

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 631.171:004

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-49-56

**Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами:  
формирование структуры**

*Иван Александрович Старостин*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник  
starwan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

*Светлана Александровна Давыдова*, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник  
davidova-sa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

*Александр Вадимович Ещин* , канд. техн. наук, старший научный сотрудник  
eschin-vim@yandex.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

**Аннотация.** Цифровые технологии, внедряемые в сельское хозяйство, направлены на повышение эффективности производства сельскохозяйственной продукции. Сельскохозяйственные роботы, осуществляющие технологические операции, мониторинг состояния поля, посевов или урожайности культур при географической удаленности от облачного хранилища, низкой пропускной способности и ненадежности сети, значительных задержках и сбоях в передаче информации, могут снижать свою производительность, качество выполнения работ и безопасность эксплуатации. С целью повышения производительности агрегатов в составе с беспилотными роботизированными техническими средствами сельскохозяйственного назначения, обеспечения высокого качества выполнения ими технологических операций, а также их безопасной эксплуатации предложена интеллектуальная система управления с применением технологий граничных вычислений на базе Edge Computing. При проведении исследований применялись методы комплексного структурно-динамического анализа и экспертно-аналитический способ обработки информации. В результате проведенных исследований предложена структурно-функциональная схема интеллектуальной системы управления сельскохозяйственными агрегатами в составе с роботизированными техническими средствами, позволяющая централизованно контролировать технологический процесс. Сельскохозяйственные машины осуществляют настройку рабочих органов и корректировку их работы с помощью встроенных автономных систем контроля, передающих данные в систему управления для выработки команд. Реализация концепции Edge Computing в цифровом сельском хозяйстве позволит снизить объем передаваемой информации и нагрузку на сеть передачи данных без снижения качества проведения технологического процесса при сбоях в работе сельскохозяйственной машины и встроенных систем.

**Ключевые слова:** цифровое сельское хозяйство, цифровые технологии, интеллектуальная система управления, система управления, система контроля, граничные вычисления, Edge Computing, сеть передачи данных

**Формат цитирования:** Старостин И.А., Давыдова С.А., Ещин А.В. Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами: формирование структуры // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 3. С. 49-56. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>.

© Старостин И.А., Давыдова С.А., Ещин А.В., 2023

## ORIGINAL ARTICLE

**Intelligent agricultural robot control system: structure formation**

*Ivan A. Starostin*, CSc (Eng), Senior Research Engineer  
starwan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>

*Svetlana A. Davydova*, CSc (Eng), Lead Research Engineer  
davidova-sa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

*Aleksandr V. Eshchin* , CSc (Eng), Senior Research Engineer  
eschin-vim@yandex.ru ; <https://orcid.org/0000-0002-9368-7758>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 5, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proezd Str., Moscow, 109428, Russian Federation

**Abstract.** Digital technologies introduced into agriculture are aimed at improving the efficiency of agricultural production. Agricultural robots carrying out technological operations, monitoring the field, crops, or crop yields

may reduce their productivity, quality and safety of operation due to the geographical distance from the cloud storage, low bandwidth and network unreliability, significant delays and failures in data transmission. To increase the performance of units with unmanned robotic technical means for agricultural purposes, to ensure the high quality of their technological operations, as well as their safe operation, an intelligent control system using edge computing technologies based on Edge Computing is proposed. During the research, the authors used methods of complex structural-dynamic analysis and an expert-analytical method of information processing. As a result of the research, a structural and functional diagram of an intelligent control system for agricultural units with robotic technical means has been proposed to ensure centralized control of the technological process. Agricultural machines adjust the working tools and their operation process using built-in autonomous control systems that transmit data to the control system to generate commands. The operation of the working tools is adjusted in case of serious failures in the unit operation. The implementation of the Edge Computing concept in digital agriculture will reduce the amount of transmitted information and the load on the data transmission network, without reducing the technological process quality in case of failures in the operation of farm machines and embedded systems.

**Keywords:** digital agriculture, digital technologies, intelligent control system, control system, monitoring system, edge computing, Edge Computing, data communication network

**For citation:** Starostin I.A., Davydova S.A., Eshchin A.V. Intelligent agricultural robot control system: structure formation. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(3):49-56. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-3-49-56>.

**Введение.** В современном сельскохозяйственном производстве сохраняется ряд проблем, связанных со снижением темпов роста урожайности сельскохозяйственных культур, производительности труда, низким уровнем энергоэффективности и экологичности производства, которые до настоящего времени не удалось эффективно решить. Большие надежды возлагаются на цифровые технологии, которые должны способствовать повышению эффективности производства сельскохозяйственной продукции и стать драйвером развития агропромышленного комплекса [1]. Ожидается, что комплексное применение цифровых технологий в сельском хозяйстве позволит обеспечить условия для максимальной реализации производственного потенциала сельскохозяйственных культур, обеспечения наивысшего качества получаемой продукции и экологической безопасности производства, оптимизировать издержки производства, повысить производительность и улучшить условия труда [2].

С целью интенсификации и систематизации процесса цифровой трансформации сельского хозяйства Минсельхозом России разработан ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство», который предусматривает комплекс мероприятий по внедрению цифровых, информационных и интеллектуальных технологий в АПК с помощью модуля «Агрорешения». Проектом планируется создание подсистем сбора и хранения данных о землях сельскохозяйственного назначения, семенах, удобрениях, сельскохозяйственных машинах и т.д. Базовыми технологиями для развития данных подсистем выступают дистанционное зондирование, радиочастотная идентификация, интернет вещей (IoT), облачные

технологии, инструменты обработки больших данных «Big Data», искусственный интеллект (AI) и роботизация рутинных процессов.

Одной из главных задач разрабатываемой платформы является автоматизация производственных процессов за счет внедрения цифровых и интеллектуальных систем контроля и управления технологическими процессами производства сельскохозяйственной продукции. Реализация проекта по цифровой трансформации сельского хозяйства приведет к значительному росту потока передаваемых данных, в том числе от устройств и сельскохозяйственной техники, расположенных непосредственно в поле, что увеличит нагрузку на сельские мобильные сети, которые имеют невысокую скорость передачи данных и недостаточную зону покрытия [3, 4].

Учеными прогнозируется, что дальнейшее развитие сельского хозяйства и сельскохозяйственной техники будет базироваться на применении искусственного интеллекта и роботизированных систем, внедрении «умных» и «подключенных» машин, которые в дальнейшем позволят реализовать автономное выполнение технологических операций. Искусственный интеллект будет выполнять функции управления на основе прогнозирования и планирования хозяйственной деятельности, а также контроля и управления производством [5]. Сельскохозяйственные машины в свою очередь будут выполнять технологические операции в соответствии с принятыми управленческими решениями, собирать и передавать необходимые данные.

Большой массив информации о текущих параметрах технологического процесса, окружающей среде и состоянии биологических сельскохозяйственных

объектов может усугубить вышеописанную проблему передачи информации. Низкая скорость передачи данных, их задержка или потеря при эксплуатации автономных роботов могут негативно отразиться на качестве выполнения технологических операций, производительности агрегата и безопасности его эксплуатации [6], поэтому целесообразно учитывать возможность возникновения данной проблемы, ее последствия и пути решения на этапе формирования цифровых систем управления технологическими процессами.

Расширение зоны покрытия сельской местности мобильным интернетом и повышение скорости передачи данных требуют финансовых затрат на модернизацию существующего или установку нового оборудования, что может оказаться экономически нецелесообразным при обеспечении функционирования автономных сельскохозяйственных роботов. Одним из путей решения может стать разработка интеллектуальной системы управления роботизированными техническими средствами сельскохозяйственного назначения с применением технологий граничных вычислений [7].

**Цель исследований:** разработка структуры интеллектуальной системы управления с применением технологий граничных вычислений, которая позволит повысить производительность агрегатов в составе с беспилотными роботизированными техническими средствами сельскохозяйственного назначения, обеспечить наивысшее качество выполнения ими технологических операций, а также их безопасную эксплуатацию.

**Материалы и методы.** При проведении анализа основных технологий управления технологическими процессами производства сельскохозяйственной продукции применялись методы комплексного структурно-динамического анализа и экспертно-аналитический способ обработки информации.

**Результаты и их обсуждение.** С целью цифровизации сельского хозяйства исследователями предлагается создание отраслевых цифровых платформ управления с применением информационно-управляющих систем. При реализации данного подхода информация со всех средств мониторинга (метеостанции, полевые датчики, средства мониторинга окружающей среды, технологического процесса и технического состояния сельскохозяйственной техники и др.) собирается в облачной геоинформационной системе, формирующей единую базу данных, хранящую информацию обо всех проведенных на каждом участке технологических операциях, параметрах и качестве их реализации [8]. При этом необходимо обеспечить возможность сельскохозяйственных машин принимать,

собирать, обрабатывать и передавать данные в общую систему, а также осуществлять обмен данными между собой [9].

Реализация данного подхода в растениеводстве требует серьезного развития сельскохозяйственных машин. Они должны совершить переход от простых технических средств, осуществляющих технологические операции, к дистанционно управляемым сельскохозяйственным роботам и автономным роботизированным машинно-тракторным агрегатам [10].

Существующие системы управления сельскохозяйственной техникой включая системы параллельного вождения разрабатываются исходя из условия наличия оператора технического средства, осуществляющего, как минимум, контроль за движением и протеканием технологического процесса. При этом генерируемые таким техническим средством данные без существенной обработки собираются и передаются на удаленный терминал [11]. Переход к роботизированному сельскохозяйственному производству предусматривает применение интеллектуальной системы управления, анализирующей поступающие в облачное хранилище данные, которая берет на себя функции контроля и управления техническими средствами, а роль человека ограничивается удаленным контролем за выполнением работ.

Энергетические средства автономных роботизированных систем должны выполнять несколько функций: как тяговое или приводное средство для сельскохозяйственной машины, как устройство управления параметрами технологического процесса и как средство мониторинга состояния поля, посевов или урожайности культур.

Таким образом, применяющиеся в сельском хозяйстве технические средства должны оснащаться большим количеством устройств мониторинга (датчики, сенсоры, чипы и т.п.), становиться элементами общей сети интернета вещей, взаимодействующими как между собой, так и с окружающей средой [12]. При этом для корректного функционирования интеллектуальной системы управления и роботизированных технических средств возникает необходимость передачи, хранения и обработки достаточно больших объемов информации. Эти данные могут включать в себя параметры протекания технологического процесса, данные о местоположении, траектории, скорости движения, информацию с лидаров, камер, средств мониторинга и т.д. [13].

При создании информационно-управляющих систем предусматривается прямое взаимодействие между расположенной на облачном сервере системой управления и сельскохозяйственным роботом, передающим необработанные данные в облачный сервер

для дальнейшего анализа. В результате формируется большой объем информации, который зачастую необходимо проанализировать в режиме реального времени и выработать оптимальные управленческие решения. Однако ввиду географической удаленности сельскохозяйственной техники от системы управления (облачного сервера), ограниченной пропускной способности и низкой надежности сельской сети (особенно при одновременном обслуживании нескольких полевых устройств) могут возникать значительные задержки и сбои в передаче информации, ввиду чего время отклика управляющей системы существенно увеличивается (рис. 1) [14, 15]. Вследствие этого безопасная эксплуатация роботизированной сельскохозяйственной техники становится затруднительной.

Решить обозначенные проблемы можно с помощью периферийной концепции Edge Computing («Граничные вычисления»), дополняющей существующую облачную модель использования данных. Суть ее заключается в сборе данных средствами мониторинга и передаче на устройство обработки данных (локальный узел), расположенное непосредственно рядом с этими средствами, – например, на самой сельскохозяйственной машине или энергосредстве. Локальный узел обрабатывает поступающую информацию, анализирует сценарии развития, выдает корректирующие команды, обработанную информацию передает

на облачный сервер и получает от него обновленные управляющие команды [16].

Реализация концепции Edge Computing в цифровом сельском хозяйстве позволяет повысить уровень безопасности передачи данных; защитить информацию от потери, так как при потере соединения с облачным сервером локальные узлы продолжают собирать и обрабатывать информацию; снизить объемы передаваемой информации, трафик и нагрузку на мобильную сеть передачи данных [14-16].

В сельскохозяйственном производстве технологическая операция посева является одной из наиболее ответственных и требующих контроля множества параметров, поэтому в качестве примера выбран агрегат для посева. При реализации технологий Edge Computing граничные вычисления осуществляются непосредственно в вычислительных узлах посевного комплекса и роботизированного технического средства, в которые поступают данные как от отдельных узлов машин, так и от других технических средств и устройств (рис. 2).

Рассмотрим структурно-функциональную схему предлагаемой интеллектуальной системы управления и алгоритм ее работы на примере роботизированного посевного агрегата (РА), состоящего из роботизированного мобильно-энергетического средства (РМЭС) и посевного комплекса, оснащенных системами контроля и управления технологическим процессом, устройствами сбора, обработки и передачи информации (рис. 3). Предлагаемая структура интеллектуальной системы управления роботизированным посевным агрегатом включает в себя облачную интеллектуальную систему управления – систему верхнего уровня; систему управления (вычислительный узел) роботизированного мобильно-энергетического средства – систему среднего уровня; систему управления (вычислительный узел) посевного комплекса – систему нижнего уровня. Интеллектуальная система управления имеет доступ к базе данных и способна на основании результатов обработки, имеющихся в базе и вновь поступающих данных, строить прогностические модели и выработать оптимальные управляющие сигналы.

Предлагаемая структура интеллектуальной системы управления функционирует следующим образом. Осуществив анализ данных, интеллектуальная система управления выдает решение о проведении технологической операции «Посев». Для роботизированного посевного агрегата задаются следующие данные: координаты поля, на котором необходимо засеять определенную культуру; состав агрегата с указанием конкретных формирующих РА технических средств (с указанием индивидуальных номеров

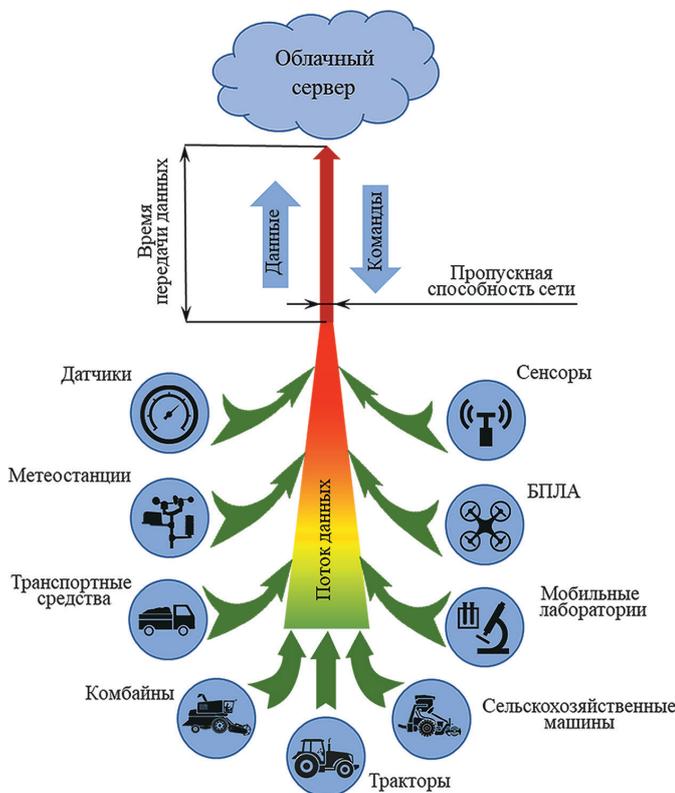
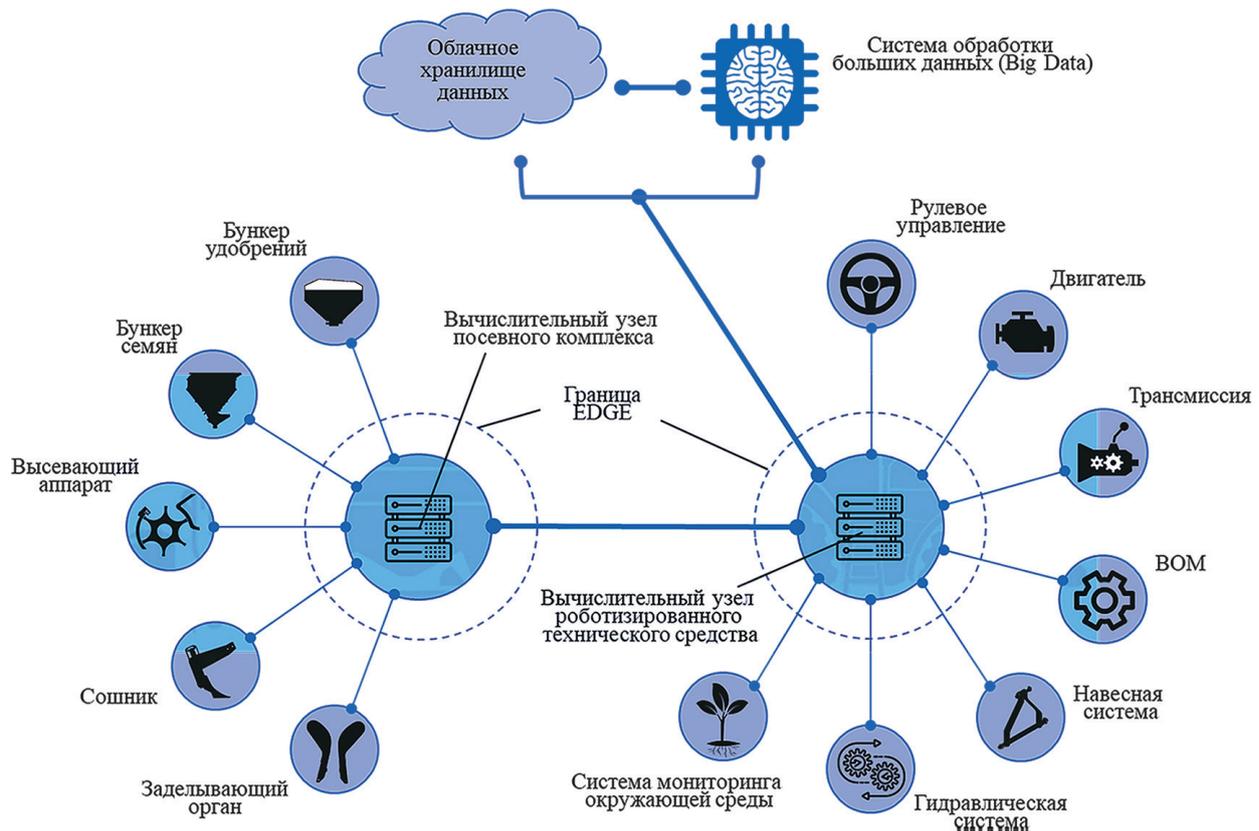


Рис. 1. Схема передачи необработанных данных в систему управления

Fig. 1. Diagram of raw data transfer to the control system



**Рис. 2. Принципиальная схема реализации технологий Edge Computing в управлении роботизированными сельскохозяйственными агрегатами на примере посевного агрегата**

**Fig. 2. Schematic diagram of implementation of Edge Computing technologies in controlling robotic agricultural unit as exemplified by a seeding unit**

машин); норма высева семян; глубина высева семян; норма внесения удобрений; рабочая скорость, траектория движения и т.д. В систему приема и обработки управляющих сигналов РМЭС передается команда о комплектовании агрегата.

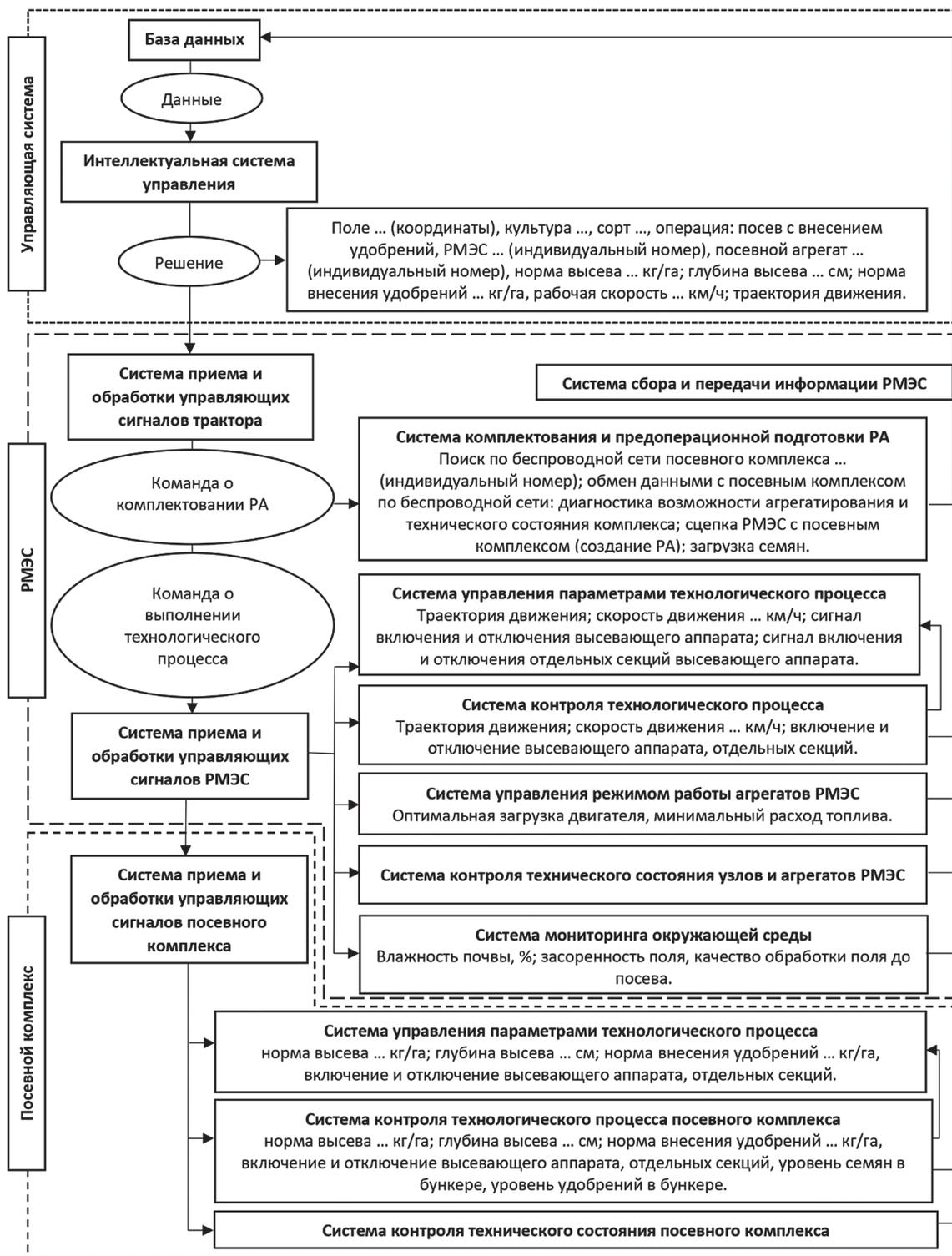
Система комплектования и предоперационной подготовки агрегата осуществляет диагностику РМЭС. При исправном состоянии комплекса и возможном агрегатировании РМЭС направляется к посевному комплексу для формирования посевного агрегата. Сформированный посевной агрегат далее направляется на склад для загрузки семян или непосредственно в поле, двигаясь по заданному управляющей системой маршруту. При этом РМЭС должно быть оснащено собственной системой управления, корректирующей маршрут, траекторию и скорость движения в случае непредвиденных ситуаций, возникающих как в полевых условиях, так и на дорогах общего пользования.

По прибытии на заданное поле управляющая система дает команду о начале выполнения технологической операции. Система приема и обработки управляющих сигналов РМЭС передает в системы управления параметрами технологического процесса и контроля технологического процесса РМЭС

информацию о заданных траекториях и скорости движения; о включении и отключении высевающего аппарата или отдельных секций на разворотных полосах и определенных участках поля. В систему приема и обработки управляющих сигналов посевного комплекса поступает информация о заданной норме высева семян, глубине высева, норме внесения удобрений, включении и отключении высевающего аппарата или отдельных секций в процессе работы. Система контроля технологического процесса РМЭС сравнивает поступившую информацию с параметрами, заданными управляющей системой, и в случае отклонения передает корректирующий сигнал в систему управления технологическим процессом. Дополнительно эта система осуществляет мониторинг уровня семян и удобрений в бункерах.

Система управления режимом работы агрегатов РМЭС обеспечивает оптимальную загрузку двигателя и минимальный расход топлива при осуществлении технологической операции. Система контроля технического посевного комплекса осуществляет постоянную диагностику технического состояния его узлов и агрегатов.

Автономно функционирует система мониторинга окружающей среды, которая собирает



**Рис. 3. Интеллектуальная система управления роботизированным посевным агрегатом. Структурно-функциональная схема:**

PMЭC – роботизированное мобильно-энергетическое средство; РА – роботизированный посевной агрегат

**Fig. 3. Intelligent control system for a robotic seeding unit. Schematic diagram:**  
PMЭC – robotized mobile energy vehicle; РА – robotized seeding unit

информацию о влажности почвы, засоренности поля, качестве подготовки поля, фитосанитарном состоянии и т.д. Собранная информация через систему сбора и передачи информации PMЭC передается в базу данных.

Система приема и обработки управляющих сигналов посевного комплекса передает через систему приема и обработки управляющих сигналов PMЭC информацию о заданных параметрах технологического процесса (норма высева семян, глубина высева,

норма внесения удобрений, включение и отключение высевающего аппарата или отдельных секций) и направляет ее в системы управления параметрами технологического процесса, контроля технологического процесса посевного комплекса и контроля технического состояния посевного комплекса. Корректировка работы рабочих органов осуществляется за счет встроенных автономных систем (системы контроля), которые передают данные в систему управления для выработки команд только в случае существенных отклонений.

Реализация интеллектуальной системы управления сельскохозяйственными роботами требует разработки как отдельных элементов формируемой сети передачи данных, так и протокола обмена информацией между интеллектуальной системой управления, роботизированным мобильным энергетическим средством, рабочей машиной и их внутренними системами с целью обеспечения быстрой, беспрепятственной и защищенной передачи данных и для согласования их работы.

В дальнейших исследованиях при разработке протокола передачи данных необходимо определить основные типы пользовательских данных и режимы их передачи, требуемую скорость и дальность передачи, допустимое время задержки и время передачи, объем передаваемой информации. Следует

заложить функциональные возможности обнаружения и устранения неисправностей, синхронизации времени между устройствами, обеспечить необходимый уровень защищенности и отказоустойчивости системы, ее доступность, гибкость, масштабируемость и т.д. [17].

Предлагаемый подход позволяет снизить объем передаваемой информации и нагрузку на сеть передачи данных без снижения качества проведения технологических операций при сбоях в работе сельскохозяйственной машины и встроенных систем.

## Выводы

Интеллектуальная система управления сельскохозяйственными роботами, базирующаяся на применении технологий граничных вычислений, позволяет исключить возможные простои техники и возникновение чрезвычайных ситуаций, связанных с задержками и сбоями в передаче информации, увеличением времени отклика управляющей системы. Применение интеллектуальной системы управления системой дает возможность снизить объем передаваемой информации и нагрузку на сеть передачи данных, обеспечить безопасную эксплуатацию сельскохозяйственных роботов, добиться повышения качества выполнения технологических операций и увеличения производительности сельскохозяйственных агрегатов.

## Список использованных источников

1. Измайлов А.Ю. Интеллектуальные технологии и роботизированные средства в сельскохозяйственном производстве // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 5. С. 536-538. <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>
2. Сибирёв А.В., Дорохов А.С., Аксенов А.Г. Цифровизация машинной технологии уборки лука искусственными нейронными сетями // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. Т. 20, № 1. С. 84-91. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.1.84-91>
3. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Потапов С.Е., Шуточкин Е.А., Бонкин И.Д. Концепция применения программно-конфигурируемых сетей для управления мобильными объектами // Известия Института инженерной физики. 2016. № 1 (39). С. 25-30. EDN: VJSPJH
4. Гаврилов А.В. Проблемы цифровизации сельского хозяйства развивающихся стран // Наука без границ. 2021. № 7 (59). С. 38-45. EDN: ZHUGQG
5. Young S.N., Kayacan E., Peschel J.M. Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum. *Precision Agric.* 2019;20:697-722. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9601-6>
6. Шелковников С.А., Петухова М.С., Алексеев А.А. Теоретические основы управления сельскохозяйственным производством на основе цифровых технологий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Экономика». 2020. Т. 28, № 1. С. 137-145. <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2020-28-1-137-145>
7. Moysiadis V., Tsolakis N., Katikaridis D., Sørensen C.G., Pearson S., Bochtis D. Mobile robotics in agricultural operations:

## References

1. Izmaylov A.Y. Smart technologies and robotic means in agricultural production. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2019;89(5):536-538. (In Rus.) <https://doi.org/10.31857/S0869-5873895536-538>
2. Sibiriev A.V., Dorokhov A.S., Aksenov A.G. Digital transformation of machine technology for onion harvesting using the theory of artificial neural networks. *Agricultural Science of Euro-North-East.* 2019;20(1):84-91. (In Rus.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.1.84-91>
3. Tsimbal V.A., Toiskin V.Y., Potapov S.E., Shutochkin E.A., Bonkin I.D. Concept of the use of software configurable network to control mobile objects. *Izvestiya instituta inzhenernoj fiziki.* 2016;1(39):25-30. (In Rus.)
4. Gavrilov A.V. Challenges of digitalization of agriculture in developing countries. *Science without borders.* 2021;7(59):38-45. (In Rus.)
5. Young S.N., Kayacan E., Peschel J.M. Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum. *Precision Agric.* 2019;20:697-722. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9601-6>
6. Shelkovnikov S.A., Petukhova M.S., Alekseev A.A. Theoretical bases of managing agricultural production based on digital technologies. *RUDN Journal of Economics.* 2020;28(1):137-145. (In Rus.) <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2020-28-1-137-145>
7. Moysiadis V., Tsolakis N., Katikaridis D., Sørensen C.G., Pearson S., Bochtis D. Mobile robotics in agricultural operations: A narrative review on planning aspects. *Appl. Sci.* 2020;10(10):3453. <https://doi.org/10.3390/app10103453>

A narrative review on planning aspects. Appl. Sci. 2020;10(10):3453. <https://doi.org/10.3390/app10103453>

8. Меденников В.И. Интеграция цифровых платформ управления сельским хозяйством России и Казахстана // *Endless Light in Science*. 2022. № 3-3. С. 17-24. EDN: NXMEZO

9. Кондратьева О.В., Федоров А.Д., Слинько О.В. О перспективах развития цифровизации в растениеводстве // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. № 4 (29). С. 321-329. EDN: YQVPAD

10. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15, № 4. С. 6-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

11. Головинов Е.Э., Аминев Д.А., Захаров А.В., Бакштанин А.М. Отечественный агрономитор для контроля работы сельскохозяйственной техники // *Природообустройство*. 2016. № 1. С. 52-57. EDN: VVWIVV

12. Starostin I.A., Belyshkina M.E., Chilingaryan N.O., Alipichev A.Yu. Digital technologies in agricultural production: implementation background, current state and development trends. *Agricultural engineering*. 2021;3(103):4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-4-10>

13. Gao X. et al. Review of wheeled mobile robots' navigation problems and application prospects in agriculture. *IEEE Access*. 2018;6:49248-49268. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2868848>

14. Петухова Н.В., Фархадов М.П., Качалов Д.Л. Разгрузка и консолидация вычислительных ресурсов в среде туманных и граничных вычислений // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2020. № 50. С. 123-129. <https://doi.org/10.17223/19988605/50/15>

15. Винничек Е.В. Облачные, граничные и туманные вычисления. Анализ и прогноз развития технологий обработки данных // *Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта*. 2018. № 1 (5). № 4. С. 239-244. EDN: YWZWXА

16. Воробьев С.П., Широбокова С.Н., Евсин В.А. Модель обмена системы распределенного реестра облачных, туманных и граничных вычислений // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2022. № 2. С. 11-21. <https://doi.org/10.14357/20718632220202>

17. Olenev V.L. Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols. *Information and Control Systems*. 2021;1:8-16. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-1-8-16>

8. Medennikov V.I. Integration of digital agricultural management platforms in Russia and Kazakhstan. *Endless Light in Science*. 2022;3-3:17-24. (In Rus.)

9. Kondratyeva O.V., Fedorov A.D., Slinko O.V. About the prospects of planting digitalization. *Innovatsii v selskom khozyaystve*. 2018;4(29):321-329. (In Rus.)

10. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15(4):6-10 (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>

11. Golovinov E.E., Aminev D.A., Zakharov A.V., Bakshatanin A.M. Domestic agromonitor for control of agricultural machinery operation. *Prirodoobustroystvo*. 2016;1:52-57. (In Rus.)

12. Starostin I.A., Belyshkina M.E., Chilingaryan N.O., Alipichev A.Yu. Digital technologies in agricultural production: implementation background, current state and development trends. *Agricultural Engineering*. 2021;3(103):4-10. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-4-10>

13. Gao X. et al. Review of wheeled mobile robots' navigation problems and application prospects in agriculture. *IEEE Access*. 2018;6:49248-49268. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2868848>

14. Petukhova N.V., Farkhadov M.P., Kachalov D.L. Unloading and consolidation of computing resources in the environment of fog and boundary computing. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 2020;50:123-129. (In Rus.) <https://doi.org/10.17223/19988605/50/15>

15. Vinnichек E.V. Cloud computing, edge computing, fog computing: analysis and forecast of the development of data processing. *Sovremennye innovatsionnye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti i transporta*. 2018;1(5):239-244. (In Rus.)

16. Vorobyev S.P., Shirobokova S.N., Evsin V.A. Exchange model of a distributed registry system for cloud, fog and edge computing. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2022;2:11-21. (In Rus.) <https://doi.org/10.14357/20718632220202>

17. Olenev V.L. Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols. *Information and Control Systems*. 2021;1:8-16. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-1-8-16>

#### Вклад авторов

И.А. Старостин – руководство исследованием, концептуализация, методология, администрирование проекта;

С.А. Давыдова – формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

А.В. Ещин – проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

**Статья поступила в редакцию 17.02.2023; поступила после рецензирования и доработки 17.04.2023; принята к публикации 20.04.2023**

#### Contribution of the authors

I.A. Starostin – research supervision, conceptualization, methodology, project administration

S.A. Davydova – formal analysis, research, creation of a draft of the manuscript, creation of the final version (revision) of the manuscript and its editing

A.V. Eshchin – conducting research, creating a draft of the manuscript, creating the final version (refinement) of the manuscript and its editing, visualization

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

**Received 17.02.2023; revised 17.04.2023; accepted 20.04.2023**