

ИМИТАЦИОННОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО УГОДИЯ

К.Т. Нго, В.В. Нгуен, Д.К. Ву, А.Л. Ронжин (Санкт-Петербург)

В работе проанализированы существующие подходы и системы по загрузке/разгрузке физических и энергоресурсов ресурсов беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Описана алгоритмическая модель управления БЛА при обслуживании на наземной сервисной платформе. Представлены результаты численного и имитационного моделирования количества робототехнической техники для обработки сельскохозяйственного угодья, выполненные в разработанной программе Agrobot Modeling.

Беспилотные летательные аппараты сейчас активно используются для мониторинга угодий, составления картограмм урожайности земель, планирования зон внесения удобрений. Уже появляются первые прототипы, физически взаимодействующие с окружающими объектами, что требует потребления еще больших энергоресурсов [1-3]. Совместная работа роботизированных наземных платформ и БЛА позволяет существенно увеличить продолжительность работы в автономной миссии.

Имеющиеся прототипы сервисных роботизированных платформ отличаются сложностью внутренних механизмов, скоростью обслуживания, алгоритмами совместной работы платформы и летательного аппарата при посадке и обслуживании аккумулятора. В работе [4] рассмотрены основные подходы к увеличению продолжительности полета БЛА за счет снижения энергозатрат, в частности: 1) использование новых легких материалов; 2) снижение энергопотребления бортовых устройств; 3) улучшение аэродинамических характеристик БЛА; 4) использование гибридных схем построения БЛА, в том числе с использованием аэростатической разгрузки БЛА самолетного и вертолетного типа; 5) динамическая маршрутизация полетов группы БЛА; 6) а также нетривиальное решение с сбрасыванием разряженных источников питания и снижением за счет этого массы БЛА.

Если с развитием и активным использованием БЛА проблема сервисных подзарядных станций стала изучаться лавинообразно, то публикаций по обмену физическими ресурсами между роботами и в частности в области сельского хозяйства до сих пор крайне мало. Большинство работ посвящены загрузке жидкостей из стационарных емкостей в бак наземной сельскохозяйственной техники [5-7] или же БЛА используются для съемки и составления картограмм, а наземная техника для обработки полей [8-10].

В рассматриваемой задаче сельскохозяйственного применения БЛА наземная платформа производит обмен энергетическими и физическими ресурсами с БЛА. Под физическими ресурсами понимается, например, минеральные удобрения, химические средства борьбы с вредителями, сельскохозяйственная продукция. В рамках данной работы не будут рассматриваться физические характеристики перечисленных ресурсов и технические сложности манипуляции с ними. Здесь для расчетов будем иметь в виду, что на сервисной платформе и БЛА имеются контейнеры, между которыми производится обмен однородными ресурсами. При обслуживании аккумуляторов БЛА в его контейнер устанавливается заряженный аккумулятор, а старый возвращается на сервисную платформу. В задаче внесения удобрения БЛА также пополняет свой контейнер ресурсами, имеющимися на сервисной платформе. В случае сбора урожая БЛА, собирающий сельскохозяйственную продукцию в свой контейнер, наоборот освобождает свой контейнер в большую емкость на платформе.

На рисунке 1 представлены основные типы состояний функционирования, в которых может находиться БЛА, а также возможные переходы между ними при выполнении задач на сельскохозяйственных полях.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

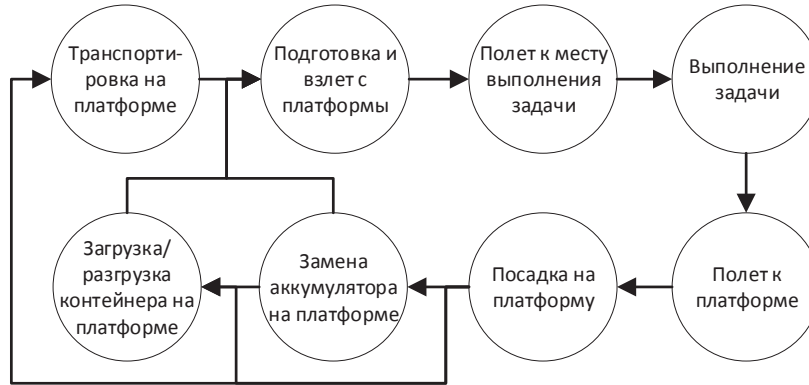


Рис. 1. Состояния функционирования БЛА

На рисунке 2 показана алгоритмическая модель управления БЛА, выполняющего задачу на сельскохозяйственных полях. Когда аккумулятор разряжен или контейнер заполнен/пуст, БЛА выполняет поиск ближайшей платформы и проверку свободного места для посадки. Если свободное место есть на платформе, далее идет процесс оценивания оставшихся энергетических ресурсов платформы (в случае заряда/замена аккумулятора) или ресурсов удобрения (в случае загрузки/разгрузки на БЛА). Если ресурсы есть в наличии, то БЛА выполняет посадку и производит обслуживание, если ресурсов недостаточно, то проводится анализ другой платформы.

После окончания процессов заряда/замена аккумулятора БЛА или загрузки/разгрузки с платформы БЛА готов к взлету с платформы и продолжению выполнения целевой задачи. В случае отсутствия ресурсов на платформах БЛА совершает посадку на ближайшей платформе и переходит в состояние транспортировки. После окончания всех ресурсов или завершения целевой задачи все БЛА переходят в режим транспортировки и группа наземных сервисных платформ возвращаются к базовому наземному центру управления.

Для оценивания необходимого количества техники для обработки сельскохозяйственного угодья можно использовать 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 угодии. Для расчета времени обслуживания БЛА необходимо определить сколько раз за период t^o потребуется произвести пополнение БЛА физическими и энергетическими ресурсами:

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

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

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

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:

$$e^{sum} = N2e_{min}^P + \frac{S^o \Delta t}{\Delta sNM e_{max}} NM = N2e_{min}^P + \frac{S^o \Delta t}{\Delta s e_{max}^U}.$$

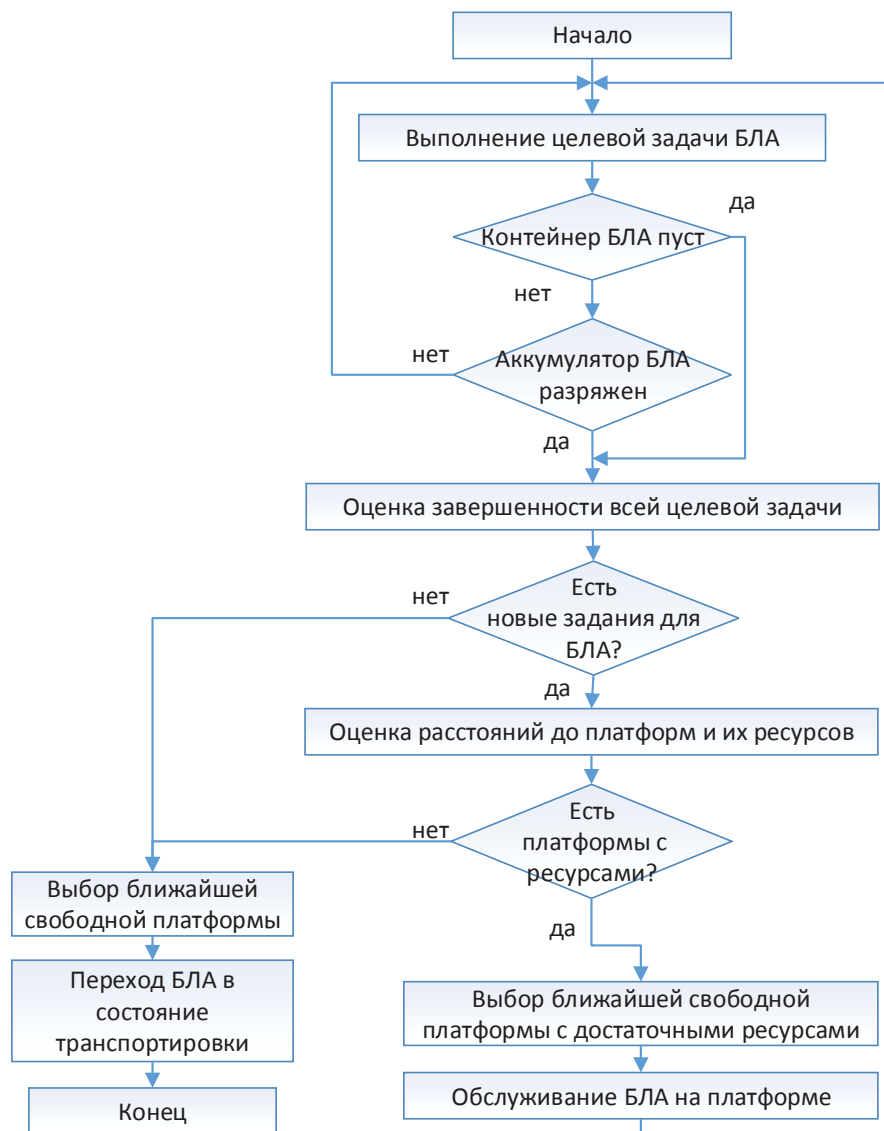


Рис. 2. Алгоритмическая модель управления БЛА с обслуживанием на наземной сервисной платформе

Суммарная стоимость задействованной техники будет складываться из стоимости платформ и БЛА, обслуживаемых на них:

$$c^{sum} = Nc^P + Mc^U.$$

В результате 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 многокритериальной оценки выбирается некоторый набор ε^{opt} , имеющий минимальную оценку:

$$\widehat{\varepsilon}^{opt} = \operatorname{argmin}_{S^o, N, M} (\varepsilon(S^o, N, M)).$$

Значения весов выбираются экспертным путем. В наших экспериментах были использованы следующие значения:

$w_t=3, w_e=1, w_c=1$ – в случае приоритета повышения скорости обработки;

$w_t=1, w_e=2, w_c=3$ – в случае приоритета сокращения стоимости обработки.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

Затем был проведен ряд численных экспериментов по оцениванию количества необходимой техники для обработки сельскохозяйственного угодья и выбору оптимального значения параметров. При этом будем менять значения входных параметров в следующих диапазонах: $n = [1,2,\dots,10]$; $m = [1,2,\dots,8]$; $s_{max}^{oj} = [1000, 10000]$; $n = [1,2,\dots,10]$; $w_t, w_e, w_c = \{(1,1,1); (3,1,1); (1,2,3)\}$, в разных комбинациях, необходимых для исследования предложенных моделей и выявления сложных случаев. На рисунке 3 показан один из случаев.

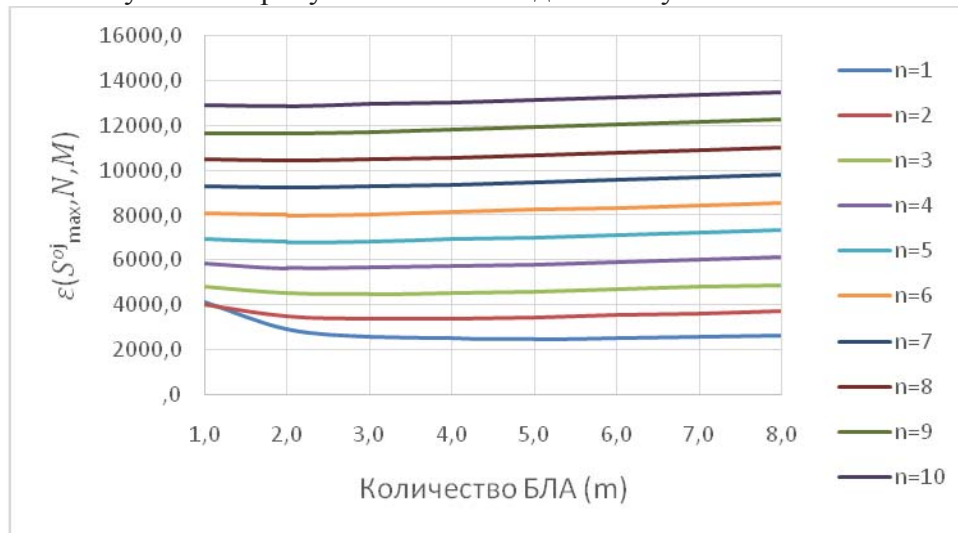


Рис. 3. Многокритериальная оценка количества задействованной техники при $M=8$, $n_{opt}=1$, $m_{opt}=5$, $w_t, w_e, w_c = (1,2,3)$

Выше были представлены результаты 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. Далее была проведена проверка выбранных оптимальных значений при имитационном моделировании, реализованном в программе AgrobotModeling. На рисунках 4 показано диалоговые окна с результатами моделирования при разных значения входных параметров.

В таблице 1 приведено сравнение результатов численного и имитационного моделирования. Заметно, что в некоторых экспериментах имеется расхождение значений оценок t^{sum} , e^{sum} , c^{sum} , ε^{opt} , возникающее при реализации последнего полетом, когда все угодье уже обработано и БЛА возвращается с неизрасходованными ресурсами.

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

Таблица 1. Сравнение результатов численного и имитационного моделирования

№	S_{max}^{oj}	n_opt	m_opt	(w_t, w_e, w_c)	Численное моделирование				Имитационное моделирование			
					t^{sum}	e^{sum}	c^{sum}	ε^{opt}	t^{sum}	e^{sum}	c^{sum}	ε^{opt}
	1000	1	4	(1,1,1)	529	1820	560	2909	529	1820	560	2909
	1000	2	4	(3,1,1)	272	1872	960	3648	256	1768	960	3496
	1000	1	4	(1,2,3)	529	1820	560	5849	529	1820	560	5849
	1000	1	8	(1,1,1)	272	1852	720	2844	256	1748	720	2724
	1000	1	8	(3,1,1)	272	1852	720	3388	256	1748	720	3236
	1000	1	6	(1,2,3)	358	1838	640	5954	340	1748	640	5756
	10000	4	4	(1,1,1)	1322	18144	1760	21226	1306	17936	1760	21002
	10000	7	4	(3,1,1)	758	18228	2960	23462	739	17780	2960	22957
	10000	2	4	(1,2,3)	2629	18040	960	41589	2629	18040	960	41589
	10000	3	8	(1,1,1)	883	18132	1520	20535	865	17772	1520	20157
	10000	6	8	(3,1,1)	444	18216	2720	22268	424	17400	2720	21392
	10000	2	8	(1,2,3)	1322	18104	1120	40890	1306	17896	1120	40458

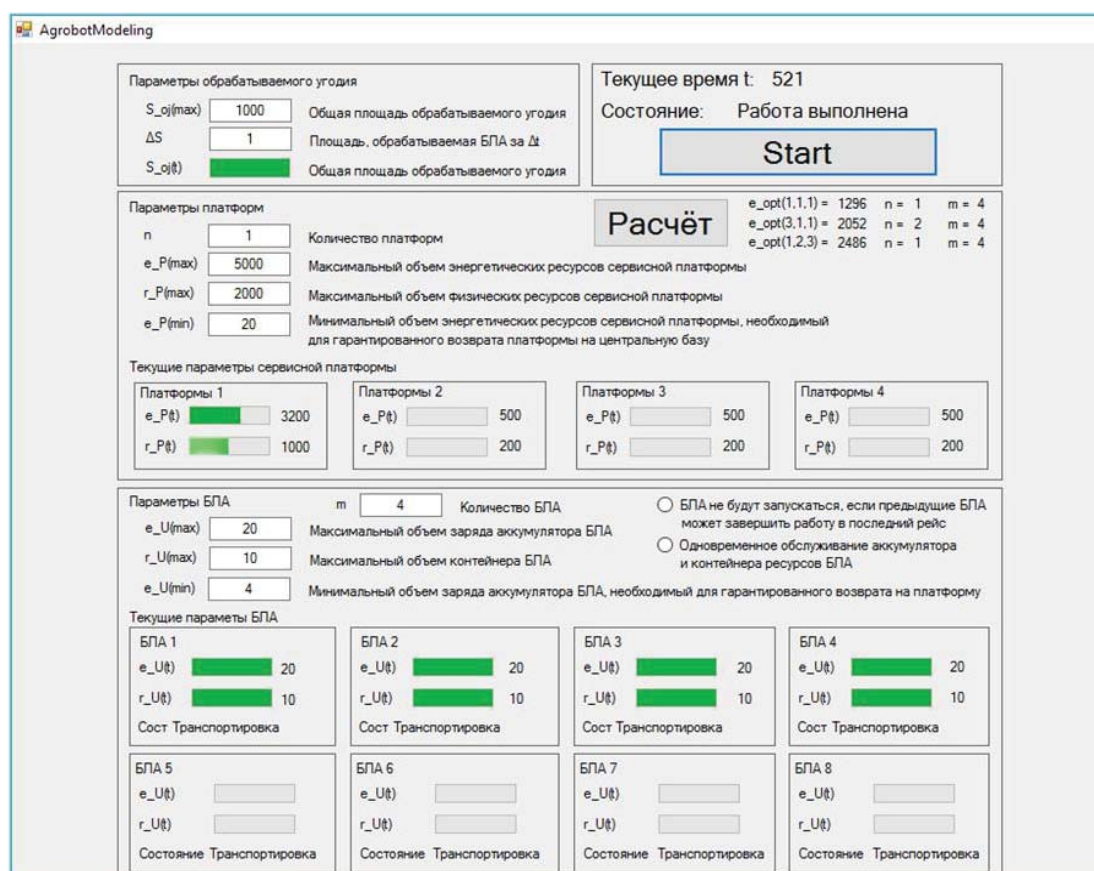


Рис. 4. Результаты программы AgrobotModeling при $N=1, M=4, S_{max}^{oj} = 1000$

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

В данном исследовании программа дозаправки и пополнения энергетических и физических ресурсов производится одновременно t_p^u . Если производить дозаправку не до конца пустых контейнеров физических ресурсов вместе с заменой аккумуляторов, то системе нужно больше времени для дозаправки контейнеров физических ресурсов. Это увеличивает время обслуживания на платформе, но обеспечивает максимальную производительность БЛА без необходимости возвращаться на станцию для пополнения ресурсов.

Выводы

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. Разработанная программа AgrobotModeling обеспечивает расчет количества беспилотных летательных аппаратов и наземных сервисных подвижных платформ, задействованных в обработке сельскохозяйственного угодья заданной площади. Также 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. Дальнейшее исследование будет посвящено развитию предложенных подходов, в части физического, информационного и энергетического взаимодействия и их практической реализации на сельскохозяйственных предприятиях [11-15].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-58-76001_ЭРА_a.

Литература

1. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О.Я. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ. 2018. № 98. 26 с. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90439>
2. Нго К.Т., Нгуен В.В., Харьков И.Ю., Усина Е.Е., Шумская О.О. Функциональная модель взаимодействия БЛА с наземной роботизированной платформой при решении сельскохозяйственных задач // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2019. №6(86). С. 283–292.
3. Нго К.Т., Соленая О.Я., Ронжин А.Л. Анализ подвижных роботизированных платформ для обслуживания аккумуляторов беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. №95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84444>
4. Фетисов В. С., Артемьев А. Е., Муфаззалов Д. Ф. Автоматические сервисные станции для обслуживания электрических беспилотных летательных аппаратов : монография / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – М. : «Издательство «Инновационное машиностроение», 2017. – 253 с.
5. Y. Chen, R.L. Parish, D.J. Merhaut, R.P. Bracy. Description of an Improved Hydroponic Research System for Screening Plants for Nutrient Abatement in Constructed Wetlands. September. Applied engineering in agriculture, 2008, Vol. 24(5), pp. 1-6. DOI: 10.13031/2013.25258
6. 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, pp. 574–614. DOI 10.1007/s11119-016-9476-3
7. Jiri Vondricka, Peter Schulze Lammers. Real-time controlled direct injection system for precision farming. Precision Agriculture. 2009, Vol. 10, Issue 5, pp. 421–430. DOI 10.1007/s11119-008-9093-x
8. Javier Campos, Jordi Llop, Montserrat Gallart, Francisco García-Ruiz, Anna Gras, Ramón Salcedo, Emilio Gil. Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. Precision Agriculture, 2019, pp. 1–21. DOI 10.1007/s11119-019-09643-z

Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

9. Travis Esau, Qamar Zaman, Dominic Groulx, Aitazaz Farooque, Arnold Schumann, Young Chang. Machine vision smart sprayer for spot-application of agrochemical in wild blueberry fields. *Precision Agriculture*, 2018, Vol. 19, pp. 770–788. DOI <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9557-y>
10. Jesus Conesa-Munoz, Joao Valente, Jaime del Cerro, Antonio Barrientos and Angela Ribeiro. Integrating Autonomous Aerial Scouting with Autonomous Ground Actuation to Reduce Chemical Pollution on Crop Soil. Springer International Publishing Switzerland 2016. L.P. Reis et al. (Eds.), *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 418, pp. 41-53. DOI: 10.1007/978-3-319-27149-1_4
11. Ермолов И.Л., Кузин Н.А., Собольников С.А. Решение задачи планирования скоординированных движений группы мобильных роботов для обеспечения работы подвижной коммуникационной сети // Вестник МГТУ Станкин. 2012. № 4 (23). С. 108-112.
12. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Труды СПИИРАН. 2018. № 60 (5). С. 39-63.
13. Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределённого управления в роботах с модульной архитектурой // Труды СПИИРАН. 2018. № 57 (2). С. 134-160.
14. Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л. О перспективах роботизации точного земледелия // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 12. С. 828-833.
15. Черноусько Ф.Л., Ермолов И.Л., Афанасьев Р.А. Основные направления роботизации земледелия // Плодородие. 2018. № 1 (100). С. 48-53.