

Makayev Kairat Amirzhanovich* – 3-rd-year PhD student, D131 – Plant Production, “8D08102 – Organic Farming” educational program, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Head of SMART inc. LLP, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 32 Turkestan Str., apt. 52, tel.: 87017362631, e-mail: kmaakev@mail.ru.

Tatarintsev Vladimir Leonidovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of soil science and soil ecology, Institute of Biology, Ecology, Soil Science, Agriculture and Forestry (Biological Institute), Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “National Research Tomsk State University” (NRTSU), Russian Federation, 634050, Tomsk, 36 Lenin ave, tel.: 89039956719.

МРНТИ 68.85.85: 68.31.21

УДК 631.67

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631146>

КОМПЛЕКСНЫЙ ОБЗОР СИСТЕМ ОРОШЕНИЯ: ДАТЧИКИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ, ИОТ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Молдахметов С.С.* – PhD, Researcher (исследователь) кафедры энергетики и радиоэлектроники, «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», г. Петропавловск, Республика Казахстан.

Абдуалиев Е.О. – докторант 2 курса ОП 8D07103 – Электроэнергетика, «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», г. Петропавловск, Республика Казахстан.

В статье представлен комплексный обзор «умных» систем орошения, включающий анализ основных типов датчиков влажности почвы, атмосферных и растительно-ориентированных сенсоров, а также методов их калибровки и интеграции в полевые измерительные сети. Значительное внимание уделено развитию IoT-технологиям связи, LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi, ZigBee и BLE, а также их роли в построении масштабируемых и энергоэффективных сетевых архитектур для сельскохозяйственных условий. Рассмотрены основные современные технологии в измерении влажности почвы. Также в статье рассматриваются классы вычислительных платформ и контроллеров, применяемых для автоматизации полива. Произведен анализ основных подходов к принятию решений: модели водного баланса и испаряемости (ET_0 , Kc), пороговые логические алгоритмы, системы поддержки принятия решений, основанные на правилах, а также современные методы прогнозирования, использующие машинное обучение, нейронные сети и гибридные модели. Особое внимание уделено сопоставлению преимуществ и ограничений различных классов технологий, а также их влиянию на эффективность использования воды, снижение эксплуатационных затрат и повышение устойчивости агропроизводства в условиях климатической изменчивости. Обзор подчеркивает, что наибольший потенциал имеют гибридные IoT системы, объединяющие данные сенсоров, физические модели и алгоритмы искусственного интеллекта. Полученные результаты формируют целостное представление о технологической базе современных систем точного орошения и определяют перспективные направления дальнейших исследований и практических внедрений.

Ключевые слова: орошение, датчики влажности почвы, IoT, LoRaWAN, водный баланс, точное земледелие.

СУАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ КЕШЕНДІ ШОЛУ: ТОПЫРАҚ ЫЛҒАЛДЫЛЫҒЫНЫҢ ДАТЧИКТЕРІ, ИОТ БАЙЛАНЫСЫ ЖӘНЕ ШЕШІМ ҚАБЫЛДАУДЫҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫҚ МОДЕЛЬДЕРІ

Молдахметов С.С.* – PhD, «Энергетика және радиоэлектроника» кафедрасының зерттеушісі, «М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», Петропавл қ., Қазақстан Республикасы.

Абдуалиев Е.О. – «8D07103 – Электр энергетикасы» білім беру бағдарламасының 2-курс докторанты, «М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», Петропавл қ., Қазақстан Республикасы.

Мақалада «ақылды» суару жүйелеріне кешенді шолу ұсынылады, онда топырақ ылғалдылығының негізгі датчиктері, атмосфералық және өсімдікке бағытталған сенсорлар түрлері, сондай-ақ оларды калибрлеу және далалық өлшеу желілеріне біріктіру әдістері талданады. Арнайы назар IoT байланыс технологияларының, LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi, ZigBee және BLE, ауылшаруашылық жағдайларына арналған ауқымды әрі энергия тиімді желілік архитектураларды құрудағы рөліне аударылады. Сонымен бірге топырақ ылғалдылығын өлшеудің заманауи технологиялары қарастырылады. Мақалада суаруды автоматтандыруға қолданылатын есептеу платформалары мен контроллерлердің негізгі сыныптары да сипатталады. Шешім қабылдау тәсілдерінің негізгі түрлері талданады: су балансы мен булануды есептеу модельдері (ET_0 , Kc), шекті логикалық алгоритмдер, ереже-

ге негізделген шешім қабылдауды қолдау жүйелері, сондай-ақ машиналық оқыту, нейрондық желілер және гибриді модельдерге сүйенетін қазіргі болжамдау әдістері. Әртүрлі технологиялық шешімдердің артықшылықтары мен шектеулерін салыстыруға, сондай-ақ олардың су ресурстарын тиімді пайдалану, пайдалану шығындарын азайту және климаттың өзгергіштігі жағдайында агроөндірістің тұрақтылығын арттыруға әсеріне ерекше мән беріледі. Шолу сенсор деректерін, физикалық модельдерді және жасанды интеллект алгоритмдерін біріктіретін гибриді IoT жүйелерінің ең жоғары әлеуетке ие екенін көрсетеді. Алынған нәтижелер дәлме-дәл суарудың заманауи жүйелерінің технологиялық базасы туралы толыққанды түсінік береді және болашақ зерттеулер мен практикалық енгізудің перспективалық бағыттарын айқындайды.

Түйінді сөздер: суару, топырақ ылғалдылығының датчиктері, IoT, LoRaWAN, су балансы, дәлме-дәл егіншілік.

A COMPREHENSIVE REVIEW OF IRRIGATION SYSTEMS: SOIL MOISTURE SENSORS, IoT CONNECTIVITY AND INTELLIGENT DECISION-SUPPORT MODELS

Moldakhmetov S.S.* – PhD, Researcher, Department of power engineering and radio electronics, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan.

Abdualiyev Ye.O. – 2nd-year PhD student, “8D07103 – Electric Power Engineering” educational program, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan.

This article presents a comprehensive review of smart irrigation systems, including an analysis of the main types of soil moisture sensors, atmospheric and plant-oriented sensing technologies, as well as methods for their calibration and integration into field monitoring networks. Particular attention is given to the development of IoT communication technologies, such as LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi, ZigBee and BLE, and their role in building scalable and energy-efficient network architectures for agricultural environments. The paper also examines modern technologies for soil moisture measurement. Furthermore, various classes of computing platforms and controllers used for irrigation automation are reviewed. The analysis covers the principal decision-making approaches: soil water balance models and evapotranspiration calculations (ET_0 , K_c), threshold-based logical algorithms, rule-based decision support systems, as well as modern forecasting methods that employ machine learning, neural networks and hybrid models. Special emphasis is placed on comparing the advantages and limitations of different technological classes and assessing their impact on water-use efficiency, operational cost reduction and the sustainability of agricultural production under conditions of climatic variability. The review highlights that hybrid IoT-based solutions integrating sensor data, physical models and artificial intelligence algorithms demonstrate the highest potential. The results provide a holistic view of the technological foundation of modern precision irrigation systems and outline promising directions for future research and practical implementation.

Key words: irrigation, soil moisture sensors, IoT, LoRaWAN, water balance, precision agriculture.

Введение. В условиях нарастающего дефицита пресных водных ресурсов и изменения климатических условий проблема рационального водопользования в аграрном секторе приобретает особую актуальность. Орошение является ключевым фактором стабильного производства сельскохозяйственной продукции, в особенности для некоторых регионов Казахстана, где природно-климатические условия крайне сложные [1, с. 72]. В таких условиях системы орошения приобретают стратегическое значение для стабильного производства сельскохозяйственной продукции, особенно в северных регионах страны, где развитая животноводческая деятельность также требует повышения урожайности не только зерновых, но и кормовых культур. При этом, согласно [2, с. 2], необходимость использования оросительных систем возникла с момента массового освоения целинных земель в Казахстане. Однако эффективность используемых традиционных оросительных систем остается низкой: значительные потери воды происходят вследствие фильтрации, испарения и неравномерного распределения влаги. В этих условиях возрастают требования к совершенствованию технологий орошения, направленных на повышение урожайности и снижение водо- и энергоемкости аграрного производства.

На современном этапе в мировой практике наблюдается переход от традиционных систем орошения к интеллектуальным решениям, включающим капельное, спринклерное и микродождевание, автоматическое управление подачей воды, а также применение IoT-сенсоров, спутникового мониторинга и возобновляемых источников энергии для насосных станций.

Целью данного обзора является анализ современного состояния и тенденций развития систем орошения сельскохозяйственных культур, а также оценка их адаптации к климатическим условиям Казахстана. Особое внимание уделяется перспективам внедрения энергоэффективных и интеллектуальных технологий, способных повысить водную и энергетическую эффективность аграрного производства, обеспечить устойчивость земледелия и рациональное использование природных ресурсов в северных регионах страны.

Задачи:

- систематизировать и сопоставить основные способы орошения по различным показателям;

- проанализировать методы измерения влажности почвы и водного статуса растений;
- сравнить технологии передачи данных и оценить их применимость при построении сетей на сельскохозяйственных площадях;
- рассмотреть вычислительные платформы, используемые для автоматизации полива;
- определить перспективную архитектуру интеллектуальной системы орошения и приоритеты ее адаптации к климатическим и ресурсным ограничениям северных регионов Казахстана.

Материалы и методы. Настоящее исследование выполнено в формате аналитического обзора, основанного на систематизации и сравнительном анализе отечественных и зарубежных источников, посвященных проблемам и перспективам развития систем орошения сельскохозяйственных культур. При отборе и анализе статей использовались рекомендации PRISMA. В качестве основных источников информации использованы научные публикации, размещенные в базах данных Scopus, Web of Science, SpringerLink, ScienceDirect и ResearchGate за период 2015-2026 гг., а также отчеты различных организаций и официальные статистические материалы Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан. Всего было рассмотрено более 300 источников, из которых в обзор включены 76.

Анализ литературы

Современная сельскохозяйственная отрасль сталкивается с нарастающим комплексом проблем, связанных с дефицитом пресной воды [3], низкой эффективностью традиционных оросительных систем [4] и усилением климатической нестабильности. Гравитационные методы полива, широко применяемые в ряде регионов, характеризуются значительными потерями влаги и неравномерностью распределения воды, что приводит к ухудшению структуры почвы, водному стрессу растений и снижению урожайности [5]. Рост частоты засух [6, с. 1424], высокие энергетические затраты на подачу воды, износ инфраструктуры [7, 8], а также отсутствие систем точного мониторинга усугубляют дисбаланс между потреблением и доступностью водных ресурсов. В совокупности эти факторы формируют объективную необходимость перехода к высокоэффективным, управляемым и интеллектуальным методам орошения, способным обеспечить рациональное использование воды (water use efficiency, WUE), повышение продуктивности и устойчивость аграрного производства в условиях изменяющегося климата [9, с. 181].

В современном сельском хозяйстве методы орошения можно классифицировать на несколько групп, каждая из которых имеет свои преимущества и области применения. Поверхностное (гравитационное) орошение остается наиболее распространенным благодаря простоте и низкой стоимости, однако характеризуется значительными потерями воды и невысокой равномерностью увлажнения [10]. Более управляемым является орошение дождеванием, обеспечивающее равномерное распределение влаги за счет распыления под давлением [11, с. 80]. Наиболее водосберегающим считается микроорошение [12], включающее капельное, подповерхностное и микродождеватели, которые подают воду непосредственно в прикорневую зону и достигают высокой эффективности использования воды. Для оценки сравнительных преимуществ и ограничений этих методов важно рассматривать не только технологический принцип работы, но и параметры распределения влаги, потери воды, стоимость внедрения и пригодность для различных агроландшафтов. Ниже представлена обобщенная сравнительная таблица, отражающая ключевые характеристики трех наиболее распространенных методов орошения.

Таблица 1 – Сравнение основных методов орошения

№	Критерий	Поверхностное	Дождевание	Капельное
1	Способ подачи воды	Самотеком по поверхности почвы	Распыление под давлением	Точечная подача в прикорневую зону
2	Эффективность использования воды (WUE)	40–70 %	50–90 %	90–95 %
3	Потери воды	Высокие (испарение, сток, фильтрация)	Средние (испарение)	Низкие
4	Равномерность увлажнения	Низкая	Высокая	Очень высокая
5	Энергоемкость	Низкая	Средняя (нужно давление)	Средняя (нужна фильтрация)
6	Стоимость установки и обслуживания	Низкая	Средняя	Высокая
7	Влияние на почву	Риск засоления, эрозии, переувлажнения	Минимальное	Стабильная влажность, низкий риск деградации
8	Пригодность для культур	Зерновые, кормовые	Зерновые, кормовые	Овощные, плодовые

Как видно из таблицы, каждому методу орошения соответствует свой набор преимуществ и ограничений, определяющий его целесообразность в конкретных условиях. Для условий северного Казахстана, где преобладают крупные поля зерновых и кормовых культур на черноземных и каштановых почвах, наиболее целесообразным является дождевание, обеспечивающее равномерное увлажнение и высокую эффективность использования воды.

вых почвах, лучше всего подходит управляемое дождевание, а не капельное орошение, ориентированное преимущественно на овощные культуры.

Следующим этапом развития являются интеллектуальные и прецизионные системы, основанные на датчиках, IoT-платформах, технологиях VRI и анализе данных, что позволяет адаптировать полив к фактическому состоянию почвы и растений [19, с. 15-16]. Интеграция Smart-технологий и модернизация инфраструктуры орошения способны дополнительно повысить эффективность расходования воды. В отдельных нишах применяются специализированные методы, такие как туманообразование для теплиц [20, с. 157] и подповерхностное трубчатое орошение, предназначенные для высокоинтенсивных систем выращивания [21]. Таким образом, наблюдается эволюция ирригационных технологий от традиционных к высокоточным и цифровым решениям.

Контроль за осуществлением полива заключается в определении времени и объема подачи оросительной воды на поле для полного удовлетворения водных потребностей растений. Его несогласованность может существенно повлиять на WUE и урожайность. Для осуществления этого контроля современным системам необходимо следить за рядом показателей состояния почвы и растений.

Одним из главных показателей является оценка влажности почвы в поле. Влажность почвы важна, т.к. в исследовании Ogidan O.K. и др. [20, с. 157] с помощью применения микро-тензиометров показана корреляция влажности почвы и водного стресса растения. Обычно сельскохозяйственники визуально контролируют влажность почвы, используя практические приемы (подъем, «пинки», извлечение лопатой) для принятия решений по поливу. В работе Rasheed M.W. и др. [23] выделяют прямые и косвенные методы измерения влажности почвы для лабораторных и полевых условий, включая классические гравиметрические измерения, тензиометры, гипсовые блоки и др.

С развитием цифровых технологий контроль влажности почвы все чаще осуществляется с использованием современных инструментов, обеспечивающих более высокую точность, автоматизацию и возможность непрерывного мониторинга. К таким методам относятся электронные датчики почвенной влаги (емкостные, TDR, FDR). Однако, в работе Abdelmoneim A.A. и др. [24] была продемонстрирована необходимость калибровки таких сенсоров под конкретные типы почв. В ней были представлены датчики TERS 10, SMT50 и др., и показано, что их точность существенно зависит от породы почвы и метода установки.

Существуют также более продвинутые способы определения влажности, например сенсоры водопоглощения растениями. Так, в исследовании Макні N. и др. [25] представлены электрическая импедансная спектроскопия и инфракрасная спектроскопия как неинвазивные методы измерения водного статуса непосредственно листьев, т.е. измерение относительного содержания воды и биопотенциала клеточной мембраны. Но такой метод слишком усложняет всю систему.

Для систематизации подходов и наглядного сравнения их характеристик целесообразно привести основные методы, используемые для оценки влажности почвы и водного статуса растений. Представленная ниже таблица 2 обобщает ключевые параметры различных групп датчиков.

Таблица 2 – Основные методы измерения влажности почвы и водного статуса растений

Тип сенсора	Принцип работы	Основные преимущества	Основные ограничения	Точность/Инертность
Гравиметрический (прямой метод)	Измерение потери массы образца почвы после высушивания (обычно при 105 °C)	Эталонный метод	Трудоемкий, не подходит для непрерывного мониторинга	±0.5–1 % влажности; очень высокая инертность (часы)
Тензиометр (датчик водного потенциала почвы)	Измерение водного потенциала (отрицательного давления) в пористой чашке, заполненной водой	Хорошо коррелирует с доступностью влаги для растений; наглядный параметр	Не работает в сильно сухих почвах (ограниченный диапазон); требует обслуживания	±2 кПа; инертность от 30 мин до нескольких часов
Гипсовые блоки / матричные сенсоры	Измерение электрического сопротивления насыщенного гипсового (или полимерного) блока, находящегося в равновесии с почвой	Низкая стоимость, простота, возможно использование в сети точек	Средняя точность, постепенная деградация материала, нужна периодическая замена	Погрешность 10–20 %; инертность 12–24 ч
Емкостные диэлектрические сенсоры	Измерение диэлектрической проницаемости почвы, зависящей от содержания воды, по изменению емкости датчика	Низкая стоимость, дают данные в реальном времени, легко интегрируются в автоматизацию	Требуют калибровки под тип почвы; чувствительны к солености, плотности и температуре	±3–7 % (TEROS 10, SMT50); отклик < 1 мин

Продолжение таблицы 2

TDR/FDR сенсоры	Измерение скорости/частотного отклика электромагнитного сигнала в почве, связанного с ее диэлектрической проницаемостью	Высокая точность и стабильность; пригодны для автоматизированного мониторинга в полевых условиях	Высокая стоимость оборудования; требовательность к установке и калибровке	$\pm 1-5\%$ VWC; отклик < 1 с
Импедансные /резистивные	Измерение сопротивления/импеданса между электродами в почве	Очень низкая стоимость, простота электроники, легко масштабировать сеть датчиков	Чувствительны к солености, температуре и коррозии электродов; требуются частые калибровки	$\pm 5-10\%$; отклик < 10 с
Нейтронный зонд	Регистрация замедления быстрых нейтронов атомами водорода в почве, что дает профиль содержания влаги по глубине	Очень высокая точность и глубина зондирования (до 1 м и более)	Дорогое радиационное оборудование; требует обученного персонала	$\pm 1-3\%$; отклик 10–60 с
Дистанционное зондирование (спутники, дроны)	Оценка влажности по отражательной способности/микроволновому сигналу (NIR, SAR и др.)	Покрывание больших территорий, возможность интеграции с ГИС и моделями; полезно для регионального планирования	Требуется калибровка с наземными датчиками, завязка на атмосферные условия	± 0.1 МПа; отклик 5–20 мин
Растение-ориентированные сенсоры (microtensio-meter и др.)	Прямое измерение водного статуса растения (потенциала воды в стволе, листе; электрические/оптические характеристики)	Позволяют фиксировать водный стресс до его проявления в урожайности	Высокая стоимость, сложность установки и интерпретации	точность высокая; отклик быстрый (минуты)

Как следует из таблицы 2, выбор способа для мониторинга влажности почвы должен основываться на балансе между требуемой точностью, стоимостью, условиями эксплуатации и задачами системы орошения. Традиционные методы остаются эталонными для калибровки, однако они не подходят для оперативного полевого контроля. Диэлектрические и импедансные сенсоры обеспечивают непрерывный мониторинг и хорошо интегрируются с автоматизированными системами, но требуют тщательной калибровки и контроля факторов, влияющих на измерения. Растение-ориентированные сенсоры дают наиболее полную информацию о водном статусе культуры, однако сложность их применения ограничивает использование только в специализированных интенсивных хозяйствах. Таким образом, использование различных типов датчиков влажности почвы и водного статуса растений создает основу для более точного и обоснованного управления поливом. Однако сами по себе датчики представляют лишь первичный уровень измерения, а непосредственно сам эффект достигается при их интеграции в автоматизированные системы управления орошением. Развитие цифровых технологий, IoT-платформ, беспроводных сетей передачи данных и алгоритмов анализа позволило перейти от эпизодических измерений к непрерывному, адаптивному управлению водоподачей в реальном времени [39–40].

Современные автоматизированные системы управления орошением предоставляют целый ряд стратегически важных преимуществ. Во-первых, согласно анализу Zhang T. и др. [41, с. 18] они обеспечивают значительную экономию водных ресурсов: в ряде исследований отмечено снижение потребления воды на 30 % и более без ущерба для урожайности. Во-вторых, они позволяют минимизировать трудозатраты, снизить влияние человеческого фактора и существенно повысить оперативность реакции на изменения в состоянии почвы, растения или погодных условий [42, с. 1]. В-третьих, интеграция датчиков, облачных платформ и алгоритмов анализа данных позволяет оптимизировать режим полива с учетом фактических потребностей культуры, что ведет к повышению WUE и улучшению устойчивости аграрного производства в условиях ограниченных водных и климатических ресурсов [43].

Однако, прежде чем рассматривать принцип принятия решений автоматизированными системами, необходимо заметить, что толчком к усовершенствованию оросительных систем также послужило и развитие технологий беспроводной связи [44]. Это важно, поскольку датчики, как правило, устанавливаются непосредственно на сельскохозяйственном поле и, таким образом, представляют собой сеть обмена данными между датчиками и сервером, который расположен относительно далеко от этого поля. Именно поэтому развитие систем связи, обеспечивающих непрерывный обмен данными, является

ся также важным фактором эволюции оросительных систем. Согласно исследованию Qian M. и др. [45], наиболее распространенными технологиями являются LoRaWAN и NB-IoT, отличающиеся низким энергопотреблением и большой дальностью передачи, что делает их эффективными для сельскохозяйственных условий с большой площадью наблюдения. В работе Zhang Y. и др. [46, с. 2] технология ZigBee использовалась для передачи данных из полевого узла, а Wi-Fi использовалась для соединения с веб-сервером. Для удаленного доступа и передачи данных на облачные серверы применяются GSM/4G/5G-модули, обеспечивающие стабильную связь в реальном времени [47]. Обмен телеметрией и управляющими командами обычно организуется через легковесные протоколы MQTT, CoAP или REST-API, что позволяет строить гибкие системы сбора данных и интеллектуального анализа [48, с. 97-98]. Сравнение основных технологий беспроводной связи, используемых для передачи данных при мониторинге агрохимических показателей, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные технологии беспроводной связи в автоматизированных системах орошения

Технология связи	Дальность/ скорость передачи	Энерго-потребление	Основные преимущества	Основные ограничения
LoRaWAN суб-GHz (433/868/915 МГц)	2-10 км/ до ~50 кбит/с	Очень низкое (узкий канал, duty cycle)	Большая дальность, отличная энерго-эффективность, звездная топология с большим числом узлов	Низкая скорость, ограниченный размер пакета, duty cycle, необходимость сети шлюзов
NB-IoT / LTE-M	1-10 км/ до ~500 кбит/с	Низкое / среднее	Использует существующую сотовую инфраструктуру, хорошая чувствительность, надежность	Абонентская плата, зависимость от оператора и покрытия, высокая энергоемкость
GSM / 3G / 4G / 5G Сотовая связь	1-10 км (зона БС)/ более Мбит/с	Среднее / высокое	Высокая скорость, глобальное покрытие, простая интеграция с облачными сервисами	Существенное энергопотребление, стоимость SIM и трафика, не везде есть стабильный сигнал
Wi-Fi (2.4/5 ГГц)	до ~500 м/ до ~500 Мбит/с	Среднее	Высокая скорость, дешевое оборудование, простая интеграция с веб-интерфейсами	Небольшая дальность, сравнительно высокое энергопотребление, чувствительность к затенению и помехам
ZigBee / IEEE 802.15.4	50-150 м между узлами / до 250 кбит/с	Низкое	Низкое энергопотребление, поддержка mesh-топологии	Небольшая дальность; требует координации сети, чувствительна к помехам в 2.4 ГГц
Bluetooth Low Energy (BLE)	10-50 м/ до ~1 Мбит/с	Очень низкое	Очень низкое энергопотребление, простота интеграции со смартфонами	Очень малая дальность, непрактично для больших полей
Wi-Fi HaLow (802.11ah)	до ~2 км/ до ~5 Мбит/с	Низкое	Большая дальность, поддержка большого числа устройств	Ограниченная доступность оборудования

В таблице 3 не приведены проводные системы передачи данных, такие как RS-485, Ethernet и оптоволоконные линии. Несмотря на распространение беспроводных сетей, проводные каналы по-прежнему применяются для критически важных узлов: например, для связи контроллеров насосных станций и других исполнительных механизмов [59], т.е. там, где требуется высокая надежность.

В условиях северного Казахстана, где небольшая плотность сотовой связи, технология LoRaWAN обладает очевидным преимуществом. Рельеф в северном Казахстане плоский, а значит обеспечивает прямую видимость, позволяя одному шлюзу охватывать поля радиусом до 10 км без ретрансляторов.

Развитие коммуникационных технологий как беспроводных, так и проводных, создало основу для построения распределенных оросительных систем, однако сами по себе каналы связи не обеспечивают интеллектуального управления. Следующим ключевым элементом современных систем орошения являются сами контроллеры [60], которые собирают данные с датчиков, выполняют локальную обработку и управляют клапанами и насосами. Переход к автоматизированному принятию решений стал возможен благодаря интеграции вычислительных моделей водного баланса, алгоритмов расчета испаряемости, коэффициентов культуры, а также систем поддержки принятия решений [61], способных адаптировать режимы полива под фактическое состояние почвы и растений.

В последние годы в оросительные системы все активнее внедряются методы машинного обучения и искусственных нейронных сетей, позволяющие выполнять прогнозирование влажности, оценку водного стресса и оптимизацию расписаний полива на основе массивов полевых и метеорологических данных. Таким образом, современная система орошения представляет собой не просто сеть сенсоров и исполнительных устройств, а интеллектуальный аппаратно-программный комплекс, где контроллеры и аналитические модули играют центральную роль в преобразовании данных в эффективные решения по подаче воды.

Таблица 4 – Основные методы автоматизированного управления орошением

Тип системы / алгоритма	Принцип работы	Основные входные данные	Преимущества	Ограничения
Календарно-графиковые DSS (расписание поливов)	Полив выполняется по заранее заданному расписанию (дата/время/доза), иногда с простой коррекцией по погоде	Календарь поливов, иногда прогноз погоды, ограниченный набор датчиков	Очень простая эксплуатация, подходит для традиционных систем; дешево внедрять на существующих объектах	Практически не учитывает фактическое состояние почвы и растений, высокий риск перерасхода или недополива
Пороговые контроллеры по влажности	Полив включается/выключается при достижении заданных порогов влажности почвы или водного потенциала	Датчики влажности почвы (емкостные, TDR/FDR), тензиометры, метеодатчики	Простота реализации, высокая надежность, понятная логика	Низкая адаптивность: плохо учитывает прогноз погоды, развитие культуры и экономические критерии
Расчет ET_0 и K_s	Вычисляется потенциальная испаряемость ET_0 , затем потребность культуры: $ET_c = ET_0 \cdot K_s$	Метеостанция (T , RH , ветер, радиация), база коэффициентов K_s по культурам и фазам роста	Научно обоснованный подход, простота реализации	Требует качественных метеоданных, правильного выбора K_s
Модели водного баланса почвы	Ведется расчет баланса влаги в профиле: приход (осадки, полив) – расход (ET_c , сток, инфильтрация)	История поливов, осадков, ET_0/ET_c , измерения влажности на нескольких глубинах	Научно обоснованный подход	Параметры модели требуют калибровки; возможны накопленные ошибки
DSS на основе машинного обучения	Алгоритм ML по набору входных признаков (почва, погода, растение) оценивает необходимость или дозу полива	Исторические данные датчиков, метеоданные, параметры культуры, иногда экономические показатели	Может учитывать множество факторов; потенциально высокий прирост WUE и урожайности	Нужна обучающая выборка и постоянная валидация; сложность интерпретации; требуются надежная связь и вычислительные ресурсы
Нейронные сети (ANN, LSTM) для прогноза влажности / водного стресса	НС прогнозирует влажность почвы, ET_c или водный стресс на горизонт 1–3 дня, а контроллер использует прогноз для формирования расписания полива	История влажности, погоды, поливов, иногда снимки с дронов/спутников	Позволяет работать на упреждение, учитывать сложные динамические связи; хорошо стыкуется с IoT-архитектурой	Требует хорошего набора данных; чувствительна к смене условий (новый сорт, тип почвы), требует сопровождения специалистом
Гибридные DSS (ET_0/K_s + сенсоры + ML)	ET_0/K_s и водный баланс дают базовую оценку, ML/НС корректируют ее по данным датчиков и локальным особенностям поля	ET_0 , K_s , ряды влажности, метеоданные, иногда данные растения и ДЗЗ	Комбинирует интерпретируемость физических моделей с адаптивностью ИИ; дает лучшую устойчивость к изменению условий	Высокая архитектурная и программная сложность, более дорогая разработка и эксплуатация; нужны и ИИ-специалисты, и агрономы

Такое разнообразие методов автоматизированного управления орошением привело к тому, что в практике для реализации этих методов существует ряд аппаратных решений от простых микроконтроллеров до промышленных программируемых логических контроллеров (ПЛК). Выбор платформы для реализации влияет на вычислительные способности всей системы, автономность, коммуникационные возможности и ее стоимость.

Анализ источников позволяет сделать вывод, что опытные образцы прежде всего выполнены на платах расширения класса Arduino, ESP8266/32 и Raspberry Pi. Это хорошие и современные микроконтроллеры, но пригодны лишь для прототипирования. Промышленные же образцы оросительных систем выполнены в основном на программируемых логических контроллерах (ПЛК) семейства Siemens S7-1200/1500, Owen, Schneider Electric M221/M241 и других. Хотя ПЛК отличаются прежде всего надежностью, но они прежде всего просто автоматические и возможности машинного обучения в них отсутствуют. Тем не менее современная архитектура системы орошения не предполагает выбора единственной лучшей платформы, в особенности построенные на основе IoT. На практике такая система строится так, чтобы каждый класс устройств выполнял ту функцию, для которой он оптимизирован.

Заключение. Проведенный анализ технологической базы современных систем орошения позволяет сформулировать ряд выводов. Как следует из анализа по методам орошения (таблица 1), ни один из традиционных методов не обеспечивает одновременно высокой эффективности использования воды и низкой стоимости внедрения. Поверхностное орошение, при всей своей доступности, демонстрирует WUE на уровне 40-70 %, что неприемлемо для условий нарастающего водного дефицита. Капельное микроорошение с WUE до 95 % является технически оптимальным, однако его высокая стоимость и возможность применения только для овощных и плодовых культуры ограничивают ее применение. Поэтому основной вывод по методам орошения заключается в необходимости не искать замену традиционным методам орошения, а проводить их интеллектуализацию через IoT-управление или прецизионный мониторинг.

Анализ различных датчиков влажности почвы (таблица 2) показал, что не существует универсального решения. Дешевые емкостные датчики обеспечивают оптимальное соотношение стоимости, точности и скорости отклика для построения сетей полевого мониторинга. TDR/FDR-сенсоры превосходят емкостные по точности, но их высокая стоимость оправдана лишь на опорных точках сети. Микротензиометры и другие растение-ориентированные методы могут использоваться только очень специализированными интенсивными хозяйствами. БПЛА и спутники эффективны для крупного регионального планирования, но требуют обязательной верификации наземными датчиками.

Анализ технологий беспроводной связи (таблица 3) показал, что для больших сельскохозяйственных полей наиболее перспективным остается LoRaWAN. Также перспективным направлением в будущем возможно станет Wi-Fi HaLow, сочетающий большую дальность с низким энергопотреблением.

Проведенный анализ систем поддержки принятия решений демонстрирует эволюцию от простых расписаний полива к многоуровневым гибридным системам. Пороговые контроллеры по влажности, несмотря на простоту реализации, скорее всего будут заменены более интеллектуальными устройствами. Методы машинного обучения и нейронные сети обеспечивают учет сложных динамических зависимостей и прогнозирование влажности на 1-3 суток вперед, однако требуют значительных объемов обучающих данных и постоянной валидации при смене агрономических условий.

Таким образом можно сделать вывод, что современные системы орошения переживают качественный переход от традиционных подходов к высокоинтеллектуальным решениям, основанным на новых технологиях и продвинутых моделях принятия решений. Результаты обзора свидетельствуют о том, что наибольший практический потенциал имеют гибридные IoT-архитектуры, интегрирующие сети локальных датчиков по LoRaWAN, физические модели ET_0/K_c и алгоритмы машинного обучения для управления водоподачей. Для условий Казахстана, характеризующихся значительными площадями сельскохозяйственных угодий, климатической изменчивостью и дефицитом водных ресурсов, данное направление представляет стратегический приоритет, способный обеспечить повышение урожайности при одновременном сокращении водо- и энергоемкости аграрного производства.

Информация о финансировании. Информация о финансировании: данное исследование финансировалось Комитетом науки МНВО РК (грант № BR28712227).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Islyami A., Aldashev A., Thomas T.S., Dunston S. Impact of climate change on agriculture in Kazakhstan [Текст] / A. Islyami, A. Aldashev, T.S. Thomas, S. Dunston // Silk Road: A Journal of Eurasian Development. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 66–88. – DOI: 10.16997/srjed.19.
2. Nagaibayeva Z., Amantayeva J., Mazhitova Z., Bissembayeva Z., Nessipkaliyev D. Irrigation systems of the North-Kazakhstan region during the development of virgin and fallow lands (1970s) [Текст] / Z. Nagaibayeva, J. Amantayeva, Z. Mazhitova, Z. Bissembayeva, D. Nessipkaliyev // E3S Web of Conferences. – 2023. – Т. 371. – Art. 06016. – 8 с. – DOI: 10.1051/e3sconf/202337106016.

3. Hasenbeck E.C., Scruggs C.E., Morgan M., Wang J., Webster A.J., Gomez C.M. Perspectives on innovative approaches in agriculture to managing water scarcity in the Middle Rio Grande Basin [Текст] / E.C. Hasenbeck, C.E. Scruggs, M. Morgan, J. Wang, A.J. Webster, C.M. Gomez // Agriculture. – 2025. – Т. 15. – Art. 793. – DOI: 10.3390/agriculture15070793.
4. Luque-Sánchez Á., Díaz-Cabrera J.M., Perea P. Identifying strategies to enhance irrigation efficiency under drought conditions [Текст] / Á. Luque-Sánchez, J.M. Díaz-Cabrera, P. Perea // Journal of Environmental Management. – 2025. – Т. 394. – Art. 127439. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127439.
5. Farag A.A., El-Aziz M.A.A., El-Husseiny A.M. Effects of irrigation systems and water management strategies on soil chemical properties and citrus tree productivity in clayey soils [Текст] / A.A. Farag, M.A.A. El-Aziz, A.M. El-Husseiny // Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – Art. 33324. – DOI: 10.1038/s41598-025-19575-6.
6. Yao Y., Thiery W., Ducharme A. et al. Irrigation-induced land water depletion aggravated by climate change [Текст] / Y. Yao, W. Thiery, A. Ducharme et al. // Nature Water. – 2025. – Т. 3. – С. 1424–1435. – DOI: 10.1038/s44221-025-00529-1.
7. Hrozencik A., Perez-Quesada G., Donahue H. The development and current challenges of irrigated agriculture in the western U.S. [Текст] / A. Hrozencik, G. Perez-Quesada, H. Donahue // Agricultural Water Management. – 2025. – Т. 315. – Art. 109474. – DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109474.
8. Vranešević M., Mešeldžija M., Grabić J., Zemunac R., Boukalova Z. Irrigation water quality in a framework of Sustainable Development Goal 6: a review of challenges, impacts, policy alignments [Текст] / M. Vranešević, M. Mešeldžija, J. Grabić, R. Zemunac, Z. Boukalova // Frontiers in Agronomy. – 2025. – Т. 7. – Art. 1580338. – DOI: 10.3389/fagro.2025.1580338.
9. Hoffmann P., Villamayor-Tomas S. Irrigation modernization and the efficiency paradox: a meta-study through the lens of Networks of Action Situations [Текст] / P. Hoffmann, S. Villamayor-Tomas // Sustainability Science. – 2023. – Т. 18. – С. 181–199. – DOI: 10.1007/s11625-022-01136-9.
10. Chávez C., Fuentes S., Fuentes C., Brambila-Paz F., Trejo-Alonso J. How surface irrigation contributes to climate change resilience: a case study of practices in Mexico [Текст] / C. Chávez, S. Fuentes, C. Fuentes, F. Brambila-Paz, J. Trejo-Alonso // Sustainability. – 2022. – Т. 14, № 13. – Art. 7689. – DOI: 10.3390/su14137689.
11. Kumar P. A review on types of irrigation system and their advantages [Текст] / P. Kumar // International Journal of Research and Analytical Reviews. – 2018. – Т. 5, № 3. – С. 79–84.
12. Yang P., Wu L., Cheng M., Fan J., Li S., Wang H., Qian L. Review on drip irrigation: impact on crop yield, quality, and water productivity in China [Текст] / P. Yang, L. Wu, M. Cheng, J. Fan, S. Li, H. Wang, L. Qian // Water. – 2023. – Т. 15. – Art. 1733. – DOI: 10.3390/w15091733.
13. Masseroni D., Gangi F., Ghilardelli F. et al. Assessing the water conservation potential of optimized surface irrigation management in Northern Italy [Текст] / D. Masseroni, F. Gangi, F. Ghilardelli et al. // Irrigation Science. – 2024. – Т. 42. – С. 75–97. – DOI: 10.1007/s00271-023-00876-5.
14. Salman A.K. et al. Assessing irrigation system efficiency within the Water-Energy-Food Nexus: introducing energy performance metrics [Текст] / A.K. Salman et al. // Agricultural Water Management. – 2025. – Т. 317. – Art. 109665. – DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109665.
15. Abd-Elaty I., Ramadan E.M., Elbagory I.A., Nosair A.M., Kuriqi A., Garrote L., Ahmed A.A. Optimizing irrigation systems for water efficiency and groundwater sustainability in the coastal Nile Delta [Текст] / I. Abd-Elaty, E.M. Ramadan, I.A. Elbagory, A.M. Nosair, A. Kuriqi, L. Garrote, A.A. Ahmed // Agricultural Water Management. – 2024. – Т. 304. – Art. 109064. – DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109064.
16. Chauhdary J.N., Li H., Jiang Y., Pan X., Hussain Z., Javaid M., Rizwan M. Advances in sprinkler irrigation: a review in the context of precision irrigation for crop production [Текст] / J.N. Chauhdary, H. Li, Y. Jiang, X. Pan, Z. Hussain, M. Javaid, M. Rizwan // Agronomy. – 2024. – Т. 14, № 1. – Art. 47. – DOI: 10.3390/agronomy14010047.
17. Santini A., Masiero M., Amato G., Pettenella D.M. From flood to drip irrigation: a review of irrigation modernization trade-offs [Текст] / A. Santini, M. Masiero, G. Amato, D.M. Pettenella // Water. – 2025. – Т. 17, № 20. – Art. 3018. – DOI: 10.3390/w17203018.
18. Guo H., Li S. A review of drip irrigation's effect on water, carbon fluxes, and crop growth in farmland [Текст] / H. Guo, S. Li // Water. – 2024. – Т. 16, № 15. – Art. 2206. – DOI: 10.3390/w16152206.
19. Kumar S.V., Singh C.D., Upendar K. Review on IoT based precision irrigation system in agriculture [Текст] / S.V. Kumar, C.D. Singh, K. Upendar // Current Journal of Applied Science and Technology. – 2020. – Т. 39, № 45. – С. 15–26. – DOI: 10.9734/cjast/2020/v39i4531156.
20. Ogidan O.K., Elesemoyo I., Babalola H. Automated irrigation and fogging system with temperature predictive capability for greenhouse farming [Текст] / O.K. Ogidan, I. Elesemoyo, H. Babalola // Proceedings of the 8th URSI-NG Annual Conference (URSI-NG 2024). Advances in Physics Research. – 2025. – С. 157–167. – DOI: 10.2991/978-94-6463-644-4_15.
21. Siyal A.A., Babiker A.E., Bainbridge D.A. Subsurface porous clay pipe irrigation: a sustainable solution for agriculture in arid regions [Текст] / A.A. Siyal, A.E. Babiker, D.A. Bainbridge // Academic Journal of Agricultural Research. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 1–7. – DOI: 10.15413/ajar.2024.0101.

22. Di Biase R., Calabritto M., Mininni A.N. et al. Microtensiometer-based trunk water potential as a plant water status indicator in kiwifruit under different soil water availability [Текст] / R. Di Biase, M. Calabritto, A.N. Mininni et al. // *Irrigation Science*. – 2025. – Т. 43. – С. 937–954. – DOI: 10.1007/s00271-025-01020-1.
23. Rasheed M.W., Tang J., Sarwar A., Shah S., Saddique N., Khan M.U., Imran Khan M., Nawaz S., Shamshiri R.R., Aziz M. et al. Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: a comprehensive review [Текст] / M.W. Rasheed, J. Tang, A. Sarwar, S. Shah, N. Saddique, M.U. Khan, M. Imran Khan, S. Nawaz, R.R. Shamshiri, M. Aziz et al. // *Sustainability*. – 2022. – Т. 14, № 18. – Art. 11538. – DOI: 10.3390/su141811538.
24. Abdelmoneim A.A., Al Kalaany C.M., Khadra R., Derardja B., Dragonetti G. Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications [Текст] / A.A. Abdelmoneim, C.M. Al Kalaany, R. Khadra, B. Derardja, G. Dragonetti // *Sensors*. – 2025. – Т. 25, № 2. – Art. 343. – DOI: 10.3390/s25020343.
25. Makni N., Collu R., Barbaro M. Development of optical and electrical sensors for non-invasive monitoring of plant water status [Текст] / N. Makni, R. Collu, M. Barbaro // *Journal of Sensor and Actuator Networks*. – 2025. – Т. 14, № 5. – Art. 103. – DOI: 10.3390/jsan14050103.
26. Shawon S.M., Neha N.I., Jui A.N., Dey N., Zubair H.T. Advances in soil moisture measurement techniques and prediction using artificial intelligence: an extensive and systematic review [Текст] / S.M. Shawon, N.I. Neha, A.N. Jui, N. Dey, H.T. Zubair // *Smart Agricultural Technology*. – 2025. – Т. 12. – Art. 101613. – DOI: 10.1016/j.atech.2025.101613.
27. Bhatt R., Arora S. Soil matric potential-based irrigation using tensiometer for conserving irrigation water [Текст] / R. Bhatt, S. Arora // *Current Science*. – 2021. – Т. 121, № 2. – С. 197–200.
28. Ezekiel O., Danbaki B.A., Fabumi G.T. Performance evaluation of gypsum block, tensiometer and moisture sensor for soil moisture content determination [Текст] / O. Ezekiel, B.A. Danbaki, G.T. Fabumi // *Journal of Agricultural Engineering and Technology*. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 103–111.
29. Gümüşer M.A., Pichlhöfer A., Korjenic A. A comparison of capacitive soil moisture sensors in different substrates for use in irrigation systems [Текст] / M.A. Gümüşer, A. Pichlhöfer, A. Korjenic // *Sensors*. – 2025. – Т. 25. – Art. 1461. – DOI: 10.3390/s25051461.
30. Ebstu E., Hatiye S., Goshime D. et al. Development and testing of a low-cost soil moisture sensor for real-time irrigation scheduling [Текст] / E. Ebstu, S. Hatiye, D. Goshime et al. // *Irrigation and Drainage*. – 2025. – С. 1–15. – DOI: 10.1002/ird.70026.
31. Bagada P., Damor P.A., Patel R.J., Patel K.C., Patel D.J., Parmar H.V., Rank P.H., Vekariya P.B. Enhancing soil moisture sensors for optimized agricultural water management: a comprehensive review [Текст] / P. Bagada, P.A. Damor, R.J. Patel, K.C. Patel, D.J. Patel, H.V. Parmar, P.H. Rank, P.B. Vekariya // *Plant Archives*. – 2025. – Т. 25, специальный выпуск ICTPAIRS-JAU. – С. 879–888. – DOI: 10.51470/PLANTARCHIVES.2025.v25.SP.ICTPAIRS-126.
32. Yao Y., Fan J., Li J. A review of advanced soil moisture monitoring techniques for slope stability assessment [Текст] / Y. Yao, J. Fan, J. Li // *Water*. – 2025. – Т. 17, № 3. – Art. 390. – DOI: 10.3390/w17030390.
33. Pavanello M., Bordoni M., Vivaldi V., Reguzzoni M., Tamburini A., Villa F., Meisina C. Low-cost sensors for the measurement of soil water content for rainfall-induced shallow landslide early warning systems [Текст] / M. Pavanello, M. Bordoni, V. Vivaldi, M. Reguzzoni, A. Tamburini, F. Villa, C. Meisina // *Water*. – 2024. – Т. 16, № 22. – Art. 3244. – DOI: 10.3390/w16223244.
34. Zhang Z., Ou H., Shi Y., Ye Y., Sang Y., Zhang S., Zhang J. Application of cosmic-ray neutron probes for measuring soil moisture in rocky areas of the Taihang Mountains, North China [Текст] / Z. Zhang, H. Ou, Y. Shi, Y. Ye, Y. Sang, S. Zhang, J. Zhang // *Vadose Zone Journal*. – 2023. – Т. 22. – Art. e20291. – DOI: 10.1002/vzj2.20291.
35. Vahidi M., Shafian S., Frame W.H. Precision soil moisture monitoring through drone-based hyperspectral imaging and PCA-driven machine learning [Текст] / M. Vahidi, S. Shafian, W.H. Frame // *Sensors*. – 2025. – Т. 25, № 3. – Art. 782. – DOI: 10.3390/s25030782.
36. Díaz-Delgado R., Buysse P., Peres T., Houet T., Hamon Y., Faucheux M., Fovort O. Mapping soil moisture using drones: challenges and opportunities [Текст] / R. Díaz-Delgado, P. Buysse, T. Peres, T. Houet, Y. Hamon, M. Faucheux, O. Fovort // *Engineering Proceedings*. – 2025. – Т. 94, № 1. – Art. 18. – DOI: 10.3390/engproc2025094018.
37. Vaccaro G., Fusco M., Alagna V., Franco L., Motisi A., Iovino M. Assessing microtensiometers for monitoring stem water potential in mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) orchard under different irrigation regimes [Текст] / G. Vaccaro, M. Fusco, V. Alagna, L. Franco, A. Motisi, M. Iovino // *Agricultural Water Management*. – 2025. – Т. 320. – Art. 109873. – DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109873.
38. Makni N., Collu R., Barbaro M. Development of optical and electrical sensors for non-invasive monitoring of plant water status [Текст] / N. Makni, R. Collu, M. Barbaro // *Journal of Sensor and Actuator Networks*. – 2025. – Т. 14, № 5. – Art. 103. – DOI: 10.3390/jsan14050103.
39. Duguma A.L., Bai X. How the internet of Things technology improves agricultural efficiency [Текст] / A.L. Duguma, X. Bai // *Artificial Intelligence Review*. – 2025. – Т. 58. – Art. 63. – DOI: 10.1007/s10462-024-11046-0.

40. Liu L., Cheng W., Kuo H.-W. A narrative review on smart sensors and IoT solutions for sustainable agriculture and aquaculture practices [Текст] / L. Liu, W. Cheng, H.-W. Kuo // Sustainability. – 2025. – Т. 17, № 12. – Art. 5256. – DOI: 10.3390/su17125256.
41. Zhang T., Cai J., Wang S., Lv L., Yuan D., Zeng X., Li J., Li Y. Identification and expression analysis of the ethylene response factor gene family in tea plant (*Camellia sinensis*) [Текст] / T. Zhang, J. Cai, S. Wang, L. Lv, D. Yuan, X. Zeng, J. Li, Y. Li // Agronomy. – 2023. – Т. 13, № 7. – Art. 1900. – DOI: 10.3390/agronomy13071900.
42. Wang P., Su G., Yang W., Jing P. Research on safety interlock system design and control experiment of combined support and anchor equipment [Текст] / P. Wang, G. Su, W. Yang, P. Jing // Sensors. – 2022. – Т. 22, № 16. – Art. 6058. – DOI: 10.3390/s22166058.
43. Lakhiar I.A., Yan H., Zhang C., Wang G., He B., Hao B., Han Y., Wang B., Bao R., Syed T.N. et al. A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints [Текст] / I.A. Lakhiar, H. Yan, C. Zhang, G. Wang, B. He, B. Hao, Y. Han, B. Wang, R. Bao, T.N. Syed et al. // Agriculture. – 2024. – Т. 14, № 7. – Art. 1141. – DOI: 10.3390/agriculture14071141.
44. García L., Parra L., Jimenez J.M., Lloret J., Lorenz P. IoT-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture [Текст] / L. García, L. Parra, J.M. Jimenez, J. Lloret, P. Lorenz // Sensors. – 2020. – Т. 20, № 4. – Art. 1042. – DOI: 10.3390/s20041042.
45. Qian M., Qian C., Xu G., Tian P., Yu W. Smart irrigation systems from cyber–physical perspective: state of art and future directions [Текст] / M. Qian, C. Qian, G. Xu, P. Tian, W. Yu // Future Internet. – 2024. – Т. 16, № 7. – Art. 234. – DOI: 10.3390/fi16070234.
46. Zhang Y., Wang X., Jin L., Ni J., Zhu Y., Cao W., Jiang X. Research and development of an IoT smart irrigation system for farmland based on LoRa and edge computing [Текст] / Y. Zhang, X. Wang, L. Jin, J. Ni, Y. Zhu, W. Cao, X. Jiang // Agronomy. – 2025. – Т. 15, № 2. – Art. 366. – DOI: 10.3390/agronomy15020366.
47. Rehman W., Koondhar M.A., Afridi S.K., Albasha L., Smaili I.H., Touti E., Aoudia M., Zahrouni W., Mahariq I., Ahmed M.M.R. The role of 5G network in revolutionizing agriculture for sustainable development: a comprehensive review [Текст] / W. Rehman, M.A. Koondhar, S.K. Afridi, L. Albasha, I.H. Smaili, E. Touti, M. Aoudia, W. Zahrouni, I. Mahariq, M.M.R. Ahmed // Energy Nexus. – 2025. – Т. 17. – Art. 100368. – DOI: 10.1016/j.nexus.2025.100368.
48. Turnip A. Design of smart farming communication and web interface: an implementation using MQTT protocol [Текст] / A. Turnip // Open Agriculture. – 2023. – Т. 8. – С. 97–105. – DOI: 10.1515/opag-2022-0159.
49. Liopa-Tsakalidi A., Thomopoulos V., Barouchas P., Boursianis A.D., Goudos S.K. A LoRaWAN-based IoT platform for smart irrigation in olive groves [Текст] / A. Liopa-Tsakalidi, V. Thomopoulos, P. Barouchas, A.D. Boursianis, S.K. Goudos // Smart Agricultural Technology. – 2024. – Т. 9. – Art. 100673. – DOI: 10.1016/j.atech.2024.100673.
50. Taji K., Ghanimi F. LoRaWAN-based smart irrigation systems: a literature review [Текст] / K. Taji, F. Ghanimi // Artificial Intelligence, Big Data, IoT and Blockchain in Healthcare: From Concepts to Applications / под ред. Y. Farhaoui. – Cham: Springer, 2024. – Information Systems Engineering and Management. – Т. 6. – С. 22–34. – DOI: 10.1007/978-3-031-65018-5_3.
51. Liu X., Zhao Z., Rezaeipanah A. Intelligent and automatic irrigation system based on Internet of Things using fuzzy control technology [Текст] / X. Liu, Z. Zhao, A. Rezaeipanah // Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – Art. 14577. – DOI: 10.1038/s41598-025-98137-2.
52. Majumdar P., Bhattacharya D., Mitra S. Utilities of 5G communication technologies for promoting advancement in Agriculture 4.0: recent trends, research issues and review of literature [Текст] / P. Majumdar, D. Bhattacharya, S. Mitra // 5G and Beyond / под ред. B. Bhushan, S.K. Sharma, R. Kumar, I. Priyadarshini. – Singapore: Springer, 2023. – Springer Tracts in Electrical and Electronics Engineering. – С. 111–125. – DOI: 10.1007/978-981-99-3668-7_6.
53. Mohiuddin M., Islam M.S., Shanjida S. Internet of Things (IoT)-based smart agriculture irrigation and monitoring system using Ubidots server [Текст] / M. Mohiuddin, M.S. Islam, S. Shanjida // Engineering Proceedings. – 2024. – Т. 82, № 1. – Art. 99. – DOI: 10.3390/ecsa-11-20528.
54. Deng B. Design of smart agriculture Internet of Things system based on ZigBee and CC2530 module [Текст] / B. Deng // Proceedings of the 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA). – Changchun, China, 2024. – С. 1165–1168. – DOI: 10.1109/EEBDA60612.2024.10485730.
55. Zhong X., Qiao R., Wang X. Application of ZigBee technology in smart soil temperature and humidity control systems [Текст] / X. Zhong, R. Qiao, X. Wang // Frontiers in Science and Engineering. – 2024. – Т. 4, № 6. – С. 135–140. – DOI: 10.54691/z66ef284.
56. Craven S., Bee A., Sanders B., Hammari E., Bond C., Kerry R., Hansen N., Mazzeo B.A. Smart Bluetooth stakes: deployment of soil moisture sensors with rotating high-gain antenna receiver on center pivot irrigation boom in a commercial wheat field [Текст] / S. Craven, A. Bee, B. Sanders,

- E. Hammari, C. Bond, R. Kerry, N. Hansen, B.A. Mazzeo // *Sensors*. – 2025. – T. 25, № 17. – Art. 5537. – DOI: 10.3390/s25175537.
57. Al Jebory Z., Miry A.H., Aramice G.A. **Agriculture based on wireless sensor network: literature survey** [Текст] / Z. Al Jebory, A.H. Miry, G.A. Aramice // *Wasit Journal of Engineering Sciences*. – 2024. – T. 12, № 4. – C. 171–190. – DOI: 10.31185/ejuow.Vol12.Iss4.610.
58. Hargreave K., Liu V., Kane L. **Optimising Wi-Fi HaLow connectivity: a framework for variable environmental and application demands** [Текст] / K. Hargreave, V. Liu, L. Kane // *Electronics*. – 2025. – T. 14, № 13. – Art. 2733. – DOI: 10.3390/electronics14132733.
59. Puig F., Rodríguez Díaz J.A., Soriano M.A. **Development of a low-cost open-source platform for smart irrigation systems** [Текст] / F. Puig, J.A. Rodríguez Díaz, M.A. Soriano // *Agronomy*. – 2022. – T. 12, № 12. – Art. 2909. – DOI: 10.3390/agronomy12122909.
60. Singh A.K., Shreya, Khatoon S. et al. **A comprehensive review of recent advances in intelligent controller development for smart irrigation systems** [Текст] / A.K. Singh, Shreya, S. Khatoon et al. // *Discover Computing*. – 2025. – T. 28. – Art. 239. – DOI: 10.1007/s10791-025-09762-4.
61. Ahmad U., Sohel F. **Evaluating decision support systems for precision irrigation and water use efficiency** [Текст] / U. Ahmad, F. Sohel // *Digital Engineering*. – 2025. – T. 4. – Art. 100038. – DOI: 10.1016/j.dte.2025.100038.
62. Bryant C.J., Spencer G.D., Gholson D.M., Plumblee M.T., Dodds D.M., Oakley G.R., Reynolds D.Z., Krutz L.J. **Development of a soil moisture sensor-based irrigation scheduling program for the midsouthern United States** [Текст] / C.J. Bryant, G.D. Spencer, D.M. Gholson, M.T. Plumblee, D.M. Dodds, G.R. Oakley, D.Z. Reynolds, L.J. Krutz // *Crop, Forage & Turfgrass Management*. – 2023. – T. 9. – Art. e20217. – DOI: 10.1002/cft2.20217.
63. Pereira L.S., Paredes P., Jovanovic N. **Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach** [Текст] / L.S. Pereira, P. Paredes, N. Jovanovic // *Agricultural Water Management*. – 2020. – T. 241. – Art. 106357. – DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106357.
64. Vélez S., Martínez-Peña R., Valente J., Ariza-Sentís M., Sirnik I., Pardo M.Á. **A decision support system (DSS) for irrigation oversizing diagnosis using geospatial canopy data and irrigation ecolabels** [Текст] / S. Vélez, R. Martínez-Peña, J. Valente, M. Ariza-Sentís, I. Sirnik, M.Á. Pardo // *AgriEngineering*. – 2025. – T. 7, № 12. – Art. 429. – DOI: 10.3390/agriengineering7120429.
65. Bhatti S., Heeren D.M., O'Shaughnessy S.A. et al. **Toward automated irrigation management with integrated crop water stress index and spatial soil water balance** [Текст] / S. Bhatti, D.M. Heeren, S.A. O'Shaughnessy et al. // *Precision Agriculture*. – 2023. – T. 24, № 6. – C. 2223–2247. – DOI: 10.1007/s11119-023-10038-4.
66. Umutohi L., Samadi V. **Application of machine learning approaches in supporting irrigation decision making: a review** [Текст] / L. Umutohi, V. Samadi // *Agricultural Water Management*. – 2024. – T. 294. – Art. 108710. – DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108710.
67. Saggi M.K., Jain S. **A survey towards decision support system on smart irrigation scheduling using machine learning approaches** [Текст] / M.K. Saggi, S. Jain // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2022. – T. 29, № 6. – C. 4455–4478. – DOI: 10.1007/s11831-022-09746-3.
68. Jia W., Zhang Y., Wei Z., Zheng Z., Xie P. **Daily reference evapotranspiration prediction for irrigation scheduling decisions based on the hybrid PSO-LSTM model** [Текст] / W. Jia, Y. Zhang, Z. Wei, Z. Zheng, P. Xie // *PLOS ONE*. – 2023. – T. 18, № 4. – Art. e0281478. – DOI: 10.1371/journal.pone.0281478.
69. Yu J., Qu Q., Peng S., Wei X., Li Y., Sun C. **Deep learning for intelligent irrigation decision-making: a review** [Текст] / J. Yu, Q. Qu, S. Peng, X. Wei, Y. Li, C. Sun // *Agricultural Water Management*. – 2025. – T. 320. – Art. 109836. – DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109836.

REFERENCES:

1. Islyami A., Aldashev A., Thomas T.S., Dunston S. **Impact of climate change on agriculture in Kazakhstan. Silk Road: A Journal of Eurasian Development**. 2020, vol. 2, iss. 1, pp. 66–88. <https://doi.org/10.16997/srjed.19>.
2. Nagaibayeva Z., Amantayeva J., Mazhitova Z., Bissembayeva Z., Nessipkaliyev D. **Irrigation systems of the North-Kazakhstan region during the development of virgin and fallow lands (1970s). E3S Web of Conferences**, 2023, vol. 371, art. 06016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337106016>.
3. Hasenbeck E.C., Scruggs C.E., Morgan M., Wang J., Webster A.J., Gomez C.M. **Perspectives on innovative approaches in agriculture to managing water scarcity in the Middle Rio Grande Basin. Agriculture**, 2025, vol. 15, art. 793. <https://doi.org/10.3390/agriculture15070793>.
4. Luque-Sánchez Á., Díaz-Cabrera J.M., Perea P. **Identifying strategies to enhance irrigation efficiency under drought conditions. Journal of Environmental Management**, 2025, vol. 394, art. 127439. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127439>.
5. Farag A.A., El-Aziz M.A.A., El-Husseiny A.M. **Effects of irrigation systems and water management strategies on soil chemical properties and citrus tree productivity in clayey soils. Scientific Reports**, 2025, vol. 15, art. 33324. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19575-6>.

6. Yao Y., Thiery W., Ducharne A. et al. Irrigation-induced land water depletion aggravated by climate change. *Nature Water*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s44221-025-00529-1>.
7. Hrozencik A., Perez-Quesada G., Donahue H. The development and current challenges of irrigated agriculture in the western U.S. *Agricultural Water Management*, 2025, vol. 315, art. 109474. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109474>.
8. Vranešević M., Mešeldžija M., Grabić J., Zemunac R., Boukalova Z. Irrigation water quality in a framework of sustainable development goal 6: a review of challenges, impacts, policy alignments. *Frontiers in Agronomy*, 2025, vol. 7, art. 1580338. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1580338>.
9. Hoffmann P., Villamayor-Tomas S. Irrigation modernization and the efficiency paradox: a meta-study through the lens of Networks of Action Situations. *Sustainability Science*, 2023, vol. 18, pp. 181–199. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01136-9>.
10. Chávez C., Fuentes S., Fuentes C., Brambila-Paz F., Trejo-Alonso J. How surface irrigation contributes to climate change resilience – a case study of practices in Mexico. *Sustainability*, 2022, vol. 14, issue 13, art. 7689. <https://doi.org/10.3390/su14137689>.
11. Kumar P. A review on types of irrigation system and their advantages. *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 2018, vol. 5, iss. 3, pp. 79–84.
12. Yang P., Wu L., Cheng M., Fan J., Li S., Wang H., Qian L. Review on drip irrigation: impact on crop yield, quality, and water productivity in China. *Water*, 2023, vol. 15, art. 1733. <https://doi.org/10.3390/w15091733>.
13. Masseroni D., et al. Assessing the water conservation potential of optimized surface-irrigation systems under changing climate conditions. *Irrigation Science*, 2024, vol. 42, art. 57. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00876-5>.
14. Salman A.K., et al. Assessing irrigation system efficiency within the water-energy nexus: a focus on surface irrigation districts. *Agricultural Water Management*, 2025, vol. 317, art. 109665. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109665>.
15. Abd-Elaty I., Ramadan E.M., Elbagory I.A., et al. Optimizing irrigation systems for water efficiency and groundwater sustainability in the coastal Nile Delta. *Agricultural Water Management*, 2024, vol. 304, art. 109064. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109064>.
16. Chauhdary J.N., Li H., Jiang Y., et al. Advances in sprinkler irrigation: a review in the context of precision irrigation for crop production. *Agronomy*, 2024, vol. 14, iss. 1, art. 47. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010047>.
17. Santini A., Masiero M., Amato G., Pettenella D.M. From flood to drip irrigation: a review of irrigation modernization trade-offs. *Water*, 2025, vol. 17, iss. 20, art. 3018. <https://doi.org/10.3390/w17203018>.
18. Guo H., Li S. A review of drip irrigation's effect on water, carbon fluxes, and crop growth in farmland. *Water*, 2024, vol. 16, iss. 15, art. 2206. <https://doi.org/10.3390/w16152206>.
19. Kumar S.V., Singh C.D., Upendar K. Review on IoT based precision irrigation system in agriculture. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2020, vol. 39, issue 45, pp. 15–26. <https://doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i4531156>.
20. Ogidan O.K., Elesemoyo I., Babalola H. Automated irrigation and fogging system with temperature predictive capability for greenhouse farming. *Proceedings of the 8th URSI-NG Annual Conference (URSI-NG 2024)*, 2025, Advances in Physics Research, pp. 157–167. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-644-4_15.
21. Siyal A.A., Babiker A.E., Bainbridge D.A. Subsurface porous clay pipe irrigation: a sustainable solution for agriculture in arid regions. *Academic Journal of Agricultural Research*, 2024, vol. 12, iss. 1, pp. 001–007. <https://doi.org/10.15413/ajar.2024.0101>.
22. Di Biase R., Calabritto M., Mininni A.N., et al. Microtensiometer-based trunk water potential as a plant water status indicator in kiwifruit under different soil water availability. *Irrigation Science*, 2025, vol. 43, pp. 937–954. <https://doi.org/10.1007/s00271-025-01020-1>.
23. Rasheed M.W., Tang J., Sarwar A., et al. Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: a comprehensive review. *Sustainability*, 2022, vol. 14, issue 18, art. 11538. <https://doi.org/10.3390/su141811538>.
24. Abdelmoneim A.A., Al Kalaany C.M., Khadra R., Derardja B., Dragonetti G. Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. *Sensors*, 2025, vol. 25, iss. 2, art. 343. <https://doi.org/10.3390/s25020343>.
25. Makni N., Collu R., Barbaro M. Development of optical and electrical sensors for non-invasive monitoring of plant water status. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2025, vol. 14, iss. 5, art. 103. <https://doi.org/10.3390/jsan14050103>.
26. Shawon S.M., Neha N.I., Jui A.N., Dey N., Zubair H.T. Advances in soil moisture measurement techniques and prediction using artificial intelligence: an extensive and systematic review. *Smart Agricultural Technology*, 2025, art. 101613. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101613>.
27. Bhatt R., Arora S. Soil matric potential-based irrigation using tensiometer for conserving irrigation water. *Current Science*, 2021, vol. 121, iss. 2, pp. 197–200.
28. Ezekiel O., Danbaki B.A., Fabumi G.T. Performance evaluation of gypsum block, tensiometer and moisture sensor for soil moisture content determination. *Journal of Agricultural Engineering and Technology*, 2021, vol. 26, iss. 2, pp. 103–111.

29. Gümüşer M.A., Pichlhöfer A., Korjenic A. A comparison of capacitive soil moisture sensors in different substrates for use in irrigation systems. *Sensors*, 2025, vol. 25, art. 1461. <https://doi.org/10.3390/s25051461>.
30. Ebstu E., Hatiye S., Goshime D., et al. Development and testing of a low-cost soil moisture sensor for real-time irrigation scheduling. *Irrigation and Drainage*, 2025, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1002/ird.70026>.
31. Bagada P., Damor P.A., Patel R.J., et al. Enhancing soil moisture sensors for optimized agricultural water management: a comprehensive review. *Plant Archives*, 2025, vol. 25, special issue (ICTPAIRS-JAU, Junagadh), pp. 879–888. <https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2025.v25.SP.ICTPAIRS-126>.
32. Yao Y., Fan J., Li J. A review of advanced soil moisture monitoring techniques for slope stability assessment. *Water*, 2025, vol. 17, iss. 3, art. 390. <https://doi.org/10.3390/w17030390>.
33. Pavanello M., Bordonni M., Vivaldi V., et al. Low-cost sensors for the measurement of soil water content for rainfall-induced shallow landslide early warning systems. *Water*, 2024, vol. 16, issue 22, art. 3244. <https://doi.org/10.3390/w16223244>.
34. Zhang Z., Ou H., Shi Y., et al. Application of cosmic-ray neutron probes for measuring soil moisture in rocky areas of the Taihang Mountains, North China. *Vadose Zone Journal*, 2023, vol. 22, art. e20291. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20291>.
35. Vahidi M., Shafian S., Frame W.H. Precision soil moisture monitoring through drone-based hyperspectral imaging and PCA-driven machine learning. *Sensors*, 2025, vol. 25, iss. 3, art. 782. <https://doi.org/10.3390/s25030782>.
36. Díaz-Delgado R., Buysse P., Peres T., et al. Mapping soil moisture using drones: challenges and opportunities. *Engineering Proceedings*, 2025, vol. 94, issue 1, art. 18. <https://doi.org/10.3390/engproc2025094018>.
37. Vaccaro G., Fusco M., Alagna V., et al. Assessing microtensiometers for monitoring stem water potential in mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) orchard under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 2025, vol. 320, art. 109873. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109873>.
38. Makni N., Collu R., Barbaro M. Development of optical and electrical sensors for non-invasive monitoring of plant water status. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2025, vol. 14, iss. 5, art. 103. <https://doi.org/10.3390/jsan14050103>.
39. Duguma A.L., Bai X. How the Internet of Things technology improves agricultural efficiency. *Artificial Intelligence Review*, 2025, vol. 58, art. 63. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0>.
40. Liu L., Cheng W., Kuo H.-W. A narrative review on smart sensors and IoT solutions for sustainable agriculture and aquaculture practices. *Sustainability*, 2025, vol. 17, iss. 12, art. 5256. <https://doi.org/10.3390/su17125256>.
41. Zhang T., Cai J., Wang S., et al. Identification and expression analysis of the ethylene response factor gene family in tea plant (*Camellia sinensis*). *Agronomy*, 2023, vol. 13, iss. 7, art. 1900. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071900>.
42. Wang P., Su G., Yang W., Jing P. Research on safety interlock system design and control experiment of combined support and anchor equipment. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 16, art. 6058. <https://doi.org/10.3390/s22166058>.
43. Lakhari I.A., Yan H., Zhang C., et al. A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints. *Agriculture*, 2024, vol. 14, iss. 7, art. 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>.
44. García L., Parra L., Jimenez J.M., Lloret J., Lorenz P. IoT-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 4, art. 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>.
45. Qian M., Qian C., Xu G., Tian P., Yu W. Smart irrigation systems from cyber-physical perspective: state of art and future directions. *Future Internet*, 2024, vol. 16, iss. 7, art. 234. <https://doi.org/10.3390/fi16070234>.
46. Zhang Y., Wang X., Jin L., et al. Research and development of an IoT smart irrigation system for farmland based on LoRa and edge computing. *Agronomy*, 2025, vol. 15, iss. 2, art. 366. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020366>.
47. Rehman W., Koondhar M.A., Afridi S.K., et al. The role of 5G network in revolutionizing agriculture for sustainable development: a comprehensive review. *Energy Nexus*, 2025, vol. 17, art. 100368. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100368>.
48. Turnip A. Design of smart farming communication and web interface: an implementation using MQTT protocol. *Open Agriculture Journal*, 2023, vol. 8, pp. 97–105. <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0159>.
49. Liopa-Tsakalidi A., Thomopoulos V., Barouchas P., Boursianis A.D., Goudos S.K. A LoRaWAN-based IoT platform for smart irrigation in olive groves. *Smart Agricultural Technology*, 2024, vol. 9, art. 100673. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100673>.
50. Taji K., Ghanimi F. LoRaWAN-based smart irrigation systems: a literature review. In: Farhaoui Y. (ed.) *Artificial Intelligence, Big Data, IoT and Blockchain in Healthcare: From Concepts to Applications*. BDBI 2024. *Information Systems Engineering and Management*, vol. 6. Cham: Springer, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65018-5_3.

51. Liu X., Zhao Z., Rezaeipanah A. Intelligent and automatic irrigation system based on Internet of Things using fuzzy control technology. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, art. 14577. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98137-2>.
52. Majumdar P., Bhattacharya D., Mitra S. Utilities of 5G communication technologies for promoting advancement in Agriculture 4.0: recent trends, research issues and review of literature. *5G and Beyond. Springer Tracts in Electrical and Electronics Engineering*. Singapore: Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3668-7_6.
53. Mohiuddin M., Islam M.S., Shanjida S. Internet of Things (IoT)-based smart agriculture irrigation and monitoring system using Ubidots server. *Engineering Proceedings*, 2024, vol. 82, iss. 1, art. 99. <https://doi.org/10.3390/ecsa-11-20528>.
54. Deng B. Design of smart agriculture Internet of Things system based on ZigBee and CC2530 module. *Proceedings of the 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)*, Changchun, China, 2024, pp. 1165–1168. <https://doi.org/10.1109/EEBDA60612.2024.10485730>.
55. Zhong X., Qiao R., Wang X. Application of ZigBee technology in smart soil temperature and humidity control systems. *Frontiers in Science and Engineering*, 2024, vol. 4, iss. 6, pp. 135–140. <https://doi.org/10.54691/z66ef284>.
56. Craven S., Bee A., Sanders B., et al. Smart Bluetooth stakes: deployment of soil moisture sensors with rotating high-gain antenna receiver on center pivot irrigation boom in a commercial wheat field. *Sensors*, 2025, vol. 25, iss. 17, art. 5537. <https://doi.org/10.3390/s25175537>.
57. Al Jebory Z., Miry A.H., Aramice G.A. Agriculture based on wireless sensor network: literature survey. *Wasit Journal of Engineering Sciences*, 2024, vol. 12, iss. 4, pp. 171–190. <https://doi.org/10.31185/ejuow.Vol12.Iss4.610>.
58. Hargreave K., Liu V., Kane L. Optimising Wi-Fi HaLow connectivity: a framework for variable environmental and application demands. *Electronics*, 2025, vol. 14, iss. 13, art. 2733. <https://doi.org/10.3390/electronics14132733>.
59. Puig F., Rodríguez Díaz J.A., Soriano M.A. Development of a low-cost open-source platform for smart irrigation systems. *Agronomy*, 2022, vol. 12, iss. 12, art. 2909. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122909>.
60. Singh A.K., Shreya, Khatoon S., et al. A comprehensive review of recent advances in intelligent controller development for smart irrigation systems. *Discover Computing*, 2025, vol. 28, art. 239. <https://doi.org/10.1007/s10791-025-09762-4>.
61. Ahmad U., Sohail F. Evaluating decision support systems for precision irrigation and water use efficiency. *Digital Engineering*, 2025, vol. 4, art. 100038. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100038>.
62. Bryant C.J., Spencer G.D., Gholson D.M., et al. Development of a soil moisture sensor-based irrigation scheduling program for the midsouthern United States. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 2023, vol. 9, art. e20217. <https://doi.org/10.1002/cft2.20217>.
63. Pereira L.S., Paredes P., Jovanovic N. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 2020, vol. 241, art. 106357. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357>.
64. Vélez S., Martínez-Peña R., Valente J., Ariza-Sentís M., Sirnik I., Pardo M.Á. A Decision Support System (DSS) for Irrigation Oversizing Diagnosis Using Geospatial Canopy Data and Irrigation Ecolabels. *AgriEngineering*, 2025, vol. 7, iss. 12, art. 429. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7120429>.
65. Bhatti S., Heeren D.M., O'Shaughnessy S.A. et al. Toward automated irrigation management with integrated crop water stress index and spatial soil water balance. *Precision Agriculture*, 2023, vol. 24, iss. 6, pp. 2223–2247. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10038-4>.
66. Umutoni L., Samadi V. Application of machine learning approaches in supporting irrigation decision making: a review. *Agricultural Water Management*, 2024, vol. 294, art. 108710. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108710>.
67. Saggi M.K., Jain S. A survey towards decision support system on smart irrigation scheduling using machine learning approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, vol. 29, iss. 6, pp. 4455–4478. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09746-3>.
68. Jia W., Zhang Y., Wei Z., Zheng Z., Xie P. Daily reference evapotranspiration prediction for irrigation scheduling decisions based on the hybrid PSO-LSTM model. *PLOS ONE*, 2023, vol. 18, issue 4, art. e0281478. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281478>.
69. Yu J., Qu Q., Peng S., Wei X., Li Y., Sun C. Deep learning for intelligent irrigation decision-making: a review. *Agricultural Water Management*, 2025, vol. 320, art. 109836. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109836>.

Дата поступления: 31 мая 2026 г. Принято: 03 июня 2026 г.

Опубликовано: 30 сентября 2026 г.

Сведения об авторах:

Молдахметов Саят Сайранович* – PhD, Researcher (исследователь) кафедры энергетики и радиоэлектроники, «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, тел.: 87713616822, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz.

Абдуалиев Есенгельді Оспанұлы – докторант 2 курса ОП 8D07103 – Электроэнергетика, «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», Республика Казахстан, 150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, тел.: 87089515354, e-mail: eoabdualiev@ku.edu.kz.

Молдахметов Саят Сайранович* – PhD, «Энергетика және радиоэлектроника» кафедрасының зерттеушісі, «М.Козыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», Қазақстан Республикасы, 150000 Петропавл қ., Пушкин көш., 86; тел.: 87713616822, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz.

Абдуалиев Есенгельді Оспанұлы – «8D07103 – Электр энергетикасы» білім беру бағдарламасының 2-курс докторанты, «М. Козыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», 150000, Қазақстан Республикасы, Петропавл қ., Пушкин көш., 86; тел.: 87089515354, e-mail: eoabdualiev@ku.edu.kz.

Moldakhmetov Sayat Sairanovich* – PhD, Researcher, Department of power engineering and radio electronics, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, 150000, Petropavlovsk, 86 Pushkin Str., tel.: 87713616822, e-mail: ssmoldahmetov@ku.edu.kz.

Abdualiyev Yessengeldi Ospanuly – 2nd-year PhD student, “8D07103 – Electric Power Engineering” educational program, M. Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, 150000, Petropavlovsk, 86 Pushkin Str., tel.: 87089515354, e-mail: eoabdualiev@ku.edu.kz.

XFTAP 68.41.39

ӨОЖ 631.95:581.5:546.3

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631161>

МЫС-АЛТЫН КЕНДЕРІ ҮЙНДІЛЕРІНДЕГІ ӨСІМДІКТЕР ҚАУЫМДАСТЫҚТАРЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫ ЖӘНЕ ЭЛЕМЕНТТЕРДІҢ БИОЖИНАҚТАЛУЫ: ЗАМАНАУИ ЗЕРТТЕУ ТӘСІЛДЕРІ

Нугманов А.Б. – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, ауыл шаруашылығы ғылымдары факультетінің деканы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КеАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Божекенова Ж.Т.* – «8D05101-Биология» БББ докторанты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КеАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Ысқақ А. – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, қолданбалы биотехнологиялық ғылыми-зерттеу институтының директоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КеАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Суюндиқова Ж.Т. – биология ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, «Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы.

Мыс-алтын кен орындарының қалдық үйінділері мен қоймаларында өсімдік жамылғысының қалыптасу заңдылықтары мен элементтердің биожинақталу үдерістері жайлы соңғы жылдардағы ғылыми деректерді осы шолу мақаласында жүйелендірдік. Талдауға 2000-2025 жылдар аралығында Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar дерекқорларынан алынған жарияланымдар енгізілді; негізгі талап – мақаланың рецензиядан өтуі, сандық биоаккумуляция көрсеткіштерінің болуы және фиторемедияция тиімділігін бағалаудың ұсынылуы.

Жинақталған деректер техногенді субстраттарда өсімдіктің дамуын шектейтін негізгі себептердің қатарында ауыр металдардың жоғары шоғырлануы, органикалық заттар мен қоректік элементтердің тапшылығы, рН-тың экстремалды мәндері тұрғанын көрсетті. Табиғи ортада басым үдерісі – фитостабилизация болып табылады. Әдетте металдар өсімдіктің тамыр жүйесінде қалып, жерүсті мүшелеріне өте аз мөлшерде ауысады. Өсімдіктердің бірнеше түрлері – *Gliricidia sepium*, *Dodonaea viscosa*, *Sorghum bicolor* – жоғары биоаккумуляциялық қабілетімен ерекшеленеді. Ал биокөмір, органикалық қоспалар және PGPR бактерияларын (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) қолданатын көмекші фиторемедияция тәсілі металдың қозғалғыштығын төмендетіп, субстраттың қасиетін жақсартады, соның нәтижесінде рекультивация тиімділігі елеулі түрде артады. Қазақстандық зерттеулер бойынша *Sorghum bicolor* құрғақ континенттік климатта Pb, Cd, Co жинақтауға қабілетті перспективалы дақыл ретінде танылды. Осыған орай, келешекте биожинақталудың молекулалық механизмдерін терең зерттеп, аймақтық ерекшеліктерге сай мелиорациялық технологиялар жасау қажет болады. Қорытындылай келе, табиғи сукцессия үдерісі мен басқарылатын биотехнологиялық шараларды үйлестіру бұзылған жерлерді қалпына келтірудің ең ұтымды жолы екені айқындалды.