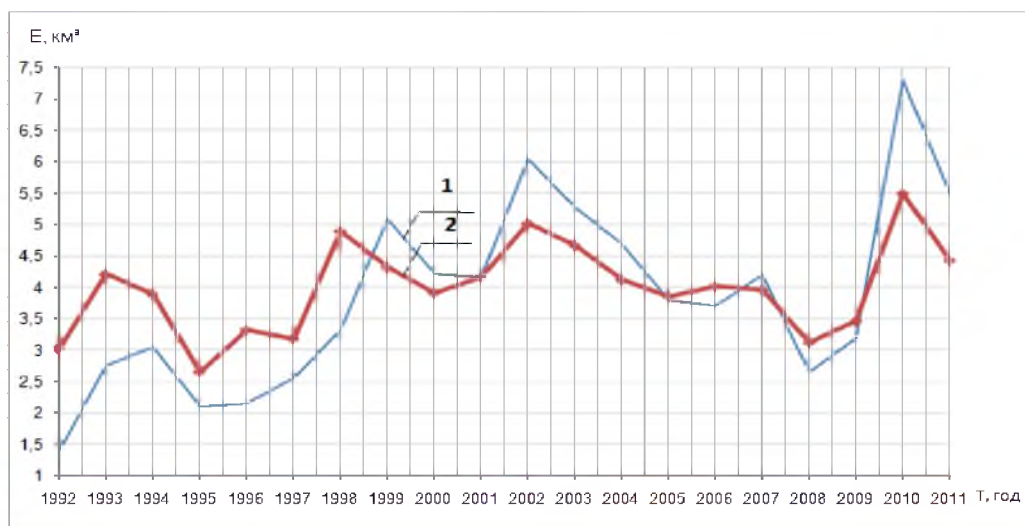
$$P_{2P} = \frac{n_{2P}}{N}, \quad (21)$$

где n_{2P} – количество лет расчетного периода N , в которых $W_2^T \geq W_{2P}$.

Оценка адекватности модели исследуемой системе. Проведена оценка адекватности имитационной модели исследуемой системе путем ручных прогонов (процедуры валидации и верификации). В качестве фактического состояния системы водообеспечения Иле-Балкашского бассейна приняты ретроспективные данные о ее состоянии за 21-летний период (1989–2009 гг.). Начальные условия имитационных экспериментов на этапе верификации модели определены путем обработки ретроспективной информации о фактическом состоянии системы в характерный период [2005–2010 гг., формулы (3)–(5)]. Приведение в соответствие модели и реальной системы проведено по наиболее надежным фактическим данным: уровенному режиму озера Балкаш и Капшагайского водохранилища. Все водобалансовые невязки отнесены к наименее изученному компоненту – русловым потерям речного стока (параметру e_3^T) (рисунок 5).



а



б

Рисунок 5 – Сопоставление фактических и смоделированных экологических затрат (а) и динамики уровня оз. Балкаш (б). Ретроспективная динамика: а – потеря (экологических затрат) речного стока в низовьях р. Иле; б – уровня озера Балкаш за 1992–2011 гг.: 1 – фактические, 2 – смоделированные данные

Выполнена компьютерная реализация имитационной модели системы водообеспечения на объектно ориентированном языке программирования С#. Разработанный программный комплекс включает совокупность модулей: графический интерфейс, математические функции, интерактивный анализ, взаимодействие с операционной системой. Пользовательский графический интерфейс включает функциональные панели: «выбор бассейна и сценария», «выбор прогона», «построение графика», «статистическая обработка», «визуализация» [19].

Разработана двумерная модель визуализации процесса имитационного моделирования Иле-Балкашской системы водообеспечения с анимацией ее динамики на основе схематических обозначений объектов, их связей и расчетных параметров.

Специально разработанные модули включают алгоритмы: изменения площади полигональных объектов в зависимости от входящих в модель расчетных параметров; определения толщины линий, характеризующих взаимосвязи водных объектов; изменения цвета объектов визуализации, основанные на табличной форме связи цвета и параметров объекта (рисунок 6).

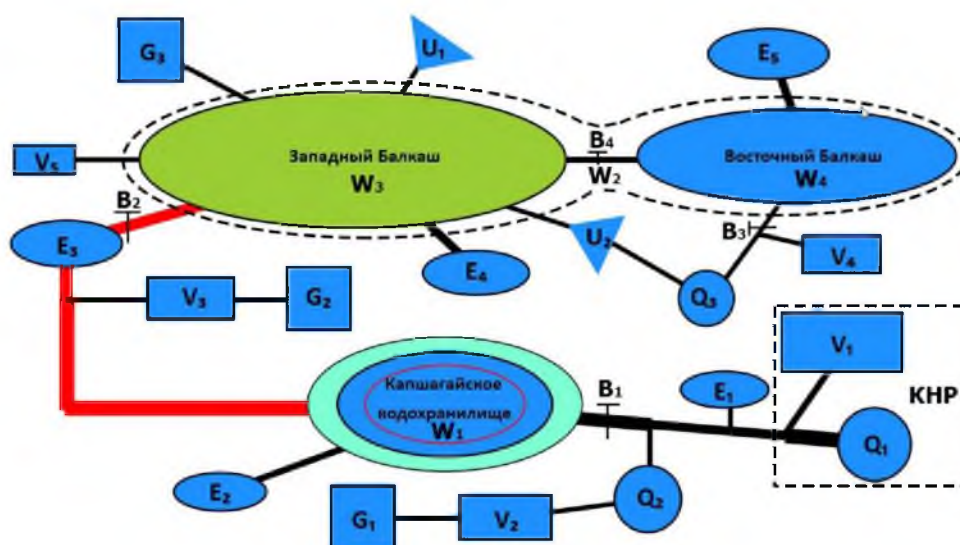


Рисунок 6 – Двумерная компьютерная визуализация имитационной модели развития СВО Иле-Балкашского бассейна

Численными расчетами на компьютерной модели подтверждены ее функциональные возможности и достоверность полученных результатов в реальном диапазоне входных параметров.

На рисунке 7 приведены результаты единичного прогона имитационной модели в рамках сценария «приоритет низовьев», отображающего динамику притока р. Иле в озеро Балкаш в виде календарного графика (*а*) и функций распределения вероятностей притока (*б*). На графике рисунка 7, *б* показана схема определения показателей водной безопасности системы по критериям надежности P и риска R .

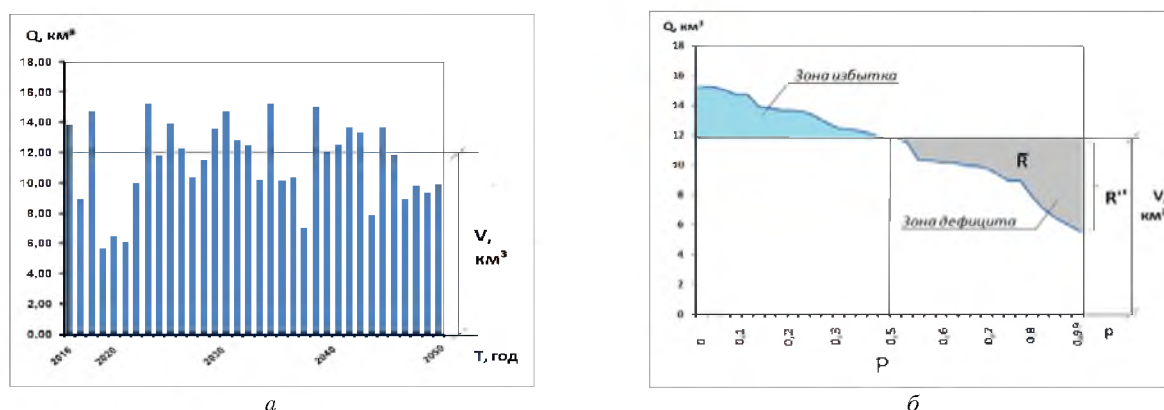


Рисунок 7 – Схема определения критериев водной безопасности

На рисунке 8 приведен пример графической визуализации состояния (наполнения) озера Балкаш.

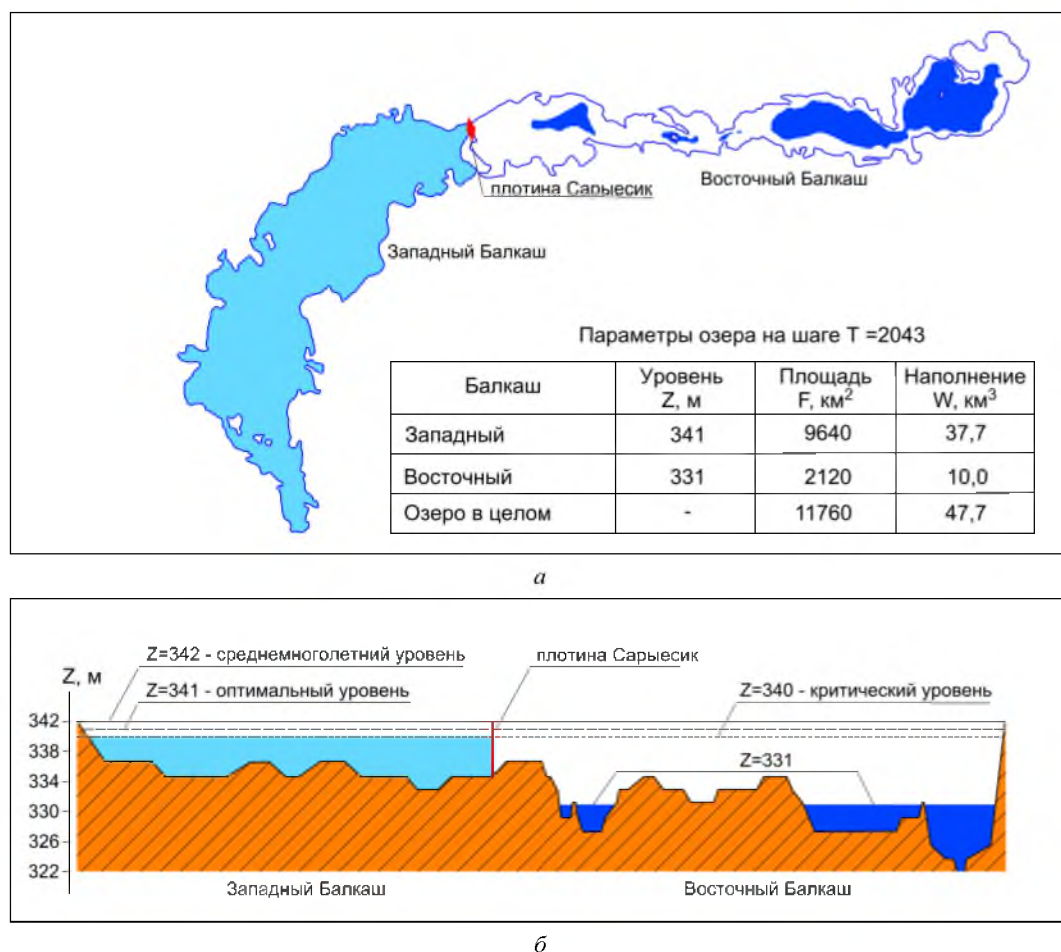


Рисунок 8 – Состояние озера Балкаш по сценарию «приоритет Западного Балкаша» на модельном шаге $T = 2043$.

а – план озера; *б* – продольный профиль

Обсуждение результатов.

1. Разработан «первый эскиз» имитационной модели системы водообеспечения Иле-Балкашского бассейна, включающий выполнение следующих процедур и операций:

- сформулированы проблемы развития СВО до 2050 года в контексте реализации стратегии «Казахстан-2050» и определены цели и задачи исследования;

- обоснована эффективность применения методологии имитационного динамико-стохастического моделирования для достижения сформулированных целей и найдены уровни детализации модели, определяющие ее пространственно-временную структуру и правила ее функционирования;

- дано логико-математическое описание СВО как совокупности взаимосвязанных алгоритмов, отображающих функционирование и развитие компонентов СВО – водисточников поверхностных и подземных, водопользователей социально-экономических и экологических, объектов водохозяйственной инфраструктуры;

- разработана система статистических критериев водной безопасности для оценки и сравнения альтернативных сценариев развития СВО;

- сформулированы требования к исходной информации и определены начальные условия имитационных экспериментов;

- дана оценка адекватности имитационной модели исследуемой системе путем ручных прогнозов модели с оценкой чувствительности выходов к изменению входных данных;

- выполнена компьютерная реализация имитационной модели на языке программирования C# и разработана двумерная анимационная модель визуализации процесса моделирования СВО.

2. Сформулированы первоочередные задачи сценарного анализа развития СВО Иле-Балкашского бассейна с использованием имитационного моделирования, включающие:

- разработку и моделирование сценарных прогнозов изменения располагаемых водных ресурсов бассейна с учетом данных по изменению климата и сокращению трансграничного стока с территории КНР;

- разработку и моделирование динамики спроса на воду бассейновой природно-хозяйственной системы на основе прогноза численности населения, гипотез развития водоемких производств, нормативов сохранения объектов природы;

- разработку и моделирование сценариев оптимизации водохозяйственной инфраструктуры СВО, в том числе межбассейновых перебросок речного стока, и освоение альтернативных водных источников;

- планирование, проведение имитационных экспериментов на компьютере и анализ результатов, обеспечивающие максимум информации из выходных данных моделирования;

- реализация полученных решений и документирование имитационной модели и ее использования.

3. Даны предложения по развитию функциональных возможностей имитационного динамико-стохастического моделирования путем:

- разработки имитационной модели Единой системы водообеспечения Республики Казахстан на основе развития межбассейновых водохозяйственных связей (перераспределения ресурса и спроса на воду);

- включения в состав оценочных критериев сценариев развития СВО экономических показателей и оптимизационных блоков.

Выводы. Впервые создан инструмент (первый эскиз модели) поддержки принятия решений в области стратегического планирования развития Национального водохозяйственного комплекса, в том числе реконструкции системной водохозяйственной инфраструктуры, сохранения и восстановления природных водных объектов, совершенствования межгосударственного вододелиения.

Даны предложения по развитию функциональных возможностей имитационного моделирования СВО, в том числе по созданию Единой системы водообеспечения Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Мальковский И.М. Географические основы водообеспечения природно-хозяйственных систем Казахстана. – Алматы, 2008. – 204 с.

[2] Медеу А.Р., Мальковский И.М., Толеубаева Л.С. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление (концепция). – Алматы, 2012. – 94 с.

[3] Медеу А.Р., Мальковский И.М., Толеубаева Л.С. Управление водными ресурсами Республики Казахстан: проблемы и решения // Материалы I Международной научно-практической конференции «Гидрология и инновационные технологии в водном хозяйстве». – Астана, 2015. – С. 18-22.

[4] Данилов-Данильян В.И. Глобальная проблема дефицита пресной воды. Режим доступа: www.socionauki.ru/journal/articles/129824.

[5] Мальковский И.М., Толеубаева Л.С., Толекова А., Долбешкин М.В., Пузиков Е.М. Оценочная модель сценариев развития единой системы водообеспечения Республики Казахстан // Вопросы географии и геоэкологии. – Алматы, 2015. – № 2. – С. 15-25.

[6] Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II. – М.: Мир, 1987. – 646 с.

[7] Поляков Н.А. История имитационного моделирования <http://simulation.su/uploads/files/default/obzor-polyakov-1.pdf>.

[8] Лузина Л.И. Компьютерное моделирование. – Томск, 2001. – 105 с.

[9] Manakou V., Tsiakis P., Tsiakis T., Kungolos A. Management of the Hydrological Basin of Lake Koronia using Mathematical Programming <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=15664>.

[10] Раткович Д.Я. Гидрологические основы водообеспечения. – М., 1993. – 430 с.

[11] Сванидзе Г.Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. – Тбилиси: Мецниерба, 1964. – 268 с.

[12] Кузьмин Е.В., Соколов В.А. О дисциплине специализации «Верификация программ» // Доклады II научно-методической конференции «Преподавание математики в компьютерных науках». – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – С. 91-101.

- [13] Андреев А.М., Козлов И.А. Методы построения и верификации математических моделей систем реального времени // Инженерный вестник. – 2014, 12 декабря – С. 607-625.
- [14] Validating Computational Models, Kathleen M. Carley Associate Professor of Sociology Department of Social and Decision Sciences Carnegie Mellon University September, 1996.
- [15] Достай Ж.Д. Природные воды Казахстана: ресурсы, режим, качество и прогноз. – Алматы, 2012. – 330 с.
- [16] Бахтияров В.А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. – Л., 1961. – 430 с.
- [17] Смоляр В.А., Буров Б. В., Мустафаев С. Т. Подземные воды Казахстана: обеспеченность и использование. – Алматы, 2012. – 402 с.
- [18] Сатенбаев Е.Н., Ибатуллин С.Р., Балгабаев Н.Н. Водопотребление отраслей экономики Казахстана: оценка и прогноз. – Алматы, 2012. – 262 с.
- [19] Пузиков Е.М., Долбешкин М.В., Поветкин Р.Д., Каржаубаев К.К. Программный комплекс для оценки прогнозных сценариев водообеспеченности природно-хозяйственных систем Казахстана // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. – Алматы, 2014. – С. 82-85.

REFERENCES

- [1] Malkovskiy I.M. Geographical bases of water supply of natural and economic systems of Kazakhstan. Almaty, 2008. 204 p. (in Russ.).
- [2] Medeu A.R., Malkovsky I.M., Toleubayeva L.S. Water resources of Kazakhstan: assessment, forecast, management (concept). Almaty, 2012. 94 p. (in Russ.).
- [3] Medeu A.R., Malkovskiy I.M., Toleubayeva L.S. Water resources management of the Republic of Kazakhstan: problems and decisions // Materials I of the International scientific and practical conference "Hydrology and Innovative Technologies in a Water Management". Astana, 2015. P. 18-22(in Russ.).
- [4] Danilov-Danilyan V.I. Global problem of deficiency of fresh water. Access mode: www.socionauki.ru/journal/articles/129824.
- [5] Malkovsky I.M., Toleubayeva L.S., Tolekov A., Dolbeshkin M. V., Puzikov E.M. Estimated model of scenarios of development of uniform system of water supply of the Republic of Kazakhstan // Questions of geography and geoecology. Almaty, 2015. N 2. P. 15-25(in Russ.).
- [6] Pritsker A. Introduction to imitating modeling and SLAM II language. M.: World, 1987. 646 p. (in Russ.).
- [7] Polyakov N.A. Istory's Poles of imitating modeling <http://simulation.su/uploads/files/default/obzor-polyakov-1.pdf>.
- [8] Luzina L.I. Computer modeling. Tomsk, 2001. 105 p. (in Russ.).
- [9] Manakou V., Tsiakis P., Tsiakis T., Kungolos A. Management of the Hydrological Basin of Lake Koronia using Mathematical Programming <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=15664>.
- [10] Hydro-electric calculations by Monte–Carlo method. M.: Energy, 1969. 362 p. (in Russ.).
- [11] Svanidze G.G. Bases of calculation of regulation of a river drain by Monte–Carlo method. Tbilisi: Metsniyerba, 1964. 268 p. (in Russ.).
- [12] Kuzmin E.V., Sokolov V.A. O to discipline of specialization "Verification of programs" // Reports of the II scientific and methodical conference "Teaching Mathematics in Computer Sciences". Yaroslavl: YarGU, 2007. P. 91-101(in Russ.).
- [13] Andreyev A.M., Kozlov I.A. Methods of construction and verification of mathematical models of systems of real time // Engineering messenger. 2014, 12 December. P. 607-625 (in Russ.).
- [14] Validating Computational Models, Kathleen M. Carley Associate Professor of Sociology Department of Social and Decision Sciences Carnegie Mellon University September, 1996.
- [15] Достай Zh.D. Natural waters of Kazakhstan: resources, mode, quality and forecast. Almaty, 2012. 330 p. (in Russ.).
- [16] Bakhtiarov V.A. Water management and water management calculations. L., 1961. 430 p. (in Russ.).
- [17] Smolyar V.A., Drills B.V., Mustafayev S.T. Underground waters of Kazakhstan: security and use. Almaty, 2012. 402 p. (in Russ.).
- [18] Satenbayev E.N., Ibatullin S.R., Balgabayev N.N. Water consumption of branches of economy of Kazakhstan: assessment and forecast. Almaty, 2012. 262 p. (in Russ.).
- [19] Puzikov E.M., Dolbeshkin M.V., Povetkin R.D., Karzhaubayev K.K. A program complex for an assessment of expected scenarios of water security of natural and economic systems of Kazakhstan // News of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Almaty, 2014. P. 82-85 (in Russ.).

БАЛҚАШ ЖӘНЕ АРАЛ АҒЫНСЫЗ АЛАПТАРЫН СУМЕН ҚАМТАМАСЫЗДАНДЫРУ ЖҮЙЕСІН ГЕОКЕҢЕСТІК ИМИТАЦИЯЛЫҚ ҮЛГІЛЕУ

И. М. Мальковский¹, Л. С. Толеубаева², Т. Е. Сорокина³, А. З. Таиров³, А. Толекова⁴,
М. В. Долбешкин⁵, Е. М. Пузиков⁵, Р. Д. Поветкин⁵, Д. У. Абдибеков⁴

¹География ғылымдарының докторы, профессор, жобаларды басқару бойынша бас менеджер
(География институты, Алматы, Қазақстан)

²География ғылымдарының докторы, математикалық үлгілеу және табиғи-шаруашылық жүйені
сумен қамтамасыздандыру зертханасының жетекшісі (География институты, Алматы, Қазақстан)

³География ғылымдарының кандидаты, математикалық үлгілеу және табиғи-шаруашылық жүйені
сумен қамтамасыздандыру зертханасының аға ғылыми қызметкері
(География институты, Алматы, Қазақстан)

⁴Математикалық үлгілеу және табиғи-шаруашылық жүйені сумен қамтамасыздандыру
зертханасының ғылыми қызметкері (География институты, Алматы, Қазақстан)

⁵Математикалық үлгілеу және табиғи-шаруашылық жүйені сумен қамтамасыздандыру
зертханасының кіші ғылыми қызметкері (География институты, Алматы, Қазақстан)

Түйін сөздер: геокенестік имитациялық үлгілеу, сумен қамтамасыздандыру жүйесі, ағынсыз алаб, Арал, Балқаш, Монте–Карло әдісі.

Аннотация. 2050 жылғы кезеңіне дейін Іле-Балқаш алабының сумен қамтамасыздандыру жүйесіне (СҚЖ) имитациялық даму үлгісінің «алғашқы эскизі» өңделген. Үлгілеудің міндеттері және мақсаттары анықталған және де СҚЖ дамыту мәселелері құрастырылған. СҚЖ логика-математикалық сипаттамасы берілген және қойылған мақсаттарды шешу жолында имитациялық динамика-стохастикалық үлгілеу әдістемесін пайдалануы негізделген. СҚЖ зерттеу барысында үлгілеудің сәйкестендіру бағасын беру үшін қолмен есептеу жолымен жүргізілген. Үлгілеу компьютер арқылы іске асырылған және үлгілеу процессінің екі өлшемді анимациясы жасалған. Сандық экспериментті арқылы үлгілеудің функционалды мүмкіншілігі және алынған нәтижелердің сенімділігі кіріс параметрлердің нақты ауқымында дәлелденген.

GEOSPATIAL IMITATING MODELLING OF WATER SUPPLY SYSTEMS OF BARRED BALKASH AND ARAL BASINS

I. M. Malkovskiy¹, L. S. Toleubayeva², T. E. Sorokina³, A. Z. Tairov³, A. Tolekova⁴,
M. V. Dolbeshkin⁵, E. M. Puzikov⁵, R. D. Povetkin⁵, D. U. Abdibekov⁴

¹Doctor of Geographical Sciences, professor, the chief manager on management of projects
(Institute of Geography, Almaty, Kazakhstan)

²Doctor of Geographical Sciences, head of Laboratory of Water Provision for Natural-Economic Systems and Mathematical Modeling (Institute of Geography, Almaty, Kazakhstan)

³Candidate of Geographical Sciences, senior research worker of Laboratory of Water Provision for Natural-Economic Systems and Mathematical Modeling (Institute of geography, Almaty, Kazakhstan)

⁴Research worker of Laboratory of Water Provision for Natural-Economic Systems and Mathematical Modeling (Institute of geography, Almaty, Kazakhstan)

⁵Jounior research worker of Laboratory of Water Provision for Natural-Economic Systems and Mathematical Modeling (Institute of geography, Almaty, Kazakhstan)

Keywords: geospatial imitating modeling, systems of water supply, barred basin, Aral, Balkash, Monte–Carlo method.

Abstract. "The first sketch" of imitating model of development of system of water supply (SVO) of the Ile-Balkashsky pool for the period till 2050 is developed. Problems of development of SVO and definite purposes and problems of modeling are formulated. Application of methodology of imitating dinamiko-stochastic modeling to the solution of objectives is proved and the logical-mathematical description of SVO is given. The assessment of adequacy of model of the studied SVO by carrying out manual runs of model is made. Computer realization of model and two-dimensional animation of process of modeling is executed. Numerical experiments have confirmed functionality of model and reliability of the received results in the actual range of input parameters.