

УДК 631.331:004.89

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.3012>

EDN

[KEJLIU](#)

Интеграция БПЛА в системы точного высева: перспективные подходы для совершенствования сеялок в умном земледелии

Д.И. Ковалев^{1, 2,*}

¹Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

²Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт
инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент,
Узбекистан

*E-mail: kovalev.dw7@gmail.com

Аннотация. В работе рассматриваются перспективные методы совершенствования сеялок точного высева с учетом интеграции беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и интеллектуальных технологий. Показано, что современные системы точного высева, дополненные возможностями БПЛА для картирования полей, мониторинга посевов и анализа данных в режиме реального времени, способствуют повышению эффективности сельскохозяйственных операций, позволяют оптимизировать транспортно-технологические циклы БПЛА и использование ресурсов и, соответственно, повысить урожайность. Несмотря на дополнительные инвестиции в техническое оснащение, интеграция БПЛА в системы точного высева обеспечивает сокращение производственных затрат и повышение урожайности основных сельскохозяйственных культур. Это подтверждает экономическую целесообразность такой интеграции для средних и крупных аграрных предприятий. Экологические преимущества предлагаемых решений связаны с оптимизацией использования земельных ресурсов, снижением воздействия на почву и сокращением расхода агрохимикатов. Дальнейшие перспективы совершенствования интегрированных систем БПЛА и сеялок точного высева связаны с развитием алгоритмов машинного обучения для прогнозирования оптимальных параметров посева, созданием полностью автономных комплексов мониторинга и посева, а также разработкой облачных платформ для управления данными в масштабных аграрных экосистемах.

Ключевые слова: точного высева, БПЛА, умное земледелие, мониторинг, интеграция.

Integration of UAVs into precision seeding systems: promising approaches to improving seeders in smart farming

D.I. Kovalev^{1, 2,*}

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

²Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers – National
Research University, Tashkent, Uzbekistan

*E-mail: kovalev.dw7@gmail.com

Abstract. The paper considers promising methods for improving precision seeders, taking into account the integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) and intelligent technologies. It is shown that modern precision seeding systems, supplemented by UAV capabilities for field mapping, crop monitoring and real-time data analysis, contribute to increasing the efficiency of agricultural operations, optimize UAV transport and technological cycles and resource use, and, accordingly, increase crop yields. Despite additional investments in technical equipment, the integration of UAVs into precision seeding systems reduces production costs and increases the yield of major agricultural crops. This confirms the economic feasibility of such integration for medium and large agricultural enterprises. The environmental benefits of the proposed solutions are associated with the optimization of land use, reduced impact on the soil and reduced consumption of agrochemicals. Further prospects for improving integrated UAV systems and precision seeders are associated with the development of machine learning algorithms for predicting optimal seeding parameters, the creation of fully autonomous monitoring and seeding systems, and the development of cloud platforms for data management in large-scale agricultural ecosystems.

Keywords: precision seeding system, UAV, smart farming, monitoring, integration.

1. Введение

Посев представляет собой фундаментальный агротехнический процесс заделки семян на определенную глубину почвы с распределением, соответствующим биологическим потребностям растений. Этот процесс является важным этапом в сельскохозяйственном производстве, определяющим будущую урожайность и эффективность использования земельных ресурсов [1, 2].

Традиционно методы посева классифицируются на три основные группы в зависимости от характера распределения семян по полю: разбросной, где семена распределяются по 100% поверхности поля; ленточный, охватывающий около 50% поверхности; и рядовой, при котором засеивается примерно 10% площади поля. Особое место занимает точный посев, при котором семена размещаются в борозды с равномерными интервалами, что обеспечивает оптимальные условия для развития каждого отдельного растения. Четвертым методом, часто применяемым в овощеводстве, является пересадка рассады в поле.

Для каждого из этих методов были разработаны специализированные сеялки или рассадопосадочные машины, непрерывно эволюционирующие с развитием технологий умного земледелия [3].

2. Материалы и методы

Системы точного высева в работе рассматриваются в контексте современных технологий умного земледелия [4, 5]. Сеялка точного высева представляет собой специализированный тип сельскохозяйственной техники, предназначенный для внесения отдельных семян с равномерным интервалом в ряды [6]. Традиционно технологии точного высева применяются при возделывании таких культур, как сахарная свекла, кукуруза, хлопок и соя [7].

В современной парадигме умного земледелия сеялки точного высева становятся частью комплексных интеллектуальных систем, интегрирующих различные технологии сбора и анализа данных для оптимизации посевного процесса. БПЛА хорошо зарекомендовали себя во многих направлениях, связанных с развитием систем точного земледелия, включая технологии опрыскивания растений и обработки полей удобрениями и гербицидами [8-11]. Применение БПЛА в сочетании с сеялками точного высева позволяет создавать детальные карты полей, определять оптимальные схемы

высева и контролировать качество посевных работ в режиме реального времени, что значительно расширяет возможности традиционных методов посева [12, 13].

Классификация сеялок точного высева преимущественно основывается на используемых системах дозирования семян [14-16]. Несмотря на существование широкого спектра дозирующих систем, большинство из них можно отнести к следующим категориям: пальцевые, пластинчатые (включая горизонтальные, наклонные и вертикальные модификации), ленточные, системы с всасыванием воздуха (вакуумные диски) и напорные барабанные. Основой данной классификации служит конструктивное решение части дозирующей системы, обеспечивающей сепарацию семян.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Интеграция БПЛА в системы точного высева

Как уже отмечалось, современное развитие технологий умного земледелия характеризуется активным внедрением БПЛА в процессы сельскохозяйственного производства, включая точный высев. БПЛА используются для предпосевного картирования полей с высоким разрешением, выявления неоднородностей почвенного покрова и идентификации проблемных участков [17, 18]. На этих данных базируется создание полетных карт и рекомендаций, позволяющих варьировать норму высева в зависимости от характеристик каждого участка поля, что невозможно при использовании только традиционных сеялок точного высева. Кроме того, БПЛА применяются для мониторинга качества всходов после посева, предоставляя актуальную информацию для корректировки настроек сеялок и оптимизации планируемых посевных операций.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ традиционных систем точного высева и систем с интеграцией БПЛА. В таблице комплексно проанализированы десять ключевых параметров эффективности, включая точность размещения семян, адаптивность к условиям поля, экономию посевного материала, энергозатраты и экономическую эффективность. Данная таблица наглядно демонстрирует существенные преимущества интегрированных с БПЛА систем, которые обеспечивают более высокую точность, адаптивность и экономичность. Особенно примечательны показатели экономии посевного материала (до 15-20% против 5-7% у традиционных систем) и повышения равномерности всходов (индекс вариации 5-8% против 12-15%), что

непосредственно влияет на конечную урожайность и рентабельность сельскохозяйственного производства.

Таблица 1. Сравнительный анализ традиционных систем точного высева и систем с интеграцией БПЛА.

Исследуемые параметры	Традиционные системы точного высева	Системы с интеграцией БПЛА
Точность размещения семян	Зависит от механических компонентов и скорости движения агрегата	Повышенная точность за счет предварительного картирования и адаптивного управления
Адаптивность к условиям поля	Ограниченная, требует ручной настройки оператором	Высокая, автоматическая адаптация к пространственной вариабельности почвы
Экономия посевного материала	Базовая, в пределах 5-7%	Повышенная, до 15-20%
Энергозатраты	Базовый уровень	Снижение на 8-12% за счет оптимизации маршрутов и режимов работы
Равномерность всходов	Средняя, индекс вариации 12-15%	Высокая, индекс вариации 5-8%
Контроль качества посева	Постфактум, визуальный контроль	Оперативный, в режиме реального времени
Сбор и анализ данных	Ограниченный, преимущественно механический контроль	Комплексный, включает параметры почвы, рельефа, прошлых урожаев
Прогнозирование урожайности	Ограниченное, на основе исторических данных	Расширенное, с учетом микроразональных особенностей поля
Экологическое воздействие	Среднее	Пониженное за счет оптимизации расхода ресурсов

Таблица 2 содержит систематизированную информацию о пяти основных типах БПЛА, применяемых в системах точного высева, их техническом оснащении, функциональных возможностях и ограничениях.

Представлены мультироторные системы, БПЛА самолетного типа, гибридные аппараты, микро-БПЛА роевого типа и перспективные автономные БПЛА с искусственным интеллектом. Для каждого типа указаны специфические виды сенсоров и оборудования, оптимальные сценарии применения в точном высева и технические ограничения. Представленные данные характеризуют эволюцию технологий БПЛА от

простых систем картирования до комплексных решений с искусственным интеллектом, способных автономно принимать решения по корректировке параметров высева в режиме реального времени, и подчеркивает взаимосвязь между типом БПЛА, его техническими характеристиками и эффективностью применения для конкретных задач точного высева.

Таблица 2. Типы БПЛА и их применение для задач точного высева в умном земледелии.

Тип БПЛА	Оснащение	Применение в системах точного высева	Особенности и ограничения
Мультироторные (квадрокоптеры, гексакоптеры)	RGB-камеры, мультиспектральные камеры, тепловизоры	Детальное картирование малых и средних полей, точный контроль всходов, идентификация проблемных участков	Высокая точность сканирования, низкая производительность обследования (до 100 га/день), зависимость от ветровых условий
Самолетного типа (фиксированное крыло)	Мультиспектральные камеры, гиперспектральные сенсоры, лидары	Предпосевное картирование крупных полей, создание цифровых моделей рельефа, карт плодородия и влажности	Высокая производительность (до 1000 га/день), меньшая детализация, требует зоны для взлета/посадки
Гибридные (VTOL)	Комбинированные системы сенсоров, RTK-системы позиционирования	Универсальное применение, включая картирование, мониторинг и точное позиционирование техники	Баланс между детализацией и производительностью, универсальность, высокая стоимость
Микро-БПЛА роевого типа	Специализированные микросенсоры, системы коммуникации между устройствами	Сверхдетальное картирование почвенных условий, мониторинг всходов, обнаружение вредителей	Экспериментальные системы, ограниченное время полета, высокая детализация данных
Автономные БПЛА с ИИ	Комплексные системы сенсоров, бортовые вычислительные модули	Автономное принятие решений по корректировке параметров высева в режиме реального времени	Находится в стадии разработки, высокая стоимость, потенциально самая эффективная система

3.2. Вакуумные дозирующие устройства и их интеллектуализация

Наиболее распространенным типом дозирующих устройств в современных сеялках точного высева являются вакуумные высевающие аппараты (системы) [19, 20]. Данная система включает вертикальный вращающийся диск с множеством отверстий по окружности, семенной бункер и вентилятор или воздуходувку. В отличие от пластинчатых систем, в устройствах с всасыванием воздуха семена не проходят через

отверстия диска, а удерживаются на них за счет отрицательного давления. Диаметр отверстий должен быть меньше наименьшего поперечного размера семени в партии, что обеспечивает захват только одного семени каждым отверстием.

Внедрение интеллектуальных технологий позволяет существенно повысить эффективность вакуумных дозирующих устройств [16, 21]. Современные разработки включают системы машинного зрения для контроля процесса дозирования, автоматического определения физических свойств семян и адаптивной регулировки параметров работы. Например, интеграция датчиков, контролирующих размер и форму семян, позволяет в режиме реального времени корректировать вакуумное давление и скорость вращения диска, оптимизируя процесс дозирования для конкретной партии семян.

3.3. Оптимизация параметров дозирующих устройств

Многочисленные исследования, связанные с оптимизацией параметров дозирующих устройств, подтверждают высокую эффективность сеялок точного посева с вакуумными дозирующими устройствами (с всасыванием воздуха) для различных культур, включая хлопок, кукурузу, сою, сахарную свеклу, рапс и лук [22, 23]. В работе [24] определены оптимальные структурные параметры таких устройств с использованием метода сопряжения DEM CFD. Для гранулированных семян овощей оптимальной комбинацией параметров оказались угол выброса семян 13° и отрицательное давление 3,1 кПа. При данных настройках индекс качества подачи достиг 95,9%, а индексы пропусков и множественной подачи составили всего 2,9% и 1,2% соответственно.

К ключевым параметрам, определяющим эффективность дозирующих устройств с всасыванием воздуха, относятся вакуумное давление, угловая скорость дозирующего лотка и угол конусности всасывающего отверстия. Исследование авторов [25] для семян китайской капусты определило оптимальные значения этих параметров: вакуумное давление 2,16 кПа, угловая скорость 29,43 об/мин и угол конусности всасывающего отверстия $61,51^\circ$. В работе [26] авторы проанализировали взаимосвязь между физическими свойствами семян и требуемым вакуумным давлением и разработали комплекс математических моделей для прогнозирования оптимальных настроек дозирующего устройства с учетом характеристик семенного материала.

3.4. Интеллектуализация систем оценки качества высева

Известно, что для оценки эффективности работы сеялок в лабораторных условиях применяются различные методы, включая использование лент, оптических датчиков и высокоскоростных камер [27-29]. Традиционный метод, несмотря на свою распространенность, имеет существенные ограничения: ограниченную длину ленты, что сокращает объем получаемых данных, и высокую трудоемкость процесса анализа.

Использование современных интеллектуальных технологий позволяет более эффективно выполнять задачи по оценке качества высева. В частности, системы компьютерного зрения, установленные на БПЛА или непосредственно на сеялках, способны в режиме реального времени анализировать равномерность распределения семян и выявлять отклонения от заданных параметров. Искусственный интеллект и машинное обучение позволяют автоматизировать процесс анализа данных и выработки рекомендаций по корректировке настроек сеялки для достижения оптимального качества высева. Следует отметить, что указанные технологии особенно востребованы при работе в условиях переменной скорости движения сеялки и неоднородности почвенных условий, характерных для реальных полевых операций.

4. Заключение

Таким образом, интеграция БПЛА и интеллектуальных технологий в системы точного высева представляет собой перспективное направление развития современного сельскохозяйственного производства. Дополнение традиционных сеялок точного высева возможностями аэромониторинга, автоматического анализа данных и адаптивного управления позволяет значительно повысить эффективность посевных операций, снизить затраты семенного материала и обеспечить оптимальные условия для развития растений на всех участках поля.

Дальнейшие исследования в данной области непосредственно направлены на совершенствование алгоритмов обработки данных, разработку более точных моделей прогнозирования оптимальных параметров высева и создание комплексных систем управления, интегрирующих информацию от различных источников для принятия обоснованных агрономических решений.

Список литературы

1. Сайтов, В. Е. Разработка и исследование ресурсосберегающего посевного комплекса: Монография / В. Е. Сайтов, Р. Г. Гатауллин, П. А. Савиных. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 166 с.
2. Волхонов, М. С. Классификация и определение эффективности известных способов предпосевной обработки семян / М.С. Волхонов, И.А. Мамаева, М.М. Беляков // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 8 (135). – С. 7-19. – DOI:10.24412/2227-9407-2022-8-7-19.
3. Бартенев, И. И., Конструктивные особенности посадочных машин / И. И. Бартенев, Д. С. Гаврин // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9. – № 2 (34). – С. 147-156.
4. Шайтура, С. В. Некоторые аспекты точного земледелия / С.В. Шайтура, М. Д. Князева, Л. П. Белю, Н. Л. Султаева, В. М. Феоктистова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 8. – С. 21-34. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-aspekty-tochnogo-zemledeliya> (дата обращения: 28.02.2025).
5. Буценко, Е. В. Умное земледелие на платформе одноплатных компьютеров / Е. В. Буценко, А. В. Курдюмов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2019. – № 1-2. – С. 95-107.
6. Завражнов, А. А. Основные направления совершенствования сеялок точного высева пропашных культур / А. А. Завражнов, А. И. Завражнов, В. Ю. Шепелев, А. В. Якушев // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 1 (128). – С. 7-21. – DOI:10.24412/2227-9407-2022-1-7-21.
7. Несмиян, А. Ю. Совершенствование дозирующих элементов пропашной сеялки вакуумного типа / А. Ю. Несмиян, В. В. Должиков, А. В. Асатурян // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 80. – № 6. – С. 91-94.
8. Ковалев, И. В. Обзорный анализ экспериментальных данных для оценки характеристик БПЛА для опрыскивания посевов в точном земледелии / И. В. Ковалев, З. Е. Шапорова, Д. И. Ковалев // Вестник КрасГАУ. – 2024. – № 11(212). – С. 25-31. – DOI 10.36718/1819-4036-2024-11-25-31. – EDN OTCZUZ.
9. Kovalev, I. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et

- al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 471. – P. 04017. – DOI 10.1051/e3sconf/202447104017. – EDN LGAJJO.
10. Ковалев, Д. И. К вопросу оценки производительности применения БПЛА для защиты растений / Д. И. Ковалев, К. Д. Астанакулов, И. В. Ковалев // Достижения науки и технологий, культурные инициативы и устойчивое развитие (ДНИТ-III-2024): сборник научных статей по материалам III Всероссийской научной конференции с международным участием (Красноярск, 01-02 марта 2024 года). – Красноярск: ОУ «ККДНИТ», 2024. – С. 261-267. – DOI 10.47813/dnit-III.2024.11.3007. – EDN XJCIQA.
11. Yablokova, A. Environmental safety problems of swarm use of UAVs in precision agriculture / A. Yablokova, D. Kovalev, I. Kovalev [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 471. – P. 04018. – DOI 10.1051/e3sconf/202447104018. – EDN FFYFSI.
12. Kovalev, I. Conceptual basis for digitalization of specifications of transport and technological cycles of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 443. – P. 06014. – DOI 10.1051/e3sconf/202344306014. – EDN QEBFFO.
13. Kovalev, I. Digitalization of UAV transport and technological cycles in smart agriculture / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et al.] // E3s Web of Conferences. – 2023. – Vol. 390. – P. 03014. – DOI 10.1051/e3sconf/202339003014. – EDN MPXPRL.
14. Несмиян, А. Ю. Теоретическое обоснование конструкции универсального дозирующего элемента высевающего аппарата вакуумной пропашной сеялки / А. Ю. Несмиян, В. В. Должиков // Вестник аграрной науки Дона. – 2011. – № 2. – С. 48-53.
15. Несмиян, А. Ю. Повышение эффективности захвата семян дозирующими элементами высевающего аппарата сеялки точного посева / А. Ю. Несмиян, В. В. Должиков, Ю. М. Черемисин, С. В. Асатурян // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 106. – С. 1024-1039.
16. Karayel, D. Estimation of Optimum Vacuum Pressure of Air-Suction Seed-Metering Device of Precision Seeders Using Artificial Neural Network Models / D. Karayel, O. Güngör, E. Šarauskiš // Agronomy. – 2022. – № 12. – P. 1600. – DOI: 10.3390/agronomy12071600.

17. Kovalev, I. V. Modern unmanned aerial technologies for the development of agribusiness and precision farming / I. V. Kovalev, N. A. Testoyedov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 548. – P. 52080. – DOI: 10.1088/1755-1315/548/5/052080. – EDN JZAPPN.
18. Kovalev, I. V. On the problem of increasing the efficiency of UAVs technologies in agrarian business / I. V. Kovalev, M. V. Karaseva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 421. – P. 72020. – DOI 10.1088/1755-1315/421/7/072020. – EDN ZLDJJY.
19. Несмиян, А.Ю. Экспериментальное определение направления равнодействующей сил сопротивления, действующих на присасываемое семя в вакуумном высевальном аппарате / А.Ю. Несмиян, П.Я. Лобачевский, В.И. Хижняк // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2008. – Т. 8. – № 4-39. – С. 244-247.
20. Должиков, В. В. Оптимизация конструкции вакуумных высевальных аппаратов с дозирующими элементами переменного сечения / В. В. Должиков., К. П. Дубин, А. Ю. Несмиян, Д. С. Стариков // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 1(92). – С. 49-59.
21. Xu, J. Key structure design and experiment of air-suction vegetable seed-metering device / J. Xu, J. Hou, W. Wu, C. Han, X. Wang, T. Tang, S. Sun // Agronomy. – 2022. – № 12. – P. 675.
22. Бородаева, М. Г. Выбор модели сеялки точного посева с помощью метода анализа иерархий / М. Г. Бородаева, А. В. Каргина, Е. М. Зубрилина, И. А. Маркво // Символ науки. – 2017. – Т. 2. – № 3. – С. 21-25. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-modeli-seyalki-tochnogo-vyseva-s-pomoschyu-metoda-analiza-ierarhiy> (дата обращения: 28.02.2025).
23. Каргина, А.В. Принятие решения о выборе модели сеялки точного посева методом обобщенной оценки / А. В. Каргина, М. Г. Бородаева, Е. М. Зубрилина, И. А. Маркво // Символ науки. – 2017. – Т. 2. – № 2. – С. 67-70. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prinyatie-resheniya-o-vybore-modeli-seyalki-tochnogo-vyseva-metodom-obobschennoy-otsenki> (дата обращения: 28.02.2025).
24. Cay, A. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters. Part I: Design and laboratory simulation / A. Cay, H. Kocabiyik, S. May // Comput. Electron. Agric. – 2018. – № 144. – P. 71-79.

25. Sun, X. Performance Parameters Optimization of a Three-Row Pneumatic Precision Metering Device for Brassica chinensis / X. Sun, H. Li, X. Qi, S.M. Nyambura, J. Yin, Y. Ma, J. Wang // Agronomy. – 2022. – № 12. – P. 1011.
26. Karayel, D. Laboratory measurement of seed drill, seed spacing and velocity of fall of seed using high-speed camera system / D. Karayel, M. Wiesehoff, A. Ozmerzi, J. Muller // Comput. Electron. Agric. – 2006. – № 50. – P. 89-96.
27. Кузнецов, П. В. Разработка методов и средств контроля и управления качеством высева пропашных культур сеялками точного высева "QMS" / П. В. Кузнецов, В. И. Новиков // Polish Journal of Science. – 2021. – № 42(42). – С. 14-21. – EDN PBXAKZ.
28. Айтлева, П.Л. Методика лабораторных экспериментов по оценке эффективности гасителя воздушного потока для семяпроводов пневматических зерновых сеялок / П.Л. Айтлева // Союз машиностроителей России. Национальная научно-техническая конференция. – 2023. – № 1. – С. 66-68. – DOI:10.24412/cl-35807-2023-1-66-68.
29. Искандаров, И. А. Техничко-экономическая оценка эффективности универсальной сеялки для посева пропашных культур / И. А. Искандаров // АгроЭкоИнженерия. – 2024. – № 1 (118). – С. 96-106. – DOI:10.24412/2713-2641-2024-1118-96-106.