

**Приложение к отчету по проекту РФФИ № 18-58-76001 «Стратегии совместной деятельности гетерогенных роботов, контролируемой с помощью интуитивно понятных человеко-машинных интерфейсов, при решении сельскохозяйственных задач»**

**ВВЕДЕНИЕ**

Технологии, связанные с совместной деятельностью группы роботов и человека, в настоящее время активно внедряются в сельское хозяйство [Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components, Biosystems Engineering, 2016, vol. 149, pp. 94-111.], [Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems, Biosystems Engineering, 2017, vol. 153, pp.110-128.], [Bergerman M., Billingsley J., Reid J., van Henten E. Robotics in agriculture and forestry, In Springer Handbook of Robotics, Springer, Cham, 2016, pp. 1463-1492.]. В связи с этим существует множество междисциплинарных исследований, связанных с анализом и обработкой данных о сельскохозяйственных объектах.

Фундаментальные исследования в области роботизированной уборки урожая начались в шестидесятых годах прошлого века [Schertz C., Brown G. Basic considerations in mechanizing citrus harvest, Transactions of the ASAE, 1968, vol. 11, i. 2, pp. 343-348.] и активно развиваются в настоящее время. С появлением в последние годы тренда на здоровое питание значительно вырос спрос на экологически чистую сельскохозяйственную продукцию, и для обеспечения достаточного количества продовольствия фермеры вынуждены внедрять роботизированные системы, которые обладают большей производительностью, чем ручной труд. Роботизированная уборка урожая [Silwal A., Davidson J.R., Karkee M., Mo C., Zhang Q., Lewis K. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester, Journal of Field Robotics, 2017, vol. 34, i. 6, pp. 1140–1159.], применение зондирующих приборов для точечного распыления пестицидов [Bardaro G., Bascetta L., Beri G., Matteucci M., Polit, F. An autonomous mobile manipulator for pheromone dispenser deployment in vineyards.] оказывают положительное влияние на экономику фермерских хозяйств за счет уменьшения использования человеческого ресурса и расходных материалов.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) все чаще применяются для решения задач мониторинга различного рода производственных объектов и территорий [Барбасов В.К., Орлов П.Ю., Федорова Е.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования линий электропередачи // Электрические станции. 2016. № 10 (1023). С. 31 - 35. Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А., Фимушин Е.С. Конструкция винтокрылого высокоманевренного летательного аппарата // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», Казань, 10-12 августа 2016: сборник докладов в 2-х томах. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2016. Т. 1. С. 80 - 85.], [Минин Н.В.

Применение комбинированного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя в качестве двигательной установки для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. №95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=83960>. Одним из актуальных решений в области сельскохозяйственной робототехники является совместное использование БЛА и мобильных роботизированных платформ [Kushwaha H.L., Sinha J.P., Khura T.K., Kushwaha Dilip Kumar, Ekka Utpal, Purushottam Mayank, Singh Nishtha, Status and Scope of Robotics in Agriculture, International Conference on Emerging Technologies in Agricultural and Food Engineering 27 – 30th December, 2016, Agricultural and Food Engineering Department, IIT Kharagpur, 2016.]. Такие платформы могут быть оснащены манипуляторами для выполнения задач различного рода [Yuan T., Zhang S., Sheng X., Wang D., Gong Y., Li W. An autonomous pollination robot for hormone treatment of tomato flower in greenhouse, Systems and Informatics (ICSAI), 2016 3rd International Conference on. IEEE, 2016, pp. 108-113.], [De-An Z., Jidong L., Wei J., Ying Z., Yu C. Design and control of an apple harvesting robot, Biosystems engineering, 2011, vol. 110, i. 2, pp. 112-122.], [Kumar K.S., Shankaran P.S., Asif S.R., Karthick S., Palani I.A., Lad B.K., Abhijeet Patil A., Patil P., Sharma H. Optimal conceptual design and vision-based control of a fruit harvesting robot, International Journal of Intelligent Machines and Robotics, 2018, vol. 1, i. 1, pp. 45-59.], [Korpela C. M., Danko T. W., Oh P. Y. MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle //Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2012. – Т. 65. – №. 1-4. – С. 93-101.], а также модулем для взаимодействия пользователя с БЛА.

В 2018 году при участии СПИИРАН был выполнен обзор современных решений в области сельского хозяйства, робототехники, человеко-машинного взаимодействия и совместной работы гетерогенных роботов; разработаны конструктивная и функциональная модели мобильной платформы, результаты исследований представлены на международных конференциях, а также опубликованы 3 статьи. Далее более подробно представлены эти результаты, начиная с обзора существующих решений.

## **ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ**

### **1.1 Анализ возможностей использования беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве**

В настоящее время дистанционное зондирование при помощи космических и авиационных систем является основным методом для получения информации о поверхности земли и расположенных на ней объектах. Однако применение данных систем в сельском хозяйстве имеет ряд таких ограничений, как низкое разрешение снимков, долгое время выполнения нового запроса, сильная зависимость от погодных условий и высокая стоимость. Альтернативой такого подхода является активно развивающаяся технология дистанционного зондирования при помощи БЛА, которая имеет

более низкую стоимость, малую массу, низкую скорость движения и высокую маневренность при выполнении полетных задач [Zhang C., Kovacs J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review // Precision agriculture. – 2012. – Т. 13. – №. 6. – С. 693-712.].

При выборе БЛА необходимо отталкиваться от задач их применения [Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79–97.]. В отличие от самолетов с фиксированным крылом винтокрылые летательные аппараты (ВЛА), такие как вертолеты и мультикоптеры, способны перемещаться в узких и труднодоступных пространствах за счет высокой маневренности и малых размеров. ВЛА также имеет возможность парить над поверхностью земли и производить ее мониторинг, что позволяет разрабатывать эффективные алгоритмы взаимодействия и управления наземными объектами [Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А., Фимушин Е.С. Конструкция винтокрылого высокоманевренного летательного аппарата // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», Казань, 10-12 августа 2016: сборник докладов в 2-х томах. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2016. Т. 1. С. 80 - 85.]. Некоторые ВЛА способны совершать вертикальную посадку в различных типах местности в ходе выполнения задач, например, для наблюдения за объектами со стационарных площадок, что увеличивает время автономной работы и сокращает потребляемую энергии.

Использование БЛА в агропромышленности является достаточно новым и перспективным направлением. БЛА применяются для решения таких задач, как аэросъемка почвы и растений, составление ортофотоплана полей с высокой точностью [Барбасов В.К., Орлов П.Ю., Федорова Е.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования линий электропередачи // Электрические станции. 2016. № 10 (1023). С. 31 - 35.], [Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А., Фимушин Е.С. Конструкция винтокрылого высокоманевренного летательного аппарата // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», Казань, 10-12 августа 2016: сборник докладов в 2-х томах. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2016. Т. 1. С. 80 - 85. .], [Минин Н.В. Применение комбинированного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя в качестве двигательной установки для малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. №95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=83960>], получение данных для расчета различных вегетационных индексов и выявления сопутствующих проблем роста растений [Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs) // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2015. – Т. 81. – №. 4. – С. 281-330. .], [Hunt Jr E. R., Daughtry C. S. T. What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? // International journal of remote sensing.

– 2018. – Т. 39. – №. 15-16. – С. 5345-5376.]. Для выполнения различных агропромышленных задач используются мультиспектральные камеры, установленные на БЛА, которые позволяют фермерам более эффективно выполнять управление процессами выращивания сельскохозяйственных культур, обработки и ирригации почвы.

В работе [Bagheri N. Development of a high-resolution aerial remote-sensing system for precision agriculture //International journal of remote sensing. – 2017. – Т. 38. – №. 8-10. – С. 2053-2065.] представлена разработка системы дистанционного зондирования с высоким разрешением для точного сельского хозяйства, которая состоит из бортовых и наземных подсистем. Разработанный БЛА представляет собой восьмивинтовую платформу с каркасом из углеродного волокна, способную к вертикальному взлету и посадке.

Основными преимуществами получения снимков с БЛА над результатами дистанционного зондирования со спутника является высокая скорость получения изображений и их низкая себестоимость. Показательный примером применения БЛА в сельском хозяйстве может служить система, отслеживая роста посевов, представлен в работе [Vega, F. A., Ramírez, F. C., Saiz, M. P., & Rosúa, F. O. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop //Biosystems Engineering. – 2015. – Т. 132. – С. 19-27.]. Закрепленный на БЛА мультиспектральный датчик в разное время суток в течение всего вегетационного периода собирает данные о росте подсолнечника. Анализ полученной информации позволяет рассчитать нормализованный относительный индекс растительности для точного земледелия. В статье [Yu, N., Li, L., Schmitz, N., Tian, L. F., Greenberg, J. A., & Diers, B. W. Development of methods to improve soybean yield estimation and predict plant maturity with an unmanned aerial vehicle based platform //Remote Sensing of Environment. – 2016. – Т. 187. – С. 91-101.] также описано отслеживание посевов, но в данном случае исследуемой культурой является соя. Была разработана модель прогнозирования урожая. Оба выше представленных исследования направлены на увеличение точности предсказания урожая посевов с целью рационального использования семян и уменьшения экологического загрязнения за счет снижения количества применяемых пестицидов.

Измеряя параметры сельскохозяйственных деревьев, таких как высота деревьев и объем кроны, можно отследить состояние и динамику урожая, а также оптимизировать количество использованной воды, удобрений и пестицидов, обрезка сухих частей кроны. В [Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Serrano, N., Arquero, O., & Peña, J. M. High-throughput 3-D monitoring of agricultural-tree plantations with unmanned aerial vehicle (UAV) technology //PloS one. – 2015. – Т. 10. – №. 6. – С. e0130479.] показаны результаты проведения трехмерного мониторинга сельскохозяйственных садов и предложен подход замены наземных устройств на БЛА. Преимущество БЛА заключается в охвате больших территорий для их дальнейшего анализа и аэрофотосъемки труднодоступных мест. В

исследовании был использован квадрокоптер MD4-1000 (microdrones GmbH, Зиген, Германия) с функцией вертикального взлета и посадки, оснащенный четырьмя бесколлекторными двигателями. Управление БЛА осуществляется как вручную при помощи системы радиоуправления (дальность 1000 м), так и автономно с использованием системы глобального позиционирования (GPS) и системы навигации по ортодромии. Камеры и мультиспектральные датчики, установленные на БЛА, собирают информацию о состоянии сельскохозяйственных земель, затем полученные результаты обрабатываются при помощи алгоритма объектно-ориентированного анализа изображений, который выводит трехмерное изображение карты садов. В ходе проведения экспериментов было установлено, что данная измерительная система пригодна для земель, имеющих рельеф с малыми перепадами высот. Карты, составленные по полученным данным, позволяют локализовать неоднородности растительного покрова садов, тем самым, выявлять патологии агрокультур и взаимосвязи между характеристиками деревьев и свойствами почвы [Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., De Castro, A. I., & Peña-Barragán, J. M. Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management //PloS one. – 2013. – Т. 8. – №. 3. – С. e58210.]. Такие функциональные возможности способствуют существенному сокращению расхода пестицидов, воды для орошения почвы и удобрений, что в сумме позволяет увеличить экономическую прибыль фермеров.

В статье [Luo C., Yu L., Ren P. A Vision-Aided Approach to Perching a Bioinspired Unmanned Aerial Vehicle //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Т. 65. – №. 5. – С. 3976-3984.] представлена разработка конструкции и системы управления сельскохозяйственного БЛА, который оборудован захватным механизмом. Исходя из его скорости посадки и ориентации в реальном времени, авторы разработали новый механизм захвата с целью обеспечения максимальной силы сцепления с грузом. Система управления вертикальным взлетом и посадкой основана на сверточной нейронной сети (СНС). В ходе работы был разработан мягкий механизм захвата, эффективно поглощающий энергию удара при посадке БЛА. Разработанные алгоритмы обеспечивают плавность и точность посадки БЛА на сложные поверхности, что было подтверждено результатами экспериментов.

БЛА могут быть оборудованы системами обработки растений удобрениями для повышения качества объема урожая и пестицидами для химической защиты растений от вредителей и болезней [Faiçal, B. S., Costa, F. G., Pessin, G., Ueyama, J., Freitas, H., Colombo, A., & Braun, T. (2014) The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor networks for spraying pesticides //Journal of Systems Architecture. – 2014. – Т. 60. – №. 4. – С. 393-404.]. В статье [Vardhan, P. H., Dheepak, S., Aditya, P. T., & Arul, S. Development of Automated Aerial Pesticide Sprayer //International Journal of Engineering Science and Research Technology. – 2014. – Т. 3. – №. 4.] представлен автоматизированный распылитель пестицидов, который включает в себя квадрокоптер и устройство распыления. Аналогичная система показана в [ME, S. M., Maguteeswaran, R.,

BE, N. G., & Srinivasan, G. Quadcopter UAV Based Fertilizer and Pesticide Spraying System.]. Устройство распыления, установленное на квадрокоптере, включает в себя две составляющие: модуль распыления, в котором содержится химический препарат или удобрение, и контроллер. Кроме того, квадрокоптер оснащен мультиспектральной камерой, что значительно расширяет функциональные возможности системы в целом. Управление системой осуществляется дистанционно.

Авторы работы [Николаенков А. А., Осипов Е. В. Компоновка беспилотного летательного аппарата аграрного назначения. – 2018.] предлагают использовать в качестве устройства распыления систему, состоящую из бака и электромагнитного дозирующего насоса. Такая структура устройства позволяет менять режим распыления за счет регулирования расстояния, на которое будет распределена жидкость. В статье [Baluprithviraj K. N., Naveena P., Palanisamy R. Quadcopter based Automatic Spattering of Pesticides and Fertilizers //Journal of Electronic Design Engineering. – 2016. – Т. 2. – №. 2.] продемонстрировано аналогичное устройство, содержащее насос поршневого типа для вытеснения химикатов из. Процесс распыления раствора на агропромышленные объекты автоматизирован с помощью блока инерциальных датчиков ARDU-IMU.

В работе [Fortes E. P. Seed Plant Drone for Reforestation //The Graduate Review. – 2017. – Т. 2. – №. 1. – С. 13-26.] предложена система, включающая в себя квадрокоптер и устройство, осуществляющее посев семян. Механизм посева состоит из контейнера, в котором содержатся семена, и контроллера, регулирующего количество сбрасываемых семян. Устройство работает следующим образом: семена загружаются в контейнер и последовательно втягиваются в раздаточное отделение, расположенное в его нижней части, где расположен инфракрасный датчик, определяющий наличие семян.

БЛА охватывают широкий спектр задач в сельском хозяйстве, реализуя осмотр и контроль за сельскохозяйственными землями, высадку семян в грунт, а также распыление пестицидов и внесение удобрений в почву. Данные с камер и датчиков, установленных на БЛА, обеспечивают точный анализ состояния растительных покровов и почвы фермерских участков, своевременное выявление заболеваний сельскохозяйственных культур и определение корреляционных зависимостей между характеристиками почвы и растений. Все это позволяет повысить урожай, сократить экономические издержки на перерасход удобрений и пестицидов, тем самым увеличив эффективность и прибыль фермерского хозяйства. Для успешной работы сельскохозяйственного БЛА важно разработать систему автономной посадки устройства на наземную статическую или мобильную платформу.

## **1.2 Автономная посадка БЛА**

Автономная посадка является одной из самых сложных задач при реализации движения БЛА. Для стыковки БЛА с наземной станцией или мобильной платформой необходимо разработать специальные механизмы и алгоритмы, что усложняет процесс разработки системы в целом. [Иванников,

К. В., Гаврилов, А. В., Боев, А. С., & Шошин, И. С. (2016). Способ посадки беспилотного летательного аппарата вертолетного типа с использованием инфракрасной камеры. Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей, (3 (18)); Sudevan V., Shukla A., Karki H. Vision based autonomous landing of an Unmanned Aerial Vehicle on a stationary target //Control, Automation and Systems (ICCAS), 2017 17th International Conference on. – IEEE, 2017. – С. 362-367], [Falanga, D., Zanchettin, A., Simovic, A., Delmerico, J., & Scaramuzza, D. Vision-based autonomous quadrotor landing on a moving platform //Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, Shanghai, China. – 2017. – С. 11-13.]. В работе [Lee H., Jung S., Shim D. H. Vision-based UAV landing on the moving vehicle //Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016 International Conference on. – IEEE, 2016. – С. 1-7.] представлен метод обработки изображения в режиме реального времени для обнаружения маркера на движущемся транспортном средстве. Разработанный подход основан на алгоритме определения цвета с использованием морфологического фильтра. Для обеспечения автономного полета БЛА авторы используют встроенный компьютер, включающий в себя GPS-модуль и IMU-датчик. Авторы статьи [Pan C., Hu T., Shen L. BRISK based target localization for fixed-wing UAV's vision-based autonomous landing //Information and Automation, 2015 IEEE International Conference on. – IEEE, 2015. – С. 2499-2503.] предлагают использовать алгоритм обнаружения цели на основе бинарных инвариантных масштабируемых ключевых точек (BRISK – Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) для облегчения процесса автономной посадки БЛА.

Целью работы [Carreira T. G. Quadcopter automatic landing on a docking station //Instituto Superior Técnico. – 2013.] является разработка метода контроля пространственной стабилизации и управления автономной посадкой квадрокоптера. Представленный в статье подход обеспечивает полную автономность выполнения данных операций за счет обработки данных датчиков, установленных на БЛА. Для оценки относительного положения и ориентации БЛА были использованы маркеры и алгоритмы компьютерного зрения. Дополнительно была разработана среда виртуального моделирования с использованием инструментов ROS для тестирования алгоритма и проведения дальнейших исследований.

В статье [Zhou, D., Zhong, Z., Zhang, D., Shen, L., & Yan, C. Autonomous landing of a helicopter UAV with a ground-based multisensory fusion system //Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2014). – International Society for Optics and Photonics, 2015. – Т. 9445. – С. 94451R.] предложена автономная система посадки БЛА на основе инфракрасной камеры, радиолокационной станции, измеряющей расстояние между БЛА и наземной платформой, и электромеханического поворотного устройства камеры. Радиолокационная система обеспечивает получение информации о глубине изображения, отслеживание изображений в режиме реального времени и вычисление трехмерных координат. Для обнаружения цели при любых погодных условиях были использованы инфракрасные камеры.

Таким образом, решение задачи автономной посадки БЛА подразумевает определение собственного положения в пространстве и местоположение посадочной площадки и может быть реализована различными методами. Для обнаружения посадочной площадки достаточно наличие бортовых камер и системы обработки изображения. Важным требованием к системе автономной посадки является способность функционировать в различных погодных условиях и осуществление посадки на движущиеся платформы. Помимо посадки БЛА бортовые датчики должны выполнять задачи мультиспектрального анализа для оценки состояния почвы и растительности сельскохозяйственных угодий.

## 2. Мультиспектральный анализ

Для оценки зрелости плода, состояния почвы и других задач в агропромышленности применяются такие камеры, как ПЗС-камера (камера на основе прибора с зарядовой связью), инфракрасная камера, высокоскоростная камера или многоспектральная камера. Бортовые мультиспектральные камеры позволяют минимизировать количество используемых пестицидных аэрозолей, удобрений, водных ресурсов, что уменьшает временные и денежные затраты, и в то же время способствуют повышению урожайности сельскохозяйственных культур [Primicerio, J., Di Gennaro, S. F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A., & Vaccari, F. P.]. Технология мультисенсорной фотосъемки использует полосы зеленого, красного, синего и ближнего инфракрасного диапазонов для захвата видимых и невидимых изображений растительности. Такой подход позволяет выявить ухудшение состояния почв и посевов, не видимое при аэрофотосъемке.

Поскольку мультиспектральные снимки содержат информацию, не воспринимаемую человеческим глазом, возникает проблема отображения данных снимков. Для решения данной задачи существует два основных подхода: отображение невидимых каналов изображения как видимых (их смешение) или отображение цвета из палитры, индекс которой рассчитывается на основании интенсивности цветов в невидимом диапазоне. Каналы, не видимые в оптическом диапазоне, могут быть использованы совместно с цветовыми каналами при математической обработке для решения задач дешифрирования и анализа изображения. Объекты с различными поверхностными характеристиками отражают или поглощают солнечное излучение по-разному. Отношение потока отраженного излучения к потоку падающего излучения известно, как коэффициент отражения и выражается в процентах. Величина отражательной способности растительности используются для получения различных вегетационных индексов (ВИ) для определения таких характеристик, как общая площадь листьев или содержание воды в растениях. В научной литературе представлено более 150 ВИ, однако из них только несколько имеют значительную биофизическую основу. Наиболее распространенным является нормализованный разностный ВИ (Normalized Difference Vegetation Index. NDVI), который представляет собой отношение отраженного потока излучения в ближней инфракрасной

области к аналогичному потоку в красной области. Исходные данные для расчета показателя NDVI могут быть получены при помощи мультиспектральной или гиперспектральной съемки. Основным отличием данных видов фотосъемки является то, что гиперспектральная камера разделяет отраженный от объекта свет на узкие спектральные полосы и обрабатывает их отдельно, при этом происходит фиксация спектральной характеристики каждого пикселя получаемой картинки. Это позволяет получить узкополосные индексы, построенные по значениям коэффициентов отражения в точно заданных спектральных каналах [Быков, В. Л., Быков, Л. В., Новородская, М. В., Пушак, О. Н., & Шерстнева, С. И. Применение данных дистанционного зондирования для информационного обеспечения системы точного земледелия // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2016. – №. 1 (21). ], [Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. J. Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry // Remote Sensing. – 2017. – Т. 9. – №. 11. – С. 1110.]. Рассмотрим некоторые новейшие мультиспектральные камеры для получения изображений: MicaSense RedEdge-M, Parrot Sequoia, MAPIR Kernel Camera Array, Sentera Quad Sensor.

MicaSense RedEdge-M – прочная и надежная профессиональная мультиспектральная камера. Устройство снимает в 5 независимых спектральных каналах. К MicaSense RedEdge-M подключается 5-полосный датчик освещенности для измерения потока излучения во время полета и последующей записи полученных значений в метаданные изображения. При правильной установке и калибровке информация, воспринимаемая датчиком, может быть использована для корректировки резких скачков освещенности во время полета, причиной которых может служить высокая облачность.

Мультиспектральная камера Parrot Sequoia является одной из самых малогабаритных и легких профессиональных мультиспектральных камер в настоящий момент на рынке. Она захватывает изображения по четырем четко определенным видимым и невидимым спектральным полосам, а также изображения в цветовой модели RGB.

Мультисенсорный комплекс Parrot Sequoia, который включает в себя мультиспектральную камеру, поглощает солнечное излучение, отраженное растениями, в четырех спектральных полосах: зеленой, красной, и области ближнего инфракрасного излучения. Отражательная способность является различной для растений разной степени зрелости. Если интенсивность солнечного излучения изменяется, количество энергии, отраженной от поверхности растений также изменится, и результаты обработанных данных будут искажены. Для решения данной проблемы мультиспектральная камера дополнена сенсором освещенности, которой определяет параметры освещения в тех же спектральных диапазонах, что и мультиспектральная камера. Включение сенсора освещенности позволяет использовать Parrot Sequoia при различных погодных условиях, что существенно повышает гибкость измерительного комплекса.

Мультиспектральная камера MAPIR Kernel 6 Camera Array представляет собой модульную платформу, компоненты которой являются полностью автономными. Конструкция камеры позволяет заменять датчики, линзы, фильтры, настраивать программное обеспечение каждого модуля таким образом, чтобы встроенные метаданные EXIF (Exchangeable Image File Format) изображения соответствовали аппаратной конфигурации.

Sentera Quad Sensor является точным решением для получения достоверной информации о состоянии фермерских посевах благодаря четырем полностью настраиваемым камерам. Система предназначена для определения люминесцентных показателей листьев растений, нормализованного разностного ВИ и нормализованного разностного ВИ для области ближнего инфракрасного склона (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index, NDRE). Одновременное вычисление данных показателей позволяет пользователю получать точные сведения о состоянии сельскохозяйственных культур.

Ниже приведена сравнительная таблица (см. приложение таблица 1). характеристик рассмотренных мультиспектральных камер.

Таблица 1 – Технические характеристики мультиспектральных камер

|                                | MicaSense RedEdge-M                        | Parrot Sequoia                          | MAPIR Kernel Camera Array                               | Sentera Quad Sensor              |
|--------------------------------|--|---|---|----------------------------------|
| Габариты, масса                | 9,4 см × 6,3 см × 4,6 см, 170 г            | 59мм × 41мм × 28мм, 72 г                | возможность выбора количества камер в массиве от 1 до 6 | 76 мм × 62 мм × 48 мм, 170 г     |
| Интерфейсы для подключения     | USB, Ethernet, Wi-Fi, внешний триггер, GPS | Wi-Fi, GPS, USB по протоколу PTP/PTP-IP | USB, UART, UAVCAN, ШИМ, I2C, Ethernet, GPIO             | Ethernet, Serial/UART, I2C, GPIO |
| Дополнительные датчики         | датчик освещенности                        | датчик освещенности                     | нет   | нет                              |
| Требования к элетропитанию     | 4,2- 1,6 В<br>4- 8 Вт                      | 2,4 А<br>5 Вт-12 Вт                     | 5 В<br>4 Вт   | 5-26,2 В<br>12 Вт                |
| Платформа для обработки данных | ATLAS                                      | ATLAS, Pix4d – версии PRO и AG, Agisoft | Pix4d   | нет                              |

|                                 |  |  |  |  |
|---------------------------------|--|--|--|--|
| Спектральные диапазоны          | синий (475 нм), зеленый (560 нм), красный (668 нм), ближний инфракрасный (840 нм) и граница красного (717 нм)  | зеленый (550 нм), красный (660 нм), граница красного (735 нм), ближний инфракрасный (790 нм) | 395-945 нм   | красный 655 нм, граница красного 725 нм, ближний инфракрасный 800 нм   |
| Количество спектральных каналов | 5  | 4 (1,2 МП глобальные) и RGB (16МП)   | 2 (3,2 МП MONO, , 14,4 МП RGB)   | 1 (10,5 МП RGB), 3 (1.2MP CMOS Mono)   |
| Цена, \$                        | 4900   | 3500   | 2500-15000   | 4599- 6118   |
| Определяемые индексы            | NDVI, NDRE   | NDVI   | NDVI   | NDVI, NDRE   |
| Параметры запуска               | режим таймера, режим перекрытия, режим внешнего запуска (ШИМ, GPIO, Serial), автоматическая дистанционная и покадровая съемка 1 кадр в секунду (все диапазоны), 12 бит RAW | режим таймера, РТР, дистанционная и покадровая съемка до 1 кадра в секунду, 10 бит RAW       | режим внешнего запуска (ШИМ, GPIO, USB) 2 кадра в секунду (3,2 МП RAW), 1 кадра в секунду 14,4 МП RAW) | режим внешнего запуска (GPIO, Serial/UART) 7 кадров в секунду (1,2 МП/10,5 МП) 720р видео 20-24 кадров в секунду |

Micasense RedEdge имеет пять полос (по сравнению с 4 на SEQUOIA), и, кроме того, их длина волны может быть настроена. Большое количество интерфейсов позволяет полностью управлять запуском камеры любым автопилотом. Parrot SEQUOIA обеспечивает снятие показаний в четырех диапазонах и является самой доступной мультисенсорной камерой из всех, которые представлены на рынке. Преимуществом данной камеры над MicaSense RedEdge является ее малый размер и масса, а также встроенная RGB-камера с высоким разрешением. Основным недостатком камеры SEQUOIA по сравнению с аналогами является небольшое количество интерфейсов с автопилотом.

Обеспечивая высокую точность получаемых данных, мультиспектральные камеры в настоящее время являются одним из основных инструментов для получения вегетационных индексов, необходимых для отслеживания качества урожая во время роста [Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., & Gioli, B. Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture //Remote Sensing. – 2015. – Т. 7. – №. 3. – С. 2971-2990.]. В исследовании [Ghazal M., Al Khalil Y., Hajjdiab H. UAV-based remote sensing for vegetation cover estimation using NDVI imagery and level sets method //Signal

Processing and Information Technology (ISSPIT), 2015 IEEE International Symposium on. – IEEE, 2015. – С. 332-337.] для сбора данных о посевах использовался квадрокоптер и установленная на нем камера GoPro Hero 4 с модифицированным инфракрасным фильтром. Наложение фильтров позволяет использовать стандартные камеры для получения изображений в необходимых спектрах. Используя такой метод, авторы избежали необходимость использования двух камер для получения изображений в видимом и инфракрасном спектрах, что упростило процесс вычисления NDVI индекса.

В статье [Daroya R., Ramos M. NDVI image extraction of an agricultural land using an autonomous quadcopter with a filter-modified camera //Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2017 7th IEEE International Conference on. – IEEE, 2017. – С. 110-114.] проводится аналогичное исследование с применением различных алгоритмов определения индекса NDVI. Авторы использовали квадрокоптер и камеры Raspberry Pi NoIR и Raspberry Pi Zero. Полученные изображения были сшиты в единую карту местности, при помощи которой вычислялся индекс NDVI. Сшивание было выполнено с использованием ускоренных надежных функций – SURF (Speeded-Up Robust Features) и преобразования масштабируемых инвариантных объектов SIFT – (Scale-Invariant Feature Transform). Результаты тестирования показали, что метод SIFT больше подходит для анализа изображений, сделанных с наклоном и разной освещенностью.

Авторами работы [Dubbini, Marco; Pezzuolo, Andrea; De Giglio, Michaela; Gattelli, Mario; Curzio, Lucia; Covi, Daniele; Yezekyan, Tatevik; Marinello, Francesco, Last generation instrument for agriculture multispectral data collection, «E-JOURNAL - CIGR», 2017, 19, pp. 87 - 93 [Scientific article]] было разработано специальное устройство MAIA для мультиспектрального анализа сельскохозяйственных земель. MAIA имеет 9 различных датчиков: одного RGB и восемь монохромных, работающих с частотой 5 Гц. Также в устройстве реализована технология глобального затвора, что позволяет захватывать изображения с высокой точностью одновременно со всей поверхности съемки. MAIA является отличным решением для получения данных для анализа благодаря высококачественной обработке изображений и относительно небольшим размерам и массе приборов.

Оснащение БЛА системой мультисенсорного анализа значительно расширяет функциональные возможности сельскохозяйственных БЛА, позволяя пользователям получать количественные показатели состояния почвы и растительности. Это в свою очередь дает возможность своевременно реагировать на ухудшение состояния сельскохозяйственных культур и вносить изменения в систему земледелия. Мультиспектральная камера должна удовлетворять требованиям высокой точности съемки, малых габаритов и массы. Кроме того, для точного земледелия важно знать фенотипические характеристики растений и геометрические параметров земельных участков.

### 3. Формирование карт местности, фотограмметрия

За последнее время произошли большие изменения в области дистанционного зондирования, применяемого в точном земледелии [Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371.]. Качество спутниковых снимков улучшилось за счет уменьшения погрешности смещения изображений (менее 1 м), что повлекло за собой увеличение спектрального разрешения. Воздушная гиперспектральная съемка произвела революцию в сельском хозяйстве, позволив отслеживать особенности вегетации растений, вычислять требуемое количество удобрений, воды, химикатов для небольших участков посевов. В последние годы интерес к многократному сбору данных при помощи дистанционного зондирования возрастает, что позволяет проводить отслеживание состояния почвы и сельскохозяйственных культур в режиме реального времени.

Внедрение БЛА в сельское хозяйство обеспечивает возможность исследования сельскохозяйственных угодий с помощью камер и датчиков для удаленной оценки объекта наблюдений [Watanabe, K., Guo, W., Arai, K., Takanashi, H., Kajiya-Kanegae, H., Kobayashi, M., & Iwata, H. High-throughput phenotyping of sorghum plant height using an unmanned aerial vehicle and its application to genomic prediction modeling // *Frontiers in plant science*. – 2017. – Т. 8. – С. 421.]. Одним из главных преимуществ применения БЛА в сельском хозяйстве является возможность обнаружения растущей культуры на снимках, если она хорошо распознается по спектральным характеристикам и текстуре.

Для получения информации при помощи дистанционного зондирования используются два подхода: лидар и фотограмметрия [Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system // *Automation in Construction*. – 2014. – Т. 41. – С. 1-14.]. На данный момент даже камеры потребительского уровня позволяют получать изображения с высоким разрешением, что предоставляет большие возможности для использования фотограмметрии без высоких экономических затрат. Данный способ является недорогой альтернативой лазерным системам [Nouwakpo, S. K., Wertz, M. A., & McGwire, K. (2015). Assessing the performance of structure-from-motion photogrammetry and terrestrial LiDAR for reconstructing soil surface microtopography of naturally vegetated plots. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(3), 308–322.] и позволяет определять фенотип растений, время цветения, почвенный состав и прогнозировать урожай.

Фотограмметрия в совокупности с БЛА является полезным инструментом в сельскохозяйственных исследованиях [Sung S. M., Lee J. O. Accuracy of parcel boundary demarcation in agricultural area using UAV-photogrammetry // *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*. – 2016. – Т. 34. – №. 1. – С. 53-62.]. В [Michalski, A., Riche, A., Castle, M., Holman, F., Hawkesford, M., & Wooster, M. UAS in 3D crop modelling for agriculture research // *Proceedings, 7th International Conference on Cartography and GIS*. – 2018. – С. 18-23.] авторы предлагают использовать данный подход для определения высоты растений, тем самым

заменить традиционный способ измерения с помощью линейки. Такие измерения помогают предоставить данные о фенотипе растений и повысить урожайность.

В работе [Shi, Y., Thomasson, J. A., Murray, S. C., Pugh, N. A., Rooney, W. L., Shafian, S., Rana, A. Unmanned aerial vehicles for high-throughput phenotyping and agronomic research //PloS one. – 2016. – Т. 11. – №. 7. – С. e0159781.] показаны результаты сравнительного исследования использования БЛА для получения снимков фермерских земель и аэрокосмического зондирования. В результате проведения экспериментов удалось выявить высокую корреляцию между высотой злакового растения сорго и уровнем влажности почвы и отследить поведение почвы в весенний период для предсказания результатов заражения сорняками в сезон вегетации культур. Для достижения поставленных в работе целей были определены необходимые характеристики камеры, а также наиболее подходящее время для съемки.

В статье [Comba, L., Biglia, A., Aimonino, D. R., & Gay, P. Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. – 2018. – Т. 155. – С. 84-95.] представлен новый метод построения трехмерных карт местности. Данные были получены при помощи мультиспектральной камеры, установленной на БЛА. Алгоритм автоматически обнаруживал виноградники в трехмерных точечных облачных картах. Точность алгоритма была доказана при тестировании алгоритма на участках с виноградниками неправильной формы и посадками другой растительности. В статье [Gómez-Candón, D., De Castro, A. I., & López-Granados, F. (2013). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. Precision Agriculture, 15(1), 44–56.] авторы акцентировали свое внимание на высоте полета БЛА, которую необходимо учитывать для получения удаленных изображений сельскохозяйственных полей. По результатам тестирования, проведенного на полях пшеницы, не было выявлено различий точности работы системы при полете БЛА на высотах от 30 до 100 м. По этой причине при выборе правильной высоты полета есть два параметра, более важных, чем ошибки изображения: оптимальное пространственное разрешение, необходимое для распознавания сорняков и сельскохозяйственных культур, и количество одиночных изображений, из которых строится карта местности посадки культуры.

В сотрудничестве с почвоведом авторы статьи [Grims, M., Atzberger, C., Bauer, T., & Strauss, P. (2014). Low-cost Terrestrial Photogrammetry as a Tool for a Sample-Based Assessment of Soil Roughness Preiswerte terrestrische Photogrammetrie als Werkzeug zur Bestimmung der Rauigkeit von Böden. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, 2014(5), 313–323.] разработали простую и надежную фотограмметрическую систему для получения трехмерных данных о поверхности почвы на площади 1 м<sup>2</sup>. Система предназначена для вычисления параметров шероховатости почвы и количественной оценки ее объема в зависимости от погодных условий местности. Разработанный подход основан на наземной фотограмметрии и

является эффективным с точки зрения экономических издержек и затрат времени.

Виноградники очень часто расположены в местах, подверженных эрозии почвы. Фотограмметрический метод позволяет смоделировать ливневые пути и тем самым визуализировать предполагаемый маршрут обвала почвы. В работе [Prosdocimi, M., Burguet, M., Di Prima, S., Sofia, G., Terol, E., Rodrigo Comino, J., Tarolli, P. (2017). Rainfall simulation and Structure-from-Motion photogrammetry for the analysis of soil water erosion in Mediterranean vineyards. *Science of The Total Environment*, 574, 204–215.] была показана возможность применения камер смартфонов для фотограмметрии наравне с профессиональными камерами. Точность результатов, полученных при помощи камер смартфонов оказалась соизмеримой с точностью зеркальных камер, что в свою очередь имеет важное значения для метода фотограмметрии. Фотограмметрия [Ballesteros, R., Ortega, J. F., Hernández, D., & Moreno, M. Á. (2015). Characterization of *Vitis vinifera* L. Canopy Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Remote Sensing and Photogrammetry Techniques. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66(2), 120–129.] позволяет отследить ВИ, связанные с качеством и урожайностью виноградной лозы, а также получить значения параметров роста винограда. Все это дает возможность оптимизировать процесс мониторинга за растениями определенного участка виноградника. В работе [Baofeng, S., Jinru, X., Chunyu, X., Yuyang, S., & Fuentes, S. Digital surface model applied to unmanned aerial vehicle based photogrammetry to assess potential biotic or abiotic effects on grapevine canopies // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2016. – Т. 9. – №. 6. – С. 119-130.] представлена трехмерная модель нахождения пораженных болезнью участков виноградника и территорий, где нет насаждений.

В статье [Esposito, G., Mastrorocco, G., Salvini, R., Oliveti, M., & Starita, P. (2017). Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environmental Earth Sciences*, 76(3)] описан геоматический подход для оценки изменений площади надземной шахты и количественной оценки выкопанного объема почвы в карьере. Были проведены две фотограмметрические съемки при помощи дронов и получены связанные трехмерные облака точек высокой плотности и ортофотоснимки с использованием метода определения объекта по отображению движения (Structure from Motion, SfM). Объемы полезных ископаемых были рассчитаны исходя из расстояний между двумя облаками. Такую систему можно интегрировать в сельское хозяйство для отслеживания изменения земельных угодий со сменой времен года. В работе [Capolupo, A., Pindoizzi, S., Okello, C., & Voccia, L. (2014). Indirect field technology for detecting areas object of illegal spills harmful to human health: application of drones, photogrammetry and hydrological models. *Geospatial Health*, 8(3), 699.] представлен аналогичный метод для выявления экологических проблем на сельскохозяйственных угодьях. Интерес к данной проблеме был вызван высокой статистикой

заболеваний раком в регионе Кампания на юге Италии, вероятно, из-за накопления тяжелых металлов в почвах, некоторые из которых были включены в органическое вещество. Разработанная авторами методология основана на фотограмметрии и моделировании сети подземных вод для прогнозирования точек осаждения тяжелых металлов по топологическому и климато-топологическому индексам водно-болотных угодий. Обработка аэрофотоснимков, сделанных с использованием гексакоптера, оснащенного программным обеспечением пятого поколения для фотограмметрии, позволила создать цифровую модель рельефа с разрешением до 30 мм. Разработанный метод обеспечил точное предсказание областей осаждения тяжелых в масштабе от 0,1 до 10 га.

Системы определения геометрических параметров земельных участков и фенотипических характеристик растений могут повысить производительность сельскохозяйственных робототехнических средств за счет анализа общей структуры поля. Для повышения качества автоматизации точного земледелия сельскохозяйственные робототехническим средствам необходимо предоставлять информацию о фотограмметрии рабочих участков.

#### **4. Сбор и перемещение манипуляторами с/х продукции**

##### **4.1 Мобильная платформа**

На сегодняшний день разрабатывается множество универсальных роботов, функциональность которых не ограничивается только одной сферой применения. За счет модульной конструкции робота возможно использовать его в различных сферах. Одним из примеров такого робота является Husky [<https://www.clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/> дата обращения 16.11.2018], представляющий собой универсальную роботизированную мобильную платформу, которая поддерживает программное обеспечение ROS. Данная система позволяет интегрировать различные манипуляторы или камеры, тем самым область ее применения возрастает в несколько раз.

Существует множество работ, посвященных разработке роботизированных платформ для сельскохозяйственного применения. Например, в работе [Edan Y., Miles G.E. Systems engineering of agricultural robot design, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1994, vol. 24, i. 8 pp. 1259-1265.] представлен системный инженерный метод оценки производительности сельскохозяйственного робота. Кроме того, ряд исследований, проведенных за последние пять лет, нацелен на разработку мобильных роботов для выполнения конкретных задач, таких как уборка урожая, орошение пестицидами, выкорчевывание сорняков и т.д. Заменив ручной труд мобильной платформой [Mueller-Sim T., Jenkins M., Abel J., Kantor G. The Robotanist: a ground-based agricultural robot for high-throughput crop phenotyping, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, Singapore, 2017.] можно уменьшить ошибки при сборе информации о растении. Роботизация уборки сорняков [Sellmann F., Bangert

W., Grzonka Dr. S, Hänsel M., Haug S., Kielhorn A., Michaels A., Möller K., Rahe Dr. F., Strothmann W., Prof. Dr. Dieter Trautz, Prof. Dr. Arno Ruckelshausen, RemoteFarming.1: Human-machine interaction for a fieldrobot-based weed control application in organic farming, 4 th International Conference on Machine Control & Guidance, March 19-20, 2014.] позволит избавиться от лишней нагрузки на рабочую силу и повысить урожайность сельскохозяйственных угодий.

Для работы в сельскохозяйственных системах мобильная робототехническая платформа должна обладать некоторыми особенностями для выполнения необходимого ряда задач: маневренностью для обхода препятствий [Blackmore B.S, Fountas S., Vougioukas S., Tang L., Sørensen C.G, Jørgensen, R. A method to define agricultural robot behaviours, Mechatronics & Robotics Conference (MECHROB), 2004, pp. 1197-1200; Gao X., Li J., Fan L., Zhou Q., Yin K., Wang J., Song C., Huang L., Wang Z. Review of Wheeled Mobile Robots' Navigation Problems and Application Prospects in Agriculture, IEEE Access, vol. 6, pp. 49248-49268.], легкой конструкцией, малой себестоимостью. Роботы, предназначенные для сбора урожая фруктов обычно включают в себя три основных модуля: модуль распознавания и идентификации, захватное устройство для сбора фруктов и мобильная платформа, запрограммированная на перемещение робототехнического устройства по территории фермы [De-An, Z., Jidong, L., Wei, J., Ying, Z., & Yu, C Design and control of an apple harvesting robot //Biosystems engineering. – 2011. – Т. 110. – №. 2. – С. 112-122.].

Авторами работы [Bascetta L., Baur M., Gruosso G. ROBI': A Prototype Mobile Manipulator for Agricultural Applications, Electronics, 2017, vol. 6, №. 2, P. 39.] предложена конструкция робототехнической платформы ROBI для проведения сельскохозяйственных работ. Данная платформа оснащена четырьмя мотор-колесами переменного тока, которые обеспечивают уменьшение габаритов конструкции, повышение маневренности и снижение степени повреждения электродвигателей. Данная система оборудована ленточной трансмиссией, которая позволяет управлять поворотным датчиком.

Мобильный робот, представленный в [Sujaritha M., Lakshminarasimhan M., Fernandez C.J., Chandran M. Greenbot: a solar autonomous robot to uproot weeds in a grape field, International Journal of Computer Science and Engineering, 2016, vol. 4, i. 2, pp. 1351-1358.], оснащен системой выкорчевывания сорняков и модулем построения маршрута движения с учетом препятствий. Для обеспечения питания устройства используется солнечная панель мощностью 100 Вт. Для удаления сорняков на рисовых полях авторы работы [Choi K.H., Han S.K., Han S.H., Park K.H., Kim K.S., Kim S. Morphology-based guidance line extraction for an autonomous weeding robot in paddy fields, Computers and Electronics in Agriculture, 2015, vol. 113, pp. 266-274.] используют колеса с винтовыми лопастями. Конструкция устройства рассчитана на межрядное расстояние 30 см, таким образом мобильная платформа обеспечивает прополку сорняков, не задевая полезные растения. Такое устройство может быть дополнена системой распыления пестицидов

и модулем автономной навигацией [Ko M.H., Ryuh B.-S., Kim K.C., Suprem A., Mahalik N.P. Autonomous Greenhouse Mobile Robot Driving Strategies From System Integration Perspective: Review and Application, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, vol. 20, i. 4, pp. 1705-1716.].

При точном посеве пшеницы можно добиться увеличения количества урожая и соответственно повышения эффективности агропромышленного предприятия или фермерского хозяйства. Авторы статьи [Haibo L., Shuliang D., Zunmin L., Chuijie Y. Study and Experiment on a Wheat Precision Seeding Robot, Journal of Robotics, 2015, pp. 1-9.] разработали полноприводного мобильного робота с механизмом точного посева, обеспечивающего высокий результат при посадке семян.

Как правило, мобильная платформа является многозадачным объектом, т.е. при сборе урожая, она обеспечивает продвижение манипуляторов в точку назначения, где система управления отправляет манипулятору команды для выполнения определенных действий. В работе [Zhang X., Zhao Z., Wei S., Du G., Ji Q., Zhang L., Wei H. Study on the design and control system for wolfberry harvesting robot, 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2016.] мобильная платформа по сборке личи оснащена манипулятором и загрузочным бункером для сбора урожая, системой рулевого управления, компьютером и датчиком для предотвращения столкновения с препятствиями. Данная платформа позволяет решить проблему низкой скорости сбора плодов и является эффективной заменой ручного труда.

#### **4.2 Функции манипуляторов в сельском хозяйстве**

Сельское хозяйство является отраслью экономики с низкой степенью автоматизации. Невысокие значения производительности и нехватка рабочей силы создает широкое поле деятельности для ученых. За последнее время возросло количество исследований, направленных на создание робототехнических средств для выполнения задач сельскохозяйственного производства. Агроботы предназначены для выполнения работы в неструктурированных сельскохозяйственных средах, которые обладают высокой степенью изменчивости и сильно подвержены влиянию погодных условий. На сегодняшний день существует множество различных роботов, применяемых в сельском хозяйстве: для сбора урожая (яблок [T.T. Nguyen, E. Kayacan, J. De Baedemaeker, W. Saeys Task and motion planning for apple harvesting robot\* IFAC Proceedings Volumes, 46 (18) (2013), pp. 247-252], клубники [Y. Xu, K. Imou, Y. Kaizu, K. Saga Two-stage approach for detecting slightly overlapping strawberries using HOG descriptor Biosystems Engineering, 115 (2) (2013), pp. 144-153], огурцов [E.J. Van Henten, E.J. Schenk, L.G. van Willigenburg, J. Meuleman, P. Barreiro Collision-free inverse kinematics of the redundant seven-link manipulator used in a cucumber picking robot Biosystems Engineering, 106 (2) (2010), pp. 112-124]), прополки сорняков [K.H. Choi, S.K. Han, S.H. Han, K.-H. Park, K.-S. Kim, S. Kim Morphology-based guidance line extraction for an autonomous weeding robot in paddy fields, Computers and Electronics in Agriculture, 113 (2015), pp. 266-274], составления карт земельных

участков с целью последующего выявления отклонений в вегетации растений. Самым востребованным сельскохозяйственным роботом-помощником является манипулятор для сбора урожая [Silwal, A., Davidson, J. R., Karkee, M., Mo, C., Zhang, Q., Lewis, K. (2017). Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester. *Journal of Field Robotics*, 34(6), 1140–1159. doi:10.1002/rob.21715]. Авторами статьи предложен робототехническое устройство для сбора урожая яблок, который показал высокие результаты работы. Система состоит из камеры для определения зрелости плода, манипулятора с 7 степенями свободы и захватного механизма для среза и сбора яблока. При тестировании роботом было собрано 127 из 150 фруктов со средним временем сбора плода 6,0 с.

Помимо сбора плодов перед фермерами стоит задача распыления пестицидов только на те растения, которые нуждаются в химической защите. В работе [Oberti, R., Marchi, M., Tirelli, P., Calcante, A., Iriti, M., Tona, E., ... & Ulbrich, H. Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot // *Biosystems engineering*. – 2016. – Т. 146. – С. 203-215.] представлена система выявления очага заболеваний растений, предназначенная для обработки зараженных посевов.

В статье [Schütz, C., Pfaff, J., Baur, J., Buschmann, T., & Ulbrich, H. A modular robot system for agricultural applications // *Proceedings International Conference of Agricultural Engineering, Zurich*. – 2014.] представлен манипулятор для сбора перца, яблок и винограда с возможностью обработки химикатами виноградников, т.е. данный манипулятор является полиморфным благодаря возможности многоцелевого использования.

При сборе урожая одним из главных параметров манипулятора является структура захватного механизма, который влияет на тип собираемых плодов. Авторы статьи [Li, Z., Li, P., Yang, H., & Wang, Y. Stability tests of two-finger tomato grasping for harvesting robots // *Biosystems engineering*. – 2013. – Т. 116. – №. 2. – С. 163-170.] на примере сбора томатов доказали преимущество изогнутых двупалого захватного механизма перед пластинчатыми. Прототипом манипулятора послужила человеческая рука, которая представляет собой жесткий каркас, покрытый упруго деформируемым слоем, что делает ее универсальным захватным механизмом [Culha, U., Hughes, J., Rosendo, A., Giardina, F., & Iida, F. Design principles for soft-rigid hybrid manipulators // *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges*. – Springer, Cham, 2017. – С. 87-94.].

Конструкция манипулятора определяет его функциональные возможности аналогично конкретному назначению конечностей живых существ: клешни краба, щупальца осьминога, пальцы человека. От предназначения манипулятора будут зависеть многие его свойства: внешний вид, материал, количество степеней свободы. Так в [Shi Y. Analysis on the Workspace of the Picking Manipulator for Round Fruits // *Revista de la Facultad de Ingeniería*. – 2016. – Т. 31. – №. 4.] рассмотрен манипулятор для сбора круглых плодов, в частности яблок. Размеры манипулятора были выбраны сходя из среднего размера яблока и требования минимального механического

повреждения плода. Суставные соединения и опорные кинематические пары приводятся в движение двигателем, а базовый шарнир перемещается при помощи ремня с дифференциальной структурой, которая управляет высотой и размером захвата. Большой палец захвата имеет три степени свободы, которые позволяют оставшимся четырем пальцам совершать захват объекта. При этом структура манипулятора, схожа с человеческой рукой, что повышает стабильность движения в пространстве.

В статье [Fraś, J., Maciaś, M., Czubaczyński, F., Sałek, P., & Główka, J. Soft flexible gripper design, characterization and application //International Conference on Systems, Control and Information Technologies 2016. – Springer, Cham, 2016. – С. 368-377.] авторы предлагают мягкий и гибкий захват, способный адаптироваться к форме объекта без каких-либо дополнительных датчиков. Захват выполнен из резины и силикона и приводится в действие посредством его плавной деформации. Таким образом, захват способен принимать сложные формы и легко адаптироваться к поверхности захваченного объекта. Механизм основан на мягких пневматических приводах и его конфигурация может быть легко модифицирована с целью расширения функциональных возможностей.

В работе [Bac, C. W., Hemming, J., van Tuijl, B. A. J., Barth, R., Wais, E., & van Henten, E. J. Performance evaluation of a harvesting robot for sweet pepper //Journal of Field Robotics. – 2017. – Т. 34. – №. 6. – С. 1123-1139.] представлена система для сбора урожая перца с использованием двух типов захватного механизма: параллельных пластин с ножницами для среза плода и вакуумного захвата с ножом. В результате конструкция манипулятора в большой для данного типа культуры. Оба захватных механизма из-за больших габаритов не смогли показать хорошие результаты по сбору урожая. При срезе перца ножницы могли задеть рядом растущие побеги или повредить сам плод, сила вакуумного захвата оказалась слишком маленькой и не способной удержать средний вес перца.

Авторами работы [Zhang, S., Yuan, T., Wang, D., Zhang, J., & Li, W. (2016). Structure Optimization and Path Planning of Tomato Picking Manipulator. 2016 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). doi:10.1109/iscid.2016.2091] предложена новая конструкция манипулятора для сбора томатов и более удобная схема посадки культуры. Благодаря новому способу посадки перед манипулятором при сборе плодов возникает малое количество препятствий, таким образом достаточно 4 степеней свободы для манипулятора: первые три степени используются для определения положения плодов, последний для поддержания захватного механизма. Манипулятор для сбора томатов состоит из основания, плеча, локтя и запястья, которые соединены последовательно с помощью вращающихся двигателей постоянного тока. Основание манипулятора фиксируется на гусеничном шасси, что обеспечивает подвижность системы.

Одним из вариантов применения манипулятора в сельском хозяйстве является пересадка рассады в открытый грунт [Gao G., Feng T., Li F. Design and optimization of operating parameters for potted anthurium transplant

manipulator //Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2014. – Т. 30. – №. 17. – С. 34-42.]. В работе [Gao, G. H., Yang, H., & Wei, K. C. (2013). Simulation and Optimization Design of the Transplanting Manipulator. *Advanced Materials Research*, 712-715, 2308–2311.]. При анализе результатов проекта были выявлены факторы, на которые нужно обратить внимание при разработке аналогичного устройства: тип захвата, сила и скорость его работы.

В [Li, B., Gu, S., Chu, Q., Lü, Y., Hu, J., Xie, Z., ... & Jiang, H. Design and experiment on manipulator for transplanting leaf vegetables seedling cultivated by coco-peat //Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2017. – Т. 33. – №. 14. – С. 18-24.] показан 4-игольный манипулятор для пересадки рассады. Эксперимент был поставлен на капустных ростках, которые обладают большой площадью роста. С учетом того, что все саженцы находились в состоянии нормального роста, успех пересадки составил 100 %.

В [Feng, Q., Wang, X., Jiang, K., Zhou, J., Zhang, R., & Ma, W. Design and test of key parts on automatic transplanter for flower seedling //Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2013. – Т. 29. – №. 6. – С. 21-27.] для пересадки растений использовались автоматические манипуляторы. Для выращивания растений обычно используют лотки, который обеспечивают большое пространство посадки для одиночных растений, вероятность того, что все растения приживутся при этом минимальна. Для решения данной проблемы манипулятор оснащен системой машинного зрения, которая за счет разработанного алгоритма определяет пригодность саженца для дальнейшей пересадки. Для захвата почвы с рассадой применялся гибкий зажим, который удерживал побег при помощи срабатывания кольцевой пружины. Угол поворота зажима регулируется, что дает возможность использовать данную систему с лотками различных размеров.

Авторы работы [Berenstein, R., Wallach, A., Moudio, P. E., Cuellar, P., & Goldberg, K. (2018). An Open-Access Passive Modular Tool Changing System for Mobile Manipulation Robots. 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE).] предлагают конструкцию модульного устройства со сменной насадкой: лопатой, граблями, молотком, кистью, отверткой и тепловыми датчиками. Полный цикл смены инструмента длится 16 секунд. Интеграция данного устройства в сельскохозяйственный мобильный манипулятор позволит автоматизировать процесс уборки сорняков или окучевания растений.

Сбор урожая роботом имеет большой потенциал применения в точном земледелии, однако сильно ограничен реальными условиями произрастания сельскохозяйственных культур. Разработка устройства для сбора урожая является сложной технической задачей, так помимо сохранения целостности самого плода необходимо избежать механическое повреждение листьев и стеблей растений. Кроме того, для успешного предвидения робота при прополке сорняков, пересадке рассады и сбора урожая необходимо учитывать схему посадки растений на территории фермерского хозяйства.

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ, ОБОРУДОВАННОЙ КОНТЕЙНЕРОМ ДЛЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ, А ТАКЖЕ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ПОДЗАРЯДКИ БЛА

Основываясь на данных, приведенных в обзоре, в ходе реализации первого этапа проекта были разработаны конструктивная и функциональная модели двух вариантов наземных робототехнических платформ для сельскохозяйственного применения.

Обе платформы имеют одинаковые элементы конструкции: 1) шасси, обеспечивающие передвижение платформы по сельскохозяйственным угодьям; 2) мультисенсорная система для определения локальных препятствий при перемещении платформы; 3) система энергопитания, обеспечивающая необходимую мощность для потребления самой платформой; 4) навигационная система, состоящая из двух подсистем, одна из которых контролирует движение платформы между местом базирования и рабочей территорией на основе средств глобальной навигации, а вторая локальная система разворачивается непосредственно на рабочей территории перед началом проведения аграрной задачи с использованием радионавигационных данных от БЛА; 5) коммуникационная система, реализующая связь подвижной платформой с БЛА и базовой станцией. Отличительной особенностью первой разрабатываемой роботизированной платформы является наличие встроенного посадочного места с ArUco-маркером [38] для стыковки БЛА с платформой и механизма замены аккумулятора БЛА (рис. 1). Конструкция второй платформы имеет манипулятор, способный выполнять различные задачи, и грузовой отсек.

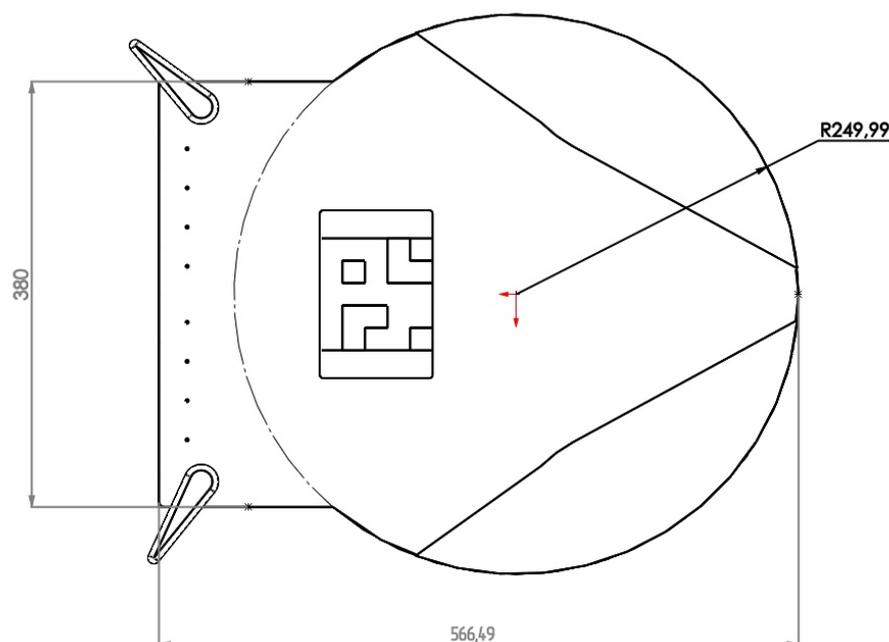


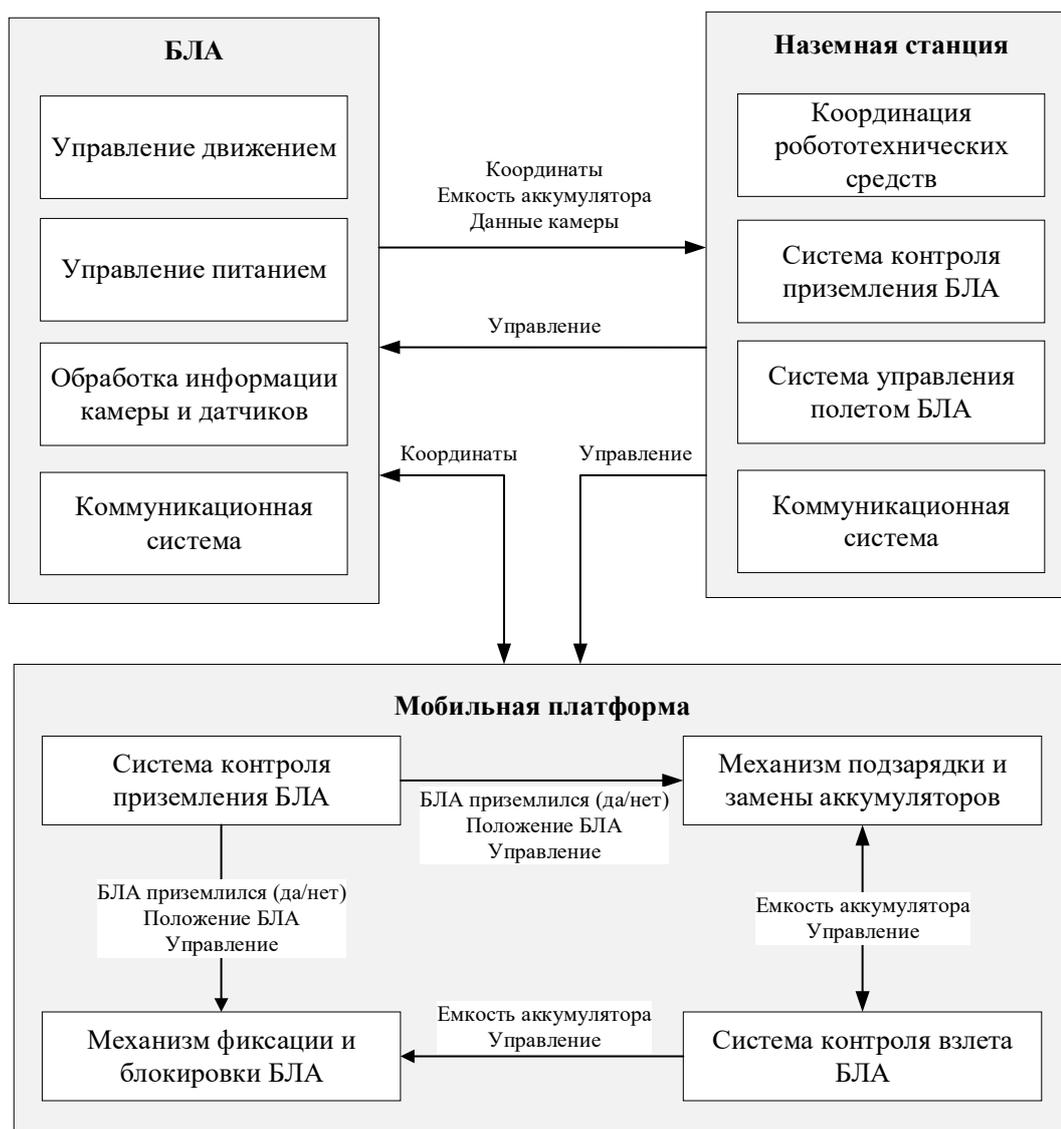
Рис. 1 – Посадочная площадка мобильной платформы с ArUco-маркером

На рисунке 2 представлена функциональная модель взаимодействия наземной станции, мобильной платформы и БЛА. Для позиционирования

относительно мобильной платформы БЛА использует ArUco-маркер, расположенный на поверхности посадочной площадки. После приземления БЛА специальные задвижки выравнивают его положение относительно платформы, а механизм фиксации закрепляет БЛА в неподвижном состоянии. БЛА имеет размеры 326 x 298 мм, а посадочная площадка – 340 x 300 мм, это свидетельствует о возможности применения БЛА меньшего размера.

Для подзарядки БЛА система следует определенному алгоритму. Через коммуникационную систему БЛА передаёт на наземную станцию параметры: время полета, ёмкость аккумулятора и своё текущее местоположение. В случае, если БЛА необходима зарядка аккумуляторной батареи или необходимо провести посадку на наземную станцию, БЛА отправляет станции запрос о посадке. Система коммуникации позволяет обмениваться информацией о параметрах между БЛА и наземной станцией: положение БЛА, положение платформы, текущей емкости аккумулятора БЛА, цель посадки. После ответа система управления координирует процесс посадки БЛА на платформу или наземную станцию. Стыковочное место для БЛА включает в себя: систему контроля приземления БЛА, систему фиксации и механизм блокировки БЛА, механизм подзарядки/замены аккумуляторов БЛА и систему контроля готовности БЛА ко взлету.

Система контроля посадки позволяет проверить текущий статус БЛА, в котором будет отображено состояние приземления БЛА, после чего система управления передает параметры о текущем местоположении БЛА на подвижную платформу. При готовности БЛА ко взлёту система контроля получает информацию о ёмкости аккумулятора и уведомление о миссии взлёта. Затем передает эту информацию другим управляющим механизмам.



**Рис. 2** – Функциональная модель взаимодействия наземной станции, БЛА и мобильной платформы

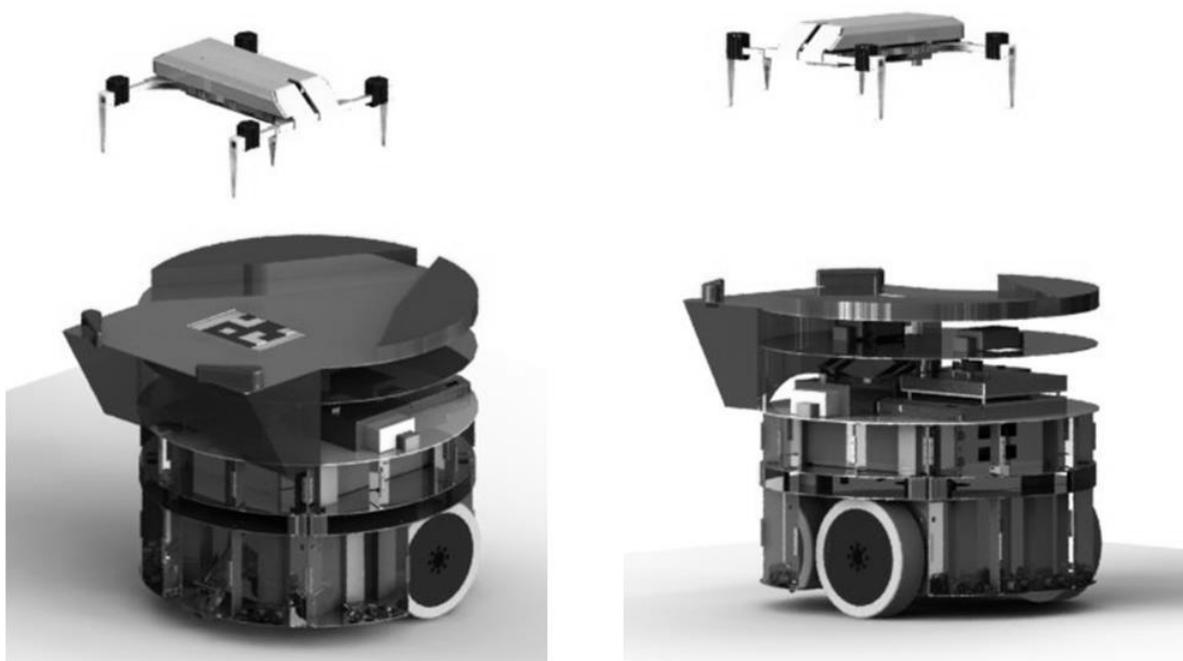
Для пополнения ёмкости аккумулятора БЛА необходимо произвести стыковку с наземной станцией или мобильной платформой. После приземления механизм зарядки аккумулятора получает информацию о подтверждении приземления БЛА и выполняет зарядку батареи, после выполнения операции механизма заряда отправляет системе управления БЛА информацию об ёмкости аккумулятора. Если нет возможности произвести стыковку с наземной станцией, можно приземлиться на мобильную платформу и произвести замену батареи для дальнейшей работы.

После стыковки БЛА с наземной станцией система контроля приземления БЛА подтверждает статус посадки. Эта информация передается системе фиксации и механизму блокировки, которые закрепляют БЛА в неподвижном состоянии.

Система контроля готовности БЛА ко взлёту отслеживает процесс заряда аккумулятора до тех пор, пока ёмкость не будет заполнена. После того,

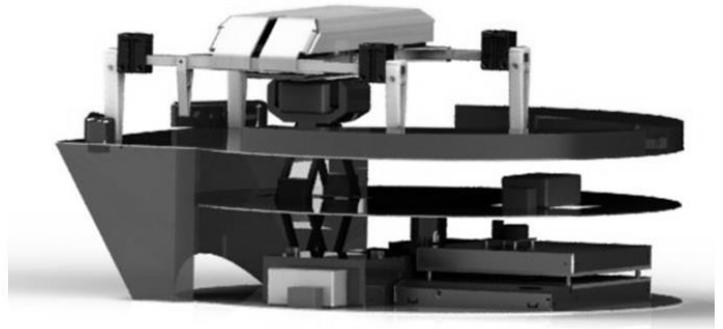
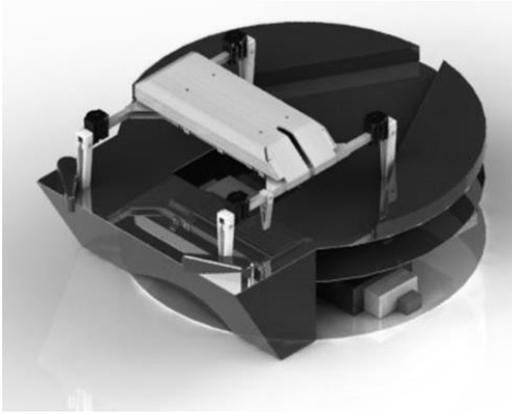
как батарея полностью заряжена, механизм зарядки аккумулятора отправляет системе готовности БЛА информацию о разрешении взлёта. Также данная система получает информацию о новой миссии БЛА. После чего происходит разблокировка механизмов фиксации БЛА. После взлёта БЛА система контроля за приземлением отправляет подтверждение об успешном взлёте и информацию о том, что станция свободна и готова принять следующий БЛА.

Если БЛА находится в ближнем радиусе движения мобильной платформы, которая осуществляет смену батареи и ему необходимо осуществить замену аккумулятора, то он отправляет на наземную станцию запрос на стыковку с платформой. После ответа БЛА при помощи ArUco-маркера осуществляет посадку на мобильную платформу, где специальные задвижки выравнивают его на площадке. На рисунке 3 представлена конструктивная модель мобильной платформы и БЛА.



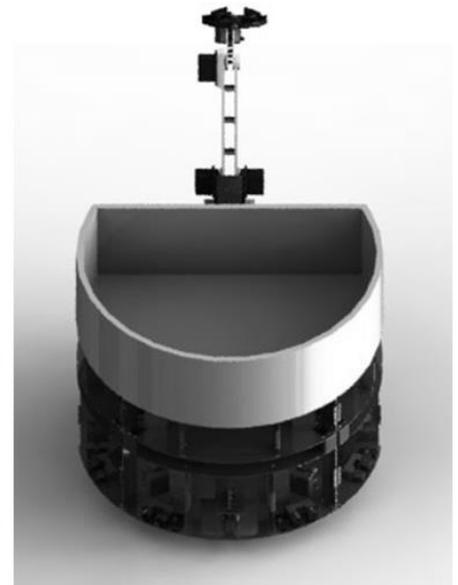
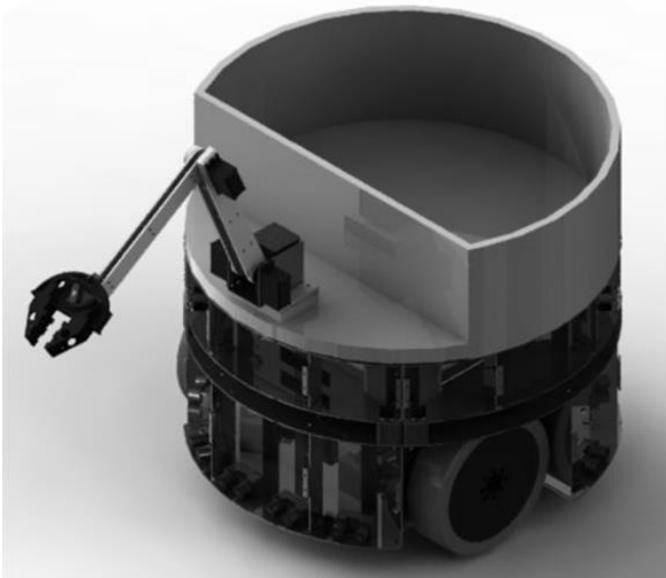
**Рис. 3** – Конструктивная модель мобильной платформы и БЛА

Механизм замены аккумуляторов представлен на рис. 4. Для замены аккумуляторов на площадке мобильной платформы панель с ArUco-маркером смещается в сторону, тем самым открывая окошко, через которое будет происходить замена аккумулятора. Встроенный внутри платформы манипулятор снимает с БЛА разряженную батарею и опускает её на внутренний подвижный диск, который поворотом угла меняет местами заряженный и разряженный аккумуляторы, после чего манипулятор устанавливает батарею с полной ёмкостью в БЛА. После успешной операции БЛА отправляет информацию на наземную станцию о выполнении миссии, запросе разблокировки механизмов фиксации и разрешению ко взлёту.



**Рис. 4** – Механизм замены аккумуляторов: а) снятие б) установка

Другая модификация мобильной робототехнической платформы представлена на рис. 5. Данная платформа оборудована манипулятором для сбора плодов и контейнером для их хранения.



**Рис. 5** – Модификация мобильной платформы для сбора урожая

Предложенные модели обеспечат простоту и независимость смены аккумуляторов на БЛА от других задач, которые выполняет вторая платформа. Модульная система также позволяет повысить проходимость платформ при их совместном использовании, особенно это важно на сложно проходимых участках фермерских угодий. Оснадив данную мобильную платформу системой полива или точечного опрыскивания пестицидами/удобрениями растений, а также механизмом посева семян, можно получить первоклассного полевого помощника, который заменит человеческий ресурс на тяжелой утомительной работе. Его координатором является автономный БЛА, который ведет анализ местности и отправляет команды мобильной платформе с координатами для перемещения. Данный комплекс роботов позволяет

экономить ресурсы и время, повышая уровень дохода, что является основной задачей в любом экономически затратном производстве.

## **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕКУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕЖДУНАРОДНЫХ КОНФЕРЕНЦИЯХ ПО РОБОТОТЕХНИКЕ И ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ И ПОДГОТОВКА ПУБЛИКАЦИЙ, ИНДЕКСИРУЕМЫХ В WOS / SCOPUS**

В течение 2018 года полученные результаты были представлены на трех конференциях: Международная научно-техническая конференция по электромеханике и робототехнике "Завалишинские чтения"; Международная научная конференция по интерактивной коллаборативной роботехнике "ICR-2018"; Международный симпозиум Simposio Internacional de Procesamiento Digital de Señales, а также опубликованы четыре статьи, две из которых индексируются в WoS/Scopus:

1. Tien Ngo, Mehmet Guzey and Vladimir Dashevsky. Classification of robotic battery service systems for unmanned aerial vehicles. 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" – 2018, MATEC Web of Conferences, vol. 161, 03023 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816103023>

2. Ronzhin A.L., Nguen V.V., Solenaya O.Y. Analysis of the problems of unmanned flying manipulators development and UAV physical interaction with ground objects // Trudy MAI. 2018. № 98 – URL: [trudymai.ru/published.php?ID=90439](http://trudymai.ru/published.php?ID=90439)

3. Quyen Vu, Mirko Raković, Vlado Delic, Andrey Ronzhin. Trends in Development of UAV-UGV Cooperation Approaches in Precision Agriculture. ICR 2018, LNAI 11097, pp. 213–221, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99582-3_22).

4. К.Т. Нго, В.В. Нгуен, И.Ю. Харьков, Е.Е. Усина, А.Л. Ронжин. Разработка модели управления многофункциональным механизмом соединения БПЛА с наземной роботизированной платформой. Международная конференция Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем (ММИУС - 2018), 4-9 декабря 2018 г., Терскол, Россия, С. 48-53.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Несмотря на существование большого количества исследований в области сельскохозяйственной робототехники задача разработки многофункционального автономного устройства для точного земледелия является актуальной. Использование БЛА в качестве альтернативы аэрокосмическому зондированию повышает скорость получения изображений местности и снижает экономические затраты фермеров. Основные требования, предъявляемые сельскохозяйственному робототехническому устройству, могут быть сформулированы следующим образом:

- автономность работы;
- multifunctionality;

- способность работать в различных погодных условиях;
- малые габариты и массы составных компонентов.

Анализ изображений при помощи фотограмметрии и позволяет получить точные данные о фенотипе растений и составе почвы, а также построить карту 3-х мерную карту местности для перемещения мобильных робототехнических платформ. Определение вегетационных индексов при помощи бортовых мультиспектральных камер дает возможность контролировать процесс созревания плодов сельскохозяйственных культур и выявлять заболевания растений. Помимо мониторинга состояния земельных участков БЛА могут быть оборудованы системами распыления пестицидов и внесения удобрений в почву, которые позволят более рационально использовать имеющиеся ресурсы. Все это повышает производительность работы фермерского хозяйства, увеличивает экономическую прибыль, автоматизируя такие процессы, как химическая обработка растений, высадка рассады в открытый грунт, прополка сорняков, сбор и транспортировка урожая. На основании проведенного обзора можно сделать вывод, что подобные разработки способны не только улучшить положение отдельных фермерских хозяйств, но всего сельского хозяйства в целом. Также из обзора следует, что перспективной областью развития сельского хозяйства является взаимодействие мультиагентных робототехнических систем. Совместная работа и данные, накопленные такими системами, смогут повысить качество выращивания и сбора произрастающих на поле культур. Наиболее востребованными в данной области являются БЛА с бортовыми системами мультиспектральной съемки и мобильные робототехнические комплексы, оснащенные манипуляторами для взаимодействия с окружающей средой.