

**Наговицин Александр Иванович** – Михайловская военная артиллерийской академия; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22; тел.: +79112160000; кафедра автоматизированного управления ракетными войсками и артиллерией; к.в.н.; доцент.

**Пестерев Сергей Николаевич** – e-mail: pestruy@inbox.ru; тел.: +79052221824; кафедра управления ракетными ударами и огнем артиллерии в бою и операции; начальник кафедры; к.в.н.; доцент.

**Молоткова Баира Борисовна** – e-mail: bbmolotkova@bk.ru; тел.: +79818035441; кафедра автоматизированного управления ракетными войсками и артиллерией; доцент; к.п.н.; доцент.

**Аксенов Иван Владимирович** – e-mail: alexander@nagovitsin.ru; тел.: +79112160000; курсант факультета артиллерийской разведки и АСУ.

**Nagovicin Alexander Ivanovich** – Mikhailovskaya Artillery Military Academy; e-mail: alexander@nagovitsin.ru; 22, Komsomol street, St. Petersburg, 195009, Russia; phone: +79112160000; the department of automated control of rocket troops and artillery; associate professor; cand. of mil. sc.; associate professor.

**Pesterev Sergey Nikolaevich** – e-mail: pestruy@inbox.ru; phone: +79052221824; the department of missile strikes and artillery fire control in combat and operations; head of the department; cand. of mil. sc.; associate professor.

**Molotkova Baira Borisovna** – e-mail: bbmolotkova@bk.ru; phone: +79818035441; the department of automated control of rocket troops and artillery; associate professor; cand. of ped. sc.; associate professor.

**Aksenov Ivan Vladimirovich** – e-mail: alexander@nagovitsin.ru; phone: +79112160000; cadet of the faculty of artillery intelligence and ACS.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-39-51

**А.Л. Ронжин, К.Т. Нго, В.В. Нгуен**

### **ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ОБМЕНОМ ФИЗИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ МЕЖДУ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКОЙ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ РОБОТИЗАЦИИ\***

*Рассматривается проблема управления взаимодействием беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с наземными сервисными роботизированными платформами, осуществляющими функции транспортировки и передачи физических ресурсов, необходимых для выполнения сельскохозяйственных операций на открытом грунте. Совместное использование гетерогенных наземных и воздушных средств расширяет функциональные и сенсорные возможности роботизированной обработки сельскохозяйственных угодий. В ряде случаев, например, при обслуживании систем энергоснабжения и транспортировке воздушных средств возникает задача физического взаимодействия между беспилотным летательным аппаратом и наземной сервисной робототехнической платформой. Сложность решения данной задачи связана с проблемами посадки, фиксации и механизированной обработки аккумуляторов и аграрных ресурсов, размещаемых на летательном аппарате на сервисной платформе, а также управления очередностью сервисного обслуживания группы БЛА. По сравнению с наземной техникой использование БЛА в сельскохозяйственных задачах дает ряд основ преимуществ: отсутствие физического контакта с землей и уплотнения почвы, более широкая площадь мониторинга и обработки, более качественная*

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-58-76001\_ЭРА\_а.

*обработка культур жидкими средствами за счет вращения роторов без применения дополнительных устройств. Имеющиеся прототипы сервисных роботизированных платформ отличаются сложностью внутренних механизмов, скоростью обслуживания, алгоритмами совместной работы платформы и летательного аппарата при посадке и обслуживании аккумулятора. Автономная посадка БЛА в современных исследованиях рассматривается не только на фиксированную площадку, но и на мобильную платформу, осуществляющую движение в различных средах. По результатам проведенного анализа существующих подходов составлена классификация существующих сервисных систем, установленных на роботизированных и механизированных платформах. Рассматриваются характеристики обработки некоторых распространенных сельскохозяйственных культур. Приводится перечень операций процесса сельскохозяйственного производства, их длительность и стоимость, а также возможности механизации. Делается вывод, что стоимость немеханизированной операцией значительно выше. Разработан метод оценивания необходимого состава и количества техники для обработки сельскохозяйственного угодья, отличающийся многокритериальной оценкой с использованием линейной комбинации трех основных критериев суммарного времени обработки, израсходованной энергии, стоимости задействованной техники и обеспечивающий проведение численного моделирования и оптимизации объема привлекаемых гетерогенных робототехнических комплексов. Представлены результаты численного и имитационного моделирования количества робототехнической техники, необходимого для обработки сельскохозяйственного угодья, с использованием условных единиц и примерных диапазонов изменения значений входных параметров. Моделирование выполнено в разработанной программе *AgrobotModeling*, реализующей также визуализацию взаимодействия беспилотных летательных аппаратов с сельскохозяйственными наземными сервисными платформами, и обеспечивающих поддержку принятия решения об оптимальном количестве робототехнических средств, необходимых для обработки заданной площади сельскохозяйственного угодья.*

*Беспилотные летательные аппараты; роботизированная сервисная наземная платформа; физическое взаимодействие гетерогенных роботов; сельскохозяйственное угодье.*

**A.L. Ronzhin, K.T. Ngo, V.V. Nguyen**

#### **TASKS OF CONTROLLING THE EXCHANGE OF PHYSICAL RESOURCES BETWEEN AGRICULTURAL MEANS WITH VARYING DEGREES OF ROBOTIZATION**

*The problem of controlling the interaction of unmanned aerial vehicles (UAVs) with ground-based robotic service platforms that perform the functions of transporting and transferring physical resources needed to perform agricultural operations on open ground is considered. The combined use of heterogeneous ground and air robotic means expands the functional and sensory capabilities of automatic processing of agricultural land. In a number of cases, for example, when servicing energy supply systems and transporting air means, the problem of physical interaction arises between an unmanned aerial vehicle and a ground service robotic platform. The complexity of solving this problem is associated with the problems of landing, fixing and mechanized processing of batteries and agricultural resources placed on an aircraft on a service platform, as well as managing the sequence of service of a UAV group. Compared with ground equipment, the use of UAVs in agricultural tasks provides a number of advantages: lack of physical contact with the ground and soil compaction, a wider monitoring and processing area, better treatment of crops with liquid means due to the rotation of rotors without the use of additional devices. Available prototypes of service robotic platforms are distinguished by the complexity of internal mechanisms, the speed of service, the algorithms for the joint operation of the platform and the aircraft during landing and maintenance of battery. Autonomous UAV landing in modern research is considered not only on a fixed site, but also on a mobile platform that carries out movement in various environments. Based on the results of the analysis of existing approaches, a classification of existing service systems installed on robotic and mechanized platforms has been compiled. The processing characteristics of some common crops are considered. A list of operations of the agricul-*

tural production process, their duration and cost, as well as the possibility of mechanization. It is concluded that the cost of non-mechanized operations is much higher. A method has been developed for assessing the required composition and quantity of equipment for cultivating agricultural land, characterized by a multi-criteria assessment using a linear combination of three main criteria for the total processing time, energy consumed, the cost of the equipment involved and providing numerical modeling and optimization of the volume of involved heterogeneous robotic systems. The results of numerical and simulation modeling of the amount of robotic equipment required for processing agricultural land using arbitrary units and approximate ranges of input parameter values are presented. The simulation was performed in the developed AgrobotModeling software, which also implements visualization of the interaction of unmanned aerial vehicles with agricultural ground service platforms and provides decision support on the optimal number of robotic tools needed to process a given agricultural land area.

Unmanned aerial vehicles; robotic service ground platform; physical interaction of heterogeneous robots; farmland.

**Введение.** Рассмотрим существующие подходы и системы по загрузке/разгрузке физических ресурсов, которые используются сельскохозяйственной техникой, том числе роботизированной, при обработке сельскохозяйственных культур. Большинство работ посвящены загрузке жидкостей из стационарных емкостей в бак наземной сельскохозяйственной техники или же БЛА используются для съемки и составления картограмм, а наземная техника для обработки полей [1, 2].

Чтобы понимать с какими полезными ресурсами мы имеем дело при заправке контейнеров БЛА прежде всего рассмотрим множество обрабатываемых операций, которые производятся при выращивании различных культур. В табл. 1 описаны характеристики обработки некоторых распространенных сельскохозяйственных культур. В частности, отмечены такие особенности, как число обрабатываемых операций за год и стоимость их выполнения для каждого вида сельскохозяйственной культуры. При составлении нижеуказанных таблиц были использованы исходные данные, полученные при проведении опытных исследований, описанных в работах [3, 4].

Таблица 1

**Стоимость и число операций при выращивании сельскохозяйственных культур**

Культуры	Число обрабатываемых операций за год	Стоимость за 1,0 га, руб.
Озимые зерновые	25	12807,0
Просо	21	11441,0
Картофель	19	62196
Огурец	15	67025,0
Овёс	16	7749,6
Кукуруза	19	13810,0
Горох	12	7161,15
Гречиха	21	9462,5
Озимого ячменя	16	8818,5
Подсолнечника	24	10335
Соя	25	12807,0

В табл. 2 приведены операции процесса сельскохозяйственного производства, их длительность и стоимость, а также возможности механизации. Видно, что стоимость немеханизированных операций значительно выше.

Таблица 2

**Характеристики операций процесса сельскохозяйственного производства**

Наименование операций	Число обслуживающего персонала, чел.	Стоимость за 1,0 га, руб.	Степень механизации
Дисковое лушение стерни; см/га	1	600,0	Т-150
Транспортировка мин. удобр. на 5 км и внесение; кг/га	2	635,0	МТЗ-80
Вспашка зяби; см/га	1	1090,0	Т-150
Чизелевание (выравнивание) зяби; см/га	1	820,0	Т-150
Обработка семян ризоторфином с затариванием в мешки; кг	2	205,0	Эл. двигатель
Боронование зяби, см/га 4-6 см	1	550,0	Т-150
Культивация предпосевная, см/га	1	400,0	Т-150
Погрузка, транспортировка семян к посевным агрегатам, 5 км	2	350,0	МТЗ-80
Посев сплошной, кг/га	1	405,0	МТЗ-80
Боронование посевов с прикатыванием, см/га	1	360,0	Т-150
Довсходовое внесение Прометрина, л/га	1	455,0	МТЗ-80
Заделка Прометрина вслед за внесением, га	1	360,0	Т-150
Боронование посевов по всходам сои, см	1	355,0	МТЗ-80
Защита посевов от мышевидных грызунов, зерновая приманка с Клерат, Г	1	346,0	Вручную
Четырехкратное обследование посевов для выявления фитосанитарного состояния, га	1	1000,0	Вручную
Ручная прополка, руб./день, 3 раза	10	15000,0	Вручную
Ручной сбор, 3 раза	10	15000,0	Вручную
Приготовление рабочего раствора: Форте, КЭ	2	250,0	Эл. двигатель
Опрыскивание посевов против вредителей, согласно ЭПВ	1	305,0	МТЗ-80
Транспортировка рабочего раствора гербицидов, 5 км/л	1	210,0	МТЗ-80
Внесение рабочего раствора гербицидов; л/га	1	305,0	МТЗ-80
Нарезка временных оросителей, га	1	555,0	Т-150
1-й вегетационный полив, куб.м/га	1	1395,0	Т-150
2-й вегетационный полив, куб.м/га	1	1395,0	Т-150
Уборка семян с измельчением и сбором соломы, га	1	965,0	СК-5«Нива»
Транспортировка семян, 5 км/ц	1	345,0	САЗ-53А
Транспортировка измельченной массы, 5 км/т	1	200,0	МТЗ-80

При составлении вышеуказанных таблиц были использованы исходные данные, полученные при проведении опытных исследований, описанных в работах [3, 4]. Далее рассмотрим публикации последних лет, в которых описаны способы и системы пополнения ресурсов роботизированной и механизированной сельскохозяйственной техники, осуществляющих полив, внесение гербицидов, удобрений, семян из своего встроенного контейнера.

Наземная станция с автоматической дозаправкой жидких ресурсов на наземных роботов описана в работе [5]. Станция снабжена металлической штангой, в конце которой закреплен манипулятор с двумя степенями свободы, направляющий шланг в воронку подъехавшего в определенную позицию робота.

В работе [6] оценивается расход топлива и удобрений наземного робота в зависимости от типа маневра ( $\Omega$  или  $U$ ) при повороте, времени обслуживания при дозаправке.

В цикле работ [7, 8] описан технологический процесс внесения минеральных удобрений с применением сельскохозяйственной техники: самосвалов, загрузчиков и удобрителей. При этом учитывались общая площадь поля, расстояние до поля, норма высева удобрений, ширина захвата удобрителя, среднее время выгрузки самосвала, наполнения загрузчика, разгрузки в удобритель, грузоподъемности самосвала, загрузчика, удобрителей, средние скорости загрузчика, удобрителя и другие параметры. Предложенная математическая модель позволила определить затраты и время завершения процесса внесения минеральных удобрений, структуру и состав оптимальных звеньев «заправщик – удобритель».

Беспилотный летательный аппарат, выполняющий в автоматическом режиме полётные задания с дальностью до 5 км и полезной нагрузкой до 10 кг, описан в работе [9]. Бак с жидкостью для опрыскивания и распылители реализованы в виде быстросъёмных модулей. Одним из преимуществ применения БЛА в сельском хозяйстве является отсутствие уплотнения почвы поля, такого эффекта можно добиться при использовании кабельных роботов, а также крановых систем [10].

Возвращаясь к исследованиям Кубанского ГАУ, уже в последующей работе [11] авторы в явном виде ставят задачу совместной работы «летающих» опрыскивателей со специализированным транспортным средством, обеспечивающим в автоматическом режиме их заправку рабочим раствором, хранение и перевозку. Тем не менее способов автоматического пополнения ресурсов БЛА на наземной заправочной платформе в работе не предлагается.

В работе [12] рассматриваются особенности управления полетом БЛА при опрыскивании сельскохозяйственных полей жидкими средствами. Пестициды и химикаты должны распространяться на определенном расстоянии от растений, высота которых различается даже на одном поле. Культуры как правило высаживаются параллельными бороздами и облет над ними должен производиться равномерно с допустимой погрешностью.

Методика расчета маршрута полета БЛА при распылении пестицидов по полю зерновых культур с учетом погодных условий описана в работе [13]. За счет мониторинга произведенной обработки производится корректировка маршрута.

Преимущества и особенности применения БЛА в горных территориях при решении сельскохозяйственных задач рассматриваются в работе [14]. Большая часть фруктовых частных хозяйств расположены в горных территориях с полями до 2 га вдали от дорог. Поэтому БЛА вертикального взлета с полезной нагрузкой до 15 кг имеют наибольшую популярность для обследования и обработки небольших полей, расположенных в горах.

Экспериментальная оценка массы полезной нагрузки производится в работе [15]. Влияние скорости вращения винтов БЛА, скорости ветра учитывается при расчете максимальной массы пестицидов, заправляемой на борт БЛА.

Анализ условий при выборе местоположения взлетно-посадочной полосы проводится в работе [16]. Многокритериальная оценка качества места посадки производится по двенадцати входных параметров на основе байесовской сети и сводится к двум основным критериям: безопасность посадки и достижимость цели.

В работе [17] описан БЛА с полезной нагрузкой до 22 кг, оснащенный системой опрыскивания с резервуаром на 5 л, которого достаточно для обработки поля до 0.14 км<sup>2</sup>.

Экспериментальные результаты снижения заряда аккумулятора и массы опрыскиваемой жидкости показаны в работе [18]. Объем резервуара подобран таким образом, чтобы с окончанием жидкости заряда аккумулятора хватало как раз чтобы только добраться до места посадки. При расчете экономических затрат учитывается амортизация техники, страховки, налоги, горюче-смазочные материалы, износ шин, затраты на ремонт, заработная плата операторов роботизированной и другой техники. Также обсуждаются перспективы использования БЛА не только для мониторинга и распыления жидкостей, но и для посевов и даже восстановления лесных угодий.

С учетом проведенного анализа существующие сервисные системы БЛА можно классифицировать по нескольким критериям, описывающих типы сервисных станций по степени мобильности, автономности управления и обслуживания самих станций, по типу обслуживания, по типу ресурсов, используемых в ходе обслуживания БЛА (рис. 1).



Рис. 1. Системы сервисного обслуживания сельскохозяйственных БЛА

Дополнительные критерии классификации свидетельствуют, что системы сервисного обслуживания контейнеров БЛА можно разделить:

- ◆ по степени мобильности на стационарные, прицепные и подвижные;
- ◆ по степени автономности управления, сервисные станции имеют типы телеуправляемые, автоматические и механизированные;

◆ по степени автономности обслуживания сервисные системы делятся на: с дозаправкой ресурсов трубопроводам, с дозаправкой ресурсов специальным транспортом и с возвращением на базу для дозаправки ресурсов;

◆ по типу ресурсов, системы классифицируются по агрегатному состоянию ресурсов и по назначению. По агрегатному состоянию ресурсы делятся на жидкие (например, растворы и эмульсии) и твердые (например, гранулированные и порошкообразные). По назначению ресурсы можно разделить на семена, удобрения и пестициды. Среди удобрений следует выделить такие типы как органические, минеральные и бактериальные. Среди пестицидов имеются следующие основные варианты: инсектициды (против насекомых), гербициды (против сорняков), фунгициды (против грибов) и зооциды.

**Имитационное и численное моделирование количества робототехнической техники для обработки сельскохозяйственного угодья.** Разработанное модельно-алгоритмическое обеспечение управления взаимодействием гетерогенных сельскохозяйственных робототехнических комплексов описано в работах [19–20].

Разработанный метод оценивания необходимого количества техники для обработки сельскохозяйственного угодья использует три основных критерия: 1) суммарное время обработки  $t^{sum}$ ; 2) суммарная израсходованная энергия  $e^{sum}$ ; 3) суммарная стоимость задействованной техники  $c^{sum}$ . При расчете суммарное время обработки  $t^{sum}$  будем считать, что сервисные платформы и находящиеся на них БЛА передвигаются к месту обработки сельскохозяйственного угодья одновременно, поэтому основные временные затраты складываются из времени движения платформ к угодью и назад, а также времени обработки угодья  $t^o$  и времени обслуживания БЛА  $t^u$ :  $t^{sum} = 2t^{CP} + t^o + t^u$ , где  $t^o = \frac{S^o}{\Delta snm}$  – среднее время работы каждого задействованного БЛА на сельскохозяйственном угодье, число БЛА  $n \in (0, N]$ , число платформ  $m \in (0, M]$ . Для расчета времени обслуживания БЛА необходимо определить сколько раз за период  $t^o$  потребуется произвести пополнение БЛА физическими и энергетическими ресурсами:

$$t^u = \frac{t^o}{r_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u) + \frac{t^o}{e_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u), \text{ тогда:}$$

$$t^{sum} = 2t^{CP} + \frac{S^o}{\Delta snm} + \frac{\Delta snm}{r_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u) + \frac{\Delta snm}{e_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u) = 2 * t^{CP} + \frac{S^o}{\Delta snm} + \frac{S^o}{\Delta snm r_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u) + \frac{S^o}{\Delta snm e_{max}^U \Delta t} (2t^{PS} + t_p^u).$$

При расчете суммарных энергетических ресурсов, необходимых для обработки сельскохозяйственного угодья  $O$ , также следует учесть передвижение платформ от центральной базы и обратно, а также обслуживание аккумуляторов всех БЛА в процессе работы:  $e^{sum} = n2e_{min}^p + \frac{S^o}{\Delta snm e_{max}^U \Delta t} nm = n2e_{min}^p + \frac{S^o}{\Delta se_{max}^U \Delta t}$ .

Суммарная стоимость задействованной техники будет складываться из стоимости платформ и БЛА, обслуживаемых на них:  $c^{sum} = nc^p + mc^u$ .

Для минимизации влияния конечных условий была произведена модификация вышеприведенных формул. Дополнительно были введены следующие временные переменные:

$$t_U^r = r_{max}^U \frac{\Delta t}{\Delta r} - \text{время, когда заканчиваются физические ресурсы БЛА};$$

$$t_U^e = (e_{max}^U - 2e_{min}^U) \frac{\Delta t}{\Delta e} - \text{время, когда заканчиваются энергетические ресурсы}$$

БЛА.

С учетом соотношения времени расходования физических и энергетических ресурсов, расчет оценок времени обработки угодья и затрачиваемой энергии изменился следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} t^{sum} = 2t^{CP} + \frac{s_{max}^{oj} \Delta r}{nmr_{max}^U \Delta t} \left( 2t^{PS} + t_p^u + \frac{r_{max}^U \Delta t}{\Delta r} \right) \\ e^{sum} = n2e_{min}^P + \frac{s_{max}^{oj} \Delta r}{r_{max}^U \Delta t} \left( 2t^{PS} + \frac{r_{max}^U \Delta t}{\Delta r} \right) \Delta e, \\ \text{если } t_U^r < t_U^e; \\ t^{sum} = 2t^{CP} + \frac{s_{max}^{oj} \Delta e}{nm(e_{max}^U - 2e_{min}^U) \Delta t} \left( t_p^u + \frac{e_{max}^U \Delta t}{\Delta e} \right), \\ e^{sum} = n2e_{min}^P + \frac{s_{max}^{oj} \Delta e}{(e_{max}^U - 2e_{min}^U) \Delta t} e_{max}^U, \\ \text{иначе.} \end{array} \right. ,$$

Если  $t_U^r < t_U^e$ , это означает, что физические ресурсы закончились раньше, чем энергетические ресурсы. В случае если  $t_U^r = t_U^e$ , то физические и энергетические ресурсы заканчиваются одновременно  $r_{max}^U \frac{\Delta t}{\Delta r} = (e_{max}^U - 2e_{min}^U) \frac{\Delta t}{\Delta e}$ . Это позволяет увеличить коэффициент использования энергии для одного взлета, что сводит к минимуму общее количество взлетов для выполнения задания.

Многокритериальной оценкой, используемой при принятии решения о количестве необходимой техники для обработки сельскохозяйственного угодья, является линейная комбинация описанных выше критериев:

$$\varepsilon(S^o, n, m) = t^{sum} w_t + e^{sum} w_e + c^{sum} w_c,$$

где  $w_t$ ,  $w_e$ ,  $w_c$  весовые коэффициенты, отвечающие за приоритеты затрат по времени, энергии и стоимости соответственно. В результате сортировки значений многокритериальной оценки выбирается некоторый кортеж значений количества сервисных платформ и БЛА для заданной площади сельскохозяйственного угодья  $\varepsilon^{opt}$ , имеющий минимальную оценку:  $Argmin_{n \in N, m \in M} (\varepsilon(S^o, n, m)) = \langle n^*, m^* \rangle$ .

Далее представлена программа многокритериальной оценки необходимого количества робототехнической техники для обработки заданного сельскохозяйственного угодья AgroBotModeling, предназначенная для расчета количества беспилотных летательных аппаратов и наземных сервисных подвижных платформ, задействованных в обработке сельскохозяйственного угодья заданной площади. В программе производится имитационное моделирование функционирования выбранного количества робототехнических средств, а также расчет многокритериальной оценки на основе линейной комбинация трех основных критериев: суммарное время обработки, суммарная израсходованная энергия, суммарная стоимость задействованной техники. Значения весов выбираются экспертным путем в зависимости от заданного приоритета скорости обработки, например в случае прогнозирования ухудшения погоды и риска потери урожая, или приоритета снижения стоимости обработки угодья. Программа имеет наглядный пользовательский интерфейс и ориентирована на использование как малыми фермерскими хозяйствами, так и крупными агрохолдингами.

На рис. 2 показана структура модулей, а на рис. 3 пользовательский интерфейс разработанной программы AgroBotModeling, визуализирующей процесс моделирования обработки сельскохозяйственного угодья с различным числом платформ и БЛА. Интерфейс содержит 4 основных блока, отражающие параметры угодья, платформы и БЛА, а также элементы управления и индикации прошедшего времени.

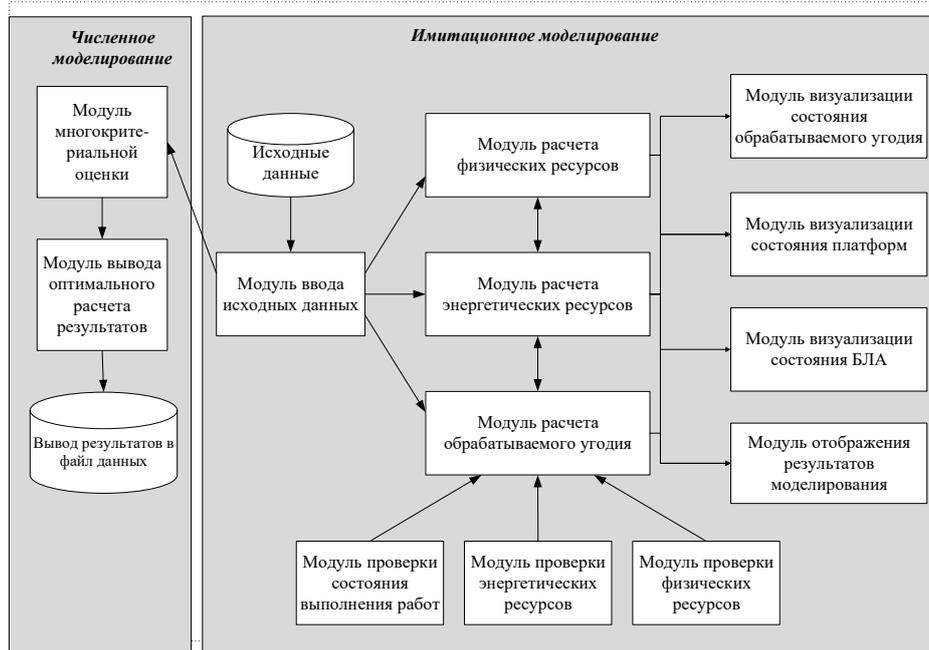


Рис. 2. Структура модулей программы AgrobotModeling

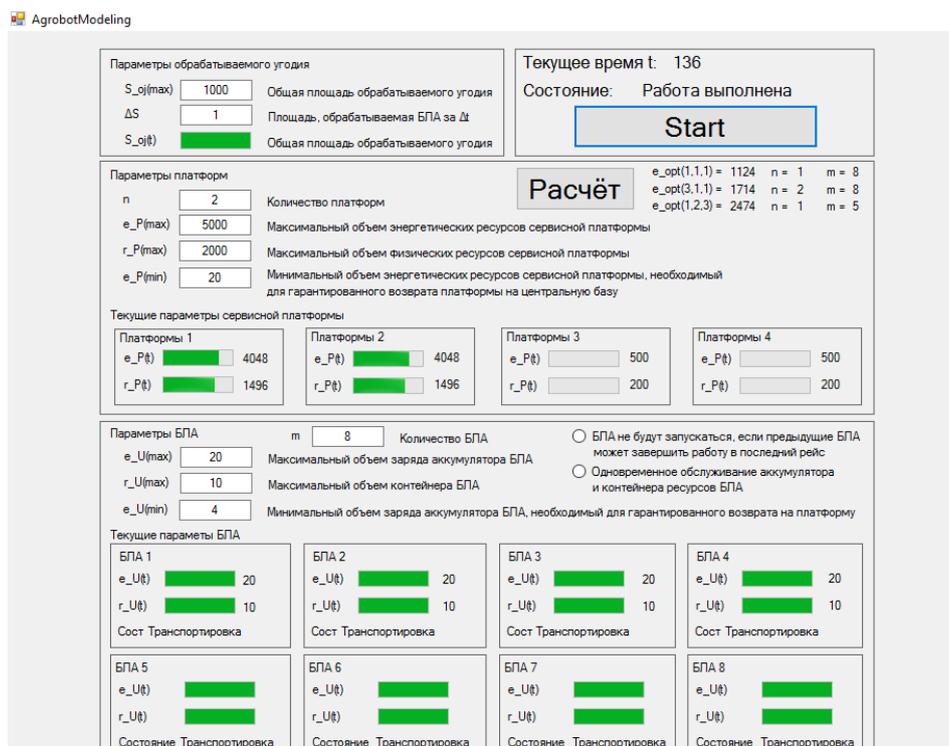


Рис. 3. Пользовательский интерфейс программы AgrobotModeling

Также были выполнены численные эксперименты по выбору оптимальных значений количества платформ и БЛА для обработки заданной площади сельскохозяйственного угодья при разных весовых коэффициентах необходимой скорости обработки и затрачиваемых ресурсов. На рис. 4 показан пример численных экспериментов по выбору оптимальных значений количества платформ и БЛА для обработки заданной площади сельскохозяйственного угодья при разных весовых коэффициентах необходимой скорости обработки и затрачиваемых ресурсов.

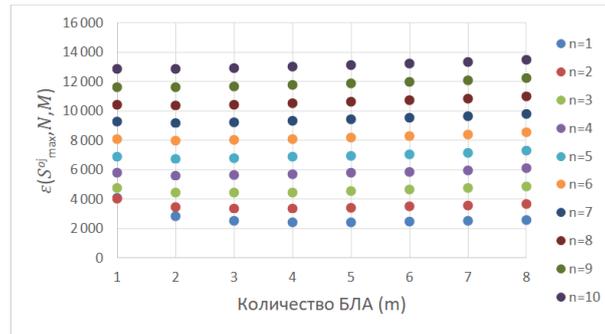


Рис. 4. Многокритериальная оценка количества задействованной техники при  $M=8$ ,  $S_{max}^{oj} = 1000$ ,  $n_{opt}=1$ ,  $m_{opt}=5$ ,  $(w_s, w_e, w_c) = (1,2,3)$

При проведении серии экспериментов значения входных параметров изменялись в следующих диапазонах: число сервисных платформ  $n = [1,2,\dots,10]$ ; число БЛА  $m = [1,2,\dots,8]$ ; площадь угодья  $s_{max}^{oj} = [1000, 10000]$ ; веса оценок  $w_s, w_e, w_c = \{(1,1,1); (3,1,1); (1,2,3)\}$ .

**Заключение.** На примере опытных исследований по выращиванию сельскохозяйственных культур показано, что число обрабатываемых операций сельскохозяйственного производства, как правило, превышает два десятка. Проанализированы их длительность и стоимость, а также возможности механизации. Наиболее затратные операции прополка, сбор плодов остаются без автоматизации. Рассмотрены существующие подходы и системы по загрузке/разгрузке физических ресурсов, которые используются сельскохозяйственной техникой, том числе роботизированной, при обработке сельскохозяйственных культур.

Разработанные модели и алгоритмы управления взаимодействием БЛА с сельскохозяйственной роботизированной платформой позволяют производить физические манипуляции с аккумулятором и физическими ресурсами при выполнении сельскохозяйственных задач и увеличить время автономного функционирования БЛА. Для оценивания необходимого состава и количества техники для обработки сельскохозяйственного угодья был разработан метод многокритериальной оценки с использованием линейной комбинации трех основных критериев суммарного время обработки, израсходованной энергии, стоимости задействованной техники, а весовые коэффициенты, отвечающие за приоритеты затрат по времени, энергии и стоимости выбираются экспертным путем в зависимости от заданного приоритета скорости обработки, например, в случае прогнозирования ухудшения погоды и риска потери урожая, или приоритета снижения стоимости обработки угодья. Разработанная программа AgrobotModeling обеспечивает расчет количества беспилотных летательных аппаратов и наземных сервисных подвижных платформ, задействованных в обработке сельскохозяйственного угодья заданной площади. Представленные результаты численного и имитационного моделирования количества робототехнической техники для обработки сельскохозяйственного угодья подтверждают достоверность разработанного модельного-алгоритмического и программного обеспечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pablo Gonzalez-de-Santos, Angela Ribeiro, Cesar Fernandez-Quintanilla, Francisca Lopez-Granados, Michael Brandstoeffer, Slobodanka Tomic, Stefania Pedrazzi, Andrea Peruzzi, Gonzalo Pajares, George Kaplanis, Manuel Perez-Ruiz, Constantino Valero, Jaime del Cerro, Marco Vieri, Gilles Rabatel, Benoit Debilde.* Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture // *Precision Agriculture*. – 2017. – Vol. 18, Issue 4. – P. 574-614. – DOI 10.1007/s11119-016-9476-3.
2. *Карсаев О.В., Шужлин И.И., Юценко С.П.* Самоорганизующееся В2В-предприятие рас-пределенной фотограмметрической обработки изображений местности в ЕТРИС // *Труды СПИИРАН*. – 2020. – № 1 (19). – С. 155-179.
3. *Нагоева О.В., Анчиков М.И.* Разработка программной модели системы управления робо-том-комбайном // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2019. – № 3 (89). – С. 15-22.
4. *Анчиков М.И., Кильчукова А.Л., Шалова С.Х.* Решение проблем автоматизации процесса сбора плодовоошной продукции // *Инженерный вестник Дона*. – 2016. – № 4 (43). – С. 73.
5. *David Ball, Patrick Ross, Andrew English, Peter Milani, Daniel Richards, Andrew Bate, Ben Uproft, Gordon Wyeth, and Peter Corke.* Farm Workers of the Future: Vision-Based Robotics for Broad-Acre Agriculture // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. – 2017. – Vol. 24, No. 3. – P. 97-107. – DOI: 10.1109/MRA.2016.2616541.
6. *Mark Spekken, Sytze de Bruin.* Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneu-ering and servicing time // *Precision Agriculture*. – 2013. – Vol. 14. – P. 224-244. – DOI 10.1007/s11119-012-9290-5.
7. *Щербаков Н.В., Ким С.А.* Моделирование технологического процесса внесения мине-ральных удобрений // *Вестник науки Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова*. – 2002. – № 3-4. – С. 31-35.
8. *Щербаков Н.В., Ким С.А.* Исследование технологического процесса внесения минеральных удобрений в зоне Северного Казахстана // *Известия ОГАУ*. – 2006. – № 11-1. – С. 75-77.
9. *Меркулов А.А.* Конструктивно-технологическая схема роботизированного комплекса для внесения рабочих растворов // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сб. статей по материалам XI Всероссийской конференции молодых ученых, посвящен-ной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края. Ответственный за выпуск А. Г. Коцаев*. – 2017. – С. 402-403.
10. *Sierra N. Young, Erkan Kayacan, Joshua M. Peschel.* Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum // *Precision Agriculture*. – 2019. – Vol. 20. – P. 697-722. – DOI 10.1007/s11119-018-9601-6.
11. *Куцаев В.В., Меркулов А.А.* Подходы к роботизации химической защиты растений в се-лекционном процессе зерновых культур // *Инновационные технологии отечественной селекции и семеноводства: Сб. тезисов по материалам II научно-практической конфе-ренции молодых ученых Всероссийского форума по селекции и семеноводству. Ответ-ственный за выпуск А.Г. Коцаев*. – 2018. – С. 130-132.
12. *Ziming Wang, Dalei Song, Juntong Qi, Jianda Han, Yu Miao, Lijun Meng, Shuaike Zhao, and Ming Li.* A Full-functional Simulation and Test Platform for Rotorcraft Unmanned Aerial Ve- hicle Autonomous Control // *Robot Intelligence Technologies and Applications*. J.-H. Kim et al. (Eds.). – 2012, AISC. – Vol. 208. – P. 537-547. – DOI: 10.1007/978-3-642-37374-9\_52.
13. *Bruno S. Faiçal, Gustavo Pessin, Geraldo P.R. Filho, Gustavo Furquim, André C.P.L.F. de Carvalho, and Jó Ueyama.* Exploiting Evolution on UAV Control Rules for Spraying Pesti- cides on Crop Fields // *EANN*. – 2014. – P. 49-58.
14. *Shulin Yang, Xiaobing Yang, Jianyou Mo.* The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China // *Precision Agriculture*. – 2018. – Vol. 19. – P. 278-292. – DOI: 10.1007/s11119-017-9516-7.
15. *Koo Y.M., Hong J.G., Haider B.A. and Sohn C.H.* Practical payload assessment of a prototype blade for agricultural unmanned rotorcraft // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2018. – Vol. 32(12). – P. 5659-5669. – DOI 10.1007/s12206-018-1113-9
16. *Marc Schmitt and Peter Stütz.* Multi-UAV Based Helicopter Landing Zone Reconnaissance. Infor- mation Level Fusion and Decision // *Support Springer International Publishing AG 2017*. D. Harris (Ed.): EPCE 2017, Part II, LNAI 10276. – P. 266-283. – DOI: 10.1007/978-3-319-58475-1\_20.
17. *Huang Y., Hoffmann W.C., Lan Y., Wu, W., Fritz B.K.* Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2009. – Vol. 25 (6). – P. 803-809.

18. *Jorge Martinez-Guanter, Pablo Agüera, Juan Agüera, Manuel Pérez-Ruiz.* Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards // *Precision Agriculture*. – P. 1-18. – DOI: 10.1007/s11119-019-09665-7.
19. *Ву Д.К., Соленая О.Я., Ронжин А.Л.* Обзор робототехнических захватов для физических манипуляций с аграрной продукцией // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2017. – № 12.
20. *Ву Д.К., Нгуен В.В., Соленая О.Я., Ронжин А.Л.* Анализ задач аграрной робототехники, решаемых посредством беспилотных летательных аппаратов // *Агрофизика*. – 2017. – № 3. – С. 57-65.

## REFERENCES

1. *Pablo Gonzalez-de-Santos, Angela Ribeiro, Cesar Fernandez-Quintanilla, Francisca Lopez-Granados, Michael Brandstötter, Slobodanka Tomic, Stefania Pedrazzi, Andrea Peruzzi, Gonzalo Pajares, George Kaplanis, Manuel Perez-Ruiz, Constantino Valero, Jaime del Cerro, Marco Vieri, Gilles Rabatel, Benoit Debilde.* Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture, *Precision Agriculture*, 2017, Vol. 18, Issue 4, pp. 574-614. DOI 10.1007/s11119-016-9476-3.
2. *Karsaev O.V., Shuklin I.I., Yushchenko S.P.* Samoorganizuyushcheesya B2B-predpriyatie raspredelennoy fotogrammetricheskoy obrabotki izobrazheniy mestnosti v ETRIS [Self-Organizing B2B Enterprise of Distributed Photogrammetric Processing of Terrain Images in ETRIS], *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2020, No. 1 (19), pp. 155-179.
3. *Nagoeva O.V., Anchekov M.I.* Razrabotka programmnoy modeli sistemy upravleniya robotom-kombaynom [Development of a software model for a robot combine control system], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN [News of the Kabardin-Balkar scientific center of RAS]*, 2019, No. 3 (89), pp. 15-22.
4. *Anchikov M.I., Kil'chukova A.L., Shalova S.H.* Reshenie problem avtomatizatsii protsessa sbora plodoovoshchnoy produktsii [Solving the problems of automation of the process of collecting fruits and vegetables], *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering journal of Don]*, 2016, No. 4 (43), pp. 73.
5. *David Ball, Patrick Ross, Andrew English, Peter Milani, Daniel Richards, Andrew Bate, Ben Uproft, Gordon Wyeth, and Peter Corke.* Farm Workers of the Future: Vision-Based Robotics for Broad-Acre Agriculture, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2017, Vol. 24, No. 3, pp. 97-107. DOI: 10.1109/MRA.2016.2616541.
6. *Mark Spekken, Sytze de Bruin.* Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time, *Precision Agriculture*, 2013, Vol. 14, pp. 224-244. DOI 10.1007/s11119-012-9290-5.
7. *Shcherbakov N.V., Kim S.A.* Modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa vneseniya mineral'nykh udobreniy [Modeling the technological process of applying mineral fertilizers], *Vestnik nauki Kostanayskogo gosudarstvennogo universiteta im. A. Baitursynova [Herald of KSU named after A. Baitursynov]*, 2002, No. 3-4, pp. 31-35.
8. *Shcherbakov N.V., Kim S.A.* Issledovanie tekhnologicheskogo protsessa vneseniya mineral'nykh udobreniy v zone Severnogo Kazakhstana [Study of the technological process of applying mineral fertilizers in the north kazakhstan zone], *Izvestiya OGAU [ORENSAU News]*, 2006, No. 11-1, pp. 75-77.
9. *Merkulov A.A.* Konstruktivno-tekhnologicheskaya skhema robotizirovannogo kompleksa dlya vneseniya rabochikh rastvorov [Structural-technological scheme of a robotic complex for making working solutions], *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: Sbornik statey po materialam XI Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 95-letiyu Kubanskogo GAU i 80-letiyu so dnya obrazovaniya Krasnodarskogo kraya [Scientific support of the agro-industrial complex: a Collection of articles based on the materials of the XI all-Russian conference of young scientists dedicated to the 95th anniversary of the Kuban state agrarian University and the 80th anniversary of the Krasnodar territory]*. Responsible for the release A.G. Koshchaev, 2017, pp. 402-403.
10. *Sierra N. Young, Erkan Kayacan, Joshua M. Peschel.* Design and field evaluation of a ground robot for high-throughput phenotyping of energy sorghum, *Precision Agriculture*, 2019, Vol. 20, pp. 697-722. DOI 10.1007/s11119-018-9601-6.

11. Kuceev V.V., Merkulov A.A. Podkhody k robotizatsii himicheskoy zashchity rasteniy v selektsionnom processe zernovykh kul'tur [Approaches to robotic chemical plant protection in the breeding process of crops], *Innovacionnye tekhnologii otechestvennoj selekcii i semenovodstva Sbornik tezisov po materialam II nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh Vserossijskogo foruma po selekcii i semenovodstvu* [Innovative technologies of domestic selection and seed production]. Responsible for the release A.G. Koshchaev, 2018, pp. 130-132.
12. Ziming Wang, Dalei Song, Juntong Qi, Jianda Han, Yu Miao, Lijun Meng, Shuaike Zhao, and Ming Li. A Full-functional Simulation and Test Platform for Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle Autonomous Control. *Robot Intelligence Technologies and Applications*. J.-H. Kim et al. (Eds.): 2012, AISC, Vol. 208, pp. 537–547. DOI: 10.1007/978-3-642-37374-9\_52.
13. Bruno S. Faiçal, Gustavo Pessin, Geraldo P.R. Filho, Gustavo Furquim, André C.P.L.F. de Carvalho, and Jó Ueyama. Exploiting Evolution on UAV Control Rules for Spraying Pesticides on Crop Fields, *EANN*, 2014, pp. 49-58.
14. Shulin Yang, Xiaobing Yang, Jianyou Mo. The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China, *Precision Agriculture*, 2018, Vol. 19, pp. 278-292. DOI: 10.1007/s11119-017-9516-7.
15. Koo Y.M., Hong J.G., Haider B.A. and Sohn C.H. Practical payload assessment of a prototype blade for agricultural unmanned rotorcraft, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, Vol. 32 (12), pp. 5659-5669. DOI 10.1007/s12206-018-1113-9.
16. Marc Schmitt and Peter Stütz. Multi-UAV Based Helicopter Landing Zone Reconnaissance. Information Level Fusion and Decision. Support Springer International Publishing AG 2017. D. Harris (Ed.): EPCE 2017, Part II, LNAI 10276, pp. 266-283. DOI: 10.1007/978-3-319-58475-1\_20.
17. Huang Y., Hoffmann W.C., Lan Y., Wu W., Fritz B.K. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform, *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, Vol. 25 (6), pp. 803-809.
18. Jorge Martinez-Guanter, Pablo Agüera, Juan Agüera, Manuel Pérez-Ruiz. Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards, *Precision Agriculture*, pp. 1-18. DOI: 10.1007/s11119-019-09665-7.
19. Vu D.K., Solenaya O.Ya., Ronzhin A.L. Obzor robototekhnicheskikh zakhvatov dlya fizicheskikh manipulyatsiy s agrarnoy produktsiey [Over-view of robotic grippers for physical manipulation with agricultural products], *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2017, No. 12.
20. Vu D.K., Nguen V.V., Solenaya O.Ya., Ronzhin A.L. Analiz zadach agrarnoy robototekhniki, reshaemykh posredstvom bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Analysis of agriculture robotics tasks solved by using unmanned aerial vehicles], *Agrofizika* [Agrophysical], 2017, No. 3, pp. 57-65.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Башилов.

**Ронжин Андрей Леонидович** – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук; e-mail: ronzhin@iias.spb.su; 199178, г. Санкт-Петербург, 14 линия, 39; тел.: +79112532432; лаборатория автономных робототехнических систем; д.т.н.; профессор; профессор РАН; г.н.с.; директор.

**Нго Куок Тьен** – e-mail: quoctienbn@gmail.com; тел.: +78123283311; лаборатория автономных робототехнических систем; соискатель.

**Нгуен Ван Винь** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: nguyenvanvinhhvkt@gmail.com; 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67; тел.: +792144912; кафедра электромеханики и робототехники; аспирант.

**Ronzhin Andrey Leonidovich** – St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ronzhin@iias.spb.su; 39, 14 Line, Saint Petersburg, 199178, Russia; phone: +79112532432; laboratory of autonomous robotics systems, chief researcher; dr. of eng. sc.; professor; director.

**Ngo Kuok Tien** – e-mail: quoctienbn@gmail.com; phone: +78123283311; laboratory of autonomous robotics systems; applicant.

**Vinh Nguyen Van** – State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: nguyenvanvinhhvkt@gmail.com; 8, Warsaw street, Saint Petersburg, 190000, Russia; phone: +79214491289; the department of electrical engineering and robotics; postgraduate student.