

Обзорная статья

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К СЦЕНАРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Leman Max^{1,2*} , Айнура Е. Алдиярова¹  PhD, ассоциированный профессор, Ерболат Т. Кайпбаев¹  PhD, ассоциированный профессор, Айнура Н. Калмашова¹  PhD, ассоциированный профессор

¹НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет», г. Алматы, Казахстан. ainura.aldiarova@kaznaru.edu.kz (AEA), yerbolat.kaipbayev@kaznaru.edu.kz (ETK), Kalmashova.Ainur@kaznaru.edu.kz (АНК)

²АО «Институт географии и водной безопасности», г. Алматы, Казахстан; maxleman131@gmail.com (LM)

*Автор корреспонденции: Leman M., maxleman131@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

водные ресурсы, сценарный анализ, моделирование, речной бассейн, водная безопасность

АБСТРАКТ

Современное управление водными, роста водопотребления и трансграничных ограничений проблема водных кризисов в речных бассейнах приобретает системный характер. Наряду с увеличением нагрузок на водные ресурсы растёт необходимость в научно обоснованных методах прогнозирования и оценки рисков, что делает разработку и применение современных моделей водного менеджмента особенно актуальной задачей.

Цель работы заключается в сравнительном анализе существующих подходов к сценарному моделированию водных ресурсов, включая подходы, ориентированные на формирование и анализ альтернативных сценариев развития водохозяйственных систем на основе результатов модельных расчётов, отражающих различные комбинации климатических, социально-экономических и управленческих факторов.

В статье представлен обзор современных методов моделирования водных ресурсов, применяемых для анализа сценариев развития водных кризисов в речных бассейнах. Рассмотрены гидрологические, интегрированные, системно-динамические и стохастические модели, а также подходы к формированию сценариев с учётом климатических, антропогенных и управленческих факторов. Проведён сравнительный анализ преимуществ и ограничений различных методов с точки зрения оценки рисков водной безопасности и устойчивости водообеспечения.

Особое внимание уделено методологическим аспектам сценарного моделирования, позволяющим учитывать неопределённость природных и социально-экономических факторов. Показано, что сценарный анализ является ключевым инструментом для обоснования управленческих решений в условиях высокой неопределённости. Полученные выводы формируют методологическую основу для дальнейших исследований, направленных на анализ развития водных кризисов и планирование устойчивого водопользования в крупных речных бассейнах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы речных бассейнов являются ключевым фактором социально-экономического развития, экологической устойчивости и обеспечения водной безопасности территорий [1]. В условиях глобального изменения климата, роста водопотребления, деградации водохозяйственной инфраструктуры и усиления антропогенной нагрузки проблема устойчивого управления водными ресурсами приобретает особую актуальность [2]. Во многих регионах мира, особенно в аридных и полупустынных зонах, данные процессы приводят к формированию хронического дефицита воды и повышению риска развития водных кризисов [3].

Современные системы водообеспечения речных бассейнов функционируют в условиях высокой неопределённости, обусловленной климатической изменчивостью,

социально-экономическими трансформациями, изменениями структуры водопользования и управленческими решениями [4]. Неопределённость и риск являются неотъемлемой частью любого процесса принятия решений в реальных условиях, особенно в системах управления водными ресурсами [5]. Проблема неопределённости имеет первостепенное значение при оценке рисков [6]. В данной работе представлен обзор основных методов моделирования и сценарного анализа водных ресурсов, применяемых в мировой практике.

По статье:

Получено: 11.03.2026

Пересмотрено: 25.08.2026

Принято: 09.09.2026

Опубликовано: 01.10.2026

Традиционные детерминированные подходы к планированию водных ресурсов во многих случаях оказываются недостаточными для оценки долгосрочных последствий климатической изменчивости, изменений водопотребления и других неопределённых факторов, влияющих на функционирование водохозяйственных систем [7]. Сегодня в международной научной практике всё большее значение приобретают методы моделирования водных ресурсов, ориентированные на анализ альтернативных сценариев развития водохозяйственных систем [8, 9]. В современной практике наблюдается переход от анализа отдельных детерминированных сценариев к интегрированным и ансамблевым подходам, позволяющим исследовать широкий диапазон климатических, гидрологических и социально-экономических неопределённостей. Вместе с тем выбор методологической структуры, показателей робастности и набора сценариев существенно влияет на получаемые оценки и остаётся самостоятельной методологической задачей [10, 11].

Для цитирования:

Мах Леман, Алдиярова А.Е.,
Кайпбаев Е.Т., Калмашова
А.Н., Сравнительный анализ
подходов к сценарному
моделированию водных
ресурсов//

Гидрометеорология и
экология, 123 (3), 2026, 304–
318.

Актуальность работы определяется тем, что в условиях усиливающегося воздействия климатических изменений, демографического роста и интенсификации хозяйственной деятельности водные ресурсы речных бассейнов переходят в категорию систем с высокой степенью неопределённости и уязвимости. В этих условиях возрастает значимость сценарного моделирования как инструмента, позволяющего учитывать множественность возможных траекторий развития водохозяйственных систем, включая вариации климатических, социально-экономических и институциональных факторов.

Особое значение в условиях глубокой неопределённости приобретают адаптивные сценарные подходы, позволяющие корректировать управленческие решения по мере изменения внешних условий и поступления новой информации [12]. Они широко применяются при прогнозировании водного дефицита, оценке рисков водной безопасности и разработке стратегий управления спросом и водными ресурсами [13]. Ключевую роль в реализации сценарного анализа играют модели водных ресурсов, которые служат инструментом формализации сложных гидрологических, экологических и социально-экономических процессов, протекающих в речных бассейнах [14]. На рисунке 1 представлена блок-схема процесса разработки сценариев водохозяйственного планирования.



Рисунок 1. Итеративная концептуальная схема разработки и уточнения сценариев развития водохозяйственных систем

В настоящее время в мировой практике используется широкий спектр моделей, включая концептуальные и физически обоснованные гидрологические модели, интегрированные модели управления водными ресурсами, методы системной динамики, а также стохастические и вероятностные подходы [15, 16]. Каждая из этих групп моделей обладает определёнными преимуществами и ограничениями, связанными с требованиями к входным данным, уровнем детализации процессов и возможностями учёта неопределённости. Эти подходы и вычислительные методы, хотя и разрабатывались для различных целей, оказались ценными для разработки адаптивных политик [12, 13].

Вопросы сценарного анализа и оценки устойчивости водообеспечения особенно актуальны для трансграничных речных бассейнов, где управление водными ресурсами осложняется различиями в национальных приоритетах, институциональных механизмах и водохозяйственной политике [17]. Исследования, выполненные для трансграничных бассейнов Центральной Азии, показывают, что сочетание климатических изменений и антропогенных воздействий существенно повышает риски водного дефицита и экологической деградации [18].

Отдельные исследования также рассматривают применение сценарных и динамико-стохастических подходов к анализу водохозяйственных систем аридных и трансграничных регионов Центральной Азии [18, 19]. Однако систематизированное сопоставление международных методологических подходов к моделированию водных кризисов остаётся актуальной задачей. В связи с этим целью настоящей статьи является обзор и сравнительный анализ современных методов моделирования водных ресурсов речных бассейнов, применяемых в сценарных исследованиях развития систем водообеспечения и водных кризисов. Полученные результаты формируют методологическую основу для дальнейших прикладных исследований, направленных на анализ и прогнозирование развития водных кризисов в крупных речных бассейнах.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современное управление водными ресурсами требует инструментов, способных учитывать сложные взаимодействия между гидрологическими, климатическими, социально-экономическими и институциональными факторами. Для сценарного анализа водохозяйственных систем применяются различные методологические подходы, отличающиеся уровнем формализации, требованиями к данным и практической интерпретируемостью результатов. В данной работе для сравнительного обзора ото-

браны системная динамика (SD), стохастические методы, интегрированные модели водопользования и методологический фреймворк Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP), широко применяемые в международной практике сценарного анализа водных ресурсов. Их сопоставление проводится по уровню учёта неопределённости, возможности количественной оценки, применимости к трансграничным речным бассейнам и управленческой интерпретируемости результатов.

2.1. Обзор моделей и подходов к сценарному анализу водных ресурсов

Гидрологические модели. Гидрологические модели остаются основным инструментом для изучения речных бассейнов, водного баланса и прогнозирования речного стока. В зависимости от целей исследования, уровня детализации процессов и доступности исходных данных модели классифицируются по различным критериям: детерминированные и стохастические, распределённые и полу-распределённые, концептуальные и физически обоснованные, имитационные и оптимизационные [20]. В современной практике широко применяются как концептуальные, так и физически обоснованные модели, включая SWAT, HBV, VIC и MIKE SHE [20...23]. Сравнительная характеристика рассматриваемых моделей и методологических подходов с учётом характера сценариев, способов представления неопределённости, аналитических преимуществ и ограничений представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Сравнительная характеристика моделей и методов сценарного анализа водных ресурсов

Подход/примеры моделей	Основной объект анализа	Характер сценариев	Учет неопределённости	Основное преимущество	Ограничение
Гидрологическое (SWAT, HBV, MIKE SHE)	Сток, водный баланс, поверхностные и подземные воды	Климатические и землепользовательские	через внешние климатические сценарии, ансамбли и вариацию параметров	Детальное воспроизведение гидрологических процессов и физических реакций	Ограниченное представление различных факторов
Интегрированные модели управления водными ресурсами (WEAP)	Водный баланс, спрос, распределение воды между секторами	Климатические, социально-экономические и управленческие	Комбинация нескольких источников неопределённости	Связывают ресурсы, водопотребление и управление в системе	Упрощение отдельных гидрологических процессов
System Dynamics (SD)	Обратные связи между ресурсами, спросом, экономикой и управлением	Долгосрочные стратегические, управленческие	Через альтернативные предположения, чувствительность параметров и структуры	Позволяет исследовать нелинейные связи, накопленные и отложенные эффекты	Высокая зависимость результатов от концептуализации модели и предположений
Стохастические и вероятностные методы	Риск дефицита, изменчивость водных ресурсов, надёжность водообеспечения	Вероятностные ансамбли и Monte Carlo	Непосредственное описание статистической неопределённости распределениями вероятностей	Количественная оценка вероятностей, диапазонов, чувствительности и риска	Требуется достаточная информация; слабее работают при глубокой неопределённости
Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP)	Адаптивные управленческие решения и последовательности действий	Множество правдоподобных будущих состояний	Ориентирован на глубокую неопределённость без обязательного задания вероятностей	Позволяет менять стратегию при достижении заранее заданных порогов и триггеров	Не является самостоятельной вычислительной моделью и требует внешнего моделирования
Динамико-стохастически/комбинированные подходы	Совместная динамика ресурсов, спроса и риска	Многофакторные сценарии развития водохозяйственной системы	Совмещают динамическую, статистическую и сценарную неопределённость	Одновременная оценка состояния системы, диапазонов возможных исходов и риска	Высокие требования к данным, вычислениям и интерпретации результатов

Сравнение, представленное в таблице 2.1, показывает, что различия между рассматриваемыми подходами определяются не только набором моделируемых процессов, но и способом представления неопределённости и характером решаемой задачи. Гидрологические модели преимущественно ориентированы на количественное воспроизведение физических процессов и оценку реакции водных ресурсов на изменение внешних факторов, тогда как интегрированные и системно-динамические подходы расширяют анализ за счёт включения водопотребления, управленческих решений и социально-экономических взаимодействий [22]. Стохастические методы обеспечивают количественное представление статистической неопределённости и риска, в то время как DAPP ориентирован на формирование адаптивных решений в условиях глубокой неопределённости, когда вероятности будущих состояний не могут быть надёжно определены. Следовательно, выбор подхода должен определяться не универсальным преимуществом конкретной модели, а соответствием её аналитических возможностей типу неопределённости, доступности данных и цели сценарного исследования. Современное развитие сценарного гидрологического моделирования связано с использованием ансамблей климатических моделей CMIP6 и сценариев Shared Socioeconomic Pathways (SSP), а также с сопоставлением физически обоснованных и data-driven моделей. В частности, сравнительное применение SWAT и NARX демонстрирует возможности использования различных модельных структур для оценки будущих изменений речного стока при нескольких климатических сценариях [24]. Одновременно развивается использование многокомпонентных открытых данных для моделирования бассейнов с ограниченной наблюдательной сетью. Совместное применение спутниковых и других открытых источников данных может улучшать воспроизведение отдельных компонентов водного баланса и повышать надёжность валидации моделей в интенсивно регулируемых и недостаточно обеспеченных наблюдениями бассейнах [25]. Это частично снижает традиционное ограничение физически обоснованных моделей, связанное с высокими требованиями к исходной информации.

Концептуальная модель HBV удобна для регионов с ограниченной наблюдательной сетью, позволяет моделировать водный баланс и динамику стока с относительно простой калибровкой. Однако для детального анализа водохозяйственного управления её возможностей недостаточно [22].

Физически распределённые модели, такие как MIKE SHE, обеспечивают точное описание взаимодействия поверхностных и подземных вод, что делает их полезными для крупных бассейнов. При этом высокая вычислительная сложность и требования к данным ограничивают их применение для долгосрочных сценарных исследований [23]. Сравнение современных водных моделей показывает, что различия между их структурами могут существенно влиять на результаты гидрологических оценок. Межмодельные сопоставления свидетельствуют, что отдельные модели неодинаково воспроизводят речной сток, запасы воды и их сезонную динамику в различных климатических и антропогенных условиях [26]. Поэтому при сценарном анализе выбор модели должен учитывать не только её функциональные возможности, но и соответствие структуры модели исследуемым процессам, пространственному масштабу и характеру антропогенного воздействия.

Интегрированные модели управления водными ресурсами

Для анализа сценариев устойчивого водообеспечения применяются интегрированные модели, которые объединяют гидрологические, социально-экономические и управленческие аспекты.

Одной из таких моделей является WEAP (Water Evaluation and Planning System) [8, 27]. WEAP позволяет моделировать распределение ресурсов между различными секторами водопользования, анализировать влияние изменения спроса и управления ресурсом, а также строить сценарии изменения климата. Этот инструмент часто используется для оценки водного дефицита и разработки стратегий управления водохозяйственными

системами. Ограничением является упрощённое описание гидрологических процессов, что требует интеграции с другими моделями при более детальном анализе [5].

Интегрированные модели особенно ценны для трансграничных бассейнов, где необходимо учитывать институциональные и управленческие факторы наряду с природными условиями. Современное развитие интегрированного моделирования связано с расширением границ анализа за пределы собственно водного баланса и включением взаимосвязей между водными, энергетическими и продовольственными ресурсами. Для трансграничных бассейнов такие модели позволяют одновременно учитывать пространственное распределение ресурсов, социально-экономическое развитие и различные условия межгосударственного сотрудничества [28]. Более широкая тенденция интегрированного моделирования заключается в переходе от преимущественно гидрологического представления системы к совместному анализу природных и социальных процессов в *human-water systems*. При таком подходе количественные модели рассматриваются не только как средства прогнозирования, но и как инструменты исследования взаимодействий между водными ресурсами, поведением водопользователей, институтами и управленческими решениями [29].

Системная динамика в сценарном анализе

Методы системной динамики (System Dynamics) широко применяются для анализа сложных, нелинейных взаимодействий между водными ресурсами, водопотреблением, социально-экономическими процессами и управленческими решениями [30]. Данный подход ориентирован на выявление причинно-следственных связей, накопленных эффектов и обратных связей, формирующих долгосрочную динамику водохозяйственных систем. Применение системной динамики в полуаридных условиях также показывает её возможности для сопоставления долгосрочных сценариев климатических изменений и адаптационных мер [31]. В частности, моделирование изменений водозабора на орошение позволяет оценивать эффективность повышения эффективности ирригации, изменения структуры посевных площадей и их сочетания в качестве мер адаптации к климатическим изменениям [32].

Системно-динамические модели позволяют оценивать устойчивость водных ресурсов во временной перспективе, анализировать последствия альтернативных управленческих стратегий и формировать адаптационные меры в условиях изменения климата и роста водопотребления [33]. Особое значение данный подход имеет для стратегического планирования, где необходимо учитывать инерционность гидрологических процессов и отложенные эффекты управленческих решений.

В то же время ключевым ограничением системной динамики остаётся высокая зависимость результатов моделирования от качества концептуализации системы, структуры обратных связей и экспертных оценок параметров, что может снижать воспроизводимость и точность количественных прогнозов [30, 31].

Стохастические и вероятностные подходы

Для учёта высокой неопределённости климатических, гидрологических и антропогенных факторов в сценарном анализе водных ресурсов широко применяются стохастические и вероятностные методы [4, 32]. Эти подходы позволяют формировать ансамбли сценариев, отражающие широкий спектр возможных будущих состояний системы, и проводить количественную оценку рисков водного дефицита. Одним из направлений развития вероятностного моделирования является совместное применение Monte Carlo simulation и анализа чувствительности для количественной оценки неопределённости параметров водохозяйственных моделей. Такой подход позволяет не только получать диапазон возможных состояний системы, но и определять параметры, вносящие наибольший вклад в неопределённость результатов [33]. Для непосредственной оценки риска дефицита воды развиваются вероятностные методы, ориентированные на описание совместного распределения факторов риска. В частности, сочетание непараметрической

оценки плотности распределения и copula-функций позволяет оценивать вероятность дефицита воды при ограниченности исходных данных и неопределённой форме распределений [34].

Преимущества метода: Стохастическое моделирование особенно актуально для аридных и полуаридных речных бассейнов, характеризующихся высокой межгодовой и внутригодовой изменчивостью стока, а также нестабильностью водопотребления [4]. Вероятностные методы позволяют оценивать надёжность водообеспечения, вероятность превышения критических порогов и чувствительность системы к различным источникам неопределённости. При выборе вероятностного инструментария необходимо различать статистическую и глубокую неопределённость. Статистическая неопределённость может быть представлена вероятностными распределениями и исследована методами Monte Carlo, тогда как для факторов, вероятности будущих состояний которых невозможно надёжно определить, более обоснованным является использование множества дискретных сценариев. Современные подходы поэтому всё чаще объединяют вероятностное моделирование и сценарный анализ в единой структуре принятия решений [7, 35]. Наряду с неопределённостью будущих сценариев существенное значение имеет структурная неопределённость самих моделей. Современные исследования глобального моделирования водных ресурсов выделяют среди её основных источников неоднородность качества и доступности исходных данных, неполное представление антропогенного воздействия на водный цикл и различия в воспроизведении гидрологических процессов для различных природных условий [36]. Следовательно, неопределённость результатов сценарного анализа определяется не только выбранными внешними сценариями, но и структурой, параметризацией и информационным обеспечением используемой модели [37].

Ограничения: основным ограничением данных подходов является сложность интерпретации вероятностных результатов для практического управления, что часто требует их комбинирования с детерминированными и интегрированными моделями водохозяйственных систем [16, 38].

2.2 Сценарные методы в управлении водными ресурсами

В международной практике управления водными ресурсами применяются различные сценарные подходы, включая системную динамику (SD) [39], стохастическое моделирование, интегрированные модели водопользования и методологический фреймворк Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP) [40]. Современное развитие сценарного анализа связано с переходом от предположения о возможности определения наиболее вероятного будущего состояния системы к исследованию множества правдоподобных будущих условий. При глубокой неопределённости такой подход позволяет оценивать устойчивость управленческих решений без необходимости присваивать достоверные вероятности отдельным сценариям будущего [41]. При этом неопределённость в гидрологическом и водохозяйственном моделировании возникает на нескольких этапах анализа - от климатических проекций и исходных данных до структуры гидрологической модели и выбора управленческих предпосылок [36, 41]. Поэтому сравнительная оценка сценарных методов должна учитывать не только способность модели воспроизводить водный баланс, но и способы представления, анализа и передачи неопределённости в процессе принятия решений.

Выбор именно этих методов для сравнительного анализа обусловлен следующими критериями:

1. Учёт неопределённости - способность метода включать климатические, гидрологические, социально-экономические и институциональные неопределённости.
2. Уровень количественной формализации - возможность получения численных оценок водного баланса, рисков дефицита и устойчивости водохозяйственной системы.
3. Применимость для трансграничных бассейнов - способность учитывать регулирование стока несколькими странами, разную инфраструктуру и институциональные ограничения.

4. Управленческая интерпретируемость - насколько результаты метода могут быть использованы для принятия практических решений, включая краткосрочные меры и долгосрочные стратегии.

Выбор этих методов обусловлен тем, что они представляют разные подходы к сценарию будущего: SD и интегрированные модели предоставляют количественные прогнозы и сценарные оценки; стохастические методы позволяют моделировать вероятностные диапазоны водных ресурсов; DAPP обеспечивает методологическую структуру для гибкого управления в условиях глубокой неопределённости.

Динамические адаптивные траектории Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP)

DAPP рассматривается не как вычислительная модель, а как методологический фреймворк, направленный на построение адаптивных стратегий управления водными ресурсами. Основная идея метода - формирование адаптационных траекторий, то есть последовательностей управленческих решений, которые корректируются при достижении заранее определённых пороговых значений (триггеров) [39]. Современное развитие DAPP характеризуется его интеграцией с exploratory modelling, robust decision-making и количественным определением сигналов, триггеров и порогов адаптации. Такая комбинация позволяет проводить стресс-тестирование альтернативных траекторий и оценивать их устойчивость относительно множества возможных будущих условий [40].

Примеры применения DAPP включают:

- дельтовую программу Нидерландов (управление стоком Рейна и Мааса);
- стратегии управления бассейном р.Темза (Великобритания);
- региональные проекты в США и Австралии.

Преимущества метода: поддержка принятия решений в условиях глубокой неопределённости, связь краткосрочных управленческих мер с долгосрочными стратегиями, визуализация альтернативных сценариев развития водохозяйственной системы, гибкость корректировки стратегии по мере появления новой информации [39...41].

Ограничения: не является самостоятельной вычислительной моделью - требует внешних данных, пороговые значения часто определяются экспертными оценками, высокая сложность при большом числе альтернатив, ограниченная применимость в регионах с дефицитом данных и слабой институциональной средой [40, 41].

2.3 Динамико-стохастические подходы и интегрированные модели

Динамико-стохастические подходы основаны на количественном моделировании сценариев водного кризиса с учётом вероятностных распределений ключевых факторов.

Основные компоненты метода - динамическое моделирование, стохастическое описание неопределённостей, сценарный анализ как количественная оценка рисков водного дефицита и устойчивости водообеспечения [32, 33]. Интегрированные модели объединяют гидрологические расчёты, водопотребление и управленческие решения в единой вычислительной системе, позволяя оценивать последствия разных стратегий на устойчивость водохозяйственной системы [28, 29]. Новейшие исследования показывают дальнейшее развитие таких подходов в направлении одновременной оптимизации эксплуатационных решений, инфраструктурной адаптации и устойчивости системы при глубокой неопределённости. В современных моделях водохранилищ рассматриваются не только альтернативные будущие условия водообеспечения и спроса, но и компромиссы между несколькими управленческими целями, а критерием выбора решений становится устойчивость их эффективности в широком диапазоне возможных будущих состояний.

Примеры применения динамико-стохастических подходов и интегрированных моделей:

- Бассейн реки Дунай (Европа) – интегрированные модели используются для оценки последствий изменения климата, управления водохозяйственными сооружениями и трансграничного распределения воды между 19 странами бассейна [42].

- Международный бассейн реки Нил (Африка) – динамико-стохастические модели применяются для анализа водопотребления, прогнозирования водного дефицита и оценки риска конфликта между странами, особенно при эксплуатации Большой Эфиопской плотины на Голубом Ниле [43].
- Река Колорадо (США, Мексика) – интегрированные модели с элементами стохастики используются для оценки устойчивости водообеспечения с учётом изменения климата, популяции и водопотребления, а также для планирования распределения воды между штатами и соседней страной [44, 45].

Преимущества: возможность количественной оценки рисков и вероятностей наступления критических состояний, обеспечение воспроизводимости и формализации сценариев, учет взаимодействия гидрологических, климатических и социально-экономических факторов, применимость для трансграничных бассейнов с высокой климатической и институциональной неопределённостью.

Ограничения: требует значительного объёма данных, модели могут быть сложны для интерпретации непрофессионалами, высокие вычислительные ресурсы при моделировании большого числа сценариев.

2.4 Сравнительная характеристика методов анализа водных сценариев по ключевым методологическим критериям

Проведен сравнительный анализ основных методологических подходов, применяемых для исследования сценариев развития водных ресурсов в условиях высокой неопределенности. Рассматриваются методы Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP), системной динамики, стохастического моделирования и интегрированных моделей.

Проведённый анализ показывает, что выбор метода сценарного моделирования определяется не только исследовательской задачей, но и характером рассматриваемой неопределённости. Статистическая неопределённость допускает вероятностное описание, тогда как при глубокой неопределённости вероятности будущих состояний не могут быть надёжно определены [45]. Отдельное значение имеют структурная неопределённость модели и сложность взаимодействий между природными, социально-экономическими и управленческими компонентами водохозяйственной системы [43, 45, 46]. На этой основе сформированы критерии выбора методов сценарного анализа, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Критерии выбора методов сценарного анализа водных ресурсов в зависимости от типа неопределенности [7, 29, 35...37]

№	Тип неопределенности/задача	Предпочтительный подход	Основной критерий выбора	Ограничение
1	Статистическая неопределенность	Стохастические и вероятностные методы	Неопределённость может быть представлена вероятностными распределениями; требуется количественная оценка вероятностей, диапазонов и рисков	Требуются достаточные данные для определения распределений и параметров
2	Глубокая неопределенность	DAPP и сценарные подходы	Вероятности будущих состояний невозможно надёжно определить; требуется оценить устойчивость решений для множества правдоподобных будущих условий	Необходимы критерии адаптации, пороговые значения и мониторинг изменений
3	Структурная и системная неопределенность	Системная динамика (SD)	Существенную роль играют обратные связи, временная динамика и взаимодействие факторов	Результаты зависят от структуры модели и принятых предположений
4	Комплексная (многофакторная) неопределенность	Интегрированные модели	Требуется совместное представление гидрологических, водохозяйственных и социально-экономических процессов	Высокие требования к данным и сложности построения модели

5	Сочетание нескольких типов неопределенности	Комбинированный подход	Один метод не охватывает одновременно количественную неопределённость, системные взаимодействия и адаптацию решений	Возрастают требования к данным, вычислениям и интерпретации результатов
---	---	------------------------	---	---

Таким образом, выбор метода определяется прежде всего характером неопределённости и целью анализа. При наличии нескольких взаимосвязанных источников неопределённости целесообразно комбинирование методов, поскольку отдельные подходы решают различные аналитические и управленческие задачи [47]. Данный анализ демонстрирует, что ни один метод не является универсальным. На практике оптимальной стратегией является комбинация подходов. В целом, интеграция качественных и количественных методов создаёт научно обоснованную основу для разработки устойчивых стратегий управления водными ресурсами, учитывающих сложность и неопределённость современных водных систем.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый сравнительный анализ выявил несколько взаимосвязанных тенденций в развитии сценарного моделирования водных ресурсов. Во-первых, наблюдается переход от использования отдельных детерминированных моделей к ансамблевым и комбинированным подходам, позволяющим учитывать несколько источников неопределённости. Современные исследования расширяют сценарный анализ за счёт использования ансамблей климатических моделей и сценариев SSP, вероятностного и стохастического моделирования, интегрированных моделей природно-социальных систем, а также адаптивных подходов к принятию решений в условиях глубокой неопределённости [24, 28, 29, 37, 40]. Это свидетельствует о смещении методологического акцента от получения единственного прогнозного состояния водохозяйственной системы к исследованию диапазона возможных будущих состояний и устойчивости решений при различных сценарных предположениях.

Во-вторых, сопоставление методов показывает, что характер неопределённости является одним из ключевых критериев выбора методологического инструментария. Стохастические и вероятностные методы наиболее применимы в случаях, когда неопределённость может быть количественно представлена вероятностными распределениями и исследована посредством ансамблевого моделирования или Monte Carlo simulation [33...35]. При глубокой неопределённости, когда вероятности будущих состояний невозможно надёжно определить, более обоснованным является рассмотрение множества правдоподобных сценариев и применение адаптивных траекторий принятия решений [40...42]. Одновременно результаты современных исследований показывают, что неопределённость сценарных оценок связана не только с внешними климатическими и социально-экономическими предположениями, но также со структурой модели, параметризацией, качеством и доступностью исходных данных [36...41].

В-третьих, рассмотренные методы различаются по характеру получаемой информации и её использованию в процессе принятия решений. Гидрологические модели обеспечивают преимущественно количественное представление физических процессов и реакции бассейна на изменение внешних воздействий; системная динамика позволяет исследовать обратные связи и долгосрочное поведение водохозяйственной системы; интегрированные модели расширяют анализ за счёт совместного представления гидрологических, социально-экономических и управленческих процессов; стохастические методы обеспечивают количественную оценку риска и диапазона возможных состояний; DAPP ориентирован на построение последовательности адаптивных решений при изменении внешних условий. Следовательно, различия между подходами определяются не только их вычислительными возможностями, но и типом исследовательской и управленческой задачи.

Полученные результаты также показывают ограничения использования единственного методологического подхода в системах, где одновременно присутствуют климатическая, гидрологическая, социально-экономическая, институциональная и структурная неопределённость. В таких условиях применение только вероятностного моделирования не позволяет полностью представить глубокую неопределённость, тогда как исключительно адаптивные подходы не обеспечивают самостоятельной количественной оценки водного баланса и риска. Поэтому методологически обоснованным является сочетание взаимодополняющих инструментов: количественные и интегрированные модели могут использоваться для оценки состояния системы и последствий альтернативных сценариев, стохастические методы - для характеристики вероятностной неопределённости и риска, а адаптивные подходы - для формирования последовательности управленческих действий при изменении внешних условий [28, 37, 40].

Такое сопоставление позволяет перейти от простого перечисления функциональных возможностей моделей к критериальному выбору методологии. Основными критериями выступают тип неопределённости, требуемая степень количественной формализации, доступность исходных данных, необходимость представления взаимодействий между природными и социально-экономическими компонентами и возможность использования результатов для принятия управленческих решений. Тем самым выбор метода сценарного анализа определяется соответствием его аналитических возможностей конкретной постановке задачи, а при сочетании нескольких типов неопределённости - обоснованностью интеграции нескольких взаимодополняющих подходов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый обзор и сравнительный анализ современных подходов к сценарному моделированию водных ресурсов показал, что выбор методологического инструментария определяется характером рассматриваемой неопределённости, целью исследования, доступностью исходных данных и требуемым уровнем количественной формализации. Универсального метода, одинаково применимого ко всему спектру задач управления водными ресурсами, не выявлено.

Основным методологическим результатом обзора является систематизация рассматриваемых подходов в соответствии с типами неопределённости. Стохастические и вероятностные методы наиболее обоснованы при статистически описываемой неопределённости; системная динамика - при необходимости анализа структурных взаимосвязей, обратных связей и долгосрочной динамики системы; интегрированные модели - при совместном рассмотрении гидрологических, социально-экономических и управленческих процессов; адаптивные подходы, включая DAPP, - в условиях глубокой неопределённости, когда вероятности будущих состояний не могут быть надёжно определены.

Современная тенденция сценарного моделирования заключается в переходе от изолированного применения отдельных моделей к комбинированию количественных, интегрированных и адаптивных подходов. Такое сочетание особенно актуально для сложных водохозяйственных систем, в которых одновременно проявляются климатическая, гидрологическая, социально-экономическая, институциональная и структурная неопределённость.

Практическая значимость проведённого обзора заключается в формировании критериев выбора методологического подхода в зависимости от исследовательской и управленческой задачи. Сформированная методологическая база может использоваться при выборе инструментов сценарного анализа, оценке устойчивости водообеспечения, обосновании стратегий водной безопасности и разработке адаптационных мер. Дальнейшее развитие сценарного анализа целесообразно связывать с интеграцией ансамблевого и вероятностного моделирования, комплексных моделей природно-социальных систем и адаптивных механизмов принятия решений, позволяющих корректировать стратегии по мере изменения внешних условий и поступления новой информации.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

В рамках данной обзорной статьи не создавались и не анализировались первичные данные. Все использованные материалы основаны на ранее опубликованных научных исследованиях и открытых источниках, ссылки на которые приведены в списке литературы.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация, методология, написание первоначального проекта и визуализация – ML; научное руководство – АЕА; написание обзора и редактирование – АЕА, ЕТК, АНК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. UNESCO World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. - UNESCO, 2023. - URL: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023>.
2. Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Liermann C.R., Davies P.M. Global threats to human water security and river biodiversity // *Nature*. - 2010. - Vol. 467. - P. 555-561. - DOI: 10.1038/nature09440.
3. Falkenmark M., Rockström J. Balancing Water for Humans and Nature. - Earthscan, 2004.
4. Loucks D.P., van Beek E. Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications. - UNESCO, 2017.
5. Arunraj N.S., Mandal S., Maiti J. Modeling uncertainty in risk assessment: A review // *Safety Science*. - 2013. - Vol. 55. - P. 15-28. - DOI: 10.1016/j.ssci.2012.12.004.
6. Beven K.J. Facets of uncertainty: Epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication // *Hydrological Sciences Journal*. - 2016. - Vol. 61, No. 9. - P. 1652-1665. - DOI: 10.1080/02626667.2015.1031761.
7. Walker W.E., Lempert R.J., Kwakkel J.H. Deep uncertainty // *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. - 3rd ed. - Springer, 2013. - P. 395-402. - DOI: 10.1007/978-1-4419-1153-7_1140.
8. Yates D., Sieber J., Purkey D., Huber-Lee A. WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model // *Water International*. - 2005. - Vol. 30, No. 4. - P. 487-500. - DOI: 10.1080/02508060508691893.
9. Raskin P., Gleick P., Kirshen P., Pontius G., Strzepek K. Water futures: Assessment of long-range patterns and problems // *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World*. - Stockholm Environment Institute, 1997. - P. 1-54.
10. Muñoz R., Vaghefi S.A., Drenkhan F., Santos M.J., Viviroli D., Muccione V., Huggel C. Assessing Water Management Strategies in Data-Scarce Mountain Regions under Uncertain Climate and Socio-Economic Changes // *Water Resources Management*. - 2024. - Vol. 38, No. 11. - P. 4083-4100. - DOI: 10.1007/s11269-024-03853-5.
11. Huang J., Sangiorgio M., Wu W., Maier H.R., Wang Q.J., Hughes J., Castelletti A. Solving the robustness puzzle: The joint impact of optimization approach, robustness metrics, and scenarios on water resources management under deep uncertainty // *Journal of Environmental Management*. - 2025. - Vol. 373. - Art. 123540. - DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123540.
12. Haasnoot M., Kwakkel J.H., Walker W.E., ter Maat J. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world // *Global Environmental Change*. - 2013. - Vol. 23. - P. 485-498. - DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006.
13. Klijn F., Kreibich H., de Moel H., Penning-Rowsell E. Adaptive flood risk management planning based on a comprehensive flood risk conceptualisation // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. - 2015. - Vol. 20, No. 6. - P. 845-864. - DOI: 10.1007/s11027-015-9638-z.
14. Dong C., Schoups G., van de Giesen N. Scenario development for water resource planning and management: A review // *Technological Forecasting and Social Change*. - 2013. - Vol. 80, No. 4. - P. 749-761. - DOI: 10.1016/j.techfore.2012.09.015.
15. Loucks D.P., van Beek E., Stedinger J.R., Dijkman J.P.M., Villars M.T. Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications. - UNESCO Publishing; Deltares, 2005.
16. Refsgaard J.C., van der Sluijs J.P., Højberg A.L., Vanrolleghem P.A. Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance // *Environmental Modelling & Software*. - 2012. - Vol. 39. - P. 154-174. - DOI: 10.1016/j.envsoft.2007.02.004.
17. Zeitoun M., Mirumachi N. Transboundary water interaction // *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*. - 2008. - Vol. 8. - P. 297-316. - DOI: 10.1007/s10784-008-9089-7.
18. Dolbeshkin M.V., Puzikov E.M., Povetkin R.D. Modeling of transboundary Ile-Balkhash river basin in Central Asia // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. - 2017. - No. 5(425). - P. 171-180.
19. Leman M., Tairov A., Malkovskiy I., Toleubaeva L., Aldiyarova A. Dynamic stochastic model of sustainable water resources management in Kazakhstan // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. - 2025. - No. 6(474). - P. 151-167. - DOI: 10.32014/2025.2518-170X.577
20. Beven K.J. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. - 2nd ed. - Wiley-Blackwell, 2012.
21. Purdue University, Department of Agronomy; Department of Agricultural and Biological Engineering. SWAT Modeling [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.agry.purdue.edu/hydrology/projects/nexus-swm/en/SWAT.html> (дата обращения: 04.03.2026).
22. Lindström G., Pers C., Rosberg J., Strömqvist J., Arheimer B. Development and test of the HBV light hydrological model. - SMHI Reports Hydrology, No. RH 07. - Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2010. - 35 p. - URL: https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.22331/Menu/general/column-content/attachment/HBV_light.pdf (дата обращения: 12.02.2026).
23. DHI Group. MIKE SHE: Integrated Hydrological Modeling System [Электронный ресурс]. - 2025. - URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she> (дата обращения: 18.01.2026).
24. Balcha Y.A., Kaveh K., Alamirew T., Malcherek A. Comparability of NARX model to SWAT model in simulating future water resources scenarios using CMIP6 climate model outputs over UASB, Ethiopia // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. - 2025. - Vol. 39. - P. 2095-2115. - DOI: 10.1007/s00477-025-02959-5.
25. Zhang J., Liu Z., Li Y., Dou Y., Wang M., Zhou H., Xu B. Enhancing hydrological model performance through multi-source open-data utilization in the highly managed, data-scarce basin // *Journal of Hydrology*. - 2025. - Vol. 654. - Art. 132860. - DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132860.

26. Tiwari A.D., Pokhrel Y., Boulange J. et al. Similarities and divergent patterns in hydrologic fluxes and storages simulated by global water models // *Nature Water*. - 2025. - Vol. 3. - P. 550-560. - DOI: 10.1038/s44221-025-00435-6.
27. Stockholm Environment Institute. WEAP (Water Evaluation and Adaptation Planning) Model: A Comprehensive Approach to Water Resources Planning and Policy Analysis [Электронный ресурс]. - 2023. - URL: <https://www.sei.org/publications/weap-sustainable-water-analysis/> (дата обращения: 04.03.2026).
28. Lodge J.W., Dansie A.P., Dang N.M., Johnson F. Modelling the availability of water, energy, and food resources in transboundary river basins to achieve Sustainable Development Goals 2, 6, and 7 // *Science of the Total Environment*. - 2024. - Vol. 949. - Art. 175186. - DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175186.
29. Razavi S. et al. Convergent and Transdisciplinary Integration: On the Future of Integrated Modeling of Human-Water Systems // *Water Resources Research*. - 2025. - DOI: 10.1029/2024WR038088.
30. Ahmad S., Simonovic S.P. Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management // *Computers & Environmental Systems*. - 2021. - Vol. 100. - Art. 100031. - DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100031.
31. Mashaly A.F., Fernald A.G., Geli H.M.E., Bawazir A.S., Steiner R.L. Dynamic simulation modeling for sustainable water management with climate change in a semi-arid environment // *Journal of Hydrology*. - 2024. - Vol. 644. - Art. 132126. - DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132126.
32. Salas J.D., Delleur J.W., Yevjevich V., Lane W.L. *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. - Water Resources Publications, 1980.
33. Maia A.G., Camargo-Valero M.A., Trigg M.A., Khan A. et al. Uncertainty and Sensitivity Analysis in Reservoir Modeling: A Monte Carlo Simulation Approach // *Water Resources Management*. - 2024. - Vol. 38. - P. 2835-2850. - DOI: 10.1007/s11269-024-03794-z.
34. Qian T., Shi Z., Gu S., Xi W., Chen J., Chen J., Bai S., Wu L. A Water Shortage Risk Assessment Model Based on Kernel Density Estimation and Copulas // *Water*. - 2024. - Vol. 16, No. 11. - Art. 1465. - DOI: 10.3390/w16111465.
35. Wilby R.L., Darch G. Uncertainty in Hydrologic and Water Resources Modelling // *Uncertainty in Climate Change Research* / eds. L.O. Mearns, C.E. Forest, H.J. Fowler, R. Lempert, R.L. Wilby. - Cham: Springer, 2025. - DOI: 10.1007/978-3-031-85542-9_9.
36. Reinecke R., Stein L., Gnann S., Andersson J.C.M., Arheimer B., Bierkens M., Bonetti S., Güntner A., Kollet S., Mishra S., Moosdorf N., Nazari S., Pokhrel Y., Prudhomme C., Schewe J., Shen C., Wagener T. Uncertainties as a Guide for Global Water Model Advancement // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. - 2025. - Vol. 12, No. 3. - Art. e70025. - DOI: 10.1002/wat2.70025.
37. Wu W., Eamen L., Dandy G., Maier H.R., Razavi S., Kwakkel J., Huang J., Kuczera G. Beyond the traditional paradigm of water resources management: Scenario thinking to address deep uncertainty // *Journal of Hydrology*. - 2025. - Vol. 661. - Art. 133547. - DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133547.
38. Rezazadeh H., Bruckmann L., Fernandes Marques G., Tilmant A. Water Resources Planning Under Deep Uncertainty and Multiple Criteria - An Example in the Senegal River Basin // *Water Resources Research*. - 2025. - Vol. 61, No. 12. - Art. e2025WR041058. - DOI: 10.1029/2025WR041058.
39. Lawrence J., Haasnoot M., McKim L., Atapattu D., Campbell G., Stroombergen A. Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP): From theory to practice // *Decision Making under Deep Uncertainty*. - Springer, 2019. - P. 187-199. - DOI: 10.1007/978-3-030-05252-2_9.
40. Allison A.E.F., Lawrence J.H., Stephens S.A., Kwakkel J.H., Singh S.K., Blackett P., Stroombergen A. Planning for wastewater infrastructure adaptation under deep uncertainty // *Frontiers in Climate*. - 2024. - Vol. 6. - Art. 1355446. - DOI: 10.3389/fclim.2024.1355446.
41. Comprehensive framework for long-term reservoir management under deep uncertainty // *Environmental Modelling & Software*. - 2026. - Vol. 195. - Art. 106740. - DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106740.
42. International Commission for the Protection of the Danube River. Danube River Basin Management Plan - Update 2021 [Электронный ресурс]. - 2021. - URL: <https://www.icpdr.org> (дата обращения: 17.03.2026).
43. Wheeler K.G., Jeuland M., Hall J.W., Zagana E., Whittington D. Cooperative filling approaches for the Grand Ethiopian Renaissance Dam // *Nature Climate Change*. - 2016. - Vol. 6. - P. 867-871. - DOI: 10.1038/nclimate3069.
44. U.S. Bureau of Reclamation. Colorado River Simulation System (CRSS): Overview and Documentation [Электронный ресурс]. - 2012. - URL: <https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/crss/> (дата обращения: 17.03.2026).
45. Christensen N.S., Lettenmaier D.P. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin // *Hydrology and Earth System Sciences*. - 2007. - Vol. 11. - P. 1417-1434. - DOI: 10.5194/hess-11-1417-2007.
46. Starodubtsev V., Leman M. New trends in watering the Chu River Delta (Kazakhstan) under climate change // *Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference "New Horizons in Scientific Research: Challenges and Solutions"*. - Marseille, France: European Open Science Space, 2025. - P. 69-74. - DOI: DOI 10.70286/EOSS-03.11.2025.002.
47. Toonen W.H.J., Macklin M.G., Dawkes G., Durcan J.A., Leman M., Nikolayev Y., Yegorov A. A hydromorphic reevaluation of the forgotten river civilizations of Central Asia // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. - 2020. - Vol. 117, No. 52. - P. 32982-32988. - DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2009553117>.

СУ РЕСУРСТАРЫН СЦЕНАРИЙЛІК МОДЕЛЬДЕУ ТӘСІЛДЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Leman Max^{1,2*}, Ainura E. Aldiyarova¹ PhD, қауымдастырылған профессор, Ерболат Т. Кайпбаев¹ PhD, қауымдастырылған профессор, Айнура Н. Калмашова¹ PhD, қауымдастырылған профессор

¹ «Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы қ., Қазақстан. ainura.aldiarova@kaznaru.edu.kz (AEA), yerbolat.kaipbayev@kaznaru.edu.kz (ETK), Kalmashova.Ainur@kaznaru.edu.kz (АНК)

² «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы қ., Қазақстан; maxleman131@gmail.com (LM)

*Автор корреспонденциясы: Leman M., maxleman131@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

су ресурстарын басқару,
сценарийлік талдау,
өзен алабын модельдеу,
су қауіпсіздігі

Мақала жайында:

Алынды: 11.03.2026

Қайта қаралды: 25.08.2026

Қабылданды: 09.09.2026

Жарияланды: 01.10.2026

АБСТРАКТ

Қазіргі заманғы су ресурстарын басқару жағдайында су тұтынудың өсуі мен трансшекаралық шектеулерге байланысты өзен бассейндеріндегі су дағдарыстары мәселесі жүйелі сипат алууда. Су ресурстарына түсетін жүктеменің артуымен қатар тәуекелдерді болжау мен бағалаудың ғылыми негізделген әдістеріне деген қажеттілік те өсуде, бұл су менеджментінің заманауи модельдерін әзірлеу мен қолдануды ерекше өзекті міндетке айналдырады.

Жұмыстың мақсаты модельдік есептеулер нәтижелері негізінде су шаруашылығы жүйелерінің дамуының баламалы сценарийлерін қалыптастыруға және талдауға бағытталған тәсілдерді қоса алғанда, су ресурстарын сценарийлік модельдеудің қолданыстағы тәсілдеріне салыстырмалы талдау жүргізу болып табылады. Бұл модельдік есептеулер климаттық, әлеуметтік-экономикалық және басқарушылық факторлардың әртүрлі комбинацияларын көрсетеді.

Мақалада өзен бассейндеріндегі су дағдарыстарының даму сценарийлерін талдау үшін қолданылатын су ресурстарын модельдеудің заманауи әдістеріне шолу ұсынылған. Гидрологиялық, интеграцияланған, жүйелік-динамикалық және стохастикалық модельдер, сондай-ақ климаттық, антропогендік және басқарушылық факторларды ескере отырып сценарийлерді қалыптастыру тәсілдері қарастырылған. Су қауіпсіздігі тәуекелдерін және сумен қамтамасыз етудің тұрақтылығын бағалау тұрғысынан әртүрлі әдістердің артықшылықтары мен шектеулеріне салыстырмалы талдау жүргізілген.

Табиғи және әлеуметтік-экономикалық факторлардың белгісіздігін ескеруге мүмкіндік беретін сценарийлік модельдеудің әдіснамалық аспектілеріне ерекше назар аударылған. Сценарийлік талдаудың жоғары белгісіздік жағдайында басқарушылық шешімдерді негіздеудің негізгі құралы болып табылатыны көрсетілген. Алынған қорытындылар су дағдарыстарының дамуын талдауға және ірі өзен бассейндерінде суды тұрақты пайдалануды жоспарлауға бағытталған кейінгі зерттеулер үшін әдіснамалық негіз қалыптастырады.

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO SCENARIO MODELLING OF WATER RESOURCES

Leman Max^{1,2*}, Ainura E. Aldiyarova¹ PhD, Associate Professor, Yerbolat T. Kaipbayev¹ PhD, Associate Professor, Ainur N. Kalmashova¹ PhD, Associate Professor

¹ NJS «Kazakh National Agrarian Research University», Almaty, Kazakhstan. ainura.aldiarova@kaznaru.edu.kz (AEA), yerbolat.kaipbayev@kaznaru.edu.kz (YeTK), Kalmashova.Ainur@kaznaru.edu.kz (ANK)

² JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; maxleman131@gmail.com (LM)

*Corresponding author correspondence: Leman M., maxleman131@gmail.com

KEY WORDS

water resources management,
scenario analysis,
river basin modelling,
water security

ABSTRACT

Modern water resources management is increasingly challenged by rising water demand and transboundary constraints, with water crises in river basins becoming increasingly systemic in nature. Alongside growing pressures on water resources, there is an increasing need for scientifically robust methods of forecasting and risk assessment, making the development and application of contemporary water management models particularly relevant.

The aim of this study is to provide a comparative analysis of existing approaches to scenario modelling of water resources, including approaches focused on the development and analysis of alternative scenarios for the evolution of water management systems based on model simulations representing different combinations of climatic, socio-economic and management factors.

About article:

Received: 11.03.2026

Revised: 25.08.2026

Accepted: 09.09.2026

Published: 01.10.2026

The article reviews contemporary water resources modelling methods used to analyse scenarios of water crisis development in river basins. Hydrological, integrated, system dynamics and stochastic models are considered, together with approaches to scenario development that account for climatic, anthropogenic and management factors. The advantages and limitations of the different methods are comparatively analysed in terms of their suitability for assessing water security risks and the resilience of water supply systems.

Particular attention is given to the methodological aspects of scenario modelling that allow uncertainty in natural and socio-economic factors to be considered. Scenario analysis is shown to be a key tool for supporting management decisions under conditions of high uncertainty. The findings provide a methodological basis for further research aimed at analysing the development of water crises and planning sustainable water use in large river basins.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).