

**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.541-560>EDN: <https://elibrary.ru/mvvvggp>

УДК / UDK 629.3.083.4:004.9:631.256

*Оригинальная статья / Original article***Оценка эффективности применения
AR-ассистента в техническом сервисе машин****И. А. Уско¹✉, А. А. Долгушин¹, М. В. Шилкина¹, Н. В. Раков²**¹*Сибирский государственный университет
инженерии и биотехнологий,**г. Новосибирск, Российская Федерация*²*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,**г. Саранск, Российская Федерация, <https://ror.org/0262qgk29>*✉ xxxandryukha36@gmail.com*Аннотация*

Введение. Усложнение конструкций современной сельскохозяйственной техники на фоне системного дефицита квалифицированных инженерных кадров обуславливает рост трудоемкости регламентных работ и повышает риск ошибок при техническом обслуживании. До 15–25 % рабочего времени оператора непроизводительно расходуется на поиск справочной информации в технической документации.

Цель исследования. Повышение эффективности технического обслуживания сельскохозяйственных машин за счет разработки и внедрения программно-аппаратного комплекса «Цифровой ассистент инженера» на базе технологии дополненной реальности.

Материалы и методы. Объектом исследования является технологический процесс ежедневного технического обслуживания трактора John Deere 6125M. Аппаратная часть комплекса реализована на базе промышленных AR-очков RealWear HMT-1, программная – на языке Kotlin с локальной базой данных, обеспечивающей автономную работу. Проведен однофакторный сравнительный эксперимент с участием 50 операторов начального уровня квалификации (контрольная группа – традиционная документация, $n = 25$; опытная группа – AR-ассистент, $n = 25$). Время выполнения операций измерялось методом сплошного хронометража.

Результаты исследования. Установлено статистически значимое сокращение общего времени технического обслуживания на 24,6 % – с $820,6 \pm 123,8$ с до $618,6 \pm 94,8$ с. Декомпозиция затрат показала, что 45,5 % экономии обеспечивается сокращением информационного поиска. Абсолютная вариативность результатов снизилась на 23,4 %.

Заключение. AR-технология эффективно компенсирует недостаток практического опыта у начинающих специалистов, стандартизируя процесс технического

© Уско И.А., Долгушин А.А., Шилкина М.В., Раков Н.В., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

обслуживания. Годовой экономический эффект составляет 5,61 чел.-ч на единицу техники. Перспективы связаны с применением предлагаемой технологии для сложных видов технического обслуживания и ремонта.

Ключевые слова: технический сервис, дополненная реальность (AR), цифровизация АПК, эксплуатация МТП, трудоемкость работ

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Уско И.А., Долгушин А.А., Шилкина М.В., Раков Н.В. Оценка эффективности применения AR-ассистента в техническом сервисе машин. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):541–560. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.541-560>

Evaluation of AR Assistant Effectiveness for Machinery Technical Service

I. A. Usko^a✉, A. A. Dolgushin^a, M. V. Shilkina^a, N. V. Rakov^b

^a*Siberian State University Engineering and Biotechnology, Novosibirsk, Russian Federation*

^b*National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation, <https://ror.org/0262qgk29>*

✉ xxxandryukha36@gmail.com

Abstract

Introduction. The increasing complexity of modern agricultural machinery design options, coupled with a systemic shortage of qualified engineering personnel, has led to greater routine maintenance labor input and increased risk of errors during maintenance. Up to 15–25% of working time an operator wastes to search reference information in technical documentation.

Aim of the Study. The study is aimed at improving the efficiency of maintenance of agricultural machines by developing and implementing the hardware-software complex “Digital Engineering Assistant” based on augmented reality (AR) technology.

Materials and Methods. The object of the study was the daily maintenance process for the John Deere 6125M tractor. The hardware component of the system was implemented using industrial AR glasses RealWear HMT-1, while the software was developed in Kotlin with a local database ensuring autonomous operation. There was conducted a single-factor comparative experiment involving 50 novice operators (control group: traditional documentation, $n = 25$; experimental group: AR assistant, $n = 25$). The time of performing operations was measured by continuous timing.

Results. The was determined a statistically highly significant reduction in total maintenance time by 24.6% – from 820.6 ± 123.8 s to 618.6 ± 94.8 s. Cost breakdown revealed that 45.5% of the savings resulted from a reduction in information search time. The absolute variability of the results decreased by 23.4%.

Conclusion. AR technology effectively compensates for the lack of practical experience of novice specialists through standardizing the maintenance process. The annual economic benefit is 5.61 person-hours per a unit of equipment. The prospects are determined by applying the proposed technology for complex maintenance and repair operations.

Keywords: technical service, augmented reality (AR), digitalization of the agro-industrial complex, operation of agricultural machinery, labor input of operations

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Usko I.A., Dolgushin A.A., Shilkina M.V., Rakov N.V. Evaluation of AR Assistant Effectiveness for Machinery Technical Service. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):541–560. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.541-560>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения эффективности технического сервиса машинно-тракторного парка (МТП) остается в числе приоритетных задач аграрной инженерии. По данным исследований, затраты на техническое обслуживание и ремонт составляют до 35 % совокупных эксплуатационных расходов сельскохозяйственных предприятий, при этом значительная их часть обусловлена не стоимостью запасных частей и материалов, а трудоемкостью работ [1]. С. Ю. Журавлев подчеркивает, что современная концепция организации технического сервиса в агропромышленном комплексе (АПК) требует перехода от реактивной (по факту отказа) к превентивной стратегии обслуживания, однако ее реализация ограничена кадровым и информационным дефицитом [2]. R. Khodabakhshian в обзоре систем превентивного обслуживания тракторов и сельскохозяйственных машин отмечает, что стандартизация регламентных процедур является необходимым, но недостаточным условием повышения эффективности – требуются инструменты информационной поддержки оператора [3].

Проблема усугубляется постоянным ростом конструктивной сложности современной агротехники. Ю. А. Царев и О. Ю. Царев показали, что увеличение числа электронных подсистем в сельскохозяйственных машинах закономерно повышает требования к квалификации обслуживающего персонала и удлиняет цикл регламентных работ [4]. С. Л. Никитченко анализирует противоречие между ростом сложности техники и реальным уровнем подготовки кадров, делая вывод о необходимости цифровых инструментов управления техническим обслуживанием (ТО) в условиях автоматизации производства [5]. Аналогичные выводы содержатся в исследованиях, посвященных оценке влияния информационного обеспечения на качество технического сервиса в условиях крупных аграрных предприятий [6].

Таким образом, в научной литературе сформировалось устойчивое понимание проблемы: усложнение техники при дефиците квалифицированных кадров требует новых подходов к информационной поддержке процессов технического сервиса машин. Однако конкретные технологические решения и их количественная оценка остаются предметом дискуссий.

Технология дополненной реальности (Augmented Reality, AR) рассматривается мировым научным сообществом как одно из ключевых направлений цифровизации процессов технического обслуживания в рамках концепции «Индустрия 4.0». Ученые из Португалии в систематическом обзоре, охватывающем период с 1997 по 2023 г., выделяют три поколения AR-систем для технического обслуживания: экспериментальные прототипы (1997–2010), пилотные внедрения (2010–2018) и промышленные решения (с 2018 г.) [7]. Авторы фиксируют устойчивый рост числа публикаций по теме (более 300 статей за последние пять лет) и констатируют переход от лабораторных экспериментов к практическому применению.

Цель исследования заключается в оценке эффективности применения технологии дополненной реальности при выполнении технического обслуживания сельскохозяйственных машин.

Достигнуть поставленной цели позволит разработка автономного AR-приложения «Цифровой ассистент инженера» с модулем автоматизированного импорта технологических карт, системой голосовой навигации и автоматическим формированием отчетности. Необходимо также провести сравнительный эксперимент по оценке влияния AR-ассистента на продолжительность выполнения регламентных операций ежесменного технического обслуживания (ТО-10) трактора John Deere 6125M и выполнить статистический анализ результатов, включая оценку достоверности различий и размера эффекта, а также выявить механизмы повышения эффективности.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время проведен систематический обзор 50 работ по AR в техническом обслуживании. Функции AR-систем классифицируются на четыре категории: визуализация процедур, удаленная экспертная поддержка, обучение персонала и контроль качества [8]. Отмечается, что наибольший эффект достигается при выполнении сложных многоэтапных процедур с высокой информационной нагрузкой. AR/VR-технологии в техническом обслуживании обеспечивают повышение эффективности подготовки персонала, поддержку выполнения сервисных операций и снижение влияния недостатка практического опыта операторов [9].

Количественные оценки эффективности AR в техническом обслуживании представлены в ряде экспериментальных исследований. E. Bottani и G. Vignali в обзоре применения AR в производственном секторе за десятилетие (2009–2018) подтвердили статистически значимое сокращение времени выполнения задач (средний размер эффекта $d = 0,8...1,2$ по шкале Коэна) и повышение точности действий операторов [10].

Ряд более поздних исследований подтверждает и уточняет эти результаты. J. Egger и T. Masood в систематическом обзоре AR для интеллектуального производства показали, что эффект AR наиболее выражен при работе с малоопытным персоналом – именно та категория работников, которая испытывает наибольшие затруднения при обращении к традиционной документации [11]. Исследователи из Университета Патры продемонстрировали сокращение времени обслуживания промышленного оборудования на 32 % при использовании AR-инструкций на базе HoloLens 2 и отметили, что критическим фактором успеха является качество структурирования пошаговых инструкций [12]. Исследована проблема когнитивной нагрузки оператора при использовании AR и предложены рекомендации по проектированию информационных элементов, минимизирующих отвлечение внимания [13].

Подход к созданию AR-систем на основе «инженерии знаний», обеспечивающий автоматическое формирование AR-инструкций из существующих баз технических данных [14], концептуально близок к реализованному в настоящем исследовании модулю автоматизированного импорта технологических карт.

Ученые из Германии провели сравнительный эксперимент по использованию AR (Microsoft HoloLens), планшета и бумажных инструкций, в ходе которого было установлено, что AR обеспечивает наибольшее преимущество именно при первом выполнении незнакомой процедуры – сценарий, характерный для ввода в строй молодых специалистов [15].

Разработана и апробирована AR-система для обслуживания судовых дизельных двигателей, зафиксировано сокращение времени выполнения регламентных работ на 27 %, что близко к результатам настоящего исследования (24,6 %) [16]. Особо отмечается значимость автономной работы AR-устройства в условиях ограниченной сетевой инфраструктуры – проблема, также актуальная для сельскохозяйственной эксплуатации.

Вместе с тем анализ литературы выявляет, что абсолютное большинство экспериментальных исследований AR проведено в условиях промышленного производства (авиация, автомобилестроение, энергетика). Применение AR для технического обслуживания мобильных машин, эксплуатируемых в полевых условиях, изучено значительно слабее.

Применение AR/VR-технологий в аграрном секторе находится на ранней стадии исследований. AR преимущественно изучается в контексте точного земледелия (визуализация данных датчиков, навигация) и обучения операторов, тогда как применение AR в техническом сервисе сельскохозяйственной техники представлено единичными работами [17].

Авторы P. Phupattanasilp и S.-R. Tong систематизировали опыт использования AR в сельском хозяйстве и выделили пять основных направлений: обучение, мониторинг посевов, управление животноводством, навигация техники и техническое обслуживание [18]. Они отмечают, что последнее направление исследовано наименее полно.

Отечественные ученые обосновывают внедрение AR-технологий для технического обслуживания сельхозтехники, предлагая использование мобильных решений для оперативного доступа к документации в полевых условиях [19]. Подчеркивается экономическая эффективность внедрения AR за счет сокращения простоев техники и оптимизации работы персонала. Также поставлена проблема интеграции технологических карт ТО в систему дополненной реальности, и обоснована необходимость автоматизированного импорта данных из сервисных баз производителей техники.

Ключевой вклад в разработку отечественных прикладных AR-решений для технического сервиса сельхозтехники внес Р. Д. Гончаров. Автор обосновывает переход на открытые библиотеки, предлагает методы трансформации эксплуатационной документации в интерактивные сценарии и демонстрирует сокращение времени поиска неисправностей через натурные испытания на зерноуборочных комбайнах [20].

Использование дополненной реальности может сократить непроизводительные затраты времени на поиск информации, повысить наглядность технологических операций и снизить зависимость результата от уровня квалификации исполнителя [6]. Близкие выводы получены в исследовании, посвященном применению

интерактивных технологий для технической поддержки в обслуживании сельскохозяйственной техники [7]. В совокупности эти данные подтверждают актуальность перехода от статичной документации к контекстно-зависимым цифровым средствам поддержки.

Таким образом, существует выраженный исследовательский пробел: при обширной доказательной базе эффективности AR и нарастающем интересе к цифровизации аграрного сектора, количественные экспериментальные данные о применении AR при техническом обслуживании сельскохозяйственных тракторов фактически отсутствуют.

Выбор аппаратной платформы является критическим фактором, определяющим практическую применимость AR-решения. Современный рынок предлагает несколько категорий устройств: бинокулярные очки с прозрачными дисплеями (Microsoft HoloLens 2, Magic Leap 2), монокулярные промышленные очки (RealWear HMT-1, RealWear Navigator 500, Google Glass Enterprise Edition 2, Vuzix M400), а также планшетные AR-системы [21].

Сравнительный анализ платформ для промышленного применения показал, что для задач «hands-free maintenance» наиболее пригодны монокулярные устройства с голосовым управлением, поскольку они не ограничивают периферийное зрение оператора и обеспечивают максимальную безопасность при работе с техникой [22; 23]. Исследователи сопоставили HoloLens 2 и RealWear HMT-1 в задачах удаленной экспертной поддержки при ремонте оборудования и установили, что RealWear обеспечивает большую субъективную удовлетворенность операторов за счет меньшего веса (380 г и 566 г) и отсутствия перекрытия поля зрения.

Для полевых условий сельскохозяйственной эксплуатации дополнительными критериями выбора являются: класс защиты от пыли и влаги (не ниже IP66), автономность аккумулятора (не менее 8 ч), устойчивость к механическим воздействиям и работоспособность при широком диапазоне температур [17; 19]. RealWear HMT-1 удовлетворяет совокупности указанных требований: IP66, автономность до 10 ч, рабочий диапазон температур от -20 до $+50$ °C, сертификация по стандартам MIL-STD-810G.

Проведенный обзор позволяет сформулировать следующие нерешенные вопросы, определяющие актуальность настоящего исследования:

- отсутствие экспериментальных данных для аграрного сектора. Количественные оценки эффективности AR в техническом сервисе машин получены преимущественно для промышленного оборудования (авиационные двигатели, автомобильные узлы, энергетические установки) [24]. Экспериментальные данные для сельскохозяйственной техники отсутствуют, хотя специфика их обслуживания (разнородность парка, полевые условия, различный уровень квалификации персонала) существенно отличается от промышленных сценариев;
- зависимость существующих AR-решений от сетевой инфраструктуры. Большинство описанных в литературе AR-систем для технического сервиса функционируют в режиме облачного подключения, что неприемлемо для сельскохозяйственной эксплуатации при условиях отсутствия устойчивого интернет-покрытия в сельской местности [19];

– проблема импорта технологических карт. Существующие AR-решения, как правило, требуют ручного создания пошаговых инструкций, что делает масштабирование системы на широкий парк техники экономически неэффективным. Автоматизированный импорт данных из сервисных баз производителей (таких как John Deere Service Advisor) остается нерешенной задачей;

– недостаточная оценка влияния AR на начинающих специалистов. Хотя ряд авторов отмечает, что AR наиболее эффективна при работе с малоопытным персоналом, систематические экспериментальные данные для категории «молодой специалист в сельском хозяйстве» отсутствуют, несмотря на остроту кадровой проблемы в отрасли [11; 15].

Таким образом, актуальной научной задачей является разработка и экспериментальная апробация автономной системы информационной поддержки оператора, адаптированной к полевым условиям эксплуатации сельскохозяйственной техники, оснащенной модулем автоматизированного импорта технологических карт и функционирующей на носимых устройствах класса «hands-free».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

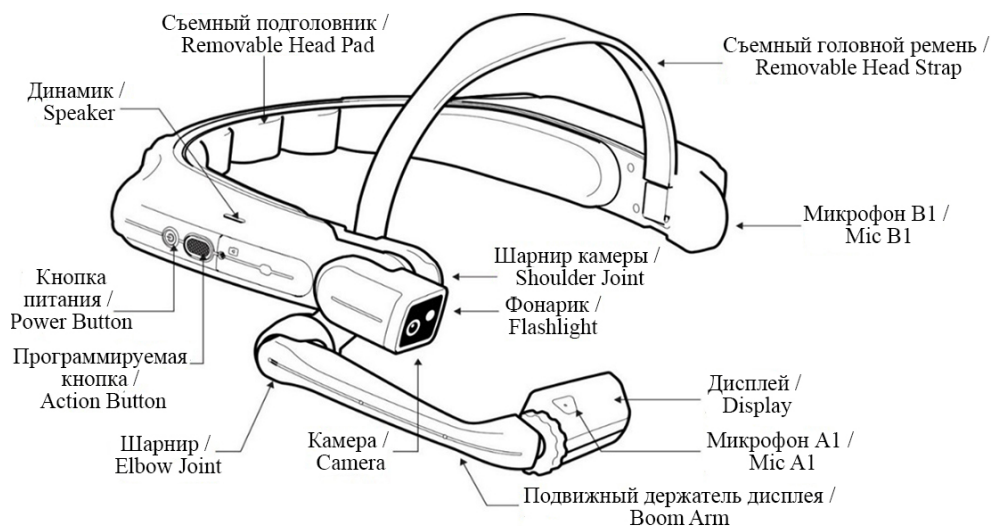
Объект исследования

Объектом исследования являлся технологический процесс ежесменного технического обслуживания (ТО-10) трактора John Deere 6125M (номинальная мощность двигателя – 132 кВт). Выбор данной модели обусловлен ее широкой распространенностью на сельскохозяйственном производстве, высокой насыщенностью электронными и гидравлическими системами, а также наличием детализированного регламента производителя с четко специфицированными контрольными точками.

Методы, оборудование и процедура исследования

В качестве платформы информационной поддержки оператора использованы промышленные AR-очки RealWear HMT-1 (рис. 1). Обоснование выбора данного устройства определялось совокупностью эксплуатационных требований: наличие модуля голосового управления, обеспечивающего режим работы «свободные руки» (hands-free) в соответствии с требованиями охраны труда при обслуживании техники; класс защиты IP66, допускающий эксплуатацию в условиях запыленности и повышенной влажности; монокулярный микродисплей (разрешение 854×480 пикселей), не перекрывающий основное поле зрения оператора; встроенная камера 16 Мп; емкость аккумулятора, обеспечивающая непрерывную работу в течение рабочей смены (до 8 ч).

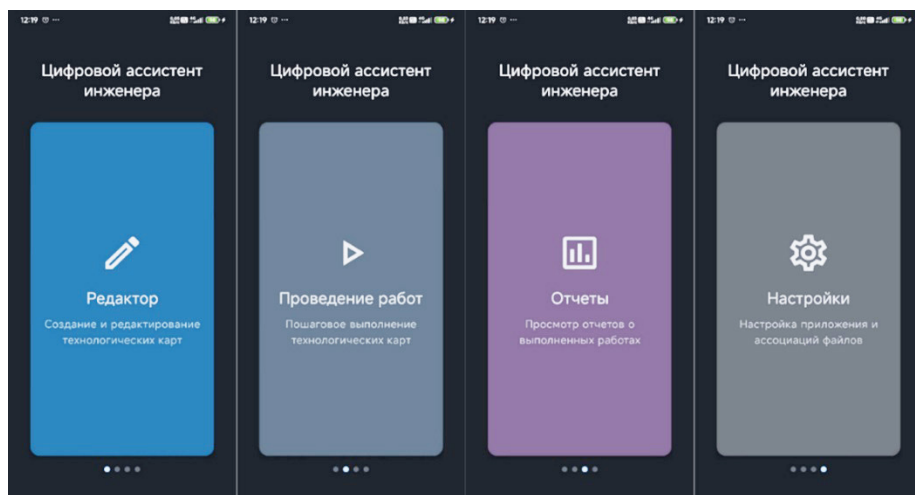
Программная часть комплекса представлена авторским мобильным приложением «Цифровой ассистент инженера», разработанным на языке Kotlin с применением архитектурного паттерна MVVM (Model–View–ViewModel) и принципов Clean Architecture. Ключевой особенностью стала способность работать без подключения к сети благодаря встроенной базе данных Room (SQLite) – это принципиально важно при эксплуатации в условиях удаленных объектов. Главное меню состоит из 4 элементов и представлено на рисунке 2.



Р и с. 1. Схема устройства RealWear HMT-1

F i g. 1. RealWear HMT-1 device schematic

Источник: адаптировано авторами на основе документации к RealWear HMT-1¹.
Source: Figure 1 was adapted by the authors from RealWear HMT-1 documentation.



Р и с. 2. Элементы главного меню приложения «Цифровой ассистент инженера»

F i g. 2. Main menu of the “Digital Engineer Assistant” application

Источник: скриншот экрана программы сделан авторами статьи.

Source: Screenshot of the program screen was made by the authors of the article.

¹ RealWear: сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://support.realwear.com/knowledge/realwear-hmt-1> (дата обращения: 03.11.2025).

Регламент ТО-10 предусматривает выполнение семи основных операций (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Table 1

Перечень регламентных операций ежесменного технического обслуживания (ТО-10) трактора John Deere 6125M (согласно шаблону omal226037 John Deere Service Advisor)

List of scheduled shift maintenance operations (SM-10) for John Deere 6125M tractor (according to omal226037 John Deere Service Advisor template)

№	Операция / Operation	Содержание / Description
1	Проверка топливной системы / Fuel system inspection	Визуальный контроль герметичности топливопроводов, состояния фильтров, уровня топлива / Visual inspection of fuel line integrity, filter condition, fuel level
2	Проверка электросистемы / Electrical system inspection	Контроль состояния клемм АКБ, целостности проводки, работоспособности приборов освещения и сигнализации / Inspection of battery terminals, wiring integrity, lighting and signaling operability
3	Проверка уровней технических жидкостей и очистка воздушного фильтра / Fluid level checks and air filter cleaning	Контроль уровней моторного масла, охлаждающей жидкости, гидравлического масла, очистка воздушного фильтра / Check engine oil, coolant, and hydraulic fluid levels; clean the air filter
4	Осмотр баков и магистралей на подтеки масла / Inspection of tanks and lines for oil leaks	Визуальный осмотр узлов на наличие подтеков и капельных течей / Visual examination of assemblies for drips and seepage
5	Слив конденсата из ресивера / Condensate drain from receiver	Открытие сливного клапана, удаление скопившегося конденсата / Opening drain valve, removing accumulated condensate
6	Комплекс смазочных работ / Lubrication service complex	Обслуживание более 15 точек смазки: передняя навеска, шарниры рулевых кулаков переднего моста, шлицевое соединение карданного вала, сцепные устройства, поворотные подшипники, подъемные тяги задней навески, точки заднего моста / Service of 15+ lubrication points: front linkage, front axle steering knuckle joints, driveshaft spline connection, coupling devices, pivot bearings, rear linkage lift arms, rear axle points
7	Оформление документации / Documentation	Заполнение журнала ТО, фиксация выявленных замечаний / Maintenance log entry, recording identified defects

Источник: таблицы 1, 2 составлены авторами статьи.

Source: The tables 1, 2 were compiled by the authors of the article.

Рассмотрели процесс ТО как управляемую систему, выходной параметр которой (время выполнения ТО) определяется совокупностью входных факторов. Общая функциональная зависимость имеет вид:

$$T_{\text{ТО}} = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5),$$

где $T_{\text{ТО}}$ – общее время выполнения комплекса регламентных операций, с; X_1 – метод информационного обеспечения оператора (варьируемый фактор); X_2 – уровень квалификации оператора (стаж работы с данным типом техники); X_3 – сложность операции ТО (количество шагов в технологической карте); X_4 – условия внешней среды (освещенность, температура); X_5 – вид технического обслуживания.

Для изоляции влияния исследуемого фактора X_1 на функцию отклика $Y = T_{\text{ТО}}$, факторы $X_2 - X_5$ фиксированы на постоянных уровнях (табл. 2). Таким образом, реализован однофакторный эксперимент с двумя уровнями варьирования:

$$X_1 = \{0 - \text{традиционная документация (CG); } 1 - \text{AR-ассистент (EG)}\},$$

где CG – контрольная группа; EG – опытная группа.

Таблица 2

Table 2

Факторное пространство и условия проведения эксперимента
Factor space and experimental conditions

Фактор / Factor	Обозначение / Symbol	Значение в эксперименте / Experimental value	Статус / Status
Метод информационного обеспечения / Information support method	X_1	0 – традиционная документация (Service Advisor); 1 – AR-ассистент / 0 – conventional documentation; 1 – AR assistant	Варьируемый / Variable
Квалификация оператора / Operator qualification	X_2	Начальный уровень (студенты инженерного профиля, без опыта работы с объектом) / Entry level (engineering students, no prior experience with the object)	Варьируемый / Variable
Сложность операции ТО / Maintenance complexity	X_3	ТО-10: 7 операций, > 15 точек смазки / SM-10: 7 operations, > 15 lubrication points	Фиксирован / Fixed
Условия среды / Environmental conditions	X_4	Закрытый бокс: $t = 20-22^\circ\text{C}$; $E \geq 300$ лк / Indoor bay: $t = 20-22^\circ\text{C}$; $E \geq 300$ lx	Фиксирован / Fixed
Вид ТО / Maintenance type	X_5	Ежесменное (ТО-10, периодичность 10 мото-ч) / Shift maintenance (SM-10, interval 10 engine-hours)	Фиксирован / Fixed

Общее время выполнения ТО представлено как сумма временных затрат по каждой из N регламентных операций, при этом время каждой операции структурно декомпозировано на три компонента:

$$T_{\text{ТО}} = \sum_{i=1}^N (t_{\text{imp } i} + t_{\text{inf } i} + t_{\text{next } i}),$$

где $t_{\text{imp } i}$ – время непосредственного выполнения i -й операции (мануальные действия), с; $t_{\text{inf } i}$ – время информационного поиска для i -й операции (обращение к документации, идентификация узлов и контрольных точек), с; $t_{\text{next } i}$ – время перехода между операциями (перемещение вокруг машины, подготовка инструмента), с; N – количество регламентных операций ТО-10.

Рабочая гипотеза исследования базируется на предположении о том, что AR-ассистент оказывает преимущественное воздействие на информационную составляющую $t_{\text{inf } i}$, минимизируя непроизводительные затраты времени на поиск и интерпретацию технической информации. Формально данная гипотеза выражается соотношением:

$$t_{\text{inf } i}^{\text{AR}} = t_{\text{inf } i}^{\text{trad}} \cdot k_{\text{AR}}, \text{ где } 0 < k_{\text{AR}} < 1,$$

где k_{AR} – коэффициент сокращения времени информационного поиска при использовании AR-ассистента (подлежит экспериментальному определению); $t_{inf i}^{AR}$ и $t_{inf i}^{trad}$ – время информационного поиска при традиционном методе и при использовании AR-ассистента соответственно.

Для статистической формализации сравнительного эксперимента принята линейная модель для двух независимых групп:

$$T_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij},$$

где T_{ij} – время выполнения ТО j -м оператором в i -й группе, с; μ – общее среднее значение времени ТО, с; τ_i – фиксированный эффект i -го метода информационного обеспечения ($i = 1 - CG, i = 2 - EG$); ε_{ij} – случайная ошибка, предполагаемая нормально распределенной с нулевым средним и постоянной дисперсией; $j = 1, \dots, n$, где $n = 25$.

Проверяемая статистическая гипотеза: $H_0 : \tau_1 = \tau_2$ (метод информационного обеспечения не влияет на время ТО); $H_0 : \tau_1 \neq \tau_2$ (метод оказывает статистически значимое влияние).

Для проверки гипотезы применили t -критерий Стьюдента для независимых выборок:

$$t_{\text{emp}} = \frac{T_{CG} - T_{EG}}{\sqrt{\frac{S_{CG}^2}{n_{CG}} + \frac{S_{EG}^2}{n_{EG}}}},$$

где T_{CG}, T_{EG} – средние арифметические времена ТО в контрольной и опытной группах, с; S_{CG}^2, S_{EG}^2 – выборочные дисперсии, с²; $n_{CG} = n_{EG} = 25$.

Предварительная проверка допущения о нормальности распределения данных в каждой группе выполнялась по критерию Шапиро – Уилка (W-тест). Нулевая гипотеза о нормальности принималась при $p > 0,05$.

Для количественной оценки практической значимости обнаруженных различий рассчитан размер эффекта по Коэну d :

$$d = \frac{T_{CG} - T_{EG}}{S_p},$$

где S_p – объединенное стандартное отклонение:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_{CG} - 1)S_{CG}^2 + (n_{EG} - 1)S_{EG}^2}{n_{CG} + n_{EG} - 2}}.$$

Интерпретация значений d осуществлялась по шкале Коэна: $d = 0,2$ – малый эффект; $d = 0,5$ – средний; $d \geq 0,8$ – большой эффект.

Относительный коэффициент повышения эффективности рассчитали:

$$\eta = \frac{T_{CG} - T_{EG}}{T_{CG}} \cdot 100 \, \%.$$

Генеральную совокупность составили студенты инженерного профиля Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий с начальным уровнем квалификации (отсутствие практического опыта работы с объектом исследования). Выбор данной генеральной совокупности обоснован тем, что он моделирует практически значимую ситуацию ввода в строй молодых специалистов – наиболее массовую категорию операторов, испытывающих затруднения при проведении регламентных работ. Общий объем выборки составил $N = 50$ человек. Распределение по группам выполнено методом простой рандомизации:

Контрольная группа: $n_{CG} = 25$ операторов, выполнявших ТО-10 с использованием стандартного шаблона omal226037 John Deere Service Advisor (текстовые инструкции с графическими приложениями на экране планшета).

Опытная группа: $n_{EG} = 25$ операторов, выполнявших ТО-10 с применением программно-аппаратного комплекса «Цифровой ассистент инженера» на очках RealWear HMT-1.

Объем выборки ($n = 25$ в каждой группе) определен, исходя из требований к репрезентативности данных в экспериментальных исследованиях, и обеспечивает выполнение условий применимости параметрических критериев. Нормальность распределения в каждой группе подтверждена критерием Шапиро – Уилка ($p > 0,05$).

Для обеспечения внутренней валидности эксперимента условия его проведения были стандартизированы:

- работы выполнялись в закрытом лабораторном боксе кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка;
- температура воздуха поддерживалась в диапазоне 20–22 °С;
- искусственная освещенность рабочей зоны не менее 300 лк (контроль поверенным люксметром ТКА-ПКМ, класс точности 2);
- перед каждым замером оборудование трактора приводилось в стандартное исходное состояние (унификация стартовых условий);
- каждому оператору перед началом работы предоставлялся одинаковый по продолжительности (5 мин) вводный инструктаж по соответствующему методу (шаблон Service Advisor – для CG, AR-очки – для EG);
- порядок выполнения операций соответствовал технологической карте производителя и был идентичен для обеих групп.

Измерение времени выполнения регламентных операций проводилось методом сплошного хронометража с использованием сертифицированного электронного секундомера «Интеграл С-01» (дискретность 0,1 с). Фиксировалось общее время полного цикла ТО-10.

Хронометрирование осуществлялось одним и тем же наблюдателем для исключения субъективной погрешности между замерщиками. Данные протоколировались в электронную таблицу для последующей статистической обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе эксперимента выполнен сравнительный хронометраж семи регламентных операций ТО-10 трактора John Deere 6125M в контрольной и опытной группе. Результаты представлены в таблице 3.

Сравнительный хронометраж операций ТО-10 трактора John Deere 6125M (N = 50)**Comparative timing of SM-10 operations for John Deere 6125M tractor (N = 50)**

№	Операция / Operation	CG, с (M ± SD) / CG, s (M ± SD)	EG, с (M ± SD) / EG, s (M ± SD)	Δ, %	t_{emp}	p
1	Проверка топливной системы / Checking fuel system	78,4 ± 14,8	68,2 ± 10,6	13,0	2,80	< 0,010
2	Проверка электросистемы / Che- cking electrical system	91,2 ± 15,8	80,4 ± 11,6	11,8	2,76	< 0,010
3	Проверка уровней жидкостей и очистка воздушного фильтра / Checking fluid levels and cleaning the air filter	108,6 ± 19,4	94,8 ± 14,2	12,7	2,87	< 0,010
4	Осмотр баков и магистралей на под- теки / Tank and line leak inspection	74,2 ± 13,2	68,6 ± 10,8	7,5	1,64	> 0,050
5	Слив конденсата из ресивера / Con- densate drain from receiver	38,6 ± 8,4	36,2 ± 7,4	6,2	1,07	> 0,050
6	Комплекс смазочных работ* / Lu- brication service complex*	336,4 ± 56,8	270,4 ± 38,6	19,6	4,81	< 0,001
7	Оформление документации / Docu- mentation	93,2 ± 17,6	0**	100,0	–	–
Общее время / Total time		820,6 ± 123,8	618,6 ± 94,8	24,6	6,48	< 0,001

Примечание: *Комплекс смазочных работ включает обслуживание более 15 точек смазки: передняя навеска, шарниры рулевых кулаков переднего моста, шлицевое соединение карданного вала, сцепные устройства, поворотные подшипники, подъемные тяги задней навески, точки заднего моста (согласно регламенту производителя); **Формирование отчетной документации выполняется автоматически модулем программы «Цифровой ассистент инженера» в процессе проведения операций 1–6 без дополнительных затрат времени оператора.

Note: *Lubrication service complex includes servicing of 15+ lubrication points: front linkage, front axle steering knuckle joints, driveshaft spline connection, coupling devices, pivot bearings, rear linkage lift arms, rear axle points (per manufacturer's schedule); **Report documentation is generated automatically by the "Digital Engineer Assistant" software module during operations 1–6 requiring no additional operator time.

Общая продолжительность выполнения ТО-10 при использовании AR-ассистента сократилась на 202,0 с, что составляет 24,6 % – с $820,6 \pm 123,8$ с в контрольной группе до $618,6 \pm 94,8$ с в опытной группе.

Незначимое ($p > 0,05$) сокращение зафиксировано на операциях с преобладанием простых мануальных действий: осмотр баков и магистралей на подтеки и слив конденсата из ресивера. Последняя операция является элементарным механическим действием (открытие сливного клапана), при котором информационный поиск практически отсутствует, поэтому AR-ассистент не обеспечивает значимого преимущества. Данный результат подтверждает рабочую гипотезу о преимущественном воздействии AR на информационную составляющую процесса t_{inf} : чем выше доля информационного поиска в операции, тем больше эффект от применения AR.

Мануальная составляющая (непосредственное выполнение технических действий) сократилась незначительно – на 2,2 % (с 532,0 до 520,2 с). Данное сокращение объясняется более уверенными и точными действиями операторов, получающих пошаговые визуальные инструкции, что снижает количество повторных

и корректирующих движений. Время переходов между операциями уменьшилось на 6,6 % (с 75,4 до 70,4 с) за счет оптимизации маршрута оператора вокруг машины, обеспечиваемой логической последовательностью шагов в AR-карте.

Согласно общепринятой шкале Коэна ($d = 0,2$ – малый эффект; $d = 0,5$ – средний эффект; $d \geq 0,8$ – большой эффект), полученное значение $d = 1,83$ свидетельствует об очень большом размере эффекта, существенно превышающем порог 0,8. Внедрение AR-ассистента оказывает выраженное практическое воздействие на продолжительность ТО.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных таблицы 3 выявляет два принципиально различных механизма повышения эффективности.

Первый механизм – автоматизация документирования. Операция 7 «Оформление документации» полностью исключена из рабочего цикла оператора опытной группы. Модуль автоматической отчетности AR-ассистента фиксирует хронометрические данные и результаты каждой операции в фоновом режиме по мере их выполнения и формирует готовый протокол без участия оператора.

Второй механизм – сокращение информационного поиска. В числе технологических операций (позиции 1–6) максимальный результат отмечен при выполнении операции 6 «Комплекс смазочных работ» – уменьшение на 19,6 % (переход от $336,4 \pm 56,8$ с к $270,4 \pm 38,6$ с, $t_{\text{emp}} = 4,81$, $p < 0,001$). Эта операция отличается наивысшей информационной сложностью, так как специалисту требуется определить местоположение и последовательно обработать более 15 смазочных узлов, размещенных в разных секциях трактора. В контрольной группе существенная часть времени уходила на локализацию точек смазки согласно схемам технической документации и их сопоставление с реальными компонентами техники. В свою очередь, AR-ассистент предоставлял поэтапную визуализацию каждого смазочного узла с текстовыми подсказками и графическими указателями, что дало возможность заметно сократить данный нерезультативный этап.

Таким образом, AR-ассистент сокращает время информационного поиска в среднем на 77 %. Остаточные 28,0 с приходятся на минимальное время восприятия AR-подсказок (чтение текстовой инструкции на дисплее, распознавание визуального маркера), которое не может быть полностью элиминировано.

Полученное сокращение времени ТО на 24,6 % согласуется с результатами зарубежных исследований применения AR в техническом обслуживании промышленного оборудования. Согласно систематическому обзору A. Malta, T. Farinha и M. Mendes, типичный диапазон сокращения времени проведения технических операций при использовании AR составляет 15–45 % в зависимости от сложности задачи и типа AR-устройства [7]. Полученный результат (24,6 %) попадает в нижнюю часть указанного диапазона, что объясняется спецификой ежедневного ТО: данный вид обслуживания включает значительную долю простых мануальных операций, на которые AR не оказывает существенного влияния. Для более сложных видов ТО (ТО-1, ТО-2, ТО-3) с большим объемом информационно-насыщенных операций можно прогнозировать более выраженный эффект.

Отдельного внимания заслуживает размер эффекта $d = 1,83$. В метаанализе E. Bottani и G. Vignali, обобщившем результаты 20 экспериментальных исследований AR в промышленности, средний размер эффекта составил $d = 0,8\text{--}1,2$ [10]. Полученное в настоящем исследовании значение $d = 1,83$ превышает этот диапазон, что может объясняться двумя факторами: участники с начальным уровнем квалификации в наибольшей степени выигрывают от информационной поддержки AR; дополнительный вклад вносит автоматизация документирования – механизм, отсутствующий в большинстве ранее изученных AR-систем.

Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что полученные результаты являются одними из первых количественных данных о применении AR молодыми специалистами при техническом обслуживании сельскохозяйственных тракторов, что определяет их научную новизну.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования сформулированы следующие основные результаты и выводы.

Разработан программно-аппаратный комплекс «Цифровой ассистент инженера», реализованный на базе промышленных AR-очков RealWear HMT-1 и авторского мобильного приложения на языке Kotlin. Отличительными особенностями комплекса являются: полная автономность функционирования (локальная база данных Room/SQLite), модуль автоматизированного импорта технологических карт из сервисных баз производителей техники, система голосовой навигации по пунктам технологической карты и модуль автоматического формирования отчетной документации.

Доказано, что применение AR-ассистента обеспечивает статистически значимое ($t_{\text{emp}} = 6,48$, $p < 0,001$, $d = 1,83$) сокращение общего времени выполнения ТО-10 трактора John Deere 6125M на 24,6 % (с $820,6 \pm 123,8$ с до $618,6 \pm 94,8$ с). Помимо этого, применение AR-ассистента снижает общую вариативность результатов на 23,4 %, что свидетельствует о нивелировании индивидуальных различий в уровне подготовки молодых специалистов.

Установлено, что повышение эффективности обеспечивается значительным сокращением времени информационного поиска и автоматизацией процесса документирования. Суммарный вклад этих механизмов составляет 91,6 % от общего сокращения времени проведения ТО. Таким образом, с учетом масштабируемости решения и независимости от интернет-инфраструктуры, разработанная AR-технология представляет собой применимый метод повышения эффективности технического сервиса машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорохов А.С. Эффективность оценки качества сельскохозяйственной техники и запасных частей. *Агроинженерия*. 2015;(1):31–35. <https://elibrary.ru/tyjhrn>
2. Журавлёв С.Ю. Современная концепция организации технического сервиса машин в АПК. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2021;(3):119–125. URL: <https://orensau.ru/ru/obuniversitete/12/4781-izvestiya-orenburgskogo-gosudarstvennogo-agrarnogo-universiteta> (дата обращения: 03.11.2025).

3. Khodabakhshian R. Maintenance Management of Tractors and Agricultural Machinery: Preventive Maintenance Systems. *CIGR Journal*. 2013;15(4):147–159. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2616> (дата обращения: 03.11.2025).
4. Царев Ю.А., Царев О.Ю. Метод повышения эксплуатационной надежности сложных сельскохозяйственных машин. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2023;(189):153–163. URL: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2023> (дата обращения: 04.12.2025).
5. Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В. Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства. *Агроинженерия*. 2023;25(4):33–42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>
6. Гончаров Р.Д., Исаев А.Д. Применение интерактивных технологий для технической поддержки в обслуживании сельскохозяйственной техники. *АгроЭкоИнженерия*. 2025;(1):145–158. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-1122-145-158>
7. Malta A., Farinha T., Mendes M. Augmented Reality in Maintenance—History and Perspectives. *Journal of Imaging*. 2023;9(7):142. <https://doi.org/10.3390/jimaging9070142>
8. Palmarini R., Erkoyuncu J.A., Roy R., Torabmostaedi H. A Systematic Review of Augmented Reality Applications in Maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018;(49):215–228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>
9. Yazdi M. Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in Maintenance Training. *Advances in Computational Mathematics for Industrial System Reliability and Maintainability*. 2024:169–183. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53514-7_10
10. Bottani E., Vignali G. Augmented Reality Technology in the Manufacturing Industry: A Review of the Last Decade. *Iise Transactions*. 2019;51(3):284–310. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
11. Egger J., Masood T. Augmented Reality in Support of Intelligent Manufacturing – A Systematic Literature Review. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;(140):106195. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195>
12. Mourtzis D., Siatras V., Angelopoulos J. Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality (AR). *Applied Sciences*. 2020;10(5):1855. <https://doi.org/10.3390/app10051855>
13. Gattullo M., Scurati G.W., Fiorentino M., Uva A.E., Ferrise F., Bordegoni M. Towards Augmented Reality Manuals for Industry 4.0: A Methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;(56):276–286. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001>
14. Kollatsch C., Klimant P. Efficient Integration Process of Production Data Into Augmented Reality Based Maintenance of Machine Tools. *Production Engineering*. 2021;(15):311–319. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01026-6>
15. Blattgerste J., Streng B., Renner P., Pfeiffer T., Essig K. Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks. In: Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. Corfu: ACM; 2017. pp. 75–82. <https://doi.org/10.1145/3056540.3056547>
16. Masoni R., Ferrise F., Bordegoni M., Gattullo M., Uva A.E., Fiorentino M., et al. Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality. *Procedia Manufacturing*. 2017;(11):1296–1302. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.257>
17. Lohan S.K., Prakash C., Lohan N., Kansal S., Karkee M. State-of-the-Art in Real-Time Virtual Interfaces for Tractors and Farm Machines: A Systematic Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;(231):109947. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.109947>
18. Phupattanasilp P., Tong S.-R. Augmented Reality in the Integrative Internet of Things (AR-IoT): Application for Precision Farming. *Sustainability*. 2019;11(9):2658. <https://doi.org/10.3390/su11092658>
19. Соловьев Д.А., Чумакова С.В., Гончаров Р.Д., Чумаков Р.В. Обоснование внедрения AR-технологий при проведении ТО сельскохозяйственной техники в АПК. *Нива Поволжья*. 2022;(3):3006. <https://doi.org/10.36461/NP.2022.63.3.020>
20. Гончаров Р.Д., Исаев А.Д., Россошанский С.Д., Ружьев В.А., Шахов В.А. Разработка цифровой платформы для обучения работе с сельскохозяйственной техникой. *Известия Оренбургского*

- государственного аграрного университета. 2025;(5):148–154. URL: <https://orensau.ru/ru/obuniversitete/12/4781-izvestiya-orenburgskogo-gosudarstvennogo-agrarnogo-universiteta> (дата обращения: 03.11.2025).
21. Melzer J.E. A Survey of Augmented and Virtual Reality Wearable Displays in Medical and Surgical Applications: Architectures, Requirements, Performance, and Benefits. In: Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) VII: Conference Proceedings. 2026. pp. 155–170. <https://doi.org/10.1117/12.3081439>
 22. Röltgen D., Dumitrescu R. Classification of Industrial Augmented Reality Use Cases. *Procedia CIRP*. 2020;(91):93–100. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.137>
 23. Fraga-Lamas P., FernáNdez-CaraméS T.M., Blanco-Novoa ÓS., Vilar-Montesinos M.A. A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *Ieee Access*. 2018;(6):13358–13375. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326>
 24. Dey A., Billinghamurst M., Lindeman R.W., Swan II J.E. A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies: 2005 to 2014. *Frontiers in Robotics and AI*. 2018;(5):37. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00037>

REFERENCES

1. Dorokhov A.S. [Efficiency of Quality Assessment of Agricultural Machinery and Spare Parts]. *Agricultural Engineering*. 2015;(1):31–35. (In Russ.) <https://elibrary.ru/tyjhrn>
2. Zhuravlev S.Yu. Modern Concept of Organization of Technical Service of Machines in the Agro-Industrial Complex. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021;(3):119–125. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/obuniversitete/12/4781-izvestiya-orenburgskogo-gosudarstvennogo-agrarnogo-universiteta> (accessed 03.11.2025).
3. Khodabakhshian R. Maintenance Management of Tractors and Agricultural Machinery: Preventive Maintenance Systems. *CIGR Journal*. 2013;15(4):147–159. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2616> (accessed 03.11.2025).
4. Tsarev Yu.A., Tsarev O.Yu. Method of Increasing the Operational Reliability of Complex Agricultural Machines. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023;(189):153–163. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <http://ej.kubagro.ru/archive.asp?y=2023> (accessed 04.12.2025).
5. Nikitchenko S.L., Lesnik N.A., Smykov S.V. Management of Agricultural Machinery Maintenance Under the Automation and Digitalization of Production. *Agricultural Engineering*. 2023;25(4):33–42. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>
6. Goncharov R.D., Isaev A.D. Application of Interactive Technologies for Technical Support of Agricultural Machinery Maintenance. *AgroEcoEngineering*. 2025;(1):145–158. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-1122-145-158>
7. Malta A., Farinha T., Mendes M. Augmented Reality in Maintenance—History and Perspectives. *Journal of Imaging*. 2023;9(7):142. <https://doi.org/10.3390/jimaging9070142>
8. Palmarini R., Erkoyuncu J.A., Roy R., Torabmostaedi H. A Systematic Review of Augmented Reality Applications in Maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018;(49):215–228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>
9. Yazdi M. Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in Maintenance Training. *Advances in Computational Mathematics for Industrial System Reliability and Maintainability*. 2024:169–183. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53514-7_10
10. Bottani E., Vignali G. Augmented Reality Technology in the Manufacturing Industry: A Review of the Last Decade. *Iise Transactions*. 2019;51(3):284–310. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
11. Egger J., Masood T. Augmented Reality in Support of Intelligent Manufacturing – A Systematic Literature Review. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;(140):106195. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195>

12. Mourtzis D., Siatras V., Angelopoulos J. Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality (AR). *Applied Sciences*. 2020;10(5):1855. <https://doi.org/10.3390/app10051855>
13. Gattullo M., Scurati G.W., Fiorentino M., Uva A.E., Ferrise F., Bordegoni M. Towards Augmented Reality Manuals for Industry 4.0: A Methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;(56):276–286. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001>
14. Kollatsch C., Klimant P. Efficient Integration Process of Production Data Into Augmented Reality Based Maintenance of Machine Tools. *Production Engineering*. 2021;(15):311–319. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01026-6>
15. Blattgerste J., Strenge B., Renner P., Pfeiffer T., Essig K. Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks. In: Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. Corfu:ACM; 2017. pp. 75–82. <https://doi.org/10.1145/3056540.3056547>
16. Masoni R., Ferrise F., Bordegoni M., Gattullo M., Uva A.E., Fiorentino M., et al. Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality. *Procedia Manufacturing*. 2017;(11):1296–1302. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.257>
17. Lohan S.K., Prakash C., Lohan N., Kansal S., Karkee M. State-of-the-Art in Real-Time Virtual Interfaces for Tractors and Farm Machines: A Systematic Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;(231):109947. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.109947>
18. Phupattanasilp P., Tong S.-R. Augmented Reality in the Integrative Internet of Things (AR-IoT): Application for Precision Farming. *Sustainability*. 2019;11(9):2658. <https://doi.org/10.3390/su11092658>
19. Solovyov D.A., Chumakova S.V., Goncharov R.D., Chumakov R.V. Justification for the Implementation of Ar-Technologies in the Maintenance of Agricultural Machinery in the Agro-Industrial Complex. *Niva Povolzh'ya*. 2022;(3):3006. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36461/NP.2022.63.3.020>
20. Goncharov R.D., Isaev A.D., Rossoshansky S.D., Ruzhev V.A., Shakhov V.A. Development of a Digital Platform for Training in Working with Agricultural Machinery. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2025;(5):148–154. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/obuniversitete/12/4781-izvestiya-orenburgskogo-gosudarstvennogo-agrarnogo-universiteta> (accessed 03.11.2025).
21. Melzer J.E. A Survey of Augmented and Virtual Reality Wearable Displays in Medical and Surgical Applications: Architectures, Requirements, Performance, and Benefits. In: Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) VII: Conference Proceedings. 2026. pp. 155–170. <https://doi.org/10.1117/12.3081439>
22. Röltgen D., Dumitrescu R. Classification of Industrial Augmented Reality Use Cases. *Procedia CIRP*. 2020;(91):93–100. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.137>
23. Fraga-Lamas P., Fernández-Caramés T.M., Blanco-Novoa Ó.S., Vilar-Montesinos M.A. A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *Ieee Access*. 2018;(6):13358–13375. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326>
24. Dey A., Billingham M., Lindeman R.W., Swan II J.E. A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies: 2005 to 2014. *Frontiers in Robotics and AI*. 2018;(5):37. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00037>

Об авторах:

Уско Иван Анатольевич, аспирант Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий (630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1932-0804>, SPIN-код: 5563-6698, xxxandryukha36@gmail.com

Долгушин Алексей Александрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий (630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7506-6309>, Scopus ID: 57212168418, SPIN-код: 1470-7343, dolgushin078@mail.ru

Шилкина Мария Валерьевна, аспирант Сибирского государственного университета инженерии и биотехнологий (630039, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 160), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5007-0831>, pandoraqwz@gmail.com

Раков Николай Викторович, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевицкая, д. 68) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, SPIN-код: 5593-8618, nikolaymgu@yandex.ru

Вклад авторов:

И. А. Уско – формулирование замысла / идеи исследования, целей и задач; осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных/доказательств; программирование, разработка и проектирование программного обеспечения; написание программного кода и реализация вспомогательных алгоритмов; тестирование существующих компонентов кода; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

А. А. Долгушин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; административное управление планированием и проведением исследования; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

М. В. Шилкина – применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования.

Н. В. Раков – деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности (включая программный код для интерпретации, где это необходимо) для первоначального и повторного использования.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 11.10.2025; поступила после рецензирования 12.11.2026;
принята к публикации 10.03.2026*

About the authors:

Ivan A. Usko, Postgraduate Student, Siberian State University Engineering and Biotechnology (160 Dobrolyubov St., Novosibirsk 630039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1932-0804>, SPIN-code: 5563-6698, xxxandryukha36@gmail.com

Alexey A. Dolgushin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Machinery and Tractor Fleet Operation, Siberian State University Engineering and Biotechnology (160 Dobrolyubov St., Novosibirsk 630039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7506-6309>, Scopus ID: 57212168418, SPIN-code: 1470-7343, dolgushin078@mail.ru

Maria V. Shilkina, Postgraduate Student, Siberian State University Engineering and Biotechnology (160 Dobrolyubov St., Novosibirsk 630039, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5007-0831>, pandoraqwz@gmail.com

Nikolay V. Rakov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-9371>, SPIN-code: 5593-8618, nikolaymgu@yandex.ru

Authors contribution:

I. A. Usko – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection; programming, software development; designing computer programs; implementation of the computer code and supporting algorithms; testing of existing code components; preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

A. A. Dolgushin – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; management and coordination responsibility for the research activity planning and execution; preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

M. V. Shilkina – application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyse or synthesize study data.

N. V. Rakov – management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 11.10.2025; revised 12.11.2026; accepted 10.03.2026