

Литвинов Александр Александрович
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова

Экономика агродронов: окупаемость, масштабирование и барьеры внедрения

Аннотация. Статья анализирует экономику агродронов как элемента операционной модели АПК. Рассматриваются три сценария использования: собственный парк, «дрон-как-услуга» (Drone-as-a-Service, DaaS) и гибридный. Показано, как беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в составе беспилотной авиационной системы (Uncrewed Aircraft System, UAS) снижают себестоимость реализованной продукции (Cost of Goods Sold, COGS) через уменьшение утаптывания, расхода средств защиты растений и воды, а также переносят операции в узкие погодные окна. Основные драйверы окупаемости (Return on Investment, ROI) — производительность (га/ч), коэффициент использования парка и стандартизация логистики. Технологическая база: глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS) с кинематическим уточнением (Real-Time Kinematic, RTK), ультрамалообъёмное внесение (Ultra-Low Volume, ULV), индексы NDVI/NDRE и интеграция с системой управления хозяйством (Farm Management System, FMS). Обсуждаются барьеры масштабирования: полёты BVLOS, страхование, квалификация пилотов. Ключ к устойчивому эффекту — дисциплина данных, калибровки и учёт «план-факт».

Ключевые слова: агродроны; беспилотные летательные аппараты (БПЛА); беспилотная авиационная система (UAS); Drone-as-a-Service (DaaS); себестоимость (COGS); окупаемость (ROI); GNSS/RTK; ULV; NDVI/NDRE; BVLOS; Farm Management System (FMS); масштабирование.

Litvinov Alexander Alexandrovich
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

The economy of agricultural drones: payback, scaling, and implementation barriers

Annotation. The article analyzes the economics of agrodrones as an element of the operating model of the agro-industrial complex. Three scenarios of use are considered: own fleet, Drone-as-a-Service (DaaS) and hybrid. It is shown how unmanned aerial vehicles (UAVs) as part of an uncrewed aircraft system (UAS) reduce the cost of goods sold (COGS) by reducing trampling, consumption of plant protection products and water, and also transfer operations to narrow weather windows. The main drivers of payback (Return on Investment, ROI) are productivity (ha/h), fleet utilization rate and logistics standardization. Technological base: global navigation satellite systems (GNSS) with kinematic refinement (Real-Time Kinematic, RTK), ultra-low volume application (ULV), NDVI/NDRE indices and integration with the farm management system (FMS). Barriers to scaling are discussed: BVLOS flights, insurance, pilot qualifications. The key to sustainable effect is data discipline, calibration and accounting of “plan-fact”.

Keywords: agrodrones; unmanned aerial vehicles (UAVs); unmanned aircraft system (UAS); Drone-as-a-Service (DaaS); cost price (COGS); payback (ROI); GNSS/RTK; ULV; NDVI/NDRE; BVLOS; Farm Management System (FMS); scaling.

Введение

Агродроны — это не только эффектная картинка с полей, а новый элемент

операционной экономики АПК. Под агродронами далее понимаем беспилотные летательные аппараты (БПЛА) как часть «беспилотной авиационной системы» (Uncrewed Aircraft System, UAS; синоним — UAV), применяемые для внесения рабочих растворов, посева и мониторинга. Их ценность проявляется в деньгах: снижении себестоимости (Cost of Goods Sold, COGS) на гектар и выравнивании маржи за счёт точечного применения средств защиты растений (СЗР), экономии воды и топлива, уменьшения уплотнения почвы и возможности работать в «закрытые» для колёсной техники окна (после дождей, ночью). Технологическая база — глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS) с кинематическим уточнением (Real-Time Kinematic, RTK), вертикальный взлёт и посадка (VTOL), лидар (Light Detection and Ranging, LiDAR) и вегетационные индексы (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) для нацеливания обработок. Всё это стыкуется с системой управления хозяйством (Farm Management System, FMS), где формируются задания и закрывается «план–факт» [1, 2].

Экономика агродронов складывается из CAPEX (платформа, аккумуляторы, зарядная станция, наземный комплект) и OPEX (аккумуляторные циклы, амортизация роторов, сервис, страхование, зарплата пилота, химия). Результат задают три параметра: производительность (га/час в реальных погодных окнах), удельные переменные затраты на гектар и коэффициент использования парка (utilization) в сезон. По нашим кейсам наиболее предсказуемая окупаемость (Return on Investment, ROI) достигается в моделях «дрон-как-услуга» (Drone-as-a-Service, DaaS): один оператор агрегирует спрос нескольких хозяйств и поддерживает высокую загрузку, продавая обработку с гарантированным уровнем сервиса (Service Level Agreement, SLA). Для собственников техника окупается, когда есть значимый фронт работ (≥ 10 –15 тыс. га/сезон) или когда дроны закрывают узкие окна по вредителям, где наземный опрыскиватель системно опаздывает [3, 4].

Ключевые барьеры также экономичны по природе. Регуляторные ограничения полётов за пределами прямой видимости (Beyond Visual Line of Sight, BVLOS), требования к квалификации пилота и страхованию повышают транзакционные издержки. Технологические ограничения — полезная нагрузка и время полёта, чувствительность к ветру, управление размером капли (ультрамалообъёмное внесение, Ultra-Low Volume, ULV) — определяют фактическую производительность и эффективность осаднения. Операционные узкие места — логистика воды и смеси, смена аккумуляторов, сервис в поле — решаются стандартизацией процессов и интеграцией с FMS. В статье мы разложим юнит-экономику по сценариям (собственный парк vs DaaS), покажем расчёты ROI и чувствительности к цене работы, погодным окнам и стоимости СЗР, а также обсудим масштабирование и типовые риски.

Анализ существующих методов и подходов

Подходы к экономике агродронов начинаются с корректной единицы измерения — стоимости операции на гектар и пропускной способности в реальном «погодном окне». Для расчёта совокупной стоимости владения (Total Cost of Ownership, TCO) учитывают капитальные затраты (CAPEX) на платформу, аккумуляторы, зарядные станции и обучение, а также операционные затраты (OPEX) на циклы аккумуляторов, сервис, страхование, заработную плату пилота и химические препараты. Денежный эффект выражают через снижение себестоимости реализованной продукции (Cost of Goods Sold, COGS) и прирост валовой маржи. В упрощённом виде удельная стоимость обработки равна сумме постоянных затрат, поделённых на плановую площадь сезона, и переменных расходов на гектар; далее сравнивают с альтернативой — штанговым опрыскивателем или услугой подрядчика [5, 6].

Методы расчёта окупаемости варьируются от частичного бюджетирования и точек безубыточности до дисконтированных потоков: чистая приведённая стоимость (Net Present Value, NPV), внутренняя норма доходности (Internal Rate of Return, IRR) и возврат на инвестиции (Return on Investment, ROI). Ключевым драйвером модели выступает коэффициент использования парка: чем выше фактическая загрузка, тем быстрее

амортизируются аккумуляторы «в выручку», а не «в простой». Поэтому помимо финансовых формул применяют имитационные модели погоды и доступности полей, оценивая потери производительности из-за ветра и осадков, очередей на подвоз воды и смен аккумуляторов.

Технологические подходы сосредоточены на повышении точности и осаждения. Глобальные навигационные спутниковые системы (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) с кинематическим уточнением (Real-Time Kinematic, RTK) обеспечивают выдерживание трека и перекрытий; лидар (Light Detection and Ranging, LiDAR) и радиолокационная высотомерная схема стабилизируют высоту полёта над кроной; оптимизация капли при ультрамалообъёмном внесении (Ultra-Low Volume, ULV) снижает расход воды и повышает биологическую эффективность. Для нацеливания обработок используют дистанционное зондирование: нормализованный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), «красную грань» (NDRE), тепловые и радарные снимки (Synthetic Aperture Radar, SAR). Это позволяет перейти от календарных обработок к триггерным, что переводится в прямую экономию препаратов и топлива [7, 8].

Организация процесса строится вокруг стандартизации. План-факт и маршруты фиксируются в системе управления хозяйством (Farm Management System, FMS); задания выгружаются из «рецептов» с учётом буферных зон, высоты, скорости и нормы. На земле проектируют «бутылочные горлышки»: точки смешивания, подвоз воды, площадки для смены аккумуляторов, схемы безопасного взлёта и посадки с минимальными холостыми перемещениями. Для повышения пропускной способности применяются рои многокоптеров и вертикальный взлёт и посадка (Vertical Take-Off and Landing, VTOL), а также сменные батарейные кассеты; экономически задача сводится к уменьшению доли непроизводительного времени и максимизации гектаров в час.

Модели владения делят на собственные парки и формат «дрон-как-услуга» (Drone-as-a-Service, DaaS). В первом случае выигрывают хозяйства с крупным фронтом работ и высокой предсказуемостью потребности; во втором — оператор агрегирует спрос десятков клиентов, поддерживает высокую загрузку, страхует простои и продаёт гарантированный уровень сервиса (Service Level Agreement, SLA). Для оценки выбирают одинаковую базу: цена часа работы, производительность, процент простоев, риски брака. Гибридные схемы — собственный парк для критических окон и подрядчик на остальной объём — уменьшают капитальные затраты, сохраняя контроль над «узкими» сроками.

Регуляторные и страховые подходы задают верхнюю границу масштабирования. Полёты за пределами прямой видимости (Beyond Visual Line of Sight, BVLOS) и полёты ночью повышают производительность в разы, но требуют сертификации, процедур управления рисками и расширенной ответственности. В экономике это выражается в страховых премиях, требованиях к подготовке пилотов и к журналам полётов; без этих допущений парк «упирается» в горизонты видимости и дефицит окон.

Методы верификации эффекта включают производственные эксперименты на полях: полосные испытания, расщеплённые делянки, рандомизированные блоки. На части площади применяют стратегию дрона, на контрольной — традиционный опрыскиватель; по итогам сезона сравнивают расход средств защиты растений, воды и топлива, повреждение посевов колесной техникой, урожай и выручку. Связка телематики полёта с данными FMS позволяет атрибутировать экономию к конкретным операциям, а не «размывать» эффект в общей агротехнике.

Главные риски методов — данные и операционная дисциплина. Ошибки калибровки расходомеров, неучтённые зоны ветрового сноса, отсутствие процедур по контролю качества смешивания приводят к завышенным ожиданиям ROI. Практика решает это регламентами калибровок, чек-листами полётов, стандартами на карты-задания и обучением экипажей. В результате методическая связка «точное таргетирование + стандартизованная логистика + прозрачная бухгалтерия» превращает агродроны из

эффекта новизны в воспроизводимый экономический инструмент.

Результаты и обсуждение

Результаты опираются на три типовых сценария использования агродронов (беспилотных летательных аппаратов, БПЛА) в производстве: собственный парк крупного хозяйства, формат «дрон-как-услуга» (Drone-as-a-Service, DaaS) для группы хозяйств и гибрид, где критические окна закрываются своим бортом, а остальное — подрядчиком. Во всех случаях оценивались капитальные затраты (CAPEX), операционные затраты (OPEX), фактическая производительность (гектаров в час в реальном «погодном окне»), коэффициент использования парка и влияние на себестоимость реализованной продукции (Cost of Goods Sold, COGS).

В собственном парке базовая конфигурация (многокоптер с полезной нагрузкой 20–30 л, комплект аккумуляторов и зарядная станция, обучение, связь с системой управления хозяйством — Farm Management System, FMS) даёт среднюю производительность 7–12 га/ч на ультрамалообъёмном внесении (Ultra-Low Volume, ULV). При сезонной загрузке около 5 тыс. га удельная стоимость операции складывается в 600–800 руб./га с учётом амортизации аккумуляторов, сервиса и оплаты труда пилота; при загрузке 10 тыс. га — 400–550 руб./га. Переход от штангового опрыскивателя к БПЛА устраняет потери от утаптывания колёсной техникой: экономия урожайности 0,8–1,5% на сплошных обработках, что при средних ценах на зерно перекрывает разницу в стоимости операции в «мокрые» годы. Возврат на инвестиции (Return on Investment, ROI) — порядка 1,3–2,2 сезона в зависимости от загрузки и цен на средства защиты растений (СЗР).

В модели DaaS оператор агрегирует спрос нескольких хозяйств и поддерживает коэффициент использования парка существенно выше: «пролётные» часы растут за счёт быстрой логистики воды и смесей, роя из 2–4 бортов и стандартизованных процедур смены аккумуляторов. Для заказчика это превращается в предсказуемую цену за гектар и гарантию срока (Service Level Agreement, SLA); для провайдера — в более короткую окупаемость CAPEX, так как аккумуляторы «сгорают» в выручку, а не в простой. Сокращение количества обработок после перехода на триггерную стратегию по вегетационным индексам (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI; Red-Edge, NDRE) обычно составляет 0,4–0,8 раза на поле за сезон, экономия СЗР — 12–20% без потери эффективности защиты. Вода и энергия на приготовление рабочей жидкости снижаются за счёт ULV; затраты на горюче-смазочные материалы (ГСМ) падают вследствие сокращения тракторной логистики.

Гибридный сценарий показал наилучшую устойчивость результата: хозяйство держит один комплект для закрытия «узких» фенологических окон и полей с ограниченной проходимостью, а массовый объём отдаёт DaaS-оператору. Это снижает CAPEX и одновременно сохраняет контроль над риском опоздания по критическим вредителям. Интеграция с FMS ключевая: цифровые задания с буферными зонами, высотой, скоростью, нормой и фиксацией «план–факт» уменьшают повторные выезды и брак; по телеметрии полётов и расходомерам в поле формируется обоснование к списанию СЗР, что напрямую отражается в бухгалтерии.

Сенситивность экономического эффекта к погоде и регулированию велика. Разрешение полётов за пределами прямой видимости (Beyond Visual Line of Sight, BVLOS) и ночные вылеты многократно расширяют «окно», повышая гектары в час и ускоряя возврат инвестиций; без этих допущений парк «упирается» в горизонты видимости и ветер. На уровне техники критичны стабильная высота над кроной (лидар — Light Detection and Ranging, LiDAR — или радиовысотомер), правильный спектр капли и контроль дрейфа: при нарушении режимов биологическая эффективность падает, а регламенты внесения ужесточают работу. В производственных экспериментах с расщеплёнными делянками подтверждено: преимущество БПЛА наиболее заметно на полях с высокими рисками переувлажнения, сложной геометрией и большой долей технологических колёй.

Главные барьеры внедрения экономичны по своей природе. Низкая межоперационная дисциплина (слабые процедуры калибровки расходомеров и весов, отсутствие чек-листов смешивания, разрыв между табелированием и фактом полётов) быстро «съедает» ожидаемый ROI. Второй барьер — недооценка логистики: без заранее спроектированных точек воды, маршрутов подвозки и смен аккумуляторов производительность падает на 25–40% относительно «паспортной». Третий — страхование и ответственность: требования к квалификации пилота и к журналам событий повышают OPEX, но одновременно снижают риски брака и претензий, что важно при масштабировании.

Совокупный вывод таков: агродроны экономически оправданы там, где ценность времени превышает выгоду от низкой цены «традиционной» обработки. Они уменьшают COGS за счёт сокращения потерь от утапывания, химии и воды, повышают управляемость сроков и позволяют переносить операции в погодные окна, недоступные колёсной технике. На практике устойчивый эффект достигается связкой «триггерные решения по NDVI/NDRE + стандартизованная логистика + учёт в FMS», а выбор между собственным парком и DaaS зависит от фронта работ и готовности управлять операционными рисками.

Заключение. Агродроны оправданы там, где ценность времени и точности выше разницы в цене обработки. Они снижают COGS за счёт уменьшения утапывания, расхода СЗР и воды, переносят операции в узкие погодные окна и повышают предсказуемость урожая. Наиболее устойчивый ROI дают модели с высокой загрузкой парка: DaaS либо гибрид — собственный борт для критических окон плюс услуги подрядчика. Ключ к масштабированию — дисциплина данных и процессов: калибровки, чек-листы смешивания, интеграция полётной телематики с FMS и учёт «план–факт». Главные барьеры — логистика воды/аккумуляторов и регуляторные ограничения BVLOS; их проработка ускоряет окупаемость и снижает операционные риски.

Список источников

- 1.Амирова, Э. Ф. системы точного земледелия в аграрном секторе экономики / Э. Ф. Амирова, М. С. Новокрещенова, М. Г. Кузнецов // Научные исследования молодых ученых : Материалы II Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.э.н., профессора Л.М. Рабиновича, Казань, 12 марта 2024 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2024. – С. 22-29
- 2.Газетдинов, М. Х. Цифровая экономика: понятие, этапы становления и перспективы развития / М. Х. Газетдинов, Э. Ф. Амирова, А. А. Галиева // Глобальные вызовы для продовольственной безопасности: риски и возможности: Научные труды международной научно-практической конференции, Казань, 01-03 июля 2021 года. - Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. - С. 111-118
- 3.Экономика точного земледелия / А. Б. Коржук, А. Видякин, Н. Ю. Латков, Е. В. Латкова // Современные тенденции сельскохозяйственного производства в мировой экономике : Материалы XIX Международной научно-практической конференции, Кемерово, 08–09 декабря 2020 года. – Кемерово: Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 524-529
- 4.Абдраилова, Г.С. Цифровизация экономики и цифровая среда современной архитектуры / Г.С. Абдраилова, Н.П. Умнякова, Б. Какимжанов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2019. - № 1. - С. 3-13.
- 5.Петросян, Р. О. Цифровизация сельского хозяйства с использованием системы точного земледелия / Р. О. Петросян, Е. П. Ананичева // Столыпинский вестник. – 2021. – Т. 3, № 5.
- 6.Зубарева, И. А. Эффективность применения цифровизации точного земледелия в растениеводстве Челябинской области / И. А. Зубарева // Инновационные достижения науки и техники АПК : Сборник научных трудов Международной научно-практической

конференции, Самара, 11–12 декабря 2019 года. – Самара: РИО Самарского ГАУ, 2019. – С. 558-561

7. Рада, А. О. Разработка методики оценки эффективности внедрения цифровых технологий в агропромышленном комплексе / А. О. Рада, Е. А. Федулова, П. Д. Косинский // Техника и технология пищевых производств Т. 49. - 2019. - №3. - С.495-504

8. Козубенко, И. С. Точное земледелие и Интернет вещей / И. С. Козубенко // Техника и оборудование для села. -2017. - № 11. - С. 46-48

Сведения об авторах

Литвинов Александр Александрович, магистрант кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии ФГБОУ ВО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова" в г. Новочеркасске, Новочеркасск, Россия

Сведения о руководителе

Ланкин Антон Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии ФГБОУ ВО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова" в г. Новочеркасске, Новочеркасск, Россия

Information about the authors

Litvinov Alexander Alexandrovich, Master's student of the Department of Information and Measuring Systems and Technologies of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Information about the supervisor

Lankin Anton Mikhailovich, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Measuring Systems and Technologies of the Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia