

Игорь Владимирович Ковалев<sup>1✉</sup>, Зинаида Егоровна Шапорова<sup>2</sup>, Дмитрий Игоревич Ковалев<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

<sup>1</sup>kovalev.fsu@mail.ru

<sup>2</sup>fub @kgau.ru.ru

<sup>3</sup>grimm7jow@gmail.com

## ОБЗОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК БПЛА ДЛЯ ОПРЫСКИВАНИЯ ПОСЕВОВ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

Цель исследования – обзорный анализ экспериментальных данных для оценки характеристик БПЛА для опрыскивания посевов в точном земледелии. Представленные экспериментальные данные отражают результаты тестирования и оценки эффективности применения БПЛА для распыления пестицидов в Китае, где в последние годы БПЛА для защиты растений получили быстрое развитие. Данные представлены для четырех наиболее распространенных в КНР типов БПЛА: одновинтовые БПЛА с газовым двигателем 3WQF120-12 и 3CD-15; шестироторный электрический БПЛА WSZ-0610; однороторный электрический БПЛА HY-B-15L. Несмотря на то что эти БПЛА имеют различные характеристики, анализ экспериментов, проведенных китайскими исследователями, представляет объективную информацию об эффективности их применения для распыления пестицидов, а также дает представление о состоянии разработок таких БПЛА в Китае. Исследовались зоны распыления, проницаемость, плотность капель и эффективность работы БПЛА в полевых условиях при заданных площадях обрабатываемых участков. Представлен анализ типовых неисправностей БПЛА при выполнении транспортно-технологических операций в процессе опрыскивания культур. Анализ интенсивности отказов БПЛА рассматриваемых типов показал временные затраты на устранение неисправностей от общего времени работы. Представлены данные о временных затратах на наземное обслуживание, подготовительные работы, планирование маршрута. Чистое время работы составило около 30 %. Обзор работ в рассматриваемой области исследований позволяет констатировать, что в целом высокая эффективность БПЛА не была достигнута в полной мере. Как характеристики самих БПЛА, применяемых для опрыскивания посевов, так и транспортно-технологические операции, включая наземное обслуживание и управление полетом, все еще нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Для повышения эффективности БПЛА и достижения удовлетворительных значений для выполняемых операций важно проведение предварительных исследований по оценке временных и ресурсных затрат на реализацию транспортно-технологического цикла БПЛА. Это позволит обеспечить оптимальное и безопасное опрыскивание с воздуха в системах точного земледелия.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, распыление пестицидов, защита растений, опрыскивание посевов, точное земледелие

**Для цитирования:** Ковалев И.В., Шапорова З.Е., Ковалев Д.И. Обзорный анализ экспериментальных данных для оценки характеристик БПЛА для опрыскивания посевов в точном земледелии // Вестник КрасГАУ. 2024. № 11. С. 25–31. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-11-25-31.

Igor Vladimirovich Kovalev<sup>1✉</sup>, Zinaida Egorovna Shaporova<sup>2</sup>, Dmitry Igorevich Kovalev<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>1</sup>kovalev.fsu@mail.ru

<sup>2</sup>fub @kgau.ru.ru

<sup>3</sup>grimm7jow@gmail.com

## EXPERIMENTAL DATA SURVEY ANALYSIS TO ASSESS UAVS CHARACTERISTICS TO SPRAY CROPS IN PRECISION FARMING

*The aim of the study is to conduct a review analysis of experimental data to evaluate the performance of UAVs for crop spraying in precision agriculture. The presented experimental data reflects the results of testing and evaluating the effectiveness of UAVs for pesticide spraying in China, where UAVs for crop protection have been rapidly developed in recent years. The data are presented for four commonly used UAV types in China: single-rotor gas-powered UAVs 3WQF120-12 and 3CD-15; six-rotor electric UAV WSZ-0610; single-rotor electric UAV HY-B-15L. Although these UAVs have different characteristics, the analysis of experiments conducted by Chinese researchers provides objective information on their effectiveness in pesticide spraying, and also gives an idea of the development status of such UAVs in China. The spray zones, permeability, droplet density and UAV efficiency in field conditions for given areas of treated sites were studied. The analysis of typical UAV malfunctions during transport and technological operations during crop spraying is presented. The analysis of the failure rate of UAVs of the considered types showed the time spent on troubleshooting from the total operating time. The data on the time spent on ground handling, preparatory work, route planning are presented. The net operating time was about 30 %. A review of the works in the considered research area allows us to state that, in general, the high efficiency of UAVs has not been fully achieved. Both the characteristics of the UAVs themselves used for crop spraying and the transport and technological operations, including ground handling and flight control, still require further improvement. In order to increase the efficiency of UAVs and achieve satisfactory values for the operations performed, it is important to conduct preliminary studies to assess the time and resource costs of implementing the UAV transport and technological cycle. This will ensure optimal and safe aerial spraying in precision farming systems.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle, pesticide spraying, plant protection, crop spraying, precision agriculture*

**For citation:** *Kovalev I.V., Shaporova Z.E., Kovalev D.I. Experimental data survey analysis to assess UAVs characteristics to spray crops in precision farming // Bulliten KrasSAU. 2024;(11): 25–31 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-11-25-31.*

**Введение.** В данной статье с учетом понятийных средств спецификации транспортно-технологических циклов (ТТЦ) сельскохозяйственных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые были разработаны в [1–3], рассматриваются результаты тестирования и оценки эффективности применения БПЛА при опрыскивании посевов пестицидами. При оценке временных и ресурсных затрат на реализацию ТТЦ следует учитывать, в частности, такие параметры, как частота отказов БПЛА, потери времени на восстановление работоспособности, затраты времени и ресурсов на наземное обслуживание, подготовительные работы, планирование маршрута и чистое время работы [4–6]. Использование GERT-сетевого моделирования ТТЦ позволяет делать вероятностную оценку успешности реализации ТТЦ за заданное время, определяемое регламентом выполнения агротехнологических операций [7]. Для реализации графоаналитического метода, основанного на GERT-подобной узловой логике, необходимо накопление статистических данных по применению различ-

ных типов БПЛА в точном земледелии, так как, по мнению многих авторов [8–12], характеристики распыления опрыскивающих БПЛА все еще нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

Защита растений – это важный сегмент сельскохозяйственной деятельности, гарантирующий эффективное уничтожение вредных объектов и создание оптимальных условий роста и развития сельскохозяйственных растений, которое приводит к повышению урожайности полевых культур. Наиболее быстрое развитие в последние годы беспилотные летательные аппараты для защиты растений получили в Китае. Отметим, что традиционные технологические решения на базе наземных штанговых опрыскивателей и пилотируемой авиации в ряде регионов с труднодоступным рельефом почвы, в горных районах сталкиваются с множеством трудностей при выполнении полевых работ. Преодоление этих трудностей основывается на привлечении в сельскохозяйственную авиацию в таких регионах небольших БПЛА [13]. Дистанционно управляемые БПЛА не требуют взлетно-

посадочных полос, которые необходимы пилотируемым сельскохозяйственным самолетам и возведение которых на сложной по рельефу местности практически невозможно [14]. Положительным аспектом применения опрыскивающих БПЛА является снижение вреда распыляемых пестицидов на операторов наземного технологического оборудования, а также снижение уровня загрязнения окружающей среды в процессе применения пестицидов [15, 16].

ТТЦ БПЛА, характеризующий временные и ресурсные затраты на выполнение всей совокупности взаимосвязанных операций технологии опрыскивания, позволяет дать оценку эффективности работы БПЛА для защиты растений, что является важным обобщенным показателем оценки. Для выполнения анализа и оптимизации ТТЦ необходимы дополнительные данные, и поскольку технология опрыскивания БПЛА для защиты от вредителей является новой технологией, все еще существует ряд практических проблем, связанных с получением этих данных. Поэтому высокий интерес вызывают работы, посвященные таким показателям, как равномерность распределения капель, степень покрытия капель, проникновение пестицидов в полог сельскохозяйственных культур, отражающие эффективность работы БПЛА при реализации типовых (как правило, повторяющихся циклически) операций ТТЦ.

Работа [9] предоставляет объективную информацию об эффективности применения пестицидов и дает широкое представление о состоянии разработок БПЛА в Китае. Данные получены на базе тестирования четырех типичных БПЛА для защиты растений, которые широко представлены на внутреннем рынке КНР и сертифицированы Национальным центром испытаний оборудования для защиты растений. Представленная оценка эффективности работы БПЛА позволяет получить более полную техническую информацию и рекомендации, которые можно использовать для правильного формирования ТТЦ БПЛА, обеспечивая оптимальное и безопасное опрыскивание с воздуха в системах точного земледелия.

**Цель исследования** – обзорный анализ экспериментальных данных для оценки характеристик БПЛА для опрыскивания посевов в точном земледелии.

**Материалы и методы.** Эффективность выполнения операций опрыскивания в работе [9]

исследовалась для четырех типовых БПЛА, используемых для защиты растений в точном земледелии. Для тестирования были выбраны следующие БПЛА: одновинтовые БПЛА с газовым двигателем 3WQF120-12 и 3CD-15; шестироторный электрический БПЛА WSZ-0610; однороторный электрический БПЛА HY-B-15L. Основные технические параметры указанных БПЛА приведены в [9].

Эксперименты с использованием БПЛА указанных четырех типов включали измерения равномерности распыления, проникающей способности капель и эффективности работы БПЛА. Размер экспериментального участка пшеничного поля, на растениях которого осуществлялись замеры, составлял 100 × 100 м. Растения на данном участке находились в стадии налива зерна (высота растений – 60 см; междурядья – 20 см). Тестирование осуществлялось в два этапа. На первом этапе определялась равномерность осадения и покрытия капель на экспериментальном участке поля. Затем проводились испытания на проникновение капель в сельскохозяйственные растения и эффективность работы.

С учетом ежедневной фактической полевой практики выполнения ТТЦ БПЛА были определены параметры полета БПЛА четырех типов. Эти параметры соблюдались в течение всего периода испытаний. Для объема распыления устанавливался уровень 0,12 л/м<sup>2</sup>. Выполненная калибровка расхода форсунок, соответствующая параметрам полета каждого типа БПЛА, позволила обеспечить сопоставимость объемов распыления для них в процессе эксперимента и определить полетные параметры БПЛА для проведения полевых испытаний.

На экспериментальном участке поля размером 10000 м<sup>2</sup> осуществлялось тестирование процесса нанесения, распределения и покрытия капель при использовании опрыскивающих БПЛА четырех типов. Анализ влияния скорости полета БПЛА на равномерность распределения капель выполнялся вдоль направления маршрута полета (продольное направление), и с этой целью на экспериментальном участке формировались три продольные испытательные зоны. В испытательных зонах располагалась фильтровальная бумага и водочувствительная бумага (ВЧБ). Эти элементы использовались в экспериментах для анализа осадения распыляемой

жидкости и анализа распределения капель в полосах многократного распыления.

Эффективность работы БПЛА каждого типа определялась в рамках реализации ТТЦ БПЛА. Операции ТТЦ при обработке обслуживаемой территории включали такие параметры, как время подготовки, планирование маршрута, техническое обслуживание при отказах, наземное обслуживание, операции дистанционного управления БПЛА. Группа обслуживания двух БПЛА каждого типа (активный и резервный БПЛА) состояла из трех операторов. Два оператора отвечали за дистанционное управление объектом, а один оператор отвечал за обслуживание наземного оборудования.

**Результаты и их обсуждение.** Анализ результатов осаднения для каждого БПЛА позволяет сделать вывод, что при выбранной длине (15 м) полосы многократного распыления наблюдалось существенно неодинаковое количество осаднений для каждого БПЛА на различных участках. Максимальное количество осаднений в несколько раз превышало минимальное значение для каждого БПЛА.

ТТЦ БПЛА при распылении пестицидов включает такие этапы, как торможение, а затем ускорение аппарата вблизи границ экспериментальной зоны (длина участка, на котором осуществляется регулирование скорости, составляет 10 м). Это также оказывает влияние на равномерность распыления жидкости. Осажде-

ние капель на границе рабочей зоны было значительно выше в отличие от продольных испытательных линий полета, на которых БПЛА движется с равномерной скоростью. Следует отметить, что чрезмерное осаждение распыляемых жидкостей вблизи границ зоны обработки может отрицательно сказаться на качестве урожая из-за высокой концентрации пестицидов.

Представленные результаты подтверждают комплексное влияние параметров полета, свойств распыляемых жидкостей и метеорологических условий на качество и затраты на реализацию ТТЦ [11, 12]. При определенных условиях в рамках периметра экспериментальной зоны фиксируется неравномерность распыления пестицидов как в поперечном, так и в продольном направлении. Устранение данных недостатков для обеспечения равномерного нанесения пестицидов возможно за счет оптимизации ТТЦ, которая позволит улучшить параметры полета БПЛА, его скоростную устойчивость и повышенную работоспособность.

В таблице представлены результаты экспериментов для четырех типов БПЛА, полученные при обработке данных с помощью программного обеспечения Deposit Scan. Этот программный пакет использовался для обработки ВЧБ, позволяя измерить уровень покрытия каплями, проанализировать плотность капель, разницу между размером капель и плотностью капель.

### Сравнительный анализ размеров капель, плотности и покрытия на ВЧБ

Тип БПЛА	Плотность, г/см <sup>2</sup> (горизонт.)	Покрытие, % (горизонт.)	Плотность, г/см <sup>2</sup> (вертик.)	Покрытие, % (вертик.)	Размеры капель, мкм
3WQF120-12	6,9–68,1	0,48–2,21	1,9–29,0	0,13–1,64	253
3CD-15	6,6–26,9	0,43–2,62	2,4–16,7	0,09–1,28	314
WSZ-0610	8,2–127,2	0,18–1,85	3,9–109,5	0,12–1,08	128
HY-B-15L	14,7–38,5	0,78–2,24	2,9–21,6	0,16–1,16	264

Результаты отражают влияние вращения роторов БПЛА и создание нисходящего потока, который способствовал оседанию капель в вертикальном направлении за счет рассеивания купола растений. Например, плотность капель при использовании БПЛА типа WSZ-0610 на горизонтально и вертикально расположенных полосах ВЧБ колебалась в пределах 8,2–127,2 и 3,9–109,5 г/см<sup>2</sup> соответственно [9]. При этом средний объемный диаметр (VMD) капель для WSZ-0610 на ВЧБ составлял 128 мкм, что было

наименьшим показателем, так как данный тип БПЛА оснащен центробежными распылительными соплами.

Для других БПЛА, оснащенных гидравлическими соплами, показатели были существенно выше. Размеры капель зависели от типа сопла, используемого на БПЛА. Отрицательная корреляция выявлена между размером капель и плотностью капель при одинаковом объеме распыления и аналогичных рабочих параметрах БПЛА. Однако между процентом покрытия и

размером капель такая корреляция не наблюдалась. Как отмечается в [17], капли меньшего размера были чувствительны к метеорологическим условиям. Также обращается внимание на то, что воздушный поток, создаваемый шестью роторами WSZ-0610, отличался от потока, создаваемого однороторными БПЛА. Авторы делают заключение о необходимости дальнейших исследований причин, которые приводят к разбросу экспериментальных параметров для различных типов БПЛА [18].

Анализ ТТЦ для рассмотренных БПЛА показал, что доля времени, затрачиваемого на наземное обслуживание, составила 50 % от полного времени реализации всего процесса. Доля времени чистых операций БПЛА составила около 30 %. Доля длительности наземного обслуживания БПЛА типа ЗСД-15 была наиболее высокой – 52,14 %. Это определялось спецификой системы электропитания БПЛА и системы распыления (независимое подключение). Рабочая площадь обрабатываемых участков составила от 1340 (WSZ-0610) до 1800 м<sup>2</sup> (ЗWQF120-12). Представленный анализ показал необходимость работ по дальнейшему повышению эффективности БПЛА для достижения удовлетворительных результатов.

**Заключение.** Представленный обзор последних публикаций в области применения БПЛА для обработки полей пестицидами основывался на экспериментальных данных для четырех типовых БПЛА, производимых и активно используемых в Китае. В результате исследования таких параметров, как равномерность нанесения, покрытие распыляемой жидкостью растений, плотность капель, проницаемость и эффективность работы БПЛА, сформулированы следующие результаты.

Применение пестицидов с помощью БПЛА осуществляется на невысоком уровне точности, а распределение распыляемой жидкости является неравномерным, что влияет на эффект осаждения пестицидов. Однако нисходящий поток воздуха, создаваемый роторами БПЛА, способствует попаданию распыляемой жидкости в нижнюю часть купола растений и повышает уровень проницаемости, что отмечается как положительный эффект применения БПЛА.

Анализ отказов в течение рабочего времени выявил уровень временных потерь не более 5 %. При этом время подготовки, планирования маршрута, наземного обслуживания занимало

большую часть общего рабочего времени, что привело к тому, что уровень чистой операции был ниже 30 %.

Для того чтобы обеспечить более высокую эффективность распылительных БПЛА и достичь удовлетворительных значений для выполняемых операций, важно выполнение предварительных исследований по оценке временных и ресурсных затрат на реализацию транспортно-технологического цикла БПЛА. Уже на этапе спецификации ТТЦ и GERT-сетевого моделирования с учетом результатов рассмотренных экспериментов можно получить семейство допустимых реализаций ТТЦ с заданными характеристиками операций и осуществить оптимизацию ТТЦ для достижения поставленных целей эффективности. Использование графоаналитического метода позволит сделать вероятностные оценки реализуемости ТТЦ за заданное время, а также оценить затраты ресурсов на всех этапах ТТЦ при различных условиях эксплуатации БПЛА и различных площадях ежедневных полевых работ.

#### Список источников

1. Анализ средств спецификации транспортно-технологических циклов БПЛА в умном сельском хозяйстве / *И.В. Ковалев* [и др.] // Системы управления и информационные технологии. 2023. № 2 (92). С. 80–85.
2. Conceptual basis for digitalization of specifications of transport and technological cycles of agricultural UAVs / *I.V. Kovalev* [et al.] // E3S Web of Conferences, 2023. 443:06014. DOI: 10.1051/e3sconf/202344306014.
3. Digitalization of UAV transport and technological cycles in smart agriculture / *I.V. Kovalev* [et al.] // E3S Web of Conferences, 2023. 390: 03014. DOI: 10.1051/e3sconf/202339003014.
4. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия / *И.Г. Смирнов* [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 3. С. 10–16. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-10-16.
5. Productivity analysis of agricultural UAVs by field crop spraying / *I.V. Kovalev* [et al.] // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2023. 1284:012026. DOI: 10.1088/1755-1315/1284/1/012026.
6. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / *I.V. Kovalev* [et al.] // IOP Conf. Ser.: Earth En-

- viron. Sci. 2022. 1076:012055. DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012055.
7. Ковалев Д.И., Подоплелова В.А., Мансурова Т.П. GERT-анализ транспортных технологических циклов беспилотных летательных аппаратов // Информатика. Экономика. Управление. 2022. № 1 (1). С. 0110–0120. DOI: 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120.
  8. Ganesh P. Borikar et al. Application of Drone Systems for Spraying Pesticides in Advanced Agriculture: A Review. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2022. 1259:012015. DOI: 10.1088/1757-899X/1259/1/012015.
  9. Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China / S.L. Wang [et al.] // Int J Agric & Biol Eng. 2017. 10(4):22-31. DOI: 10.25165/j.ijabe.20171004.3219.
  10. He X.K. Improving severe dragging actuality of plant protection machinery and its application techniques // TransactionsoftheCSAE, 2004. 20(1):13-15.
  11. К вопросу минимизации затрат в GERT-сетевых моделях транспортно-технологических циклов БПЛА / И.В. Ковалев [и др.] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. 11-2(41). С. 30–31. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.014.
  12. Computational approach to the structure spectral analysis of GERT-network models of mobile object monitoring systems / I.V. Kovalev [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. 2373:052003. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/5/052003.
  13. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers / W.C. Qin [et al.] // Crop Protection, 2016. 85:79-88.
  14. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides / B.S. Faiçal [et al.] // Journal of Systems Architecture, 2014. 60(4):393-404.
  15. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China / D.Y. Zhang [et al.] // Transactions of the CSAM, 2014. 45(10):53-59.
  16. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field / X.Y. Xue [et al.] // Int J Agric & Biol Eng. 2014. 7(4):23-28.
  17. Bird S.L., Esterly D.M., Perry S.G. Off-target deposition of pesticides from agricultural aerial spray applications // Journal of Environmental Quality, 1996. 25(5):1095-1104.
  18. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants / Y. Lan [et al.] // Applied Engineering in Agriculture, 2008. 24(1):5-10.

### References

1. Analiz sredstv specifikacii transportno-tehnologicheskikh ciklov BPLA v umnom sel'skom hozyajstve / I.V. Kovalev [i dr.] // Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii. 2023. № 2 (92). S. 80–85.
2. Conceptual basis for digitalization of specifications of transport and technological cycles of agricultural UAVs / I.V. Kovalev [et al.] // E3S Web of Conferences, 2023. 443:06014. DOI: 10.1051/e3sconf/202344306014.
3. Digitalization of UAV transport and technological cycles in smart agriculture / I.V. Kovalev [et al.] // E3S Web of Conferences, 2023. 390: 03014. DOI: 10.1051/e3sconf/202339003014.
4. Bespilotnye letatel'nye apparaty dlya vnesheniya pesticidov i udobrenij v sisteme tochnogo zemledeliya / I.G. Smirnov [i dr.] // Sel'skohozyajstvennyye mashiny i tehnologii. 2017. № 3. S. 10–16. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-10-16.
5. Productivity analysis of agricultural UAVs by field crop spraying / I.V. Kovalev [et al.] // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2023. 1284:012026. DOI: 10.1088/1755-1315/1284/1/012026.
6. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I.V. Kovalev [et al.] // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. 1076:012055. DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012055.
7. Kovalev D.I., Podoplelova V.A., Mansurova T.P. GERT-analiz transportnyh tehnologicheskikh ciklov bespilotnyh letatel'nyh apparatov // Informatika. `Ekonomika. Upravlenie. 2022. № 1 (1). S. 0110–0120. DOI: 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0110-0120.
8. Ganesh P. Borikar et al. Application of Drone Systems for Spraying Pesticides in Advanced Agriculture: A Review. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2022. 1259:012015. DOI: 10.1088/1757-899X/1259/1/012015.
9. Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China / S.L. Wang [et al.] // Int

- J Agric & Biol Eng. 2017. 10(4):22-31. DOI: 10.25165/j.ijabe.20171004.3219.
10. He X.K. Improving severe dragging actuality of plant protection machinery and its application techniques // Transactions of the CSAE, 2004. 20(1):13-15.
  11. K voprosu minimizacii zatrat v GERT-setevykh modelyakh transportno-tehnologicheskikh ciklov BPLA. / I.V. Kovalev [i dr.] // Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tehnologii. 2023. 11-2(41) S. 30–31. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.014.
  12. Computational approach to the structure spectral analysis of GERT-network models of mobile object monitoring systems / I.V. Kovalev [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. 2373:052003. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/5/052003.
  13. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers / W.C. Qin [et al.] // Crop Protection, 2016. 85:79-88.
  14. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides / B.S. Façal [et al.] // Journal of Systems Architecture, 2014. 60(4):393-404.
  15. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China / D.Y. Zhang [et al.] // Transactions of the CSAM, 2014. 45(10):53-59.
  16. Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field / X.Y. Xue [et al.] // Int J Agric & Biol Eng. 2014. 7(4):23-28.
  17. Bird S.L., Esterly D.M., Perry S.G. Off-target deposition of pesticides from agricultural aerial spray applications // Journal of Environmental Quality, 1996. 25(5):1095-1104.
  18. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants / Y. Lan [et al.] // Applied Engineering in Agriculture, 2008. 24(1):5-10.

Статья принята к публикации 30.09.2024 / The paper accepted for publication 30.09.2024.

Информация об авторах:

**Игорь Владимирович Ковалев**<sup>1</sup>, профессор кафедры информационных технологий и математического обеспечения информационных систем, доктор технических наук, профессор

**Зинаида Егоровна Шапорова**<sup>2</sup>, директор Института экономики и управления АПК, кандидат экономических наук, доцент

**Дмитрий Игоревич Ковалев**<sup>2</sup>, аспирант кафедры информационных технологий и математического обеспечения информационных систем

Data on authors:

**Igor Vladimirovich Kovalev**<sup>1</sup>, Professor at the Department of Information Technologies and Mathematical Support of Information Systems, Doctor of Technical Sciences, Professor

**Zinaida Egorovna Shapороva**<sup>2</sup>, Director of the Institute of Economics and Management of Agro-Industrial Complex, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor

**Dmitry Igorevich Kovalev**<sup>3</sup>, Postgraduate student at the Department of Information Technologies and Mathematical Support of Information Systems

