

Киян Владимир Сергеевич – PhD, профессор, Биологиялық әртүрлілік және генетикалық ресурстар зертханасының меңгерушісі, «Ұлттық биотехнология орталығы» ЖШС, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ., Қорғалжын тасжолы, 13/5, тел.: 87011216637; e-mail: vskiyang@gmail.com.

Уахит Рабига Сейтбатталқызы – PhD, Биологиялық әртүрлілік және генетикалық ресурстар зертханасының аға ғылыми қызметкері, «Ұлттық биотехнология орталығы» ЖШС, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ., Қорғалжын тасжолы, 13/5, тел.: 87074324940; e-mail: erken.uakhitrabiga@gmail.com.

Богатко Дарья Викторовна. – 7M05104 «Жалпы және қолданбалы биотехнология» мамандығының 2-курс магистранты, «Биотехнология және микробиология» кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қажымұқан көш, 13, 3 ғимарат, тел.: 87057462721; e-mail: d.bgtk2002@gmail.com.

Smagulova Ainura Muratovna* – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Biodiversity and Genetic Resources, National Center for Biotechnology LLP, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 13/5 Korgalzhyn highway, tel.: 87078523791; e-mail: smagulova0114@gmail.com.

Kiyan Vladimir Sergeyevich – PhD, Professor, Head of the Laboratory of Biodiversity and Genetic Resources, National Center for Biotechnology LLP, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 13/5 Korgalzhyn highway, tel.: 87011216637; e-mail: vskiyang@gmail.com.

Uakhit Rabiga Seitbattalkyzy – PhD, Senior Researcher, Laboratory of Biodiversity and Genetic Resources, National Center for Biotechnology LLP, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 13/5 Korgalzhyn highway, tel.: 87074324940; e-mail: erken.uakhitrabiga@gmail.com.

Bogatko Darya Viktorovna – 2nd year Master's student, "7M05104 – General and Applied Biotechnology" educational program, Department of biotechnology and microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University NJSC, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 13 Kazhymukan Str., 13, bld. 3, tel.: 87057462721; e-mail: d.bgtk2002@gmail.com.

МРНТИ 68.85.81

УДК 631.372.8:004.9

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631225>

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗВИТИЮ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В СЕВЕРНОМ КАЗАХСТАНЕ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Салыков Б.Р.* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент) кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Ысқақ А. – кандидат сельскохозяйственных наук, директор научно-исследовательского института прикладной биотехнологии НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Мануйлов Н.В. – инженер кафедры программного обеспечения, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Кабдушева А.С. – PhD кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

В статье рассмотрены современные подходы к цифровой модернизации сельскохозяйственного машиностроения Северного Казахстана. Цель исследования заключалась в разработке методического инструмента для сопоставления цифровой оснащённости отдельных сельскохозяйственных машин и машинно-тракторных парков. Исследование имеет обзорно-аналитический и методический характер. Информационную основу составили научные публикации 2010-2025 годов, отобранные в базах Scopus и Web of Science, а также официальные материалы Европейской комиссии и FAO. Использовались системный и сравнительный анализ, сценарное моделирование и однофакторный анализ чувствительности. Предложен интегральный показатель цифровизации D, учитывающий степень внедрения GPS-навигации, IoT-мониторинга, цифровых платформ управления и инструментов искусственного интеллекта. В отличие от макроуровневых индексов цифровой зрелости, показатель предназначен для оценки цифровой функциональности конкретной машины или парка техники. Весовые коэффициенты предварительно определены на основе оценок 12 специалистов агропромышленного комплекса Костанайской области. Сценарная апробация проведена на пяти вариантах цифровой комплектации. Расчётные значения D изменялись от 0,25 до 1,00. Для базового сценария получено $D = 0,42$. При поочередном изменении весовых коэффициентов на $\pm 20\%$ значение показателя находилось в диапазоне 0,389-0,448 и сохраняло исходную классификационную категорию. Полученные результаты подтверждают внутреннюю устойчивость расчётной мето-

дики, но не заменяют ее проверку на выборке реальных машин и машинно-тракторных парков. Показатель D может применяться при техническом аудите парка, сопоставлении вариантов цифровой модернизации и выборе объектов для пилотного внедрения.

Ключевые слова: сельскохозяйственное машиностроение, цифровая модернизация, машинно-тракторный парк, интегральный показатель цифровизации, GPS-навигация, IoT-мониторинг.

СОЛТҮСТІК ҚАЗАҚСТАНДА ЦИФРЛАНДЫРУ НЕГІЗІНДЕ АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ МАШИНА ЖАСАУ САЛАСЫН ДАМУ ТҮРІНДЕГІ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ

Салықов Б.Р.* – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), Аграрлық техника және көлік кафедрасы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

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

Мануйлов Н.В. – инженер, Бағдарламалық қамтамасыз ету кафедрасы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Қабдушева А.С. – PhD, Аграрлық техника және көлік кафедрасы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Мақалада Солтүстік Қазақстандағы ауыл шаруашылығы машина жасау саласын цифрлық жаңғыртудың заманауи тәсілдері қарастырылған. Зерттеудің мақсаты жекелеген ауыл шаруашылығы машиналары мен машина-трактор парктерінің цифрлық жарақтандырылуын салыстыруға арналған әдістемелік құрал әзірлеу болды. Зерттеу шолу-талдамалық және әдістемелік сипатқа ие. Ақпараттық негізді Scopus және Web of Science дерекқорларынан іріктелген 2010–2025 жылдардағы ғылыми жарияланымдар, сондай-ақ Еуропалық комиссия мен FAO-ның ресми материалдары құрады. Жүйелік және салыстырмалы талдау, сценарийлік модельдеу және бір факторлы сезімталдық талдауы қолданылды. GPS-навигацияны, IoT-мониторингті, цифрлық басқару платформаларын және жасанды интеллект құралдарын енгізу дәрежесін ескеретін цифрландырудың интегралдық көрсеткіші D ұсынылды. Цифрлық жетілудің макродеңгейлік индекстерінен айырмашылығы, бұл көрсеткіш нақты машинаның немесе техника паркінің цифрлық функционалдығын бағалауға арналған. Салмақтық коэффициенттер Қостанай облысының агроөнеркәсіптік кешенінің 12 маманының бағалауы негізінде алдын ала анықталды. Сценарийлік апробация цифрлық жабдықтың бес нұсқасы бойынша жүргізілді. D көрсеткішінің есептік мәндері 0,25-тен 1,00-ге дейін өзгерді. Базалық сценарий үшін $D = 0,42$ мәні алынды. Салмақтық коэффициенттерді кезекпен $\pm 20\%$ -ға өзгерткен кезде көрсеткіштің мәні 0,389–0,448 аралығында болды және бастапқы жіктеу санатын сақтады. Алынған нәтижелер есептеу әдістемесінің ішкі тұрақтылығын растайды, алайда оны нақты машиналар мен машина-трактор парктерінің іріктемесінде тексеруді алмастырмайды. D көрсеткіші техника паркіне техникалық аудит жүргізу, цифрлық жаңғырту нұсқаларын салыстыру және пилоттық енгізу объектілерін таңдау кезінде қолданылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: ауыл шаруашылығы машина жасау, цифрлық жаңғырту, машина-трактор паркі, цифрландырудың интегралдық көрсеткіші, GPS-навигация, IoT-мониторинг, Солтүстік Қазақстан.

MODERN APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL MACHINERY ENGINEERING IN NORTHERN KAZAKHSTAN BASED ON DIGITALIZATION

Salykov B.R.* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Yskak A. – Candidate of Agricultural Sciences, Director of the Research Institute of Applied Biotechnology, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Manuilov N.V. – Engineer, Department of software, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Kabdusheva A.S. – PhD, Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

The article examines modern approaches to the digital modernization of agricultural machinery engineering in Northern Kazakhstan. The aim of the study was to develop a methodological tool for comparing the level of digital equipment of individual agricultural machines and machinery and tractor fleets. The study is review-analytical and methodological in nature. The information framework included scientific publications published in 2010–2025 and selected from the Scopus and Web of Science databases, as well as official materials of the European Commission and FAO. Systematic and comparative analysis, scenario modelling, and one-factor sensitivity analysis were used. An integrated digitalization index (D) was proposed,

incorporating the extent to which GPS navigation, IoT monitoring, digital management platforms, and artificial intelligence tools have been implemented. Unlike macro-level digital maturity indices, the proposed indicator is intended to assess the digital functionality of a specific machine or machinery fleet. The weighting coefficients were preliminarily determined based on assessments by 12 specialists from the agro-industrial complex of the Kostanay region. Scenario-based testing was conducted using five digital configuration options. The calculated values of D index ranged from 0.25 to 1.00. For the baseline scenario, $D = 0.42$ was obtained. When the weighting coefficients were varied individually by $\pm 20\%$, the index ranged from 0.389 to 0.448 while remaining within the initial classification category. The results confirm the internal robustness of the calculation methodology; however, they do not substitute for its validation using a sample of actual machinery and tractor fleets. The D index can be used for technical audits of machinery fleets, comparison of digital modernization options, and selection of equipment for pilot implementation.

Keywords: *agricultural machinery, digital modernization, machinery and tractor fleet, integrated digitalization index, GPS navigation, IoT monitoring.*

Введение

Сельскохозяйственное машиностроение формирует техническую основу аграрного производства. Надежность и технологическая оснащенность машин определяют производительность труда, качество полевых операций, расход топлива и возможность выполнения работ в установленные агротехнические сроки [1, с. 327; 2, с. 1564]. Для Северного Казахстана значение этих факторов особенно велико вследствие масштабов обрабатываемых площадей, специализации региона на производстве зерновых и масличных культур, а также зависимости результатов сельскохозяйственного производства от погодных условий.

Технологическое развитие отрасли сдерживается физическим и моральным износом машинно-тракторного парка, недостаточными темпами его обновления, зависимостью от импортной техники и комплектующих и различиями в технических возможностях сельскохозяйственных предприятий [3; 4]. При этом модернизация не может ограничиваться заменой устаревших машин современными аналогами. Наряду с обновлением парка необходимо повышать надежность деталей и рабочих органов, развивать локализованное производство и внедрять средства цифрового контроля технического состояния машин [5].

Цифровизация стала одним из основных направлений развития сельскохозяйственной техники [6]. GPS-навигация, системы параллельного вождения, телематические устройства, датчики технического состояния, технологии Интернета вещей, цифровые платформы и алгоритмы искусственного интеллекта позволяют контролировать режимы работы машин, сокращать простои, снижать эксплуатационные затраты и повышать точность технологических операций [7, с. 74; 8; 9, с. 4859]. Наиболее выраженный эффект достигается при объединении этих решений в общий информационный контур, обеспечивающий последовательность «сбор данных – передача – обработка – управленческое решение» [10; 11].

Необходимость технологического и цифрового обновления агропромышленного комплекса закреплена в Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021–2030 годы [12]. Вместе с тем внедрение цифровых технологий зависит не только от технической доступности решений, но и от экономических, организационных и кадровых факторов, влияющих на готовность сельскохозяйственных предприятий к их практическому применению [13]. Переход от отдельных устройств к связанному цифровому контуру соответствует современным представлениям о цифровых двойниках и технологиях Agriculture 4.0, объединяющих машины, данные и платформенные средства управления [14; 15].

В научной литературе представлены различные подходы к оценке цифрового развития. Индекс цифровой экономики и общества DESI применяется преимущественно для межстранового анализа и учитывает цифровую инфраструктуру, человеческий капитал, распространение технологий и цифровые услуги [16]. Инструмент FAO DVI Readiness Assessment предназначен для определения готовности сельских сообществ к цифровой трансформации и включает инфраструктурные, институциональные, кадровые и управленческие критерии [17]. Эти подходы характеризуют цифровую зрелость страны, территории или организации, но не позволяют непосредственно определить, насколько конкретная сельскохозяйственная машина или машинно-тракторный парк включены в цифровой контур эксплуатации.

Для решения этой задачи предложен интегральный показатель цифровизации D, объединяющий четыре технических компонента: GPS-навигацию и параллельное вождение, IoT-мониторинг и телематику, цифровые платформы управления, а также искусственный интеллект и предиктивную аналитику. В отличие от макроуровневых индексов показатель D ориентирован на технический уровень и может рассчитываться для отдельной машины, группы машин или машинно-тракторного парка.

Научно-методическая новизна исследования состоит в формализации последовательных уровней цифровой функциональности сельскохозяйственной техники и их объединении в диагностическую оценку, предназначенную для сопоставления вариантов цифровой комплектации и определения очередности модернизации. Показатель D не заменяет комплексную оценку цифровой зрелости предприятия, а дополняет ее характеристикой технической оснащенности эксплуатируемого парка. Таким образом, в настоящей работе цифровая модернизация рассматривается на уровне функциональности сельскохозяйственных машин и их интеграции в общий информационный контур.

Цель исследования заключалась в систематизации современных подходов к цифровой модернизации сельскохозяйственной техники и разработке диагностического показателя для сопоставления цифровой оснащённости отдельных машин и машинно-тракторных парков Северного Казахстана.

Объектом исследования являются технические и информационные компоненты цифровой трансформации сельскохозяйственных машин. **Предмет** исследования – методы их формализации и объединения в интегральную оценку, применяемую при выборе направлений цифровой модернизации.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**: проанализировать отечественный и зарубежный опыт применения цифровых технологий в сельскохозяйственной технике; определить состав компонентов, характеризующих ее цифровую функциональность; обосновать процедуру нормирования и выбора весовых коэффициентов; проверить поведение показателя D при различных сценариях цифровой комплектации и изменении весов; определить последовательность внедрения технологий с учетом затрат, ожидаемого эффекта, инфраструктурных требований и готовности существующего парка.

Исследование имеет обзорно-аналитический и методический характер. Расчетные сценарии используются для проверки логики и внутренней устойчивости показателя D и не рассматриваются как репрезентативная оценка фактического уровня цифровизации сельскохозяйственной техники Северного Казахстана.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено с применением системного, сравнительного и институционально-технологического подходов. Сельскохозяйственная техника рассматривалась как элемент многоуровневой системы «машина – оператор – цифровая платформа – производственная среда», функционирующей в условиях неоднородного технического состояния машинно-тракторного парка и различной доступности цифровой инфраструктуры [14; 15]. Такой подход позволяет учитывать не только наличие отдельных цифровых устройств, но и степень их включения в процессы сбора, передачи, обработки и практического использования эксплуатационных данных.

Информационную основу исследования составили научные публикации 2010–2025 годов, отобранные в базах Scopus и Web of Science. Поиск проводился по сочетаниям ключевых слов «agricultural machinery digitalization», «precision agriculture», «smart farming», «IoT in agriculture» и «predictive maintenance in agriculture». Рассматривались работы, посвященные цифровым технологиям в сельскохозяйственной технике, точному земледелию, телематике, интеллектуальному управлению, прогнозной диагностике и анализу технического состояния машин. Дополнительно использовались официальные материалы Европейской комиссии и FAO, а также положения Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021–2030 годы [12; 16; 17]. Отобранные материалы применялись для аналитического обобщения технологических решений и формирования структуры интегрального показателя.

На основе анализа публикаций цифровые технологии были объединены в четыре функциональные группы: GPS-навигация и параллельное вождение; IoT-мониторинг и телематика; цифровые платформы управления; искусственный интеллект и предиктивная аналитика [7-10; 14; 15; 18; 19]. Выделение этих компонентов обусловлено их последовательной ролью в цифровом контуре эксплуатации техники. Навигационные системы определяют пространственное положение и обеспечивают точность выполнения операций; телематика и IoT-устройства формируют поток эксплуатационных данных; цифровые платформы обеспечивают их объединение и централизованную обработку; инструменты искусственного интеллекта используются для выявления закономерностей, прогнозирования технического состояния и формирования рекомендаций.

Для количественной оценки цифровой оснащённости предложен безразмерный интегральный показатель D:

$$D = \sum_{i=1}^4 (w_i \cdot x_i),$$

где x_i – нормированная степень реализации i -го цифрового компонента; w_i – весовой коэффициент его относительной значимости. Для обеспечения сопоставимости выполняются условия $0 \leq x_i \leq 1$, $w_i \geq 0$ и $\sum w_i = 1$.

Степень реализации каждого компонента оценивалась по единой порядковой шкале. Значение 0 присваивалось при отсутствии соответствующей функции; 0,25 – при наличии отдельного цифрового элемента, используемого эпизодически и без регулярного обмена данными; 0,50 – при устойчивом автономном использовании функции в пределах отдельной машины; 0,75 – при постоянном обмене данными с цифровой платформой; 1,00 – при полной интеграции функции в контур мониторинга, анализа и принятия технических или управленческих решений. Использование единой шкалы позволяет сопоставлять компоненты, имеющие различную техническую природу, и исключает прямое объединение процентных показателей, полученных из методически несопоставимых источников.

Для предварительной калибровки весовых коэффициентов проведена экспертная оценка с участием 12 специалистов агропромышленного комплекса Костанайской области. В экспертную группу вошли руководители сельскохозяйственных предприятий, главные инженеры и агрономы, имевшие практический опыт выбора, эксплуатации и технического обслуживания сельскохозяйственной техники. Критерием привлечения специалиста являлось непосредственное участие в управлении машинно-тракторным парком или применении цифровых технологий.

На основе обобщения экспертных оценок установлены следующие весовые коэффициенты: GPS-навигация и параллельное вождение – 0,25; IoT-мониторинг и телематика – 0,30; цифровые платформы управления – 0,25; искусственный интеллект и предиктивная аналитика – 0,20. Более высокий вес телематики обусловлен ее ролью в формировании непрерывного потока эксплуатационных данных, необходимого для последующего применения платформенной и интеллектуальной аналитики. Поскольку состав экспертной группы не обеспечивает статистической репрезентативности для всего Северного Казахстана, полученные веса рассматриваются как предварительные.

Для интерпретации показателя D диапазон от 0 до 1 был разделен на четыре равных диагностических интервала: 0–0,24 – низкий уровень цифровой оснащенности; 0,25–0,49 – базовый; 0,50–0,74 – развитый; 0,75–1,00 – высокий. Эти интервалы предназначены для предварительного технического аудита и сопоставления вариантов цифровой комплектации. Их границы должны уточняться по мере накопления данных о реальных машинах и хозяйствах.

Методическая апробация показателя проводилась на пяти расчетных сценариях, отражающих последовательное расширение цифровой функциональности техники: использование навигации; подключение базового мониторинга; формирование связанного контура техники; интеграция с цифровой платформой; внедрение интеллектуального управления. Значения компонентов в сценариях задавались авторами и использовались для проверки расчетной логики показателя. Они не рассматривались как результаты обследования машинно-тракторного парка Северного Казахстана.

Устойчивость показателя оценивалась методом однофакторного анализа чувствительности. Для моделирования неопределенности предварительной экспертной калибровки каждый весовой коэффициент поочередно уменьшался и увеличивался на 20 %. После изменения одного коэффициента все значения веса повторно нормировались до суммы, равной единице, и выполнялся перерасчет D. Показатель считался устойчивым, если изменение весов не приводило к переходу рассматриваемого сценария в другую классификационную категорию.

Примененная процедура позволяет оценить внутреннюю согласованность показателя D и его чувствительность к предварительно выбранным весовым коэффициентам. Она не является внешней эмпирической валидацией методики. Такая проверка требует обследования реальных групп сельскохозяйственной техники по единому протоколу и сопоставления значений D с эксплуатационными характеристиками, включая расход топлива, производительность, продолжительность простоев, количество отказов и затраты на техническое обслуживание.

Результаты исследования

Анализ научных публикаций показал, что развитие сельскохозяйственной техники связано с переходом от автономно работающих машин к техническим комплексам, объединенным средствами навигации, сенсорами, телематическими устройствами и цифровыми платформами [7, с. 72; 9, с. 4866; 10]. При этом наличие отдельных цифровых устройств само по себе не обеспечивает полноценной цифровой трансформации. Для получения устойчивого эксплуатационного эффекта необходим последовательный переход от сбора данных к их передаче, обработке и использованию при принятии технических и управленческих решений.

Для методической апробации показателя D сформированы пять сценариев цифровой комплектации сельскохозяйственной техники. Первый сценарий предусматривает использование GPS-навигации без подключения других цифровых функций. Второй включает навигацию, частичный IoT-мониторинг и начальное использование цифровой платформы. В третьем сценарии усиливается обмен эксплуатационными данными между техникой и платформой. Четвертый соответствует платформенно интегрированному машинно-тракторному парку. Пятый описывает полностью связанный цифровой контур с применением искусственного интеллекта и предиктивной аналитики. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сценарная апробация интегрального показателя цифровизации D

Сценарий	Характеристика сценария	GPS (x_1)	IoT (x_2)	Цифровая платформа (x_3)	ИИ (x_4)	D
S1	Навигационный	1,0	0	0	0	0,25
S2	Базовый мониторинг	1,0	0,4	0,2	0	0,42
S3	Связанная техника	1,0	0,7	0,3	0	0,54
S4	Платформенная интеграция	1,0	1,0	0,8	0,3	0,81
S5	Интеллектуальная техника	1,0	1,0	1,0	1,0	1,00

Примечание – значения x_1 – x_4 заданы для методической проверки расчета и не являются результатами обследования сельскохозяйственных предприятий региона. Весовые коэффициенты: w_{GPS} = 0,25; w_{IoT} = 0,30; $w_{платформа}$ = 0,25; $w_{ИИ}$ = 0,20. Границы уровней: низкий – 0–0,24; базовый – 0,25–0,49; развитый – 0,50–0,74; высокий – 0,75–1,00.

Расчетные значения D последовательно увеличивались от 0,25 в первом сценарии до 1,00 в пятом. Для второго, базового сценария получено $D = 0,42$, что соответствует базовому уровню цифровой оснащенности. В сценарии с развитой телематикой и обменом данными показатель составил 0,54, а при платформенной интеграции техники – 0,81. Полученная динамика показывает предусмотренное методикой последовательное изменение D по мере расширения цифровой функциональности и усиления взаимосвязи между ее компонентами.

Дополнительно проведен анализ чувствительности базового сценария к изменению весовых коэффициентов. При поочередном уменьшении и увеличении каждого веса на 20 % с последующей нормировкой значение D изменялось в диапазоне 0,389–0,448. Размах составил 0,059. Во всех вариантах показатель оставался в пределах базовой классификационной категории. Наибольшее изменение наблюдалось при корректировке веса GPS-навигации, поскольку в рассматриваемом сценарии данная функция была реализована полностью. Результат характеризует внутреннюю устойчивость расчетного примера к изменению предварительно установленных весов.

На следующем этапе выполнено качественное ранжирование цифровых технологий по относительному уровню затрат, ожидаемому эксплуатационному эффекту, инфраструктурным требованиям и готовности существующего машинно-тракторного парка. Наиболее доступным начальным этапом определено внедрение GPS-навигации и систем параллельного вождения. Эти решения не требуют полной перестройки информационной инфраструктуры и позволяют повысить точность полевых операций. Вторым этапом является внедрение телематики и IoT-мониторинга, обеспечивающих сбор данных о загрузке, режимах работы и техническом состоянии машин. Результаты ранжирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Предлагаемая последовательность цифровой модернизации сельскохозяйственной техники Северного Казахстана

Этап	Цифровое решение	Уровень затрат	Ожидаемый результат	Необходимая инфраструктура	Готовность к внедрению
1	GPS-навигация и параллельное вождение	низкий	Снижение перекрытий и пропусков; экономия топлива; повышение точности полевых операций	GNSS-приемник, дисплей или контроллер; базовое обучение механизаторов	высокая
2	Телематический мониторинг	средний	Контроль местоположения, загрузки и расхода топлива; раннее выявление технических отклонений	Датчики и бортовой контроллер; мобильная связь; сервер или облачное хранилище	средняя
3	Единая цифровая платформа	средний–высокий	Объединение данных; планирование полевых работ и технического обслуживания; сравнение показателей машин	Стабильная связь; совместимые протоколы и API; база данных; ответственный специалист	средняя
4	Предиктивная аналитика и интеллектуальная диагностика	высокий	Прогнозирование отказов; сокращение внеплановых простоев; переход к обслуживанию по техническому состоянию	Накопленная история данных; датчики требуемого качества; вычислительные ресурсы; специалисты по анализу данных	ограниченная
5	Автономные и роботизированные системы	очень высокий	Автоматизация операций; повышение точности и повторяемости; снижение влияния человеческого фактора	RTK-коррекция; надежный канал связи; системы функциональной безопасности; сервисная поддержка	перспективная

Примечание – уровни затрат и технологической готовности имеют предварительный качественный характер. Перед внедрением их следует уточнять для конкретного хозяйства с учетом совокупной стоимости владения, состояния машин, доступности связи, квалификации персонала и ожидаемого производственного эффекта.

Платформенная интеграция отнесена к третьему этапу, поскольку ее эффективность зависит от достаточного количества машин, оснащенных датчиками, и наличия устойчивого канала передачи дан-

ных. Предиктивная аналитика занимает четвертый этап: для ее применения необходимы накопленная история эксплуатации, сведения об отказах и качественные диагностические сигналы. Автономные и роботизированные системы отнесены к пятому этапу вследствие высокой стоимости, повышенных требований к навигационной инфраструктуре, безопасности, техническому обслуживанию и нормативному обеспечению. Предлагаемая последовательность должна уточняться для конкретного хозяйства на основе расчета совокупной стоимости владения и ожидаемого экономического эффекта.

Обобщение результатов позволило сформировать концептуальную модель поэтапной цифровизации сельскохозяйственной техники Северного Казахстана. Модель отражает переход от базового уровня к навигации и сенсоризации, затем к платформенному управлению и интеллектуальной обработке данных. Каждый последующий уровень опирается на информацию и инфраструктуру, которые были сформированы на предыдущем этапе. Поэтому внедрение предиктивной аналитики и автономного управления без предварительного создания надежного информационного контура не обеспечивает устойчивого результата. Предлагаемая модель представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Концептуальная модель цифровизации сельскохозяйственного машиностроения Северного Казахстана

Представленные значения D являются результатами сценарной апробации и не характеризуют фактическое распределение сельскохозяйственной техники Северного Казахстана по уровням цифровизации. Их связь с эксплуатационной эффективностью должна быть установлена при последующем обследовании реальных машин и хозяйств.

Обсуждение результатов

Предложенная концептуальная модель рассматривает цифровизацию сельскохозяйственной техники как последовательное формирование единого информационного контура. На базовом уровне машина выполняет технологические операции без систематического сбора и передачи эксплуатационных данных. Подключение навигации, сенсоров и телематики создает информационную основу для платформенного управления. Применение искусственного интеллекта, предиктивной аналитики и автономных функций становится обоснованным после накопления достаточного объема качественных данных. Такой подход согласуется с представлением о цифровой трансформации сельского хозяйства как о развитии киберфизической системы, а не как об установке отдельных цифровых устройств [3; 14; 15].

Методический вклад исследования состоит в соединении многоуровневой архитектуры цифровизации с интегральным показателем D. Существующие индексы преимущественно характеризуют страны, территории, организации или сельские сообщества и учитывают инфраструктуру, человеческий капитал, доступность цифровых услуг и институциональные условия [16; 17]. Показатель D имеет более узкую инженерную направленность и отражает степень включения конкретной машины или машинно-тракторного парка в цифровой контур эксплуатации. Его отличие заключается в переносе оценки цифровой зрелости с макроуровня на уровень технического объекта. Поэтому показатель следует рассматривать не как замену существующих индексов, а как дополнительный инструмент технического аудита и выбора направлений модернизации.

Сценарная апробация показала последовательное изменение D от 0,25 в варианте, включающем только навигацию, до 1,00 в полностью интегрированном цифровом контуре. Такая динамика соответствует заложенной структуре показателя, однако сама по себе не подтверждает его связь с фактической эксплуатационной эффективностью техники. При поочередном изменении весовых коэффициентов на $\pm 20\%$ базовый сценарий сохранил исходную классификационную категорию, что характеризует внутреннюю устойчивость расчетного примера к умеренному изменению предварительной экспертной калибровки. Вместе с тем однофакторный анализ не учитывает одновременного изменения нескольких весов и возможного пересмотра состава оцениваемых компонентов.

Предварительное ранжирование технологий показывает, что цифровую модернизацию целесообразно начинать с решений, обеспечивающих непосредственный производственный эффект и одновременно формирующих данные для последующих этапов. GPS-навигация и параллельное вождение могут внедряться без сложной платформенной инфраструктуры и позволяют повысить точность выполнения полевых операций. Телематика и IoT-мониторинг занимают следующий этап, поскольку обеспечивают получение сведений о загрузке, режимах работы и техническом состоянии машин. Без такого информационного слоя применение предиктивной аналитики остается ограниченным.

Платформенная интеграция приобретает практическое значение при достаточном количестве подключенной техники, наличии устойчивых каналов связи и совместимости используемых форматов данных. Предиктивная аналитика требует истории отказов, диагностических сигналов, регламентов хранения информации и процедур проверки моделей. Автономные и роботизированные системы предъявляют наиболее высокие требования к RTK-навигации, безопасности, техническому обслуживанию и нормативному обеспечению [18; 19]. Поэтому очередность их внедрения должна определяться с учетом масштаба хозяйства, состава и технического состояния парка, квалификации персонала и доступности сервисной поддержки.

Экономическое сопоставление вариантов модернизации необходимо проводить для конкретного хозяйства. Совокупная стоимость владения должна учитывать приобретение цифрового оборудования, его установку и интеграцию, оплату каналов связи и программных сервисов, обучение работников и последующее техническое обслуживание. Эти затраты следует сопоставлять с ожидаемой экономией топлива, сокращением простоев, уменьшением ремонтных расходов и технологических потерь. В связи с различиями между хозяйствами качественное ранжирование, представленное в таблице 2, следует использовать как основу для выбора пилотного решения, а не как универсальную экономическую оценку.

В международных исследованиях применение систем точного земледелия, телематики и платформенного управления связывается с повышением производительности, снижением расхода топлива и уменьшением технологических потерь [10; 11]. Однако перенос этих эффектов на условия Северного Казахстана требует осторожности. Их фактическая величина зависит от площади хозяйства, возраста и технического состояния машин, качества связи, квалификации операторов, стоимости цифровых сервисов и доступности технической поддержки. Поэтому результаты зарубежных исследований могут использоваться как ориентиры при планировании пилотных проектов, но не должны рассматриваться как подтвержденные показатели эффективности для региона.

Цифровая модернизация не устраняет необходимости технического обновления машин и повышения надежности рабочих органов. Интеллектуальное управление не может компенсировать конструктивные ограничения и высокий физический износ техники. Развитие цифровых функций должно сочетаться с локализацией производства деталей, выбором износостойких материалов и совершенствованием системы технического обслуживания [5]. При этом результативность цифровизации зависит не только от оборудования, но и от готовности работников интерпретировать данные и использовать их при принятии решений. Поэтому повышение цифровой оснащенности должно сопровождаться подготовкой операторов и инженерно-технического персонала [6; 13].

Основное ограничение исследования определяется его обзорно-аналитическим и методическим характером. Предварительная калибровка весов выполнена с участием ограниченной группы специалистов одного региона, а значения компонентов в пяти сценариях заданы для проверки расчетной логики. Полученные значения D не характеризуют фактический уровень цифровизации машинно-тракторного парка Северного Казахстана. Для внешней эмпирической валидации необходимо обследовать реальные группы машин по единому протоколу, расширить состав экспертов, оценить согласованность их суждений и установить связь D с измеряемыми эксплуатационными показателями: производительностью, расходом топлива, продолжительностью простоев, количеством отказов и затратами на техническое обслуживание.

Заключение

В исследовании разработан интегральный показатель D для оценки цифровой оснащенности отдельных сельскохозяйственных машин и машинно-тракторных парков. Показатель объединяет четыре компонента: GPS-навигацию и параллельное вождение, IoT-мониторинг и телематику, цифровые платформы управления, искусственный интеллект и предиктивную аналитику. В отличие от индексов, характеризующих цифровое развитие страны, территории или организации, показатель D ориентиро-

ван на технический уровень конкретного объекта и может применяться при первичном аудите машинно-тракторного парка.

Сценарная апробация показала изменение D от 0,25 для техники, оснащенной только навигационной системой, до 1,00 при полной интеграции рассматриваемых цифровых компонентов. Для базового сценария, включающего GPS-навигацию, частичный IoT-мониторинг и начальное использование цифровой платформы, получено $D = 0,42$. При поочередном изменении весовых коэффициентов на $\pm 20\%$ значение показателя находилось в диапазоне 0,389–0,448 и сохраняло базовую классификационную категорию. Полученный результат характеризует внутреннюю устойчивость расчетной методики, но не подтверждает ее внешнюю валидность на реальных производственных объектах.

Для сельскохозяйственных предприятий Северного Казахстана предложена предварительная последовательность цифровой модернизации техники. Начальный этап включает внедрение GPS-навигации и систем параллельного вождения, следующий – телематики и IoT-мониторинга. Платформенная интеграция, предиктивная аналитика и автономные системы требуют устойчивой цифровой инфраструктуры, накопленных эксплуатационных данных и соответствующей подготовки специалистов. Показатель D может использоваться для сравнения машин по уровню цифровой оснащенности, определения очередности модернизации и выбора объектов для пилотного внедрения. При принятии инвестиционных решений его следует дополнять оценкой совокупной стоимости владения, технической совместимости оборудования, затрат на связь и программное обеспечение, готовности персонала и ожидаемого производственного эффекта.

Полученные значения D имеют сценарный характер и не отражают фактическую распространенность цифровых технологий в Северном Казахстане. Последующая эмпирическая проверка методики должна включать обследование реальных групп машин по единому протоколу и сопоставление D с коэффициентом технической готовности, расходом топлива, производительностью, продолжительностью простоев, количеством отказов и затратами на техническое обслуживание. Такая апробация позволит уточнить весовые коэффициенты и границы диагностических уровней, а также определить условия применения предиктивной диагностики и цифровых двойников при эксплуатации сельскохозяйственной техники.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках проекта BR24992785 «Организация и проведение комплексных исследований по обеспечению устойчивого развития агропромышленного комплекса Костанайской области с созданием научно-исследовательского технологического центра».

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Finger R., Swinton S.M., El Benni N., Walter A. Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment [Текст] // Annual Review of Resource Economics. – 2019. – Vol. 11. – P. 313–335. – DOI: 10.1146/annurev-resource-100518-093929.
2. Lowenberg-DeBoer J., Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption [Текст] // Agronomy Journal. – 2019. – Vol. 111, No. 4. – P. 1552–1569. – DOI: 10.2134/agronj2018.12.0779.
3. MacPherson J., Voglhuber-Slavinsky A., Olbrisch M., Schöbel P., Dönitz E., Mouratiadou I., Helming K. Future agricultural systems and the role of digitalization for achieving sustainability goals. A review [Текст] // Agronomy for Sustainable Development. – 2022. – Vol. 42. – Article 70. – DOI: 10.1007/s13593-022-00792-6.
4. Klerkx L., Jakku E., Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and Agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda [Текст] // NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences. – 2019. – Vol. 90–91. – Article 100315. – DOI: 10.1016/j.njas.2019.100315.
5. Салыков Б.Р., Куанышбаев С.Б., Ермолдина Г.Т., Мануйлов Н.В. Выбор материалов для локализованного производства рабочих органов почвообрабатывающих машин [Текст] // 3i: intellect, idea, innovation – интеллект, идея, инновация. – 2026. – Т. 1, № 1. – С. 193–201. – DOI: 10.52269/SRDG2611193.
6. Rose D.C., Wheeler R., Winter M., Lobley M., Chivers C.A. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet [Текст] // Land Use Policy. – 2021. – Vol. 100. – Article 104933. – DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104933.
7. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.J. Big data in smart farming – A review [Текст] // Agricultural Systems. – 2017. – Vol. 153. – P. 69–80. – DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.
8. Boursianis A.D., Papadopoulou M.S., Diamantoulakis P., Liopa-Tsakalidi A., Barouchas P., Salahas G., Karagiannidis G., Wan S., Goudos S.K. Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Smart Farming: A comprehensive review [Текст] // Internet of Things. – 2022. – Vol. 18. – Article 100187. – DOI: 10.1016/j.iot.2020.100187.
9. Sharma A., Jain A., Gupta P., Chowdary V. Machine learning applications for precision agriculture: A comprehensive review [Текст] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 4843–4873. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048415.

10. Monteiro A., Santos S., Gonçalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review [Текст] // *Animals*. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Article 2345. – DOI: 10.3390/ani11082345.
11. Balafoutis A., Beck B., Fountas S., Vangeyte J., Van der Wal T., Soto I., Gómez-Barbero M., Barnes A., Eory V. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics [Текст] // *Sustainability*. – 2017. – Vol. 9, No. 8. – Article 1339. – DOI: 10.3390/su9081339.
12. Об утверждении Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021–2030 годы: постановление Правительства Республики Казахстан от 30 декабря 2021 года № 960 [Электронный ресурс]. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2100000960> (дата обращения: 24.08.2026).
13. Pathak H.S., Brown P., Best T. A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process [Текст] // *Precision Agriculture*. – 2019. – Vol. 20, No. 6. – P. 1292–1316. – DOI: 10.1007/s11119-019-09653-x.
14. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming [Текст] // *Agricultural Systems*. – 2021. – Vol. 189. – Article 103046. – DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046.
15. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., Suman R. Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies [Текст] // *International Journal of Intelligent Networks*. – 2022. – Vol. 3. – P. 150–164. – DOI: 10.1016/j.ijin.2022.09.004.
16. European Commission. Digital Decade 2025: DESI methodological note [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/digital-decade-2025-desi-methodological-note> (дата обращения: 24.08.2026).
17. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Advancing the digital transformation of agriculture and rural areas through national strategies, e-Government systems, and Digital Villages – update for Europe and Central Asia: ECA/43/23/INF/4 [Электронный ресурс]. – Rome: FAO, 2023. – URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/nn296en> (дата обращения: 24.08.2026).
18. Talaviya T., Shah D., Patel N., Yagnik H., Shah M. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides [Текст] // *Artificial Intelligence in Agriculture*. – 2020. – Vol. 4. – P. 58–73. – DOI: 10.1016/j.aiia.2020.04.002.
19. Wakchaure M., Patle B.K., Mahindrakar A.K. Application of AI techniques and robotics in agriculture: A review [Текст] // *Artificial Intelligence in the Life Sciences*. – 2023. – Vol. 3. – Article 100057. – DOI: 10.1016/j.ailsci.2023.100057.

REFERENCES:

1. Finger R., Swinton S.M., El Benni N., Walter A. Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. *Annual Review of Resource Economics*, 2019, vol.11, pp. 313–335. DOI: 10.1146/annurev-resource-100518-093929.
2. Lowenberg-DeBoer J., Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 2019, vol. 111, no. 4, pp. 1552–1569. DOI: 10.2134/agronj2018.12.0779.
3. MacPherson J., Voglhuber-Slavinsky A., Olbrisch M., et al. Future agricultural systems and the role of digitalization for achieving sustainability goals. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2022, vol. 42, art. 70. DOI: 10.1007/s13593-022-00792-6.
4. Klerkx L., Jakku E., Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and Agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences*, 2019, vol. 90–91, art. 100315. DOI: 10.1016/j.njas.2019.100315.
5. Salykov B.R., Kuanyshbayev S.B., Yermoldina G.T., Manuilov N.V. Vy'bor materialov dlya lokalizovannogo proizvodstva rabochih organov pochvoobrabatyvayushhih mashin [Selection of materials for localized production of tillage machine working elements]. *3i: intellect, idea, innovation*, 2026;1(1):193–201. DOI: 10.52269/SRDG2611193. (In Russian)
6. Rose D.C., Wheeler R., Winter M., Lobley M., Chivers C.A. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*, 2021, vol. 100, art. 104933. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104933.
7. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.J. Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 2017, vol. 153, pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.
8. Boursianis A.D., Papadopoulou M.S., Diamantoulakis P., Liopa-Tsakalidi A., et al. Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: a comprehensive review. *Internet of Things*, 2022, vol. 18, art. 100187. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100187.
9. Sharma A., Jain A., Gupta P., Chowdary V. Machine learning applications for precision agriculture: A comprehensive review. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 4843–4873. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048415.
10. Monteiro A., Santos S., Gonçalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. *Animals*, 2021, vol. 11, no. 8, art. 2345. DOI: 10.3390/ani11082345.

11. Balafoutis A., Beck B., Fountas S., et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, 2017, vol. 9, no. 8, art. 1339. DOI: 10.3390/su9081339.
12. Ob utverzhdenii Konceptii razvitiya agropromy'shlennogo kompleksa Respubliki Kazakhstan na 2021–2030 gody' [On approval of the Concept for development of the agro-industrial complex of the Republic of Kazakhstan for 2021–2030]. Resolution No. 960 dated 30 December 2021, available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2100000960> (accessed 24 August 2026). (In Russian)
13. Pathak H.S., Brown P., Best T. A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process. *Precision Agriculture*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 1292–1316. DOI: 10.1007/s11119-019-09653-x.
14. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 2021, vol. 189, art. 103046. DOI: 10.1016/j.agry.2020.103046.
15. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., Suman R. Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*, 2022, vol. 3, pp. 150–164. DOI: 10.1016/j.ijin.2022.09.004.
16. European Commission. Digital Decade 2025: DESI methodological note. 2025, available at: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/digital-decade-2025-desi-methodological-note> (accessed 24 August 2026).
17. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Advancing the digital transformation of agriculture and rural areas through national strategies, e-Government systems, and Digital Villages – update for Europe and Central Asia. ECA/43/23/INF/4, Rome: FAO; 2023, available at: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/nn296en> (accessed 24 August 2026).
18. Talaviya T., Shah D., Patel N., Yagnik H., Shah M. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2020;4:58–73. DOI: 10.1016/j.iaia.2020.04.002.
19. Wakchaure M., Patle B.K., Mahindrakar A.K. Application of AI techniques and robotics in agriculture: A review. *Artificial Intelligence in the Life Sciences*, 2023, vol. 3, art. 100057. DOI: 10.1016/j.ailsci.2023.100057.

Дата поступления: 10 июня 2026 г. **Принято:** 20 августа 2026 г.

Опубликовано: 30 сентября 2026 г.

Сведения об авторах:

Салыков Булат Рахимжанович* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент) кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, ул. Воинов Интернационалистов, 2а, тел.: 87758190343, e-mail: salykovbulat@mail.ru.

Ысқақ Алия – кандидат сельскохозяйственных наук, директор научно-исследовательского института прикладной биотехнологии, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, ул. Абая, 123, тел.: 87058854684, e-mail: yskak_aliya@ksu.edu.kz.

Мануйлов Николай Владимирович – инженер кафедры программного обеспечения, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110005, г. Костанай, ул. Геологическая, 1, тел.: 87772315458, e-mail: mnlv.nv.94@gmail.com.

Кабдушева Альмира Серикпаевна – PhD кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, Наурыз 7-32, тел.: 87789791807, e-mail: 9.12.1989@mail.ru.

Салыков Булат Рахимжанович* – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), Аграрлық техника және көлік кафедрасы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Интернационалист-жауынгерлер көш, 2а, тел.: 87758190343, e-mail: salykovbulat@mail.ru.

Ысқақ Алия – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, Қолданбалы биотехнология ғылыми-зерттеу институтының директоры, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Абай көш, 123, тел.: 87058854684, e-mail: yskak_aliya@ksu.edu.kz.

Мануйлов Николай Владимирович – Бағдарламалық қамтамасыз ету кафедрасының инженері, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110005, Қостанай қ., Геологиялық көш, 1, тел.: 87772315458, e-mail: mnlv.nv.94@gmail.com.

Кабдушева Альмира Серикпаевна – PhD, Аграрлық техника және көлік кафедрасы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Наурыз шағ. ауд, 7–32, тел.: 87789791807, e-mail: 9.12.1989@mail.ru.

Salykov Bulat Rakhimzhanovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 2a Voinov Internatsionalistov Str., tel.: 87758190343, e-mail: salykovbulat@mail.ru.

Yskak Aliya – Candidate of Agricultural Sciences, Director of the Research Institute of Applied Biotechnology, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 123 Abai Str., tel.: 87058854684, e-mail: yskak_aliya@ksu.edu.kz.

Manuilov Nikolay Vladimirovich – Engineer, Department of software, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NJSC, Republic of Kazakhstan, 110005, Kostanay, 1 Geologicheskaya Str., tel.: 87772315458, e-mail: mnlv.nv.94@gmail.com.

Kabdusheva Almira Serikpayevna – PhD, Department of agricultural machinery and transport, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, Nauryz micro district, 7–32, tel.: 87789791807, e-mail: 9.12.1989@mail.ru.

IRSTI 68.35.31; 68.35.29

UDC 635.21:631.811.98:620.3

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631236>

EFFECTS OF ARTEMISIA ABSINTHIUM L. AQUEOUS EXTRACT AND BIOSYNTHESIZED IRON NANOPARTICLES ON THE YIELD AND QUALITY OF COLOMBO POTATO TUBERS

Seitkhanova K.K.* – PhD student, Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan.

Anikina I. N. – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan.

The study evaluated the effects of foliar application of an *Artemisia absinthium* L. aqueous extract and a formulation containing biosynthesized iron nanoparticles (FeNPs) on the quality and tuber yield of the early-maturing potato cultivar 'Colomba' under field conditions of the Pavlodar region of Kazakhstan. The aqueous extract was prepared from dried aerial parts of *A. absinthium*, while FeNPs were synthesized using the plant extract and FeCl_3 as a precursor. Scanning electron microscopy confirmed the formation of nanoscale particles with irregular, predominantly rounded morphology and pronounced agglomeration; representative individual particle measurements were 35.99, 45.86, and 61.08 nm. Both formulations were applied by foliar spraying according to three schemes: once before flowering, once during flowering, or twice at both stages. Potato yield was evaluated separately in the 2024 and 2025 growing seasons. Two-way ANOVA showed significant effects of treatment on total tuber number ($F(6,126) = 4.603$, $p < 0.001$) and total tuber weight ($F(6,126) = 7.382$, $p < 0.001$), as well as significant effects of year on both parameters. No significant treatment $\times$ year interaction was detected. Planned comparisons with Holm adjustment showed that double application of the aqueous extract and double application of the FeNP-containing formulation significantly increased total tuber number compared with the control. Double-application of both formulations also significantly increased total tuber weight, while significant increases in tuber weight were additionally observed for single pre-flowering applications of both formulations and for the FeNP-containing formulation applied during flowering. In the 2025 crop, starch content ranged from 5.48 to 10.14%, vitamin C from 18 to 30 mg/100 g, nitrate content from 40.6 to 69.2 mg/kg, and dry matter from 14.65 to 19.60%; these biochemical differences were interpreted descriptively because statistical significance was not established for these parameters. No treatment-related deterioration in the assessed browning characteristics of raw or cooked tubers was observed. The results indicate that double foliar application of the *A. absinthium* aqueous extract or the FeNP-containing formulation was the most consistently effective application scheme for improving 'Colomba' potato yield under the conditions of this two-year field experiment.

Keywords: *Artemisia absinthium* L., biosynthesized iron nanoparticles, foliar application, potato, aqueous extract, tuber quality, green synthesis.

ARTEMISIA ABSINTHIUM L. СУ СЫҒЫНДЫСЫ МЕН БИОСИНТЕЗДЕЛГЕН ТЕМІР НАНОБӨЛШЕКТЕРІНІҢ «КОЛОМБО» СОРТТЫ КАРТОПТЫҢ ӨНІМДІЛІГІ МЕН ТҮЙНЕК САПАСЫНА ӨСЕРІ

Сейтханова К.К.* – докторант, «Торайғыров университеті» КЕАҚ, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы.

Аникина И.Н. – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Торайғыров университеті» КЕАҚ, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы.

Зерттеуде Қазақстанның Павлодар облысының далалық жағдайында *Artemisia absinthium* L. су сығындысы мен биосинтезделген темір нанобөлшектері (FeNPs) бар препаратты жапырақ арқылы