

Как цитировать: Жандияр Е.Г., Алдиярова А.Е., Беспаяева Р.С., Хусаинова Ж.С., Калашников П.А. (2026). Повышение эффективности водораспределения на основе цифровых технологий в условиях изменчивости водных ресурсов Алматинской области. *Евразийский агротехнический журнал*, 2(130), 267-278. DOI:[https://doi.org/10.51452/eaj.2026.2\(130\).2249](https://doi.org/10.51452/eaj.2026.2(130).2249)

УДК 626.82:004

Исследовательская статья

Повышение эффективности водораспределения на основе цифровых технологий в условиях изменчивости водных ресурсов Алматинской области

Жандияр Е.Г.¹ , Алдиярова А.Е.¹ 
Беспаяева Р.С.² , Хусаинова Ж.С.² , Калашников П.А.³ 

¹Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан

²Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина
Астана, Казахстан

³Казахский научно-исследовательский институт водного хозяйства, Тараз, Казахстан

Автор-корреспондент: Жандияр Е.Г.: Essen.zhandiyar@gmail.com

Соавторы: (2: АА) ainura.aldiarova@kaznatu.edu.kz (3: РБ) r.bespayeva@kazatu.edu.kz
(4: ЖХ) zh.khussainova@kazatu.edu.kz; (5: ПК): kalashnikov_81@inbox.ru

Получено: 10.06.2026 **Принято:** 30.06.2026 **Опубликовано:** 30.06.2026

Авторские права: Жандияр Е.Г. и др. Данная статья размещена в открытом доступе и распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Аннотация

Предпосылки и цель. Изменение климата, дефицит водных ресурсов, рост потребности сельского хозяйства в оросительной воде и износ гидротехнической инфраструктуры требуют совершенствования управления водораспределением. Для Алматинской области проблема особенно актуальна вследствие зависимости региона от трансграничного стока реки Или и межгодовой изменчивости водообеспеченности. Традиционные схемы распределения воды не обеспечивают необходимой гибкости в условиях гидрологической неопределенности. Цель исследования заключается в оценке эффективности водораспределения и разработке подхода к адаптивному управлению оросительными системами на основе цифровых технологий и экономико-математического моделирования.

Материалы и методы. Исследование выполнено на основе статистических данных о водопользовании и сельскохозяйственном производстве Алматинской области за 2010–2024 гг., а также материалов Министерства водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан. Применены методы описательной статистики, анализа гидрологических временных рядов и корреляционного анализа. Для оценки межгодовой изменчивости речного стока рассчитан коэффициент вариации, а взаимосвязь между потерями воды и эффективностью водораспределения оценена с использованием коэффициента корреляции Пирсона и коэффициента детерминации. Разработана экономико-математическая модель стохастической оптимизации водораспределения, учитывающая доступный объем водных ресурсов, потребность водопользователей, эффективность доставки и экономические потери от дефицита воды.

Результаты. Установлено снижение удельных затрат воды на регулярное орошение на 22,0%, сокращение транспортных потерь с 38 до 25% и повышение коэффициента эффективности водораспределения с 0,62 до 0,77. Выявлена сильная обратная связь между потерями воды и эффективностью водораспределения ($r = -0,89$; $R^2 = 0,79$). Коэффициент вариации речного стока составил 11,8%, подтверждая необходимость учета гидрологической неопределенности. В рамках разработанной модели на основе вариабельности речного стока сформированы маловодный, средний и многоводный сценарии водообеспеченности. Разработанная модель обеспечивает перерасчет объема водоподачи Q_i с учетом доступного ресурса $W(\omega)$, потребности D_i , эффективности доставки η_i и экономических потерь при изменении гидрологических условий.

Закключение. Полученные результаты обосновывают переход от фиксированного нормативного распределения воды к сценарному адаптивному управлению водораспределением. Интеграция экономико-математической модели с GIS, IoT, SCADA и цифровым двойником обеспечивает обновление входных параметров и перерасчет режимов водоподачи в зависимости от фактических и гидрологических условий.

Ключевые слова: водораспределение; цифровые технологий; оросительные системы; водные ресурсы; цифровой двойник; Алматинская область.

Введение

Надежность орошаемого земледелия во многом определяется тем, насколько водные ресурсы соответствуют реальным потребностям сельскохозяйственных водопользователей. Изменение климата, растущий дефицит воды и нестабильность речного стока усложняют этот баланс и увеличивают спрос на водоснабжение. Современные международные оценки свидетельствуют, что усиление гидрологической изменчивости и рост нагрузки на водные ресурсы ограничивают эффективность традиционных схем управления ирригационной инфраструктурой [1, 2]. Одним из направлений модернизации управления водными ресурсами является интеграция пространственных, сенсорных и диспетчерских данных. Современные исследования рассматривают цифровые двойники, искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления как инструменты оперативной обработки данных, моделирования состояния водохозяйственных объектов и поддержки управленческих решений [3, 4, 5, 6]. GIS обеспечивает пространственную привязку объектов оросительной сети, IoT – регистрацию текущих параметров системы, а SCADA – диспетчерский контроль технологических процессов. Интеграция указанных технологий с цифровым двойником формирует информационно-вычислительную среду для обновления параметров модели и адаптации режимов водоподачи [7, 8, 9].

Для Республики Казахстан проблема рационального использования водных ресурсов имеет стратегическое значение, поскольку значительная часть речного стока формируется за пределами страны, а южные регионы характеризуются высокой зависимостью сельскохозяйственного производства от искусственного орошения. В бассейне реки Или водообеспеченность определяется сочетанием трансграничного водопользования, климатической изменчивости и пространственно-временной неоднородности осадков [10, 11, 12]. Алматинская область относится к числу крупных сельскохозяйственных водопотребителей страны, где эффективность оросительных систем зависит от состояния гидротехнической инфраструктуры и устойчивости водообеспечения. Официальные документы Республики Казахстан указывают на необходимость сокращения потерь воды, модернизации водохозяйственной инфраструктуры и внедрения цифровых инструментов управления.

Несмотря на значительное число исследований, вопросы комплексной оценки эффективности водораспределения с учетом изменчивости речного стока и интеграции цифровых технологий в систему управления остаются недостаточно изученными.

Целью исследования является комплексная оценка современного состояния водораспределения в Алматинской области, выявление факторов, определяющих эффективность использования водных ресурсов, а также научное обоснование применения цифровых технологий для повышения устойчивости функционирования оросительных систем в условиях стохастической изменчивости водообеспеченности.

Научная новизна исследования заключается в разработке интегрированного подхода, объединяющего статистический анализ водопользования и экономико-математическую модель адаптивного водораспределения с использованием цифровых технологий.

Материалы и методы

Информационную основу исследования составили официальные статистические и аналитические материалы Министерства водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан за 2010–2024 гг. [13, 14]. Сформированный массив данных включал годовые наблюдения за объемами водозабора, использованием воды для сельскохозяйственных нужд, потерями воды при транспортировке, площадью регулярного орошения и показателями водораспределения в

Алматинской области. Для оценки гидрологической изменчивости использованы многолетние данные о речном стоке бассейна реки Или.

Исследование проведено с применением методов описательной статистики, анализа гидрологических временных рядов, корреляционного анализа и экономико-математической оптимизации. Обработка временных рядов выполнялась в соответствии с общими принципами статистического моделирования гидрологических последовательностей, изложенными *J.D. Salas, J.W. Delleur, V. Yevjevich* и *W.L. Lane* [15]. Для каждого показателя определялись среднее значение, минимум, максимум, размах вариации, среднеквадратическое отклонение и темп изменения за исследуемый период.

Степень межгодовой изменчивости водных ресурсов оценивалась с использованием коэффициента вариации (1):

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\bar{X}} \right) \times 100 \quad (1)$$

где CV – коэффициент вариации,

%; σ – среднеквадратическое отклонение;

$\bar{X}$ – среднее значение анализируемого показателя.

Для количественной оценки линейной взаимосвязи между потерями воды и эффективностью водораспределения использован коэффициент корреляции Пирсона. Применение данного показателя основано на классической методологии корреляционного анализа *K. Pearson* [16] (2):

$$r = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2]}} \quad (2)$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона;

x_i и y_i – наблюдаемые значения анализируемых переменных;

$\bar{x}$ и $\bar{y}$ – соответствующие средние значения.

Коэффициент детерминации R^2 использовался для характеристики доли вариации результативного показателя, статистически связанной с изменением факторного признака. Расчеты выполнены в IBM SPSS Statistics 27 и Microsoft Excel 365. До проведения анализа данные проверялись на полноту и согласованность. Адекватность регрессионных зависимостей оценивалась по R^2 , скорректированному R^2 , F-критерию и уровню статистической значимости $p < 0,05$. Диагностика модели проводилась на основе анализа остатков с проверкой линейности, гомоскедастичности и нормальности их распределения в соответствии с общепринятыми процедурами регрессионной диагностики [17]. NIST прямо рекомендует использовать диагностику остатков для оценки адекватности регрессионной модели и проверки распределения ошибок.

Эффективность водораспределения определялась как отношение объема эффективно использованной воды к общему объему поданной воды (3):

$$E = \frac{W_u}{W_s} \quad (3)$$

где E – коэффициент эффективности водораспределения;

W_u – объем эффективно использованной воды;

W_s – общий объем поданной воды.

Экономико-математическая модель разработана как задача стохастической оптимизации распределения ограниченного водного ресурса. Методологическая постановка неопределенности основана на принципах стохастического программирования *J.R. Birge* и *F. Louveaux* [18], согласно которым неопределенный параметр включается в оптимизационную задачу посредством сценариев возможных состояний системы. Это соответствует фундаментальному подходу к включению неопределенности в математические задачи принятия решений.

В качестве управляющей переменной принят объем водоподачи Q_i отдельному водопользователю. Ограничениями модели являются доступный объем водных ресурсов

W , потребность в воде D_i и коэффициент эффективности доставки η_i . Целевая функция предусматривает минимизацию затрат на водоподачу, экономических потерь от дефицита воды и потерь при транспортировке (4):

$$\min Z = \sum_{i=1}^n [c_i Q_i + p_i (D_i - Q_i \eta_i)^+ + k_i Q_i (1 - \eta_i)] \quad (4)$$

где Q_i – объем водоподачи;
 D_i – потребность в воде;
 c_i – затраты на водоподачу;
 p_i – экономические потери от дефицита воды;
 k_i – стоимость транспортных потерь;
 η_i – коэффициент эффективности доставки воды.

Доступный объем водных ресурсов задавался как стохастический параметр $W(\omega)$. На основе рассчитанного коэффициента вариации речного стока 11,8% сформированы три сценария водообеспеченности: маловодный, средний и многоводный. Потребность водопользователя определялась как $D_i = A_i q_i$, где A_i – площадь орошения, q_i – удельная потребность в воде. Коэффициент эффективности доставки рассчитывался как $\eta_i = 1 - L_i$, где L_i – доля транспортных потерь.

Цифровые технологии в методической схеме не рассматривались как самостоятельный статистический метод. GIS, IoT и SCADA определены как источники пространственных, сенсорных и оперативных данных для обновления входных параметров оптимизационной модели. Принцип интеграции физического объекта и его вычислительного представления основан на концепции цифрового двойника *F. Tao, M. Zhang и A.Y.C. Nee* [19]. Их работа (2019 г.) специально посвящена построению и применению цифрового двойника как связующего механизма между физической и вычислительной системами.

Таким образом, воспроизводимость исследования обеспечивается использованием официального массива наблюдений за 2010–2024 гг., формализованных статистических показателей, установленного алгоритма корреляционно-регрессионной диагностики и явно заданных переменных, ограничений и сценариев стохастической оптимизационной модели.

Результаты

Проведенный анализ показал увеличение нагрузки на водохозяйственную систему Алматинской области. За 2010–2024 гг. общий объем водозабора увеличился с 5200 до 6280 млн м³, или на 20,8%. Среднегодовой темп прироста составил 1,59%, а коэффициент вариации – 6,4%, что свидетельствует об относительно устойчивой динамике показателя при сохранении тенденции роста. Основные статистические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические показатели динамики общего водозабора по водохозяйственной системе Алматинской области за 2010–2024 гг.*

Показатели	Значение
Средний объем общего водозабора, млн м ³	5816
Минимальное значение, млн м ³	5200
Максимальное значение, млн м ³	6280
Размах вариации, млн м ³	1080
Общий прирост, %	20,8
CAGR, %	1,59
Коэффициент вариации, %	6,4
R ² линейного тренда	0,98

Примечание: * – данные составлены на основе источника [14].

Анализ сельскохозяйственного землепользования выявил существенные структурные изменения. Площадь рассматриваемых сельскохозяйственных угодий увеличилась с 418,1 до 1139,8 тыс. га. При этом, площадь регулярного орошения сократилась на 20,2%, тогда как площадь обводняемых пастбищ возросла до 820,0 тыс. га и составила 71,9% рассматриваемой площади сельскохозяйственных угодий. Изменение основных показателей представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Изменение основных показателей сельскохозяйственного водопользования*

Показатели	2010 г.	2024 г.	Изменение
Сельскохозяйственные угодья, тыс. га	418,1	1139,8	+721,7
Регулярное орошение, тыс. га	401,0	320,0	–81,0
Лиманное орошение, тыс. га	13,7	18,0	+4,3
Обводнение пастбищ, тыс. га	20,0	820,0	+800,0

Примечание: * - данные составлены на основе источника [14].

Оценка удельного водопотребления показала устойчивое снижение затрат воды на единицу площади регулярного орошения. За 2010–2024 гг. показатель уменьшился с 9100 до 7100 м³/га, или на 22,0%. Коэффициент вариации составил 8,6%, а коэффициент детерминации линейного тренда – $R^2 = 0,93$. Динамика удельных затрат воды представлена на рисунке 1.

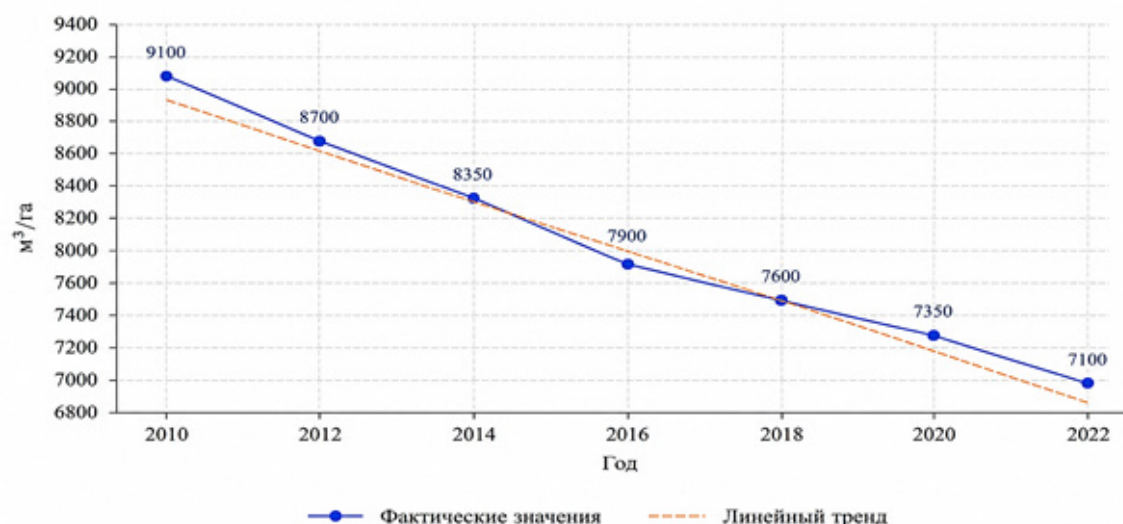


Рисунок 1 – Динамика затрат воды на 1 га площади регулярного орошения в Алматинской области

При площади регулярного орошения 320 тыс. га расчетное сокращение водопотребления относительно уровня 2010 г. составляет около 640 млн м³ в год, что подтверждает значимость снижения удельных затрат воды для повышения эффективности использования водных ресурсов.

За 2010–2024 гг. объем водозабора для сельскохозяйственных нужд увеличился с 3750 до 4360 млн м³, или на 16,3%. Одновременно потери воды при транспортировке сократились с 38 до 25%, а коэффициент эффективности водораспределения повысился с 0,62 до 0,77. Статистические показатели эффективности представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Статистические показатели эффективности водораспределения за 2010–2024 гг.*

Показатели	Значение
Прирост водозабора для сельскохозяйственных нужд, %	16,3
Снижение потерь воды, п.п.	13
Снижение потерь воды, %	34,2
Рост коэффициента эффективности, %	24,2

Продолжение таблицы 3

CAGR эффективности, %	1,55
r «потери – эффективность»	–0,89
R^2 «потери – эффективность»	0,79
r «сельскохозяйственный водозабор – эффективность»	0,84
R^2 «сельскохозяйственный водозабор – эффективность»	0,71

Примечание: * - данные составлены на основе источника [14].

Корреляционный анализ установил сильную обратную связь между потерями воды и эффективностью водораспределения ($r = -0,89$; $R^2 = 0,79$). Между объемом водозабора для сельскохозяйственных нужд и эффективностью выявлена положительная связь ($r = 0,84$; $R^2 = 0,71$). Динамика исследуемых показателей представлена на рисунке 2.

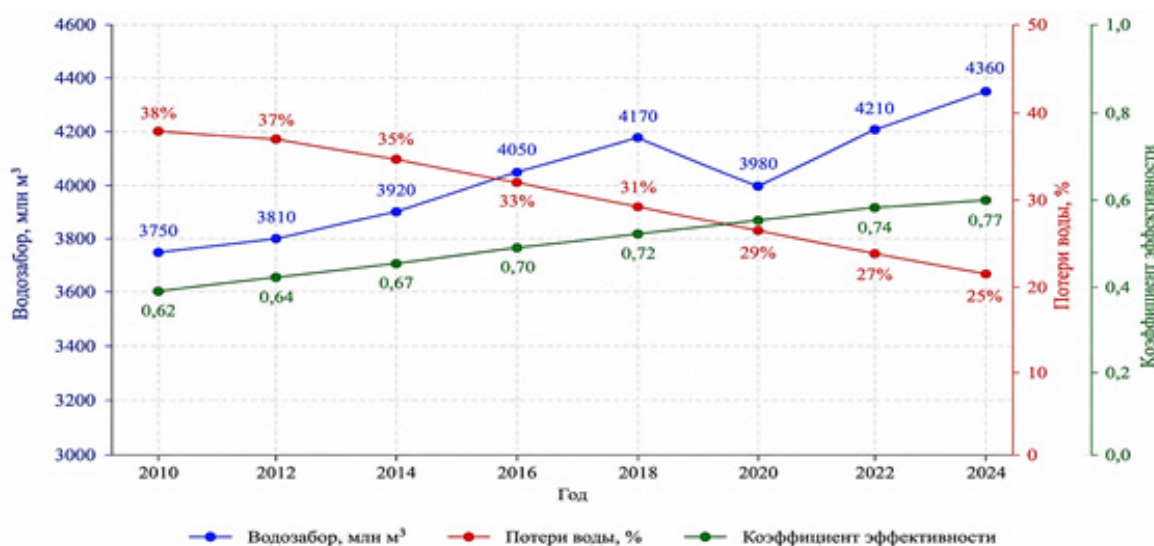


Рисунок 2 – Динамика основных показателей водораспределения в Алматинской области за 2010–2024 гг.

Сопоставление динамических рядов показывает, что последовательное снижение потерь воды сопровождалось повышением коэффициента эффективности водораспределения. При этом отдельное сокращение сельскохозяйственного водозабора в 2020 г. не изменило общей тенденции роста показателя за исследуемый период.

Для оценки гидрологической неопределенности проведен статистический анализ межгодовой изменчивости речного стока бассейна реки Или. Среднемноголетний объем стока составил 12 875 млн м³, а размах между минимальным и максимальным значениями – 4500 млн м³. Статистические характеристики речного стока представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Статистические характеристики речного стока бассейна реки Или*

Показатели	Значение
Среднемноголетний сток, млн м³	12 875
Минимальный сток, млн м³	10 900
Максимальный сток, млн м³	15 400
Размах вариации, млн м³	4500
Среднеквадратическое отклонение, млн м³	1552
Коэффициент вариации, %	11,8
R^2 линейного тренда	0,012

Примечание: * - данные составлены и рассчитаны авторами на основе источников [10–12, 14].

Коэффициент вариации речного стока составил 11,8%, что подтверждает необходимость учета гидрологической неопределенности при моделировании водораспределения.

Ключевым параметром модели является коэффициент эффективности доставки воды $\eta_i = 1 - L_i$. Выявленная зависимость между потерями воды и эффективностью водораспределения ($r = -0,89$; $R^2 = 0,79$) подтверждает обоснованность включения транспортных потерь в целевую функцию. При изменении доступного объема водных ресурсов модель обеспечивает перерасчет объемов водоподачи Q_i в соответствии с фактической потребностью D_i и сценарием водообеспеченности.

Таким образом, разработанная модель формализует переход от фиксированного нормативного распределения воды к адаптивному управлению, при котором режимы водоподачи корректируются в зависимости от гидрологической ситуации и фактических параметров оросительной системы.

Обсуждение

Сравнение исследуемых показателей указывает, что повышение эффективности водораспределения в значительной степени связано со снижением потерь воды при транспортировке. Выявленная обратная связь между уровнем потерь и коэффициентом эффективности ($r = -0,89$; $R^2 = 0,79$) позволяет рассматривать сокращение транспортных потерь как один из основных резервов повышения результативности оросительных систем. Полученная закономерность согласуется с выводами *Grafton et al.* [20], согласно которым рост технической эффективности орошения сам по себе не гарантирует устойчивого водосбережения и должен сопровождаться совершенствованием механизмов распределения и управления водными ресурсами. Аналогичный управленческий подход отражен в исследованиях OECD [21], где мониторинг водных рисков и учет изменчивости водообеспеченности рассматриваются как необходимые элементы адаптивного управления водными ресурсами в сельском хозяйстве.

Изменчивость стока Или отражает нестабильность водообеспеченности региона. В модели этот фактор учтен посредством сценарного изменения доступного объема воды.

Модель преобразует выявленные статистические зависимости в систему вычислительных ограничений и критериев выбора. Она отличается от стандартной модели тем, что объем водоснабжения не фиксирован на определенном значении: он пересчитывается на основе изменений доступных ресурсов и параметров доставки. Таким образом, сценарии с переменным объемом воды служат не только аналитической классификацией, но и условием для входа в задачу оптимизации.

Включение в целевую функцию экономических потерь от дефицита воды и транспортных потерь позволяет оценивать эффективность водораспределения, как результат оптимизации ограниченного ресурса между сельскохозяйственными водопользователями. Установленная зависимость эффективности от уровня потерь подтверждает обоснованность выбранной структуры модели.

Цифровые средства в предложенном подходе выполняют функцию информационного обеспечения расчетной модели. Данные GIS характеризуют пространственную структуру сети, IoT – текущее состояние контролируемых параметров, SCADA – режим эксплуатации. Их объединение в цифровом двойнике создает возможность обновлять входные значения модели и повторять оптимизационный расчет при изменении условий водоподачи.

Таким образом, повышение эффективности водораспределения определяется прежде всего сокращением потерь воды, тогда как устойчивость системы ограничивается изменчивостью стока реки Или. Разработанная экономико-математическая модель объединяет эти факторы в едином механизме принятия решений и обосновывает переход от нормативного планирования к сценарному адаптивному управлению водораспределением.

Заключение

Исследование позволило установить, что динамика водопользования Алматинской области сопровождается изменением структуры сельскохозяйственного землепользования и ростом требований к надежности оросительных систем. За рассматриваемый период удельное водопотребление при регулярном орошении уменьшилось на 22,0%, транспортные потери – с 38 до 25%, а коэффициент эффективности достиг 0,77.

Корреляционные результаты указывают на тесную связь результативности водораспределения с уровнем потерь. Одновременно вариабельность стока Или ограничивает применение расчетов, основанных на неизменном объеме доступной воды. Для совместного учета этих факторов предложена оптимизационная модель, в которой ресурсное ограничение изменяется в зависимости от сценария водности, а объем подачи определяется потребностью, параметрами доставки и экономическими последствиями дефицита.

Практическое развитие модели связано с ее апробацией на отдельных оросительных системах Алматинской области и подключением фактических GIS-, IoT- и SCADA-данных. Последующая проверка должна включать сопоставление расчетной и фактической водоподачи, оценку экономического эффекта и определение условий масштабирования предложенного решения.

Вклад авторов

ЕЖ и ТФ: разработали концепцию и дизайн исследования, сформировали методологию исследования, осуществили сбор и анализ данных, подготовили первоначальный текст рукописи. АА: участвовала в интерпретации полученных результатов, проведении обзора литературы и подготовке рукописи. РБ и ЖХ: провели статистический анализ, интерпретацию результатов, выполнили критическое редактирование рукописи и осуществляли научное руководство исследованием. Все авторы ознакомились с окончательной версией рукописи и одобрили окончательную версию к публикации.

Информация о финансировании

Исследование финансируется Министерством сельского хозяйства Республики Казахстан на 2024–2026 годы в рамках программы BR22886885 «Разработка организационно-экономических мер повышения эффективности использования ресурсного потенциала аграрного производства».

Список литературы

- 1 UNESCO World Water Assessment Programme. (2024). *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris: UNESCO. <https://www.unesco.org/en/articles/united-nations-world-water-development-report-2024-water-prosperity-and-peace>.
- 2 FAO. (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021: Systems at Breaking Point*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. DOI: 10.4060/cb9910en.
- 3 Ahsen, R., Di Bitonto, P., Novielli, P., Magarelli, M., Romano, D., Diacono, D., Monaco, A., Amoroso, N., Bellotti, R., Tangaro, S. (2025). Harnessing Digital Twins for Sustainable Agricultural Water Management: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 15(8), 4228. DOI: 10.3390/app15084228.
- 4 Morain, A., Hawkins, L., Poole, K., Jones, M., Washington, B., Anandhi, A. (2025). Artificial Intelligence Applications in Water Resources Management: Bibliometric analysis, challenges, and knowledge gaps. *Journal of Water and Climate Change*, 16(12), 3610–3647. DOI: 10.2166/wcc.2025.740.
- 5 Ghorbani Bam, P., Rezaei, N., Roubanis, A., Austin, D., Austin, E., Tarroja, B., Takacs, I., Villez, K., Rosso, D. (2025). Digital twin applications in the water sector: A review. *Water*, 17(20), 2957. DOI: 10.3390/w17202957.
- 6 Bautista, C. J. C., Gallegos, R. K. B., & Lampayan, R. M. (2026). Machine learning and digital twins in smart irrigation: optimising water use through agricultural data analytics. *Digital Twin*, 3(1). DOI: 10.1080/27525783.2025.2562418.
- 7 García, L., Parra, L., Jimenez, J.M., Lloret, J., Lorenz, P. (2020). IoT-based smart irrigation systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042. DOI: 10.3390/s20041042.
- 8 Zhang, R., Zhu, H., Chang, Q., Mao, Q. (2025). A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture. *Agriculture*, 15(9), 903. DOI: 10.3390/agriculture15090903.
- 9 Zhao, T., Song, C., Yu, J., Xing, L., Xu, F., Li, W., Wang, Z. (2025). Leveraging Immersive Digital Twins and AI-Driven Decision Support Systems for Sustainable Water Reserves Management: A Conceptual Framework. *Sustainability*, 17(8), 3754. DOI: 10.3390/su17083754.

- 10 Thevs, N., Nurtazin, S., Beckmann, V., Salmyrzauli, R., & Khalil, A. (2017). Water Consumption of Agriculture and Natural Ecosystems along the Ili River in China and Kazakhstan. *Water*, 9(3), 207. DOI: 10.3390/w9030207.
- 11 Guo, L., Xia, Z. (2013). Temperature and precipitation long-term trends and variations in the Ili-Balkhash Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2), 219–229. DOI: 10.1007/s00704-013-0883-3.
- 12 Duisebek, B., Senay, G.B., Ojima, D.S., Zhang, T., Sagin, J., Wang, X. (2025). Evaluating the Performance of Multiple Precipitation Datasets over the Transboundary Ili River Basin Between China and Kazakhstan. *Sustainability*, 17(16), 7418. DOI: 10.3390/su17167418.
- 13 Министерство водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан. (2024). *Концепция развития системы управления водными ресурсами Республики Казахстан на 2024–2030 годы*. Астана. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000066>
- 14 Министерство водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан. (2025). *Все материалы. Публикации*. Астана. <https://www.gov.kz/memleket/entities/water/press/article/1?lang=ru>.
- 15 Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., Lane, W.L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 484 p.
- 16 Pearson, K. (1895). Note on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58(347–352), 240–242. DOI: 10.1098/rspl.1895.0041.
- 17 NIST/SEMATECH. (2012). *e-Handbook of Statistical Methods: Regression Diagnostics and Residual Analysis*. National Institute of Standards and Technology. https://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/refman1/auxillar/regrdiag.htm?utm_source=chatgpt.com
- 18 Birge, J.R., Louveaux, F. (2011). *Introduction to Stochastic Programming*. 2nd ed. New York: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4614-0237-4.
- 19 Tao, F., Zhang, M., Nee, A.Y.C. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Elsevier. DOI: 10.1016/C2018-0-02206-9.
- 20 Grafton, R.Q., Williams, J., Perry, C.J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S.A., Wang, Y., Garrick, D., Allen, R.G. (2018). The Paradox of Irrigation Efficiency. *Science*, 361(6404), 748–750. DOI: 10.1126/science.aat9314.
- 21 OECD. (2026). *Anticipating and Monitoring Water Risks for Agriculture*. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 226. Paris: OECD Publishing. DOI: 10.1787/24939e6a-en

References

- 1 UNESCO World Water Assessment Programme. (2024). *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris: UNESCO. <https://www.unesco.org/en/articles/united-nations-world-water-development-report-2024-water-prosperity-and-peace>.
- 2 FAO. (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021: Systems at Breaking Point*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. DOI: 10.4060/cb9910en.
- 3 Ahsen, R., Di Bitonto, P., Novielli, P., Magarelli, M., Romano, D., Diacono, D., Monaco, A., Amoroso, N., Bellotti, R., Tangaro, S. (2025). Harnessing Digital Twins for Sustainable Agricultural Water Management: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 15(8), 4228. DOI: 10.3390/app15084228.
- 4 Morain, A., Hawkins, L., Poole, K., Jones, M., Washington, B., Anandhi, A. (2025). Artificial Intelligence Applications in Water Resources Management: Bibliometric analysis, challenges, and knowledge gaps. *Journal of Water and Climate Change*, 16(12), 3610–3647. DOI: 10.2166/wcc.2025.740.
- 5 Ghorbani Bam, P., Rezaei, N., Roubanis, A., Austin, D., Austin, E., Tarroja, B., Takacs, I., Villegz, K., Rosso, D. (2025). Digital twin applications in the water sector: A review. *Water*, 17(20), 2957. DOI: 10.3390/w17202957.
- 6 Bautista, C. J. C., Gallegos, R. K. B., & Lampayan, R. M. (2026). Machine learning and digital twins in smart irrigation: optimising water use through agricultural data analytics. *Digital Twin*, 3(1). DOI: 10.1080/27525783.2025.2562418.
- 7 García, L., Parra, L., Jimenez, J.M., Lloret, J., Lorenz, P. (2020). IoT-based smart irrigation systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042. DOI: 10.3390/s20041042.

- 8 Zhang, R., Zhu, H., Chang, Q., Mao, Q. (2025). A Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture. *Agriculture*, 15(9), 903. DOI: 10.3390/agriculture15090903.
- 9 Zhao, T., Song, C., Yu, J., Xing, L., Xu, F., Li, W., Wang, Z. (2025). Leveraging Immersive Digital Twins and AI-Driven Decision Support Systems for Sustainable Water Reserves Management: A Conceptual Framework. *Sustainability*, 17(8), 3754. DOI: 10.3390/su17083754.
- 10 Thevs, N., Nurtazin, S., Beckmann, V., Salmyrzauli, R., & Khalil, A. (2017). Water Consumption of Agriculture and Natural Ecosystems along the Ili River in China and Kazakhstan. *Water*, 9(3), 207. DOI: 10.3390/w9030207.
- 11 Guo, L., Xia, Z. (2013). Temperature and precipitation long-term trends and variations in the Ili-Balkhash Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2), 219–229. DOI: 10.1007/s00704-013-0883-3.
- 12 Duisebek, B., Senay, G.B., Ojima, D.S., Zhang, T., Sagin, J., Wang, X. (2025). Evaluating the Performance of Multiple Precipitation Datasets over the Transboundary Ili River Basin Between China and Kazakhstan. *Sustainability*, 17(16), 7418. DOI: 10.3390/su17167418.
- 13 Ministerstvo vodnyh resursov i irrigacii Respubliki Kazakhstan. (2024). *Koncepciya razvitiya sistemy upravleniya vodnymi resursami Respubliki Kazakhstan na 2024–2030 gody*. Astana. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000066>
- 14 Ministerstvo vodnyh resursov i irrigacii Respubliki Kazakhstan. (2025). *Vse materialy. Publikacii*. Astana. <https://www.gov.kz/memleket/entities/water/press/article/1?lang=ru>.
- 15 Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., Lane, W.L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 484 p.
- 16 Pearson, K. (1895). Note on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58(347–352), 240–242. DOI: 10.1098/rspl.1895.0041.
- 17 NIST/SEMATECH. (2012). *e-Handbook of Statistical Methods: Regression Diagnostics and Residual Analysis*. National Institute of Standards and Technology. https://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/refman1/auxillar/regrdiag.htm?utm_source=chatgpt.com.
- 18 Birge, J.R., Louveaux, F. (2011). *Introduction to Stochastic Programming*. 2nd ed. New York: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4614-0237-4.
- 19 Tao, F., Zhang, M., Nee, A.Y.C. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Elsevier. DOI: 10.1016/C2018-0-02206-9.
- 20 Grafton, R.Q., Williams, J., Perry, C.J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S.A., Wang, Y., Garrick, D., Allen, R.G. (2018). The Paradox of Irrigation Efficiency. *Science*, 361(6404), 748–750. DOI: 10.1126/science.aat9314.
- 21 OECD. (2026). *Anticipating and Monitoring Water Risks for Agriculture*. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, No. 226. Paris: OECD Publishing. DOI: 10.1787/24939e6a-en.

Алматы облысының су ресурстарының құбылмалылығы жағдайында цифрлық технологиялар негізінде су бөлудің тиімділігін арттыру

Жандияр Е.Г., Алдиярова А.Е., Беспаетова Р.С., Хусаинова Ж.С., Калашников П.А.

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Климаттың өзгеруі, су ресурстарының тапшылығы, ауыл шаруашылығының суармалы суға деген қажеттілігінің артуы және гидротехникалық инфрақұрылымның тозуы су бөлуді басқаруды жетілдіруді талап етеді. Алматы облысы үшін бұл мәселе өңірдің Іле өзенінің трансшекаралық ағынына тәуелділігіне және сумен қамтамасыз етудің жылдар аралық өзгергіштігіне байланысты ерекше өзекті. Су бөлудің дәстүрлі схемалары гидрологиялық белгісіздік жағдайында қажетті икемділікті қамтамасыз етпейді. Зерттеудің мақсаты – су бөлу тиімділігін бағалау және цифрлық технологиялар мен экономикалық-математикалық модельдеу негізінде суару жүйелерін бейімделмелі басқару тәсілін әзірлеу.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу Алматы облысының 2010–2024 жылдардағы су пайдалану және ауыл шаруашылығы өндірісі жөніндегі статистикалық деректері, сондай-ақ Қазақстан

Республикасы Су ресурстары және ирригация министрлігінің материалдары негізінде жүргізілді. Сипаттамалық статистика, гидрологиялық уақыт қатарларын талдау және корреляциялық талдау әдістері қолданылды. Өзен ағынының жылдар аралық өзгергіштігін бағалау үшін вариация коэффициенті есептелді, ал су шығындары мен су бөлу тиімділігі арасындағы өзара байланыс Пирсон корреляция коэффициенті және детерминация коэффициенті арқылы бағаланды. Қолжетімді су ресурстарының көлемін, су пайдаланушылардың қажеттілігін, суды жеткізу тиімділігін және су тапшылығынан туындайтын экономикалық шығындарды ескеретін су бөлуді стохастикалық оңтайландырудың экономикалық-математикалық моделі әзірленді.

Нәтижелер. Тұрақты суаруға жұмсалатын судың үлестік шығыны 22,0%-ға төмендегені, тасымалдау кезіндегі су шығындарының 38%-дан 25%-ға дейін қысқарғаны және су бөлу тиімділігі коэффициентінің 0,62-ден 0,77-ге дейін артқаны анықталды. Су шығындары мен су бөлу тиімділігі арасында күшті кері байланыс анықталды ($r = -0,89$; $R^2 = 0,79$). Өзен ағынының вариация коэффициенті 11,8%-ды құрады, бұл гидрологиялық белгісіздікті ескеру қажеттігін растайды. Әзірленген модель шеңберінде өзен ағынының өзгергіштігі негізінде су аз, орташа сулы және суы мол кезеңдерге арналған сумен қамтамасыз ету сценарийлері қалыптастырылды. Әзірленген модель гидрологиялық жағдайлар өзгерген кезде қолжетімді $W(\omega)$ ресурсын, D_i қажеттілігін, η_i жеткізу тиімділігін және экономикалық шығындарды ескере отырып, Q_i су беру көлемін қайта есептеуді қамтамасыз етеді.

Қорытынды. Алынған нәтижелер суды белгіленген нормативтер бойынша бөлуден сценарийлік бейімделмелі су бөлуді басқаруға көшудің негізділігін көрсетеді. Экономикалық-математикалық модельді GIS, IoT, SCADA және цифрлық егізбен интеграциялау кіріс параметрлерін жаңартуға және нақты әрі гидрологиялық жағдайларға байланысты су беру режимдерін қайта есептеуге мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: суды бөлу; цифрлық технологиялар; суару жүйелері; су ресурстары; цифрлық егіз; Алматы облысы.

Improving the efficiency of water distribution using digital technologies in the context of variable water resources in the Almaty region

Zhandiyar E.G., Aldiyarova A.E., Bespayeva R.S., Khussainova Zh.S., Kalashnikov P.A.

Abstract

Background and Aim. Climate change, water scarcity, increasing agricultural demand for irrigation water, and the deterioration of hydraulic infrastructure necessitate improvements in water distribution management. This issue is particularly relevant to the Almaty region due to its dependence on the transboundary flow of the Ili River and interannual variability in water availability. Traditional water distribution schemes lack the flexibility required under conditions of hydrological uncertainty. This study aimed to assess water distribution efficiency and develop an approach to adaptive irrigation system management based on digital technologies and economic-mathematical modelling.

Materials and Methods. The study was based on statistical data on water use and agricultural production in the Almaty region for 2010–2024, as well as materials from the Ministry of Water Resources and Irrigation of the Republic of Kazakhstan. Descriptive statistics, hydrological time-series analysis, and correlation analysis were applied. The coefficient of variation was used to calculate the interannual variability of river runoff, while the relationship between water losses and water distribution efficiency was evaluated through the incorporation of Pearson's correlation coefficient and the coefficient of determination. An economic-mathematical model for the stochastic optimization of water distribution was developed, accounting for available water resources, water users' demands, delivery efficiency, and economic losses caused by water deficits.

Results. Specific water use for regular irrigation decreased by 22.0%, water conveyance losses declined from 38% to 25%, and the coefficient of water distribution efficiency increased from 0.62 to 0.77. A strong inverse relationship was identified between water losses and water distribution efficiency ($r = -0.89$; $R^2 = 0.79$). The coefficient of variation of river runoff was 11.8%, confirming the need to

account for hydrological uncertainty. Within the developed model, low-water, average-water, and high-water availability scenarios were formulated based on river runoff variability. The model enables the recalculation of water supply volume Q_i considering the available resource $W(\omega)$, water demand D_i , delivery efficiency η_i , and economic losses under changing hydrological conditions.

Conclusion. The findings substantiate the transition from fixed normative water allocation to scenario-based adaptive water distribution management. Integrating the economic-mathematical model with GIS, IoT, SCADA, and a digital twin enables the updating of input parameters and recalculation of water supply regimes according to actual and hydrological conditions.

Keywords: water distribution; digital technologies; irrigation systems; water resources; digital twin; Almaty region.