

УДК 628.1:631.6:681.5:631.171(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-4-20-27

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

А.Ж. Батыкова, К.К. Бейшекеев

Аннотация. Рассматривается подход к автоматизации оросительных систем с использованием интеллектуальных систем управления, основанных на мониторинге в реальном времени, прогнозировании водопотребления и адаптивном регулировании подачи воды. В условиях ограниченности водных ресурсов и климатических изменений модернизация систем управления ирригацией приобретает особое значение в обеспечении продовольственной безопасности, особенно в засушливых регионах. Проведенная оценка эффективности систем на примере пилотных участков показала сокращение потерь воды, повышение урожайности и экономию затрат на водоподачу. Эффективность использования воды в таких системах определяет не только продуктивность сельского хозяйства, но и устойчивость экосистем, зависящих от водных ресурсов. Проведен анализ современных методов автоматизированного водораспределения в оросительных системах республики. Результаты исследования подтверждают, что цифровизация ирригационных систем играет ключевую роль в повышении продуктивности сельского хозяйства, обеспечивая устойчивое использование водных ресурсов.

Ключевые слова: автоматизация; оросительные системы; эффективность водопользования; интеллектуальные системы управления; устойчивое сельское хозяйство; автоматизация ирригации; эффективность водопользования.

СУУНУ НАТЫЙЖАЛУУ ПАЙДАЛАНУУНУ ЖОГОРУЛАТУУ ҮЧҮН СУГАТ ТУТУМДАРЫН БАШКАРУУНУ АВТОМАТТАШТЫРУУ

А.Ж. Батыкова, К.К. Бейшекеев

Аннотация. Бул макалада сугат тутумдарын реалдуу убакыт режиминде мониторинг жүргүзүүгө, сугатка болгон муктаждыкты божомолдоого жана сууну адаптацияланган тартипте берүү менен башкарууну автоматташтыруу ыкмалары каралат. Суунун чектелген ресурстары жана климаттын өзгөрүшү шартында, сугат тутумдарын башкарууну модернизациялоо, айрыкча, кургакчыл аймактарда, азык-түлүк коопсуздугун камсыздоонун маанилүү фактору болуп саналат. Пилоттук аймактардын негизинде жүргүзүлгөн натыйжалуулук баалоосу суунун жоготууларын кыскартуу, түшүмдүүлүктү жогорулатуу жана сууну жеткирүүгө кеткен чыгымдарды азайтуу мүмкүндүгүн көрсөттү. Мындай системаларда сууну натыйжалуу пайдалануу айыл чарбанын продуктивдүүлүгүн гана аныктабастан, сугат суусуна көз каранды болгон экосистемалардын туруктуулугун да камсыздайт. Бул изилдөөдө республикадагы сугат тутумдарында сууну автоматтык түрдө бөлүштүрүүнүн заманбап ыкмалары талданган. Изилдөөнүн жыйынтыктары көрсөткөндөй, сугат системаларын санариптештирүү айыл чарбанын өндүрүмдүүлүгүн жогорулатууда жана сууну туруктуу пайдаланууда негизги роль ойнойт.

Түйүндүү сөздөр: автоматташтыруу; сугат тутумдары; сууну натыйжалуу пайдалануу; интеллектуалдык башкаруу системалары; туруктуу айыл чарба; сугат системаларын автоматташтыруу; сууну сарамжалдуу пайдалануу.

AUTOMATION OF IRRIGATION SYSTEM MANAGEMENT TO IMPROVE WATER USE EFFICIENCY

A.Zh. Batykova, K.K. Beishekeyev

Abstract. The article presents an approach to the automation of irrigation systems using intelligent management systems based on real-time monitoring, water demand forecasting, and adaptive water supply regulation. In the context

of limited water resources and climate change, the modernization of irrigation management systems is of particular importance for ensuring food security, especially in arid regions. The assessment of the efficiency of these systems, based on pilot projects, demonstrated reduced water losses, increased crop yields, and reduced water supply costs. The efficiency of water use in such systems determines not only the productivity of the agricultural sector but also the sustainability of ecosystems dependent on water resources. This study analyzes modern methods of automated water distribution in the irrigation systems of the republic. The research results confirm that the digitalization of irrigation systems plays a key role in improving agricultural productivity, ensuring the sustainable use of water resources.

Keywords: automation; irrigation systems; water use efficiency; intelligent management systems; sustainable agriculture; irrigation automation; water use efficiency.

Введение. В условиях дефицита воды, с изменением климата, ростом населения и интенсификацией сельского хозяйства, особое внимание уделяется внедрению инновационных подходов к управлению водными ресурсами. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения эффективности водопользования в условиях дефицита водных ресурсов и устаревших методов орошения. Системы орошения предполагают сложное взаимодействие гидротехнических сооружений, инженерных сетей и управленческих решений, обеспечивающих равномерное и оперативное распределение воды. Автоматизация системы управления оросительными системами позволяет оптимизировать водораспределение, снижая потери воды и повышая урожайность сельскохозяйственных культур.

В Стратегии развития водного хозяйства Кыргызстана до 2040 года [1] предусмотрена поэтапная модернизация систем водораспределения с применением:

- ГИС-технологий;
- автоматизированных систем учета воды;
- интеллектуальных систем прогнозирования водопользования;
- дистанционного мониторинга оросительных систем.

Однако, несмотря на важность ирригационных систем для сельского хозяйства, их эффективность часто остается низкой из-за устаревших методов управления, обширных потерь воды в сетях и неравномерного распределения ресурсов, где большая часть инфраструктуры устарела. Отсутствие современных систем мониторинга, ограниченная интеграция автоматизированных решений, недостаточная адаптация к изменяющимся климатическим условиям значительно осложняют рациональное водопользование. Проблема также заключается в отсутствии комплексного анализа эффективности имеющихся технологий и их адаптации к местным условиям, что снижает потенциал внедрения инновационных подходов.

Материалы и методы исследования. Внедрение автоматизированных и интеллектуальных систем управления оросительными сетями способствует повышению устойчивости сельского хозяйства и обеспечивает более сбалансированное использование водных ресурсов в условиях водного стресса, характерного для региона Центральной Азии [2].

Рациональное управление водными ресурсами является ключевым фактором обеспечения продовольственной безопасности и устойчивого развития сельского хозяйства, особенно в регионах с дефицитом пресной воды. Кыргызстан, как и другие страны Центральной Азии сталкивается с серьезными вызовами в области водопользования, обусловленными изменением климата, устаревшей ирригационной инфраструктурой и неэффективными методами распределения воды [3]. По данным Всемирного банка и ФАО, в Кыргызстане потери воды в оросительных системах достигают 40 %, что значительно снижает продуктивность аграрного сектора [4].

Системы водораспределения, основанные на традиционных механизмах, не обладают достаточной гибкостью для адаптации к меняющимся условиям и часто не позволяют эффективно управлять водными потоками. Одним из перспективных направлений модернизации ирригационных систем является внедрение интеллектуальных технологий, включающих сенсорные сети, спутниковый мониторинг, алгоритмы машинного обучения и автоматизированные регуляторы расхода воды [5].

М.А. Садыковым и др. исследованы перспективы использования автономных источников возобновляемой энергии, в частности микроэлектростанций для энергоснабжения сельскохозяйственных

предприятий [6]. Исследователи отметили важность оптимизации использования водных ресурсов в Кыргызской Республике для развития таких систем, что будет способствовать повышению эффективности ирригации и энергоснабжения в аграрном секторе.

S. Ray и др. подчеркивают важность использования инновационных технологий орошения, таких как капельное орошение и автоматизированные системы управления водными ресурсами, для повышения эффективности водоснабжения и сохранения ресурсов в сельском хозяйстве [7]. В ходе исследования выявлено, что использование таких методов способствует снижению потребления воды и энергии и повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Полученные результаты подтвердили целесообразность использования интеллектуальных технологий для оптимизации водораспределения в условиях ограниченных водных ресурсов.

M. Nisa и др. рассмотрена онтологическая интеллектуальная система орошения, позволяющая повысить эффективность использования воды и урожайность за счет точного мониторинга и контроля [8]. Полученные результаты показали, что использование датчиков, исполнительных механизмов и алгоритмов обработки данных способствует устойчивому управлению водными ресурсами в сельскохозяйственном секторе, снижению потерь воды и негативного воздействия на окружающую среду.

В настоящее время Кыргызский научно-исследовательский институт ирригации (КНИИИ) осуществляет работы по внедрению автоматизированной системы мониторинга подачи и распределения оросительной воды на территории, обслуживаемой Чуйским районным управлением водного хозяйства (РУВХ) [9]. Данная система охватывает массивы орошаемых земель общей площадью около 30 тыс. га, обеспечивая контроль водоподдачи на основе современных технологий.

В рамках реализации данного проекта осуществляется поэтапная установка автоматизированных водоизмерительных комплексов на 72 гидропостах. Для обеспечения надежного измерения уровня воды разработаны и изготовлены электронные датчики уровня с комплектом защитных устройств и антенн для дистанционной передачи данных. Эти решения позволяют передавать информацию на значительные расстояния в режиме реального времени.

На текущий момент завершена установка 32 датчиков на гидротехнических сооружениях, расположенных на оросительных системах рек Кегети и Шамси. Для данных участков внедрена и откалибрована программная платформа, позволяющая в автоматическом режиме обрабатывать поступающие данные и формировать динамические графики водоподдачи в разрезе временных интервалов. Таким образом, на этих двух участках реализована замкнутая система автоматизированного мониторинга водораспределения, обеспечивающая контроль на орошаемых площадях порядка 15 тыс. га.

Для обеспечения высокой точности измерений и корректной работы сенсоров на всех гидропостах были дополнительно разработаны и переданы в эксплуатацию 72 специализированные гидрометрические рейки, предназначенные для калибровки и сверки показаний уровнемеров.

На уровне отдела водопользования РУВХ внедрена инфраструктура для обработки и анализа данных, включающая современную компьютерную технику и оборудование для телекоммуникационной связи с полевыми датчиками. Полноценный запуск системы управления водными ресурсами планируется после завершения оснащения всех запланированных гидропостов и настройки единого информационного контура.

В настоящее время ведутся совместные работы с Чуйским РУВХ по подготовке оставшихся 40 гидропостов, на которых планируется установка аналогичных датчиков уровня воды с системами дистанционной передачи данных и защитными механизмами, обеспечивающими устойчивость оборудования к внешним воздействиям.

Комплексная автоматизация процессов учета и распределения воды на основе дистанционного мониторинга и оперативной передачи данных позволит значительно повысить эффективность управления водными ресурсами в регионе, минимизировать потери воды и создать научно-обоснованную основу для планирования водопользования в условиях дефицита водных ресурсов и изменяющегося климата.

Системы водораспределения, основанные на традиционных механизмах, не обладают достаточной гибкостью для адаптации к меняющимся условиям и часто не позволяют эффективно управлять водными потоками. Одним из перспективных направлений модернизации ирригационных систем является внедрение интеллектуальных технологий, включающих сенсорные сети, спутниковый мониторинг, алгоритмы машинного обучения и автоматизированные регуляторы расхода воды.

В ходе исследования выполнен комплексный анализ методов автоматизации управления распределением воды в системах орошения сельского хозяйства, а именно сенсорных сетей для мониторинга процесса полива, программного обеспечения для планирования и прогнозирования, дронов для мониторинга состояния водных ресурсов, орошения и земельных участков. Были представлены схемы и архитектуры этих методов, а также изучены датчики, которые контролируют влажность, уровень воды в каналах и расход воды в сенсорных сетевых системах Wzzard LRPv и John Deere Operations Center™ [10].

Была рассчитана эффективность метода автоматизации, что помогло определить оптимальные подходы к орошению для условий республики. Уровень использования воды в системе орошения определялся как соотношение между объемом воды, который был эффективно использован для полива, и общим объемом подаваемой воды [11]:

$$\eta_u = \frac{W_u}{W_a} \times 100\%, \quad W_u = W_a - W_l, \quad (1)$$

где η_u – уровень использования воды в системе полива, %; W_u – объем воды, используемой непосредственно для полива, м³; W_a – общий объем воды, подаваемой в систему, м³; W_l – потери воды, м³.

Моделирование водного баланса и оптимизация графиков полива были выполнены с помощью программного обеспечения AquaCrop от Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций [12]. Модель эффективного использования воды в системах орошения основана на оценке количества воды, достигшей корневой зоны растений, по сравнению с количеством воды, поданной на поле. Такой подход был основан на расчете эффективности полива [12]:

$$\eta_a = \frac{W_z}{W_a} \times 100\%, \quad (2)$$

где η_a – эффективность полива, %; W_z – объем воды, хранящейся в корневой зон растений, м³, W_a – общий объем воды, подаваемой на орошение, м³.

В исследовании рассматривались технологии использования дронов: Da-Jiang Innovations Phantom 4 Real-Time Kinematic (DJI Phantom 4 RTK), Global Positioning System (GPS) и DJI P4 Multispectral, которые способствовали более эффективному управлению распределением воды. Эффективность оценивали путем расчета коэффициента эффективности применения жидкости [12]:

$$\eta_c = \frac{W_l}{W_r} \times 100\%, \quad (3)$$

где η_c – эффективность внесения жидкости дронами, %; W_l – объем жидкости, достигшей посевов, м³; W_r – общий объем жидкости, заправленной в дроны, м³.

Проанализированы интеллектуальные и автоматизированные системы управления водораспределением, в том числе примеры их использования в регионе. Особое внимание было уделено результатам исследования Кыргызского научно-исследовательского института ирригации (КНИИ), а именно, созданию автоматизированной системы управления орошением, учета воды и ее распределения. Были

изучены возможности использования геопространственной платформы «Географическая информационная система» (ГИС) и программного обеспечения ArcGIS.

Результаты. Автоматизация управления водораспределением в ирригационных системах является ключевым направлением гидромелиорации, направленным на обеспечение рационального использования водных ресурсов. Такой подход позволяет оптимизировать водопотребление, повысить урожайность сельскохозяйственных культур и минимизировать воздействие на окружающую среду с учетом климатических и гидрогеологических и агрономических условий региона.

Система орошения все чаще интегрируется с сетью датчиков для повышения эффективности управления распределением воды. Такая сеть позволяет осуществлять непрерывный мониторинг почвы, климатических условий и уровня воды в каналах, предоставляя точные данные для принятия решений в режиме реального времени. Это особенно актуально для Центральной Азии, где неравномерное распределение водных ресурсов и высокая испаряемость затрудняют управление ирригацией.

Для оценки эффективности сети датчиков система мониторинга полива использует норму расхода воды, которая отражает отношение используемой воды к общему количеству поданной воды, формула (1). Например, если на мониторе центрального сервера или в мобильном приложении оператора система показывает 85 %, это означает, что 85 % воды эффективно используется для полива, а потери составляют всего 15 %. Это рассчитывается исходя из того, что, например, общий объем воды, подаваемой в систему, составляет 1000 м³, а объем воды, потерянной в результате испарения, фильтрации и других процессов, составляет 150 м³. Таким образом, объем воды, используемой для полива, составляет 850 м³, а процент эффективного использования воды определяется как отношение сэкономленной воды к общему объему подаваемой воды, выраженное в процентах.

Для планирования и прогнозирования использовалось программное обеспечение с интегрированными алгоритмами, учитывающими климатические, гидрогеологические и агротехнические условия региона, а также данные, полученные от сенсорных сетей (рисунок 1). В качестве примера такого программного обеспечения можно привести модель роста сельскохозяйственных культур AquaCrop, которая позволила оценить влияние окружающей среды и методов управления на урожайность [12]. Это особенно полезно в условиях, где вода является ограничивающим фактором в производстве сельскохозяйственных культур. Программное обеспечение интегрировало различные входные данные, которые использовались для расчета водного баланса. Это включает в себя моделирование запасов воды и спроса на нее, а также прогнозирование изменений параметров, связанных с засухами и наводнениями. По результатам анализа был сформулирован оптимальный план водораспределения с учетом графиков полива и приоритетных зон для обеспечения эффективного и рационального использования водных ресурсов.

На этой схеме показана автоматизация управления водораспределением с помощью программного обеспечения, которое работало в три этапа: интеграция входных данных, расчет водного баланса и построение плана водораспределения. На первом этапе система получала данные от сенсорных сетей, учитывала прогноз погоды и текущий уровень воды в каналах. Система прогнозировала влияние погодных условий и испарения и соответствующим образом корректировала план полива путем интеграции с данными метеорологических станций.

На втором этапе данные были использованы для моделирования запасов и потребностей в воде, а также для прогнозирования изменения параметров, что позволило оценить будущее водопотребление. Для этого алгоритмы анализировали данные о количестве подаваемой и потребляемой воды с учетом потерь на испарение и фильтрацию. На заключительном этапе была определена приоритетность зон полива в соответствии с потребностями и оптимизированы графики полива, что обеспечило эффективное использование водных ресурсов, снижение потерь воды и повышение производительности сельского хозяйства. С помощью этого программного обеспечения было рассчитано оптимальное время и объем подачи воды в соответствии с потребностями культур и состоянием почвы.

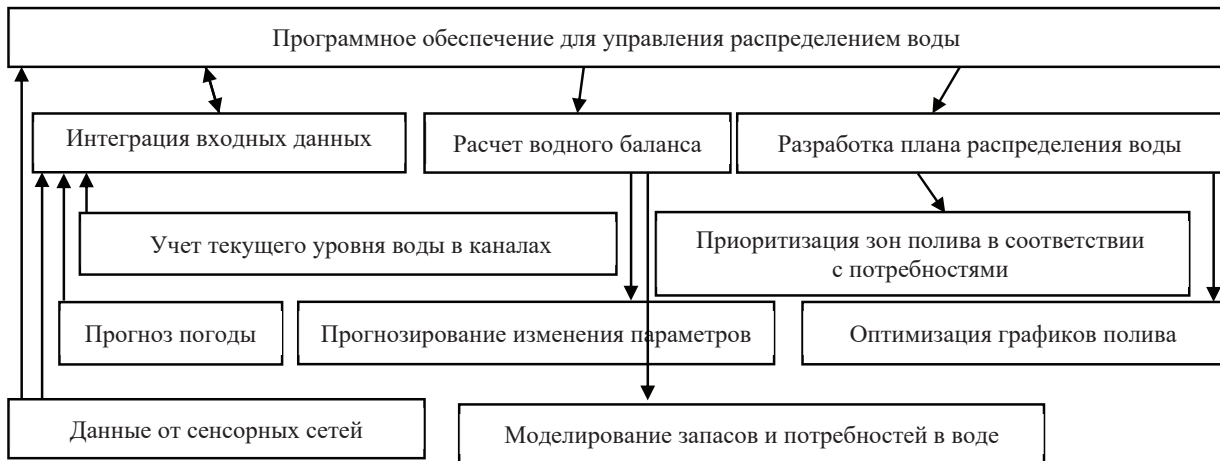


Рисунок 1 – Схема использования программного обеспечения в автоматизации управления водораспределением (создано автором)

Программное обеспечение также должно было учитывать эффективность полива, которая представляет собой отношение объема воды, удерживаемой в корневой зоне растений после полива, к общему объему поданной воды по формуле (2). Например, общий объем вносимой воды составляет 1 000 м³, а по результатам анализа датчиков влажности почвы объем воды, хранящейся в корневой зоне растений, составляет 700 м³. Эффективность использования воды составляет 70 %, это означает, что 70 % внесенной воды было накоплено для использования в корневой зоне растений. Оставшиеся 30 % воды теряются в результате испарения, инфильтрации в более глубокие слои почвы или стока.

Кроме того, программное обеспечение должно обеспечивать точность распределения воды, снижать чрезмерные потери и повышать урожайность сельскохозяйственных культур. Например, адаптируя графики полива к прогнозам погоды, можно избежать заболачивания или нехватки воды. Таким образом, такой подход способствует снижению потерь воды и обеспечивает стабильность процессов орошения.

Важным критерием стала оценка эффективности использования дронов для распределения воды при мелкодисперсном (локальном) поливе или внесении рабочих растворов удобрений или биопрепаратов по формуле (3). Например, если объем воды, равномерно распределенной дронами по посевам, составлял 450 м³, а общий объем воды, залитой в дроны, составлял 500 м³, то эффективность процесса составила 90 %. Это означает, что 90 % воды было эффективно использовано для полива, в то время как потери из-за испарения, распыления за пределами участков или других факторов составили 10 %:

$$\eta_c = \frac{W_l}{W_r} \times 100\% = \frac{450 \text{ м}^3}{500 \text{ м}^3} = 0,9 \times 100\% = 90\%.$$

Ключевыми процессами, которые были автоматизированы, стали мониторинг уровня влажности почвы, контроль объемов подачи воды в режиме реального времени, управление распределением воды между отдельными участками. Сенсорные сети позволяли считывать данные о влажности почвы, температуре и уровне испарения, которые передавались на центральный сервер для обработки.

Программное обеспечение анализировало эти данные и выдавало рекомендации или автоматически настраивало работу насосов и клапанов для обеспечения оптимального полива. Дроны использовались для сбора дополнительных данных о состоянии растительности, уровне воды в каналах и потенциальных утечках. Собранная информация была интегрирована в автоматизированную систему

управления, что позволило оперативно принимать решения о перенаправлении потоков или регулировании расхода воды.

Выводы и рекомендации. Результаты исследования показали, что внедрение интеллектуальных систем управления водораспределением в оросительных системах страны способно значительно повысить эффективность водопользования, сократить потери и оптимизировать расход воды. Интеграция сенсорных сетей, программного обеспечения для моделирования, а также дронов и автоматизированных систем управления водными потоками обеспечивает надежное, энергоэффективное и устойчивое управление водными ресурсами. Развитие и внедрение таких технологий должно стать стратегическим приоритетом для сельскохозяйственного сектора региона, обеспечивая продовольственную безопасность и адаптацию к климатическим изменениям. На данный момент в Кыргызстане интеллектуальные системы управления водными ресурсами находятся на этапе пилотных проектов и частичной апробации в рамках международных инициатив. На национальном уровне интеллектуальные системы водораспределения пока не получили широкого распространения, массовое их внедрение пока отсутствует, но потенциал для внедрения высок. Основные причины:

- высокая стоимость оборудования и ПО;
 - недостаток квалифицированных специалистов по эксплуатации и обслуживанию таких систем;
 - слабая цифровая инфраструктура в некоторых регионах;
 - отсутствие комплексных стратегий цифровизации водного сектора на уровне государства.
- Авторами разработан ряд рекомендаций по эффективному водопользованию:
- разработать и утвердить на национальном уровне долгосрочную стратегию цифровизации водохозяйственного комплекса, предусматривающую внедрение автоматизированных систем управления водораспределением на всех уровнях – от магистральных каналов до фермерских хозяйств;
 - сформировать единый цифровой реестр водных ресурсов и инфраструктуры, интегрированный с геоинформационными системами (ГИС) для обеспечения комплексного анализа и планирования водопользования на региональном и национальном уровнях;
 - обеспечить постоянное обновление технической базы водохозяйственных организаций, включая установку современных датчиков уровня, расхода и качества воды, автоматических шлюзов, а также программных комплексов для прогнозного управления подачей воды;
 - разработать и внедрить образовательные программы и специализированные курсы по подготовке инженеров водного хозяйства, обладающих компетенциями в области цифровых технологий, автоматизированных систем и интеллектуальных решений в водном менеджменте;
 - организовать пилотные проекты по комплексному внедрению интеллектуальных систем управления водоподачей на отдельных оросительных системах с последующим масштабированием успешных решений на всю страну;
 - активно привлекать международный опыт, грантовое финансирование и техническую помощь в рамках региональных и международных программ по устойчивому управлению водными ресурсами.

Исследования в рамках реализации проекта HWCA финансировались Исполнительным агентством по образованию, аудиовизуальным средствам и культуре, Erasmus+ (номер проекта 101082976 - HWCA - ERASMUS-EDU-2022-CBHE). Авторы признательны всем партнерам команды HWCA за их ценный вклад в обсуждение и проверку разработанных процедур. Европейская комиссия, поддержавшая подготовку этой публикации, не несет ответственности за ее содержание и использование представленной в ней информации.

Поступила: 26.02.2025; рецензирована: 12.03.2025; принята: 14.03.2025.

Литература

1. Указ Президента Кыргызской Республики от 10 февраля 2023 года № 23. Национальная водная стратегия Кыргызской Республики до 2040 года. URL: <https://cbd.minjust.gov.kg/434906/edition/1230660/ru> (дата обращения: 01.03.2025).
2. *Sehring J., et al.* Water governance and irrigation management in Central Asia: Institutional challenges and policy options / J. Sehring, et al. // *Environmental Policy and Governance*. 2022. № 32(2). Pp. 109–124. URL: <https://doi.org/10.1002/eet.1973>.
3. *Kovalchuk M., et al.* Water resources management under climate change in Central Asia: Current trends and future challenges / M. Kovalchuk, et al. // *Water*. 2021. № 13(5). 671. URL: <https://doi.org/10.3390/w13050671>.
4. FAO. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2021 (дата обращения: 27.02.2025).
5. *Li W.* UAV-based precision irrigation for sustainable water resource management / W. Li, X. Wang, & L. Zhang // *Remote Sensing*. 2021. № 13(10). P. 1785.
6. Садыков М.А. Кыргызстанда Фермердик Чарбаларды Электр Менен Жабдуудагы Калыбына Келүүчү Автономдуу Электр Булактары / М.А. Садыков, А.А. Алманбетов // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2023. № 2. С. 16–21. URL: <http://science-journal.kg/kg/journal/1/archive/16250> (дата обращения: 01.03.2025).
7. *Рэй С.* Управление водными ресурсами в сельском хозяйстве: инновации для эффективного орошения / С. Рэй, С. Маджумдер // *Современная агрономия*. 2024. С. 169–185. URL: https://www.researchgate.net/publication/381867727_Water_Management_in_Agriculture_Innovations_for_Efficient_Irrigation (дата обращения: 01.03.2025).
8. *Нуса М.* Интеллектуальная ирригационная система на основе онтологии: совершенствование управления водными ресурсами в сельском хозяйстве / М. Нуса, Азам и др. // *Азиатский бюллетень по управлению большими данными*. 2024. № 4(1). URL: <https://abbdm.com/index.php/Journal/article/view/131> (дата обращения: 02.03.2025).
9. Умная система полива. (2023). Получено из: URL: <https://www.proxis.ua/en/solution/smart-irrigation-system/> (дата обращения: 01.03.2025).
10. Новый уровень интеграции от John Deere Operations Center и системы Soft.Farm. (2021). Софт.Фарм. URL: <https://soft.farm/en/blog/new-level-of-integration-from-john-deere-operations-center-and-softfarm-system-188> (дата обращения: 04.03.2025).
11. *Уэр Т.* Эффективность орошения – определение, типы, значение и формула // *Орошение TWL*. 2023. URL: <https://www.twl-irrigation.com/irrigation-efficiency/> (дата обращения: 02.03.2025).
12. АкваКроп. Продовольственная и Сельскохозяйственная Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.fao.org/aquacrop/en/> (дата обращения: 01.03.2025).