

## **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»**

В 2019 году в ходе работы над проектом было предложено решение задачи локальной навигации мобильных робототехнических платформ (МРП), основанное на использовании беспроводных сетей с ячеистой топологией, организованных на базе радио-модулей, установленных на группе беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Был разработан подход к организации такой сети на базе технологии LoRa, а также алгоритм локализации МРП при помощи радиомаяков, установленных на БЛА.

В ходе выполнения проекта были разработаны методы взаимодействия между платформой и набором БЛА, внесенных в рабочую зону, и сценарии их функционирования. В рамках этой задачи был предложен общий сценарий функционирования робототехнических средств для решения сельскохозяйственных задач, а также сформированы прикладные сценарии совместного использования МРП и БЛА. В частности, были разработаны: сценарий мониторинга состояния агропромышленного пространства и построения картограмм с пространственной изменчивостью, основанный на использовании БЛА; сценарий сбора камней и других объектов на полях, с учетом картограмм загрязнения, полученных за счет анализа результатов мониторинга сельскохозяйственных земель в видимом и инфракрасном спектрах; сценарий совместного использования БЛА и МРП для внесения удобрений с учетом агрохимических картограмм плодородия почв, запланированного объема урожая, уровня предыдущего урожая, наличия влаги, рельефа местности, агрофизических свойств почвы и других факторов; сценарий автоматизированного сбора плодов посредством робототехнических средств с учетом картограмм урожайности территорий. В рамках проекта совместно с зарубежными коллегами на базе предложенного сценария автоматизированного сбора плодов была разработана модель, направленная на сбор яблок на сельскохозяйственном участке за счет коллаборативного использования группы БЛА и наземных МРП. Разработанные сценарии могут быть модифицированы для выполнения различных сельскохозяйственных задач. Полученные результаты были представлены на международных конференциях International Conference on Interactive Collaborative Robotics 2019, International Conference on Speech and Computer 2019, а также в высокорейтинговых журналах «Вестник МГТУ «Станкин», «Моделирование, оптимизация и информационные технологии».

### **Заявленные цели Проекта на период**

В 2019 году предполагалось выполнение следующих задач совместно с зарубежными партнёрами:

WP5. С учетом созданных на первом этапе проекта конструктивных и функциональных схем мобильной платформы на втором этапе предполагается

разработка математической и алгоритмической модели локальной навигации мобильной платформы и БЛА на основе радиомаяков, установленных на БЛА, занимающих места экстремальных точек на рабочей площадке до начала текущей задачи. (ETU, SPIIRAS).

WP6. Основываясь на проведенном обзоре в области современных решений в области сельского хозяйства, робототехники, человеко-машинного взаимодействия и совместной работы гетерогенных роботов предполагается в течении второго этапа проекта разработать методы взаимодействия между платформой и набором БЛА, внесенных в рабочую зону, и сценарии их функционирования. (HfTL, UNS, ETU, СПИИРАН).

WP8. Представление результатов текущих исследований на международных конференциях по робототехнике и человеко-компьютерному взаимодействию и подготовка публикаций, индексируемых в WoS / Scopus (СПИИРАН, ETU, HfTL, UNS).

### **Полученные за период, на который был предоставлен грант, результаты с описанием методов и подходов, использованных при реализации**

В 2019 году в ходе работы над проектом было предложено решение задачи локальной навигации мобильных робототехнических платформ (МРП), основанное на использовании беспроводных сетей с ячеистой топологией, организованных на базе радио-модулей, установленных на группе беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Был разработан подход к организации такой сети на базе технологии LoRa, а также алгоритм локализации МРП при помощи радиомаяков, установленных на БЛА. Основываясь на проведенном обзоре в области современных решений в области сельского хозяйства, робототехники, человеко-машинного взаимодействия и совместной работы гетерогенных роботов в течение второго этапа проекта были разработаны методы взаимодействия между платформой и набором БЛА, внесенных в рабочую зону, и сценарии их функционирования. В рамках этой задачи был разработан метод для обеспечения взаимодействия между мобильными робототехническими платформами и БЛА, необходимый для внедрения процесса беспроводной подзарядки автономной батареи БЛА. Соответствующее решение основано на использовании GPS-позиционирования в сочетании с применением ArUco-маркеров. Последние детектируются средствами технического зрения, установленными на БЛА, что обеспечивает успешное приземление БЛА на мобильную робототехническую платформу. Также предусмотрен энергетический обмен между МРП и БЛА на основе системы беспроводной передачи энергии.

Рассмотрим разработанную модель локальной навигации мобильной платформы на основе радиомаяков, установленных на БЛА (WP5). Эксплуатация автоматизированных робототехнических средств на открытых сельскохозяйственных территориях осложняется высокой степенью изменчивости окружающей среды и влиянием погодных факторов, а также требует организации устойчивой беспроводной связи между

робототехническими средствами ввиду большой протяженности территорий. Большие расстояния и нестабильный уровень GPS-сигнала на удаленных от крупных городов территориях в значительной степени затрудняют использование методов навигации на основе GPS и крайне негативно сказываются на точности их функционирования. В качестве альтернативного решения для обеспечения навигации сельскохозяйственных робототехнических средств могут быть использованы технологии беспроводной передачи данных на основе радио-модулей [Denisov A., Saveliev A. Comparative analysis of wireless data exchange technologies for IoT-system realization // Information technologies and systems. 2018. P. 422-429]. Объединение радио-модулей в сеть с ячеистой топологией обеспечивает беспроводную связь на больших расстояниях, защищенную от перебоев при отказе единичных сетевых элементов. Существующие решения в области навигации мобильных роботов, основанные на беспроводных сетях с ячеистой топологией, представлены в работах [Malandra F., Sansò B. A Markov-Modulated End-to-End Delay Analysis of Large-Scale RF Mesh Networks With Time-Slotted ALOHA and FHSS for Smart Grid Applications // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17(11). P. 7116-7127. doi:10.1109/TWC.2018.2860965] [Lavric A., Popa V. Internet of things and LoRa™ low-power wide-area networks: a survey // 2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS). – IEEE. 2017. P. 1-5. doi:10.1109/ISSCS.2017.8034915] [Garrido-Hidalgo C., Hortelano D., Roda-Sanchez L. IoT heterogeneous mesh network deployment for human-in-the-loop challenges towards a social and sustainable Industry 4.0 // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 28417-28437. doi:10.1109/ACCESS.2018.2836677] [Leon E., Alberoni C., Wister M., Hernández-Nolasco J. Flood Early Warning System by Twitter Using LoRa // Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings. – 2018. Vol. 2(19). P. 1213. doi:10.3390/proceedings2191213] [Cagatan G.K.B., Magsumbol J.A.V., Baldovino R., Sybingco E., Dadios E.P. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator // 2017 IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). – IEEE. 2017. P. 1-8. doi:10.1109/HNICEM.2017.8269492] [Lavric A., Popa V. A LoRaWAN: Long range wide area networks study // 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). – IEEE. 2017. P. 417-420. doi:10.1109/SIELMEN.2017.8123360] [Barriquello C.H., Bernardon D.P., Canha L.N., e Silva F.E.S., Porto D.S. Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids // 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – IEEE. 2017. – P. 1-4. doi: 10.1109/UPEC.2017.8231904]. Соответствующие методы и подходы демонстрируют достаточно высокие показатели качества работы, однако, не предполагают построение сетей из модулей, рассчитанных на поддержание двухсторонней радиосвязи на большой дистанции, что делает затруднительным применение данных методов и подходов в области сельского хозяйства. Таким образом, в рамках проекта для обеспечения

локальной навигации МРП на основе беспроводных самоорганизующихся сетей с ячеистой топологией, было принято решение использовать БЛА с установленными на них специализированными радиомодулями, что позволяет обеспечить гибкость развертывания, реконфигурации и масштабирования такой сети. При этом в качестве базовой технологии для организации сети передачи данных использовалась технология LoRa, которая не только позволяет устанавливать устойчивую связь между модулями на дистанции до 3 км, но также характеризуется большим частотным диапазоном, широкой полосой передачи сигнала, защищенным протоколом передачи данных и низкой стоимостью радио-модулей. Такой подход предполагает решение следующих основных задач: организация беспроводных сетей передачи данных на основе радио-модулей, установленных на БЛА; разработка соответствующего алгоритма локализации МРП, подключенной к такой сети; разработка модели распределения задач между БЛА в процессе навигации группы МРП.

Рассмотрим разработанный алгоритм организации беспроводных сетей передачи данных на основе радио-модулей, установленных на БЛА (см. приложение Рисунок 1). Данный алгоритм обеспечивает определение целевых пространственных положений группы БЛА, в которые данным устройствам необходимо осуществить перемещение, чтобы на основе установленных на них радио-модулей могла быть развернута беспроводная сеть с требуемой скоростью передачи данных.

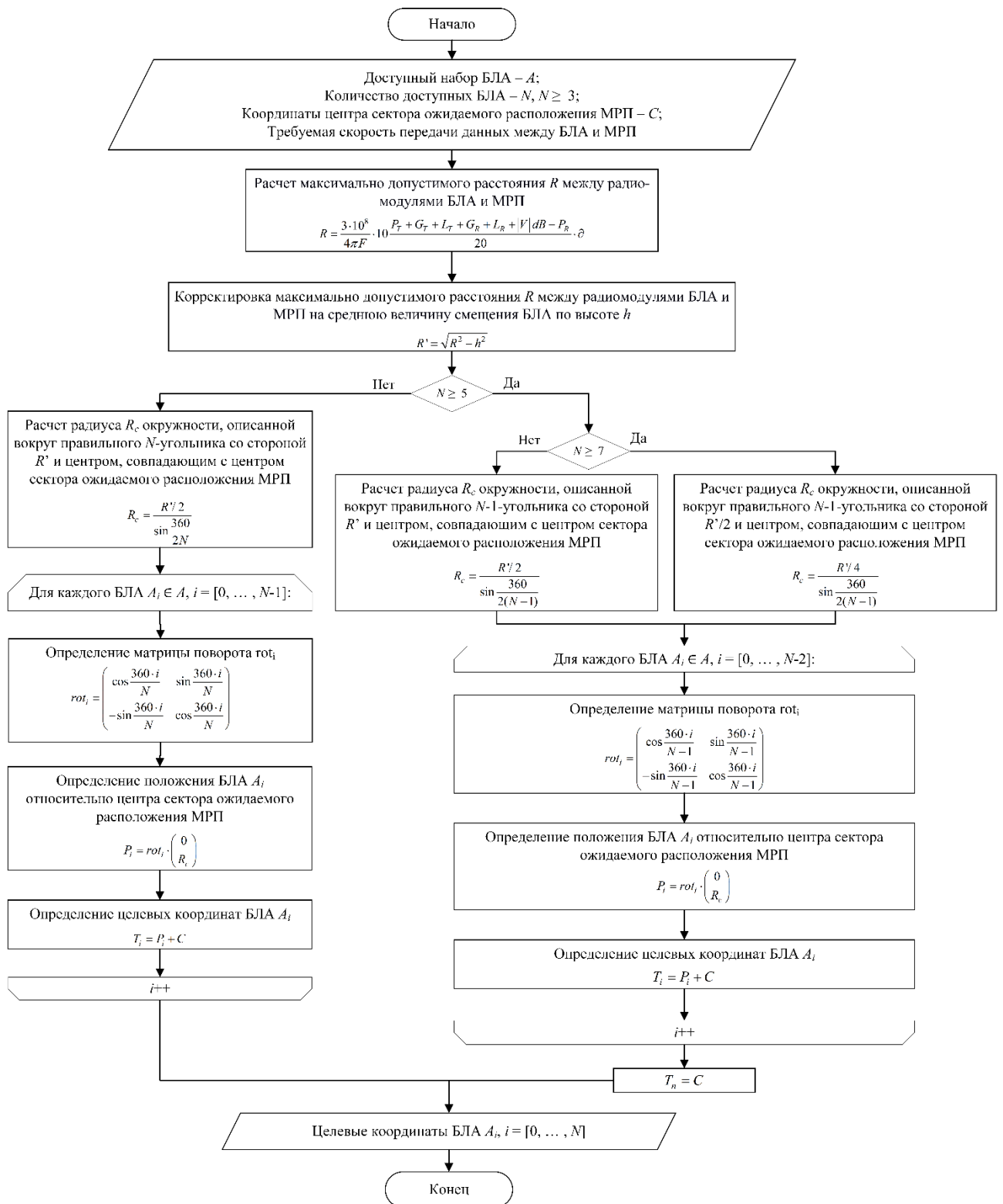


Рисунок 1 – Алгоритм организации ячеистой сети при помощи БЛА

На вход алгоритм принимает текущие положения БЛА, на базе которых будет осуществляться формирование сети передачи данных, количество БЛА в данном наборе, координаты центра сектора ожидаемого расположения МРП, а также требуемую скорость передачи данных между радио-модулями, установленными на БЛА и МРП, и другие параметры связи. Согласно предложенному алгоритму, в первую очередь, в соответствии с выражением (1), осуществляется расчет максимально допустимого расстояния  $R$  между радио-модулями:

$$R = \frac{3 \cdot 10^8}{4\pi F} \cdot 10^{\frac{P_T + G_T + L_T + G_R + L_R + |V|_{dB} - P_R}{20}} \cdot \partial, \quad (1)$$

где  $R$  – искомая дальность связи, м;  $F$  – частота, Гц;  $P_T$  – мощность радиопередатчика, дБм;  $G_T$  – усиление антенны передатчика, дБ;  $L_T$  – потери в кабеле к антенне передатчика, дБ;  $G_R$  – усиление антенны приемника, дБ;  $L_R$  – потери в кабеле к антенне приемника дБ;  $P_R$  – чувствительность радиоприемника, дБм;  $|V|_{dB}$  – множитель ослабления, учитывающий дополнительные потери за счет влияния поверхности Земли, растительности, атмосферы и других факторов, дБ,  $\partial$  – корректирующий коэффициент, равный 0,85 [Денисов А.В. Разработка рекомендательной системы расчета параметров беспроводной сети сенсорных комплексов // МОИТ. - 2019. - 7(4). DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.025].

В связи с тем, что уровень сигнала с увеличением высоты полета БЛА изменяется, при использовании БЛА для динамического развертывания сети необходимо учитывать смещение по высоте бортовых радио-модулей относительно наземных радио-модулей. Для этого на следующем шаге предложенного алгоритма осуществляется соответствующая корректировка расстояния  $R$ , по результатам которой определяется скорректированное расстояние  $R'$ . Дальнейшие шаги алгоритма в определенной мере зависят от количества БЛА, задействованных в организации сети передачи данных, и в общем случае направлены на равномерное распределение БЛА по окружности, описанной вокруг некоторого правильного многоугольника с центром, совпадающим с центром сектора ожидаемого местоположения МРП. Расчет целевых положений БЛА производится таким образом, чтобы: любой БЛА мог передать данные любому другому БЛА из данного набора посредством не более, чем одной ретрансляции сигнала; любая МРП, находящаяся внутри данной окружности, находилась в зоне покрытия сигнала, как минимум трех БЛА. На заключительном шаге алгоритма осуществляется перевод положений БЛА относительно центра сектора ожидаемого расположения МРП в пространственные координаты. Таким образом, результатом работы предложенного алгоритма являются целевые координаты для предоставленного набора БЛА, на базе которых будет успешно сформирована беспроводная сеть передачи данных, обеспечивающая требуемый уровень скорости передачи данных.

Рассмотрим алгоритм локализации МРП, находящейся в зоне покрытия такой беспроводной сети (см. приложение Рисунок 2). Поиск участка территории, соответствующего местоположению такой платформы, может быть осуществлен на основе анализа уровней сигнала, поступающего от радио-модуля данной системы на радио-модули компонентов беспроводной сети передачи данных. Поскольку по мере удаления источника сигнала от приемника уровень сигнала на приемнике будет снижаться, вокруг каждого приемника, детектирующего сигнал от известного источника, можно очертить окружность с радиусом, соответствующим расчетному расстоянию между источником и приемником при данном уровне сигнала. Определить данное расстояние можно в соответствии с выражением (см. приложение

выражение 2), зная мощность передатчика и уровень сигнала на приемнике. Таким образом, для решения задачи локализации МРП необходимо определить центр участка пересечения данных окружностей.

Определение участка пересечения для произвольного количества окружностей представлено в работе [Kremo H., FarrelE T., Tallon J., A method to enhance ranging resolution for localization of LoRa sensors //n2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). – IEEE. 2017. P. 1-6. doi:10.1109/PIMRC.2017.8292386]. При увеличении количества приемников, получивших сигнал, геометрическое представление данного участка пересечения окружностей будет усложняться. Для упрощения расчетов данный участок представляется в виде круга с центром, совпадающим с центром данного участка, и площадью, равной площади данной области. Так как полученная общая область пересечения окружностей является фигурой, состоящей из дуг, для упрощения поиска ее центра (геометрический центр – среднее арифметическое положение всех точек фигуры) представим полученный участок пересечения в виде многоугольника. Далее многоугольник разбивается на треугольники в количестве равном количеству сторон многоугольника, после чего производится расчет площади и центра (центроида) для каждого треугольника. Определим координаты центра участка пересечения всех окружностей следующим образом (см. приложение выражение 2):

$$\begin{aligned} x &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \\ y &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n$  – количество треугольников,  $(x_i, y_i)$  – координаты центра  $i$ -ого треугольника,  $S_i$  – площадь  $i$ -ого треугольника.

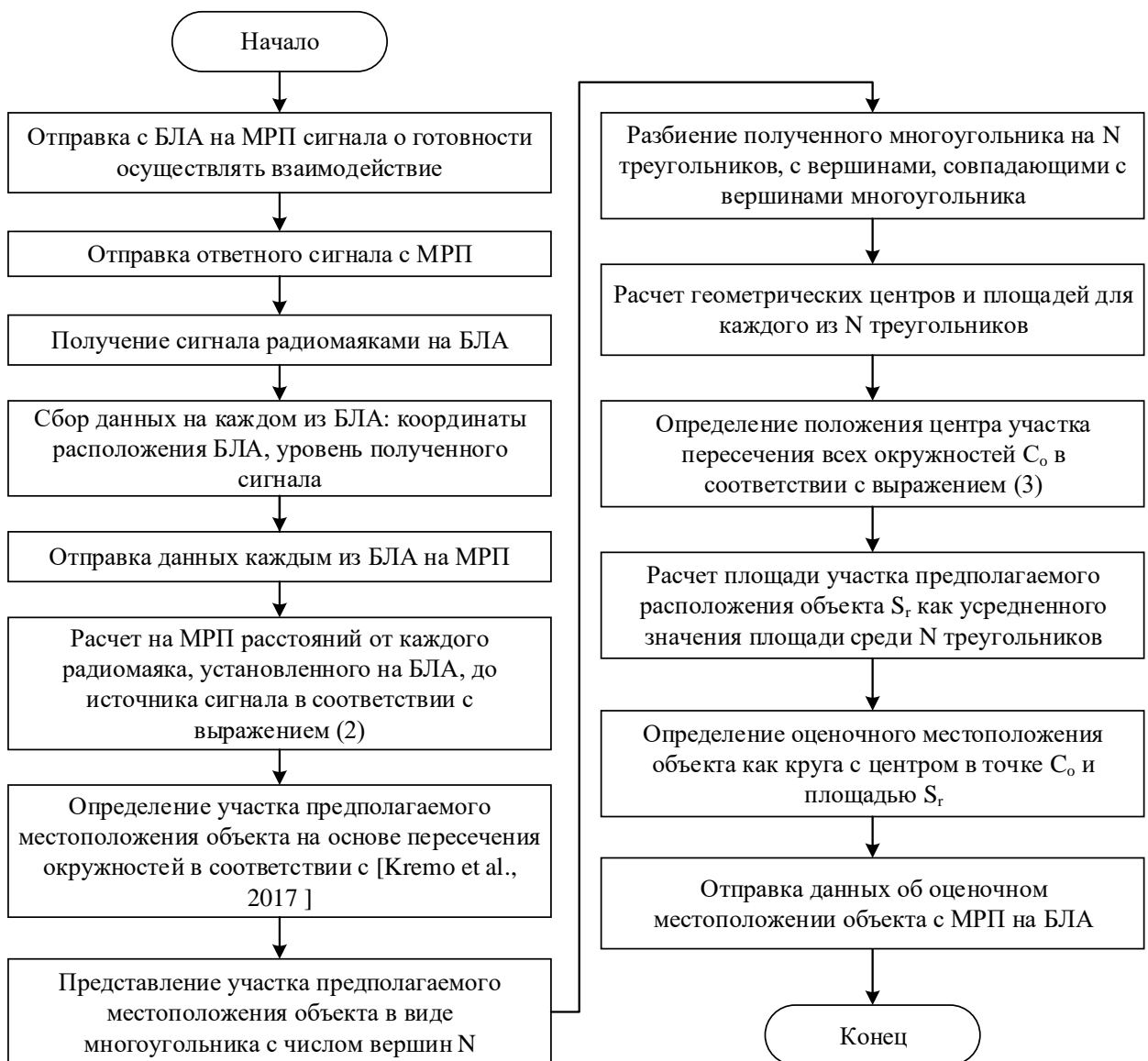


Рисунок 2 – Алгоритм локализации МРП

Разработанный алгоритм, представленный на рисунке 2, позволяет локализовать робототехническую платформу при помощи радиомаяков, установленных на БЛА, даже если она находится не в прямой зоне видимости систем технического зрения, установленных на данных устройствах.

Рассмотрим далее разработанную модель распределения задач в системе навигации МРП с использованием радио-модулей. В рамках настоящего исследования предполагается, что система навигации МРП развертывается на некоторой сельскохозяйственной территории, где функционирует заданный набор МРП. Данные устройства осуществляют движение по маршрутам, однако по мере движения МРП, в связи с несовершенством встроенных систем позиционирования, происходит накопление ошибок позиционирования, приводящих к отклонению МРП от целевых маршрутов. Разработанная модель (рисунок 3) позволяет уточнить координаты фактического положения МРП при помощи группы БЛА с целью последующей корректировки маршрутов МРП. По мере движения МРП по маршрутам формируется набор задач по локализации МРП. При этом важно отметить, что при снижении частоты локализации МРП накопленные ошибки увеличиваются, а значит



потенциальные зоны фактического положения МРП будут становиться больше, что требует привлечения большего числа БЛА для решения каждой отдельной задачи локализации.

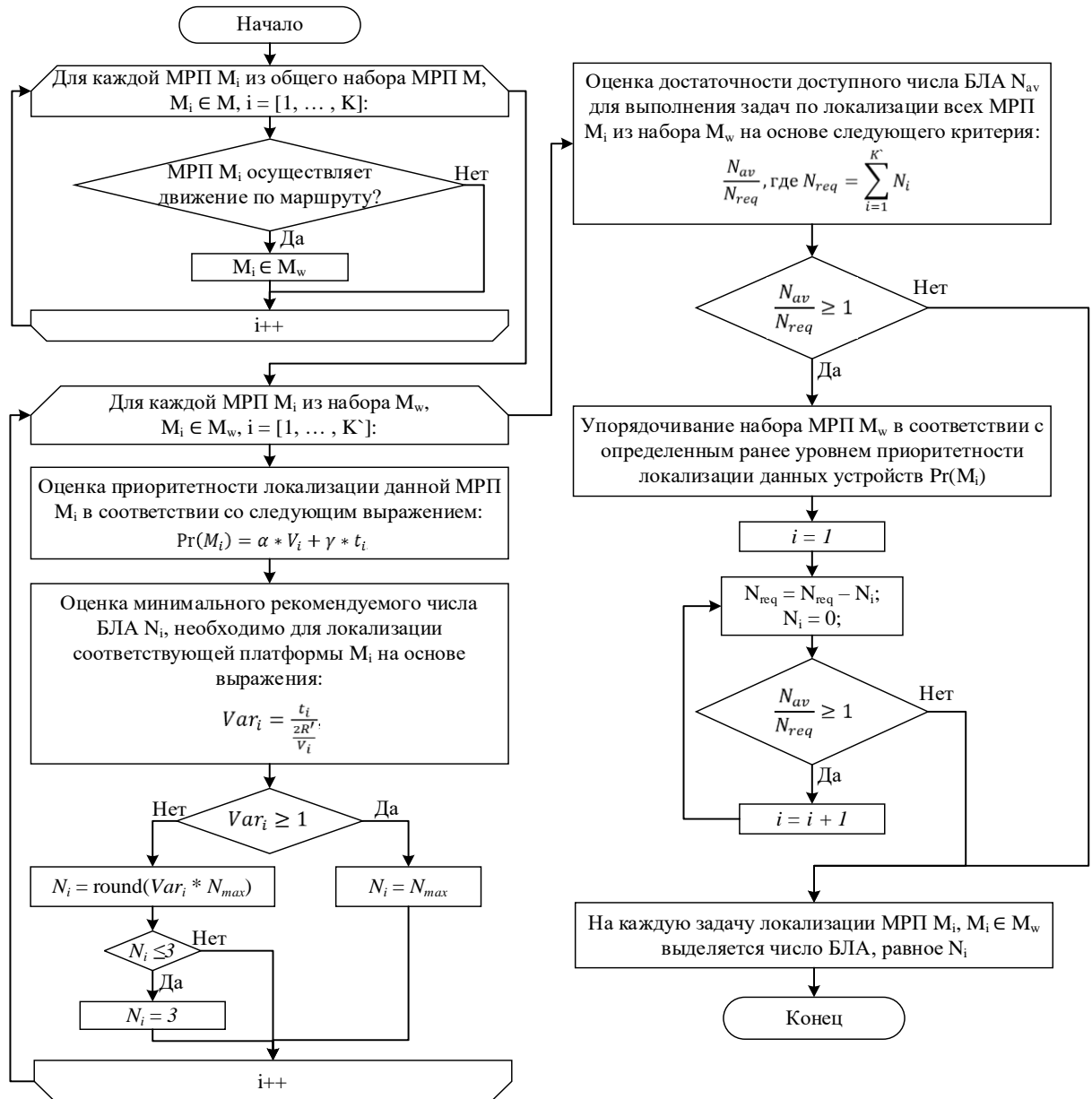


Рисунок 3 – Алгоритмическая модель распределения задач между БЛА для обеспечения навигации МРП

Представленная алгоритмическая модель предполагает циклическое выполнение следующих основных шагов:

1. Оценка приоритетности задач по локализации МРП;
2. Оценка необходимого объема ресурсов для выполнения задач;
3. Распределение БЛА по актуальным задачам.

На первом шаге осуществляется идентификация МРП, для которых требуется выполнить локализацию средствами БЛА. Для этого из общего набора МРП выделяется набор  $M_w$ , в который включаются все МРП, находящиеся в движении по тем или иным маршрутам. Далее для каждой МРП  $M_i$  из набора  $M_w$  выполняется оценка приоритетности локализации данной

платформы. Данная оценка производится в соответствии со следующим выражением (см. приложение выражение 3),

$$\text{Pr}(M_i) = \alpha * V_i + \gamma * t_i, \quad (3)$$

где  $V_i$  – расчетная скорость движения МРП  $M_i$  по маршруту (км/ч),  $t_i$  – время с момента последней локализации данной МРП посредством БЛА,  $\alpha$  и  $\gamma$  – эмпирически задаваемые весовые коэффициенты для факторов  $V$  и  $t$  соответственно.

Далее производится оценка объема ресурсов, необходимых для выполнения актуальных задач локализации. В отношении каждой МРП  $M_i$  из набора  $M_w$  осуществляется оценка минимального рекомендуемого числа БЛА  $N_i$ , необходимое для локализации соответствующей платформы (см. приложение выражение 4),

$$\text{Var}_i = \frac{t_i}{\frac{2R'}{V_i}} \quad (4)$$

где  $R'$  – скорректированное предельное расстояние между радиомодулями, на котором обеспечивается устойчивая радиосвязь; порядок расчета данной величины представлен ранее в рамках алгоритма на рис. 1. Данная эмпирически заданная формула опосредованно характеризует отношение потенциальной накопленной величины отклонения платформы  $M_i$  от маршрута движения к удвоенному предельному расстоянию  $R'$ . Непосредственно минимальное рекомендуемое число БЛА, необходимое для локализации платформы  $M_i$ , определяется в соответствии со следующим выражением (см приложение выражение 5),

$$\begin{cases} N_i = \text{round}(\text{Var}_i * N_{max}), & \text{Var}_i < 1 \\ N_i = N_{max}, & \text{Var}_i \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

где  $N_{max}$  – максимальное число БЛА, которое может быть использовано для локализации МРП – выбирается эмпирически из множества {10, 11, 12}.

На заключительном шаге алгоритма осуществляется оценка достаточности ресурсов для обеспечения решения всех задач по локализации МРП и последующее распределение доступных БЛА по конкретным задачам. Оценка достаточности ресурсов производится путем сравнения необходимого числа БЛА  $N_{\text{req}}$  с фактически доступным  $N_{\text{av}}$ . Соответствующее значение достаточности ресурсов  $Av$  определяется как отношение  $N_{\text{av}}$  к  $N_{\text{req}}$ . В случае, если  $Av \geq 1$ , то на каждую задачу локализации МРП  $L_i$  ( $L_i \rightarrow M_i$ ) выделяется определенное ранее число БЛА  $N_i$ . В противном случае, в соответствии с принятой стратегией функционирования в условиях недостаточности ресурсов, осуществляется сброс некоторого числа наиболее низкоприоритетных задач по локализации МРП. Таким образом, данная стратегия распределения БЛА направлена на максимизацию точности выполнения задач локализации за счет использования рекомендуемого числа БЛА  $N_i$  для решения каждой из оставшихся задач по локализации МРП  $L_i$ .

В рамках дальнейшей работы над проектом будет осуществлена апробация системы навигации МРП, которую планируется реализовать на базе представленных выше моделей и алгоритмов.

В течение второго этапа проекта были разработаны методы взаимодействия между платформой и набором БЛА, внесенных в рабочую зону, и сценарии их функционирования (WP6). Общий сценарий функционирования системы выглядит следующим образом (см. приложение рисунки 4 и 5).

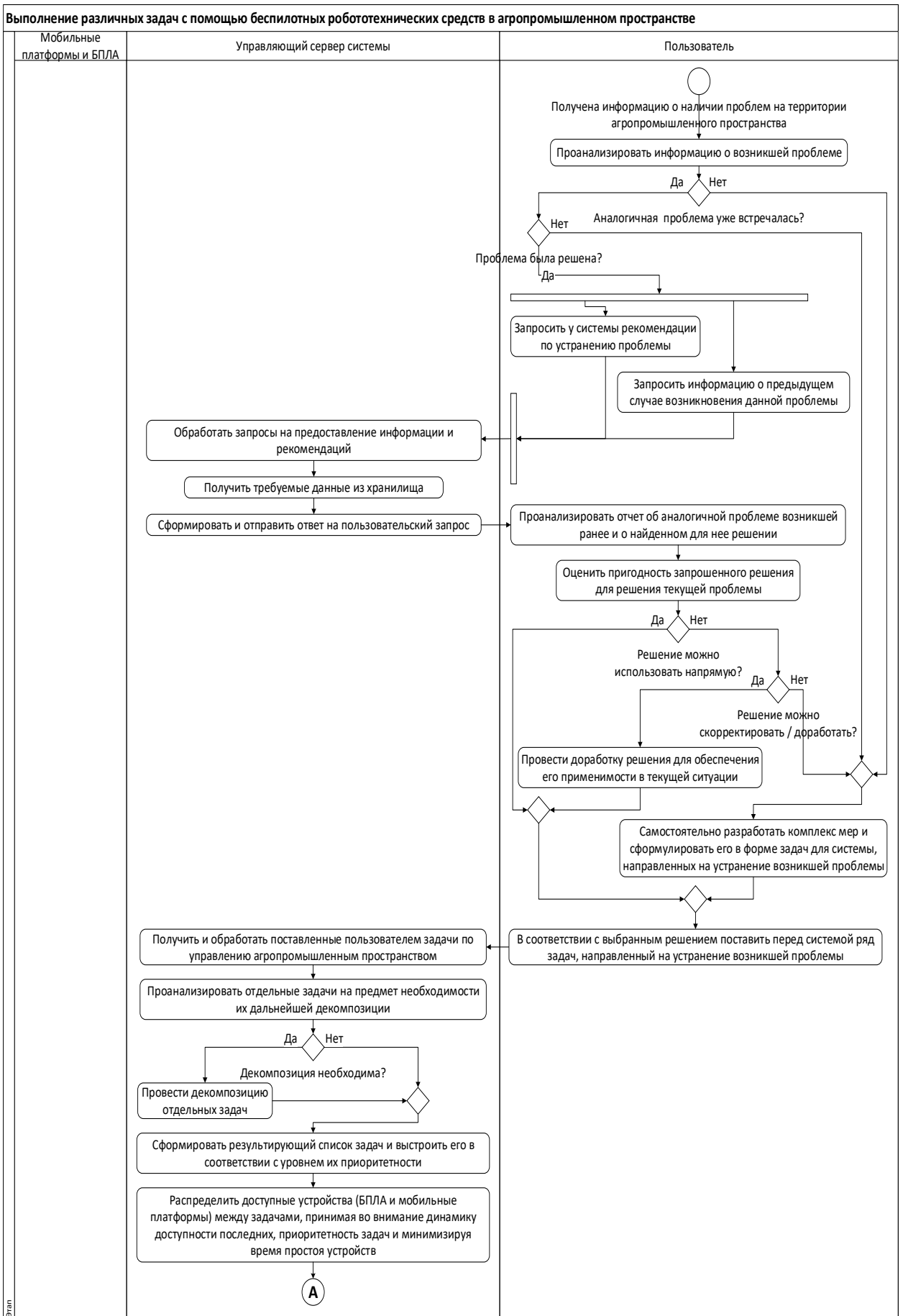


Рисунок 4 – Общий сценарий функционирования робототехнических средств для решения сельскохозяйственных задач

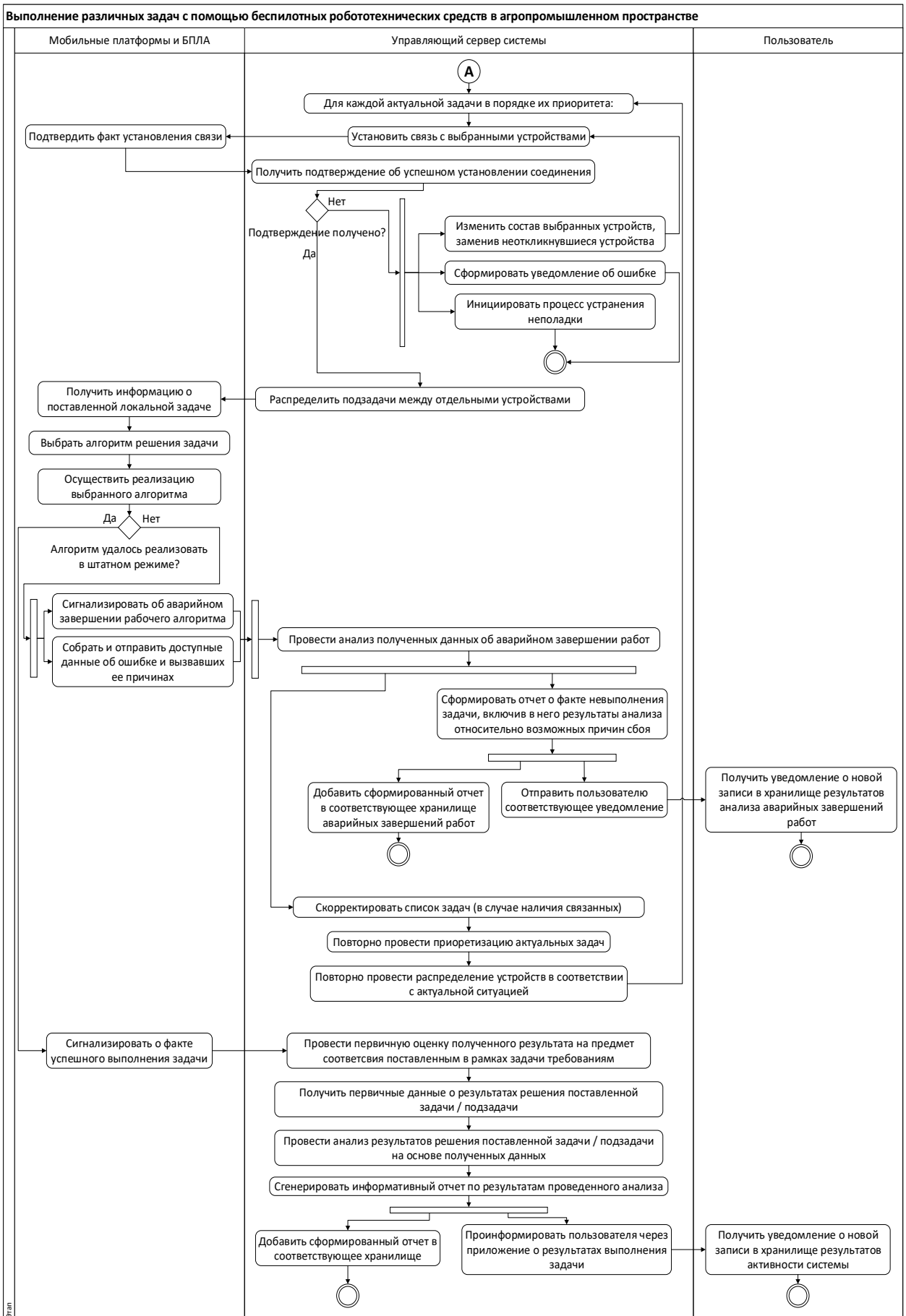


Рисунок 5 – Общий сценарий функционирования робототехнических средств для решения сельскохозяйственных задач (продолжение)

Деятельность системы инициируется пользователем по факту получения им информации о наличии проблем на территории агропромышленного пространства. Проводится первичный анализ характера возникшей проблемы, после чего запрашивается информация о факте устранения аналогичных проблем системой ранее, исходя из полученного ответа от управляющего сервера системы пользователь либо применяет задействованный ранее алгоритм к решению данной проблемы напрямую или же с корректировками, либо самостоятельно формирует комплекс мер и формулирует его в форме группы задач для системы. Далее информация о задачах, направленных на устранение возникшей на территории агропромышленного пространства проблемы передается управляющему серверу системы. Управляющий сервер последовательно выполняет следующие действия: осуществляет декомпозицию отдельных задач, если это необходимо, формирует результирующий список задач исходя из оценки уровня их приоритетности, после чего приступает непосредственно к решению отдельных задач, для чего в первую очередь распределяет доступные БЛА и мобильные платформы между задачами. Далее в рамках решения каждой отдельно взятой задачи происходит установление связи между задействованными для ее решения устройствами, а также передача соответствующих исполнительных инструкций в подходящей для устройств форме. После получения соответствующих инструкций, каждое из устройств производит анализ поставленной перед ним задачи, выбирает требуемый алгоритм ее решения и приступает к реализации соответствующего алгоритма. В случае если выполнить алгоритм в штатном режиме оказалось невозможным, устройство передает управляющему серверу сигнал об аварийном завершении работ и отправляет доступные данные об ошибке и вызвавших ее причинах. В таком случае управляющий сервер системы проводит подробный анализ возникшей аварийной ситуации, формирует предназначенный для оператора системы отчет об ошибке, сохраняет его в соответствующем хранилище и уведомляет пользователя о возникшей ситуации, после чего происходит коррекция результирующего списка задач и их реприоритезация. В случае, если устройство успешно выполнило поставленную задачу, оно отправляет соответствующий сигнал управляющему серверу системы, который проводит первичную оценку качества выполненных работ, формирует аналитический отчет о результатах выполнения задачи, который сохраняется в соответствующем хранилище и уведомляет оператора системы об успешном факте выполнения работ. После чего система продолжает функционировать в штатном режиме.

В качестве тестовых сценариев совместной работы мобильной платформы и БЛА были выбраны следующие задачи аграрной робототехники:

- 1) мониторинг сельскохозяйственных земель и построение картограмм с пространственной изменчивостью;
- 2) сбор камней и других объектов на полях, с учетом картограммы загрязнения,

3) внесение удобрений с учетом агрохимических картограмм плодородия почв, запланированного объема урожая, уровня предыдущего урожая, наличия влаги, рельефа местности, агрофизических свойств почвы и других факторов;

4) сбор плодов с учетом картограмм урожайности.

Рассмотрим их подробнее.

1. Успешная реализация сценария мониторинга состояния агропромышленного пространства посредством использования беспилотных летательных средств и построение картограмм с пространственной изменчивостью является необходимым условием решения многих других задач, которые пользователи ставят перед системой. Выполнение данной задачи инициализируется получением управляющим сервером системы соответствующей задачи от пользователя (оператора). По аналогии с выполнением других задач происходит выбор устройств (БЛА), которые будут задействованы при ее решении. Далее выполняется процесс установления связи с данными БЛА. В случае если связь с частью устройств установить не удалось, формируется отчет об ошибке, а также изменяется состав задействованных БЛА, после чего попытка установления связи начинается с начала. Как только связь со всеми устройствами установлена, управляющий сервер распределяет отдельные подзадачи между задействованными устройствами, которые выполняют сканирование требуемых секторов в соответствии с поставленными подзадачами, а затем передают первичные данные о результатах сканирования назад управляющему серверу. Управляющий сервер получает необработанные результаты сканирования, производит их обработку и анализ, по результатам которого генерирует информативный отчет о результатах выполнения задачи. Данный отчет сохраняется в соответствующее хранилище, а пользователь через приложение информируется о результатах выполнения задачи по мониторингу состояния агропромышленного пространства. В частности, подобный подход используется при формировании карт и картограмм с пространственной изменчивостью на основе ортофотоплана местности, полученного при помощи средств технического зрения БЛА.

Для построения ортофотоплана местности БЛА совершают облет исследуемой территории, производя аэрофотосъемку. Из полученной серии снимков, для двух последовательных изображений, создается набор ключевых точек, точек с ярко выраженной окрестностью. Полученные наборы точек с изображений сопоставляются друг с другом, и точки, у которых евклидово расстояние между окрестностями минимально, образуют пары. Пара таких точек – это один и тот же объект, сфотографированный с разных ракурсов. На основе найденных пар изображения сшиваются так, чтобы все точки, образующие пары, совпали друг с другом. Полученное сшитое изображение из двух снимков сравнивается с другим изображением из серии, и происходит новая итерация нахождения ключевых точек. Сшивание изображений происходит до тех пор, пока не будут обработаны все фотографии,

полученные с БЛА. Пример ортомозаичного изображения представлен на рисунке 6 (см. приложение рисунок 6).



Рисунок 6 – Результат создания ортомозаичного изображения из 7 кадров

На полученном ортофотоплане при помощи специализированных технологий распознавания образов могут быть найдены различные объекты, в частности, границы земельных участков различных культур, хозяйственные постройки, дорожки, деревья, кустарники, водоемы, и т.д. В частности, полученный план местности используется для составления картограммы с пространственной изменчивостью, в том числе для нахождения непроходимых областей, где движение МРП невозможно. Для точного позиционирования детектируемых объектов ортофотоплан местности привязывается к GPS-координатам. При съемке местности с помощью БЛА, к каждому снимку записываются GPS-координаты, соответствующие центральному пикселю на изображении, где совершен снимок. Полученный сшитый ортофотоплан содержит в себе множество таких пикселей с соответствующей GPS-координатой. Основываясь на известных данных, пропорционально высчитываются соответствующие GPS-координаты для каждой точки ортофотоплана. На основе полученных данных могут быть построены агрохимические картограммы плодородия почв, картограммы загрязнения, картограммы урожайности для дальнейшего анализа исследуемой территории и назначения робототехническим средствам соответствующих задач.

2. **Сбор камней** и других объектов на полях, с учетом **картограммы** загрязнения. На аграрных территориях, кроме выращиваемых культур, могут присутствовать и другие объекты, например, вспомогательные постройки, деревья, не относящиеся к выращиваемым культурам, камни, ограждения и т.д. Данные объекты могут являться преградой на пути перемещения робототехнического средства. Для того, чтобы найти сторонние объекты и учитывать их при построении картограмм пространственной изменчивости, был разработан сценарий поиска объектов на аграрных территориях, реализуемый на основе совместной работы мобильной платформы и БЛА.

Чтобы эффективно детектировать различные объекты, аэрофотосъемка посредством БЛА во время мониторинга сельскохозяйственных земель ведется в двух спектрах – видимом и инфракрасном. После того, как БЛА произвел аэрофотосъемку выбранного участка местности, полученные



изображения передаются в единую систему управления, где производится их обработка. В рамках которой производится попиксельное вычисление NDVI-индекса и последующая обработка изображений сверточной нейронной сетью. Нормализованный вегетационный индекс (NDVI) – это стандартизированный индекс, показывающий наличие и состояние растительности (относительную биомассу). Этот индекс использует контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных – поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительного сырья в инфракрасном канале (NIR) [Bartalev S. A., Zakora A. L. Recognition of agricultural lands based on measurements of a vegetation index //Journal of Rocket-Space Technology. – 2019. – Т. 27. – №. 4. – С. 3-8.]. Используя индекс NDVI, можно отделить участки с растительностью от других типов поверхности, например, дорог, домов, голого грунта, водоемов и т.д. Индекс NDVI рассчитывается по формуле (см. приложение выражение б)

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (6)$$

где RED – это отражательная способность в видимой красной области спектра, а NIR – отражательная способность в ближней инфракрасной области спектра. После вычисления NDVI-индекса на изображении формируются зоны, которые разграничивают отснятую территорию на объекты растительного и не растительного происхождения.

На следующем этапе для детектирования различных зеленых насаждений используется сверточная нейронная сеть Mask R-CNN [He K. et al. Mask r-cnn //Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – 2017. – С. 2961-2969]. Выходными данными Mask R-CNN являются классы и маска детектируемого объекта. Маска позволяет определить границы детектируемого объекта, что в дальнейшем позволяет осуществлять его локализацию (см. приложение рисунок 7).

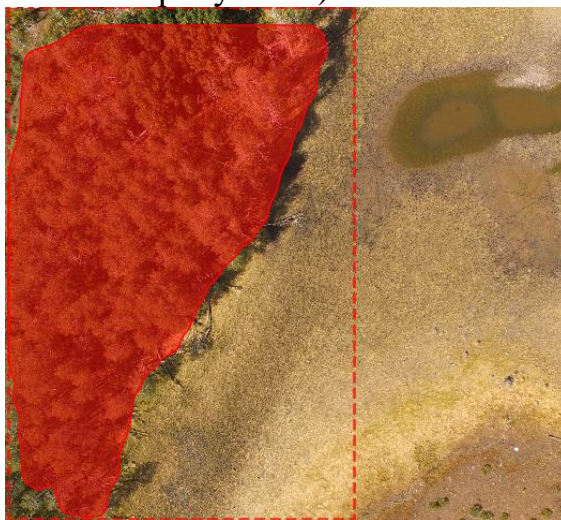


Рисунок 7 – Результат работы Mask R-CNN

Обработанные сетью Mask R-CNN данные проецируются единой системой управления на координатную сетку. На основе данных о плотности расположения объектов различного типа на исследуемом участке, например,

а) камней и прочих загрязнений, б) выращиваемых растений, в) плодов, строится картограмма требуемого масштаба, что позволяет не только рассчитать сложность выполнения задач (по сбору объектов, точечному внесению удобрений и т.д.), и требуемое для этого количество робототехнических средств, но и снизить объем передаваемых между ними данных в процессе актуализации информации об обрабатываемой территории.

Полученная картограмма объектов отправляется на МРП. На основе данной картограммы строятся маршруты, которые уже учитывают статические объекты на аграрном участке и позволяют платформе эффективнее планировать маршруты на местности при выполнении назначенных ей задач, в частности, для сбора камней и других объектов.

Сценарий сбора камней и других объектов описывается следующим набором этапов. Робототехническое средство производит детектирование объекта, который необходимо захватить. Затем выполняется расчет расстояния до объекта. На основе вычисленного расстояния МРП определяет необходимость приближения к объекту. В случае, если расстояние до объекта превосходит максимально допустимое расстояние для осуществления захвата, то робототехническое средство производит сближение с объектом. Далее, с использованием бортовых сенсоров МРП осуществляет поиск ключевых точек захвата объекта. В соответствии с положением полученных ключевых точек, выполняется планирование траектории движения манипулятора для достижения им точки захвата объекта. Предпоследним этапом сценария является перемещение манипулятора в точку захвата и осуществление захвата объекта на основе обратной связи с сенсоров, расположенных в захватном механизме. После захвата объекта, реализуется его перемещение в требуемое положение. В случае с уборкой камней данные объекты перемещаются в контейнер, установленный непосредственно на МРП.

В процессе функционирования МРП полученные картограммы постоянно актуализируются. Во время выполнения назначенных задач МРП, перемещаясь по определенному маршруту, периодически производит сканирование окружающего пространства в инфракрасном и видимом спектрах. В случае обнаружения новых объектов или критического несоответствия данных, инициируется дополнительный запрос а) на уточнение местоположения МРП при помощи БЛА; б) на уточнение карты данного участка средствами БЛА и обновление картограммы. Разработанный сценарий позволяет использовать БЛА и МРП для создания картограмм различных объектов аграрного участка.

3. Внесение удобрений с учетом агрохимических картограмм плодородия почв, запланированного объема урожая, уровня предыдущего урожая, наличия влаги, рельефа местности, агрофизических свойств почвы и других факторов. Созданные картограммы объектов помогают решать множество задач от построения маршрутов движения робототехнических средств до поиска и уборки загрязнённых участков. Для построения картограмм плотности расположения объектов на участке предлагается использовать NDVI-индекс, оценивающий состояние растительности. NDVI рассчитывается на основе

видимого и ближнего инфракрасного света, отраженного растительностью. Здоровая растительность с высокой концентрацией хлорофилла поглощает большую часть видимого света, который попадает на нее, и отражает большую часть ближнего инфракрасного света. Нездоровая или редкая растительность отражает больше видимого света и меньше ближнего инфракрасного света.

Существует около ста спектральных индексов для оценки состояния почвы и растительного покрова. Каждый индекс представляет собой формулу, которая рассчитывается на основе измеренных каким-либо сенсором свойств отражения электромагнитных волн определенного диапазона. Каждый индекс служит для решения определенных задач. Наиболее распространёнными в растениеводстве являются индексы: NDVI, GNDVI, SIPI, WI, PRI, PSSRa, CRI, PSNDa. Перечисленные индексы позволяют анализировать: концентрацию хлорофилла, отношение объемных каротиноидов к хлорофиллу, изменение состояния воды в растительном покрове, количество каротиноидных пигментов, соотношение пигментов для хлорофилла «а», пигментную характерную нормализованную разницу для хлорофилла «а». Данные индексы рассчитываются на основе гиперспектральных изображений. Для формирования изображений используются специальные гиперспектральные камеры, которые устанавливаются на БЛА или робототехнические средства. На основе обработанных гиперспектральных изображений возможно построить картограммы пространственной изменчивости свойств почв и растительного покрова для точечного внесения удобрений, анализа текущего состояния растений, почвы и другой информации о состоянии аграрного участка.

Для формирования и использования вышеупомянутых картограмм был разработан следующий сценарий. БЛА назначается область для исследования, где необходимо провести аэрофотосъемку в определенном спектре. Затем, БЛА осуществляет облет необходимой территории, фото- и видеофиксацию данных и возвращается на исходную позицию. Полученные изображения поступают в единую систему управления, где обрабатываются с использованием различных индексов. Обработанные данные проецируются на координатную сетку, где отмечаются участки, которым необходимо уделить внимание. Оператор системы назначает задачи для МРП, выполнение которых позволит произвести работы, направленные на устранение выявленных проблем на аграрном участке. МРП начинает выполнение задач, в ходе которых информирует систему о степени их выполнения и текущем состоянии своих систем. После завершения задачи МРП возвращаются на исходные позиции или получают новые задачи. Поставленная МРП задача считается выполненной при условии, что был пройден весь сформированный маршрут и работы на нем. В любых других случаях МРП сообщает системе о возникших проблемах, что позволяет оператору принять решение по её устранению.

4. Практическое применение методов взаимодействия между платформой и набором БЛА продемонстрировано на примере сбора плодов. Цель данного сценария – собрать за минимальное время заранее детектированные средствами технического зрения БЛА яблоки на сельскохозяйственном участке,

обеспечив в процессе работы коммуникацию между БЛА и наземными МРП. Модель, разработанная совместно с зарубежными коллегами в данном исследовании, предполагает разделение имеющейся задачи на две подзадачи: обнаружение местоположений необходимых остановок БЛА для сбора яблок при минимальном количестве остановок и минимизация длительности сбора яблок на остановках. Согласно ранее собранным данным аэрофотосъемки, задается минимальное количество остановок и местоположение этих остановок, причем, минимизируется длительность сбора яблок на этих остановках. БЛА расходует заряд в течение того времени, которое затрачивается на сбор яблок. Когда БЛА несет яблоко на обратном пути к МРП, он расходует заряд с интенсивностью 120%, что необходимо учитывать при расчетах и моделировании. Целевая функция предлагаемой модели задана уравнением (см. приложение выражение 7):

$$Z_{min} = \sum_{j=1}^{j_{max}} SDM_j, \quad (7)$$

где  $SDM_j$  – время, проводимое БЛА на остановке  $j$ . Это значение определяется на основании информации о БЛА, собравшем и уложившем больше всего яблок на остановке  $j$ . Целевая функция (1) стремится минимизировать общее время, затраченное БЛА (в минутах) на каждой остановке для сбора и укладки яблок.

Поскольку в ходе сбора яблок наземная мобильная платформа находится в движении, подход к этой задаче как к задаче летающего помощника коммивояжера (Flying Sidekick Traveling Salesman Problem, [de Freitas, J. C., & Penna, P. H. V. (2020). A variable neighborhood search for flying sidekick traveling salesman problem. *International Transactions in Operational Research*, 27(1), 267-290.]) на практике приводит к неэффективности. При движении наземной платформы на сбор яблок требуется больше времени, чем по оптимальной оценке, поэтому целесообразнее рассчитать заранее точки, в которых МРП остановится и использовать ее в качестве неподвижной базовой станции для БЛА. Метод кластеризации  $k$ -средних используется для выявления оптимальных точек остановки МРП. Каждой МРП, расположенной в пределах зоны действия БЛА, назначается соответствующий набор БЛА, для которых она служит базовой станцией. Ограничения, накладываемые на разработанную модель, гарантируют, что яблоко может быть снято любым БЛА на любой остановке; на каждой остановке БЛА разрешено собирать яблоки лишь в рабочей зоне этого БЛА. При завершении сбора плодов на данном участке, БЛА приземляются на площадки технического обслуживания на МРП. В то время как МРП передвигается к следующей точке остановки, соответствующие ей БЛА проходят автоматизированное обслуживание: производится подзарядка при помощи беспроводной системы передачи энергии, либо автоматизированная замена аккумулятора БЛА.

Разработанные сценарии сбора плодов могут быть доработаны для выполнения других задач, например, для сбора камней и прочего мусора на территории, а также точечного внесения удобрений при помощи БЛА. В последнем случае, сценарий взаимодействия МРП и БЛА аналогичен

вышеописанному, однако действие сбора и погрузки яблок на МРП заменяется обратным – БЛА забирает необходимое количество химических удобрений со своей базовой станции (МРП) и наносит их на соответствующие участки грунта.

Таким образом, в ходе второго этапа проекта были разработаны модели и алгоритмы локальной навигации МРП на основе беспроводных самоорганизующихся LoRA-сетей с ячеистой топологией, разворачиваемых при помощи БЛА. Также были разработаны методы взаимодействия между платформой и набором БЛА, внесенных в рабочую зону, и сценарии их функционирования, включающие: мониторинг сельскохозяйственных земель, построение и уточнение карты территории и картограмм плотности расположения объектов различного типа на исследуемом участке, а также сбор различных объектов. Разработанные сценарии могут быть доработаны для выполнения различных сельскохозяйственных задач.

В ходе международного сотрудничества по проекту иностранными коллегами были подготовлены три набора данных для выполнения целей проекта (WP1):

1. Набор отдельных изображений с попиксельной аннотацией двенадцати классов, подходящих для семантической сегментации изображений.

2. На основе видео, снятых БЛА, был подготовлен набор данных изображений для обнаружения людей, техники и животных в сельскохозяйственном контексте. Подходящие изображения были извлечены и аннотированы с помощью специально разработанной онлайн-платформы.

3. Набор изображений для классификации типичных областей с учетом контекста (сельское хозяйство), включая 13 классов различных текстур.

Также иностранными коллегами были разработаны методы детектирования и классификации объектов для трехмерной модели рабочей области на основе методов обработки видеоданных, полученных в ходе предварительного мониторинга, для создания полевых картограмм (WP3). На основе современных сверточных нейронных сетей (CNN) были разработаны, исследованы и опубликованы различные методы сегментации семантических изображений. Кроме того, был разработан метод детектирования людей на основе CNN с учетом специфики контекста (сельское хозяйство) и масштаба изображения в зависимости от расстояния между человеком и камерой, а также метод классификации текстур.

В ходе выполнения WP7 «Разработка функциональной модели, алгоритмов и сценариев взаимодействия между человеком и платформой, включая совместное обучение и критически важные компоненты взаимодействия посредством жестов, голоса и т.д.» участниками коллективов HfTL, UNS было исследовано человеко-машинное взаимодействие с помощью жестов и речевых команд. Были разработаны и протестированы наборы данных:

1. Audio set I, 2018: реалистичные аудиозаписи, записанные БЛА на открытом пространстве и в помещении (звуковая лаборатория) во время выполнения нескольких сценариев полета (набор высоты, зависание и т. д.),

включая речевые команды и звуки окружающей среды (например, проезжающий автомобиль).

2. Audio set II, 2019: аудиозаписи, полученные в специфических сценариях полета БЛА – запись с использованием легкого массива из 8 микрофонов и определенных углов формирования луча и воспроизводимых сигналов источника (речевые команды через громкоговоритель на земле).

На основе описанных наборов аудиоданных I и II были проведено тестирование аудиоданных вне и внутри помещений. Подавление шумов в записях, специфичных для БЛА, на которые влияют динамика полета и маскирование шума на частотах, аналогичных требуемым сигналам (например, голосам), создает серьезные проблемы, как и ожидалось, и требует применения передовых методов обработки сигналов на следующих этапах.