

Роботизированные комплексы и системы.  
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля  
Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 007.52; 004.89  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Принципы построения и экспериментальные исследования прототипного образца многоагентной робототехнической системы для разбора завалов

С.В. Манько<sup>@</sup>,  
В.М. Лохин,  
С.А.К. Диане

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия  
<sup>@</sup> Автор для переписки, e-mail: [manko@mirea.ru](mailto:manko@mirea.ru)

### Резюме

**Цели.** В статье обоснованы актуальность создания и перспективы применения многоагентных робототехнических систем для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Целью работы является проверка практической реализуемости алгоритмов управления группой автономных роботов при решении многоэтапных прикладных задач.

**Методы.** Используются положения теории конечных автоматов в задачах планирования действий многоагентной системы, методы автоматического управления при организации целенаправленного движения роботов-исполнителей, методы машинного зрения в задачах поиска и анализа формы завала.

**Результаты.** Описаны принципы построения, архитектура и состав программно-алгоритмического обеспечения прототипного образца многоагентной робототехнической системы, разработанной в РТУ МИРЭА в рамках проведения комплексных исследований развития средств и методов группового управления роботами. Рассмотрена многоэтапная задача поиска и устранения завалов. Предложенный алгоритм планирования действий робототехнических агентов определяет временную очередность выполнения этапов данной задачи. Распределение заданий между роботами-исполнителями производится с учетом оценок их пригодности. Автономное функционирование робототехнических агентов определяется командами, поступающими с уровня группового управления, а также априорно заложенной базой знаний со сценарными моделями целесообразных действий. Компенсация неопределенностей внешней среды локального характера в процессе движения роботов базируется на комплексном анализе визуальной и навигационной информации. Наряду с основными элементами многоагентной системы дано описание разработанной инфраструктуры аппаратно-программных средств визуальной навигации и беспроводной связи.

**Выводы.** Результаты экспериментальных исследований показали эффективность развиваемых подходов к созданию интеллектуальных технологий группового управления автономными роботами на примере задач поиска и разбора завалов. Подтверждена возможность практической реализации многоагентной робототехнической системы на основе разработки и интеграции ряда информационно-управляющих и инфраструктурных подсистем.

**Ключевые слова:** автономный робот, интеллектуальное управление, групповое управление, многоагентная робототехническая система, разбор завалов

• Поступила: 11.02.2022 • Доработана: 11.03.2022 • Принята к опубликованию: 12.09.2022

**Для цитирования:** Манько С.В., Лохин В.М., Диане С.А.К. Принципы построения и экспериментальные исследования прототипного образца многоагентной робототехнической системы для разбора завалов. *Russ. Technol. J.* 2022; 10(6):28–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Prototype multi-agent robotic debris removal system: principles of development and experimental studies

Sergey V. Manko<sup>@</sup>,  
Valery M. Lokhin,  
Sekou Abdel Kader Diane

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>@</sup> Corresponding author, e-mail: [manko@mirea.ru](mailto:manko@mirea.ru)

### Abstract

**Objectives.** The article substantiates the relevance of the creation and the prospects of application of multi-agent robotic systems for elimination of consequences of emergency situations. The purpose of this work was to test the practical feasibility of algorithms for controlling a group of autonomous robots when performing multi-stage missions.

**Methods.** The theses of the finite automata theory in planning actions of a multi-agent system, methods of automatic control in organizing a goal-directed movement of robots, and methods of computer vision in searching and analyzing debris geometry were used.

**Results.** The principles of development, architecture, and composition are described for the software and algorithms of a prototype of the multi-agent robotic system created at RTU MIREA as part of integrated research for the creation of tools and methods of group control of robots. The multi-stage task of searching and removing debris in the process of eliminating the consequences of emergency situations is analyzed. A proposed algorithm for planning the actions of robotic agents determines the time sequence of the mission stages. Tasks are allocated among the performing robots according to assessments of their suitability. The autonomous functioning of robotic agents is determined by commands coming from the group control level, as well as an a priori embedded knowledge base with scenario models of appropriate actions. Compensation of local environmental uncertainties in the process of robot movement is based on a comprehensive analysis of visual and navigation information. Along with the main elements of the multi-agent system, the developed infrastructure of hardware and software for visual navigation and wireless communication is described.

**Conclusions.** The results of the experimental studies demonstrated the efficiency of the developed approaches to the creation of intelligent technologies for group control of autonomous robots on the example of debris search and removal tasks. The feasibility of the multi-agent robotic system is demonstrated by the development and integration of a number of information management and infrastructure subsystems.

**Keywords:** autonomous robot, intelligent control, group control, multi-robot system, debris removal

• Submitted: 11.02.2022 • Revised: 01.03.2022 • Accepted: 12.09.2022

**For citation:** Manko S.V., Lokhin V.M., Diane S.A.K. Prototype multi-agent robotic debris removal system: principles of development and experimental studies. *Russ. Technol. J.* 2022;10(6):28–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>

**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблематики многоагентных робототехнических систем (МАРС), активный интерес к которым неуклонно возрастает с начала XXI в., определяется широкими перспективами их применения в различных прикладных областях. Основные преимущества совместного использования автономных роботов в составе объединенной группировки связаны с существенным повышением эффективности выполнения поставленных задач за счет объединения функциональных возможностей и ресурсов при организации необходимых взаимодействий.

Исследованию проблем и разработке технологий группового управления автономными роботами во всем мире придается приоритетное значение, а реальные практические результаты, полученные в США и ряде других стран, носят опережающий характер [1, 2].

Программы аналогичных работ в России до определенного момента имели значительное отставание от зарубежного уровня. Однако реализация национальной стратегии научно-технологического развития, одной из главных целей которой является переход к передовым интеллектуальным и роботизированным технологиям, обеспечила резкую активизацию теоретических и экспериментальных исследований соответствующей направленности. Эти исследования выполняются в целом ряде научно-исследовательских центров, академических институтов, проектно-конструкторских организаций и университетов [3–5]. Фундаментальные и прикладные заделы, формируемые на этом фоне силами российской научной школы, в части предлагаемых постановок и решений не только соответствуют современным мировым трендам, но и начинают находить свое практическое воплощение в практических разработках, связанных с созданием интеллектуальных систем управления автономными роботами и многоагентными группировками.

Так, в частности, обобщение результатов, полученных в РТУ МИРЭА в рамках исследовательского проекта «Методы, модели и алгоритмы группового управления автономными роботами на основе комплексного применения аппарата теории конечных автоматов», позволило разработать экспериментальный прототип МАРС для отработки технологий

автоматического поиска и разбора завалов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

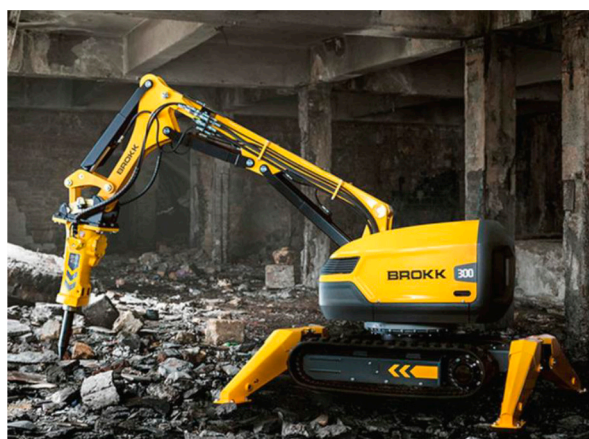
## ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

Анализ чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера показывает, что одним из наиболее характерных проявлений их последствий являются масштабные разрушения и завалы, сложности ликвидации которых зачастую усугубляются наличием отягчающих факторов, связанных с возникновением пожаров, очагов заражения местности и т.д. В этих условиях, когда привлечение человеческих ресурсов может иметь ограниченные объемы или представляется вообще невозможным, применение автономных роботов и, в особенности МАРС, становится единственно оправданной альтернативой.

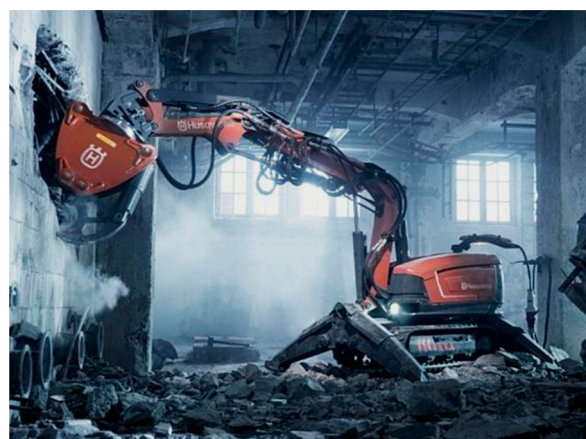
Очевидно, что многоагентные системы для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, автоматического разбора завалов и решения других задач подобного характера должны формироваться из числа специализированных образцов автономных роботов соответствующего типа [6, 7]. Многие российские и иностранные производители предлагают широкую номенклатуру многофункциональных телеуправляемых мобильных роботов инженерного назначения (с развитым сенсорным оснащением, сменным набором инструмента и навесного оборудования) (рис. 1). Подобные роботы потенциально могут использоваться в составе многоагентных систем для разбора завалов при условии необходимой модернизации средств управления для обеспечения режимов автономной работы и приема/передачи данных по каналам беспроводной сетевой связи.

Основные требования к функциональным возможностям МАРС связаны с необходимостью анализа поставленной прикладной задачи, ее декомпозиции на множество подзадач или составных технологических операций и их последующего выполнения в автономном режиме совместными усилиями отдельных исполнителей, координирующих свои действия [8–10]. Создание таких систем,





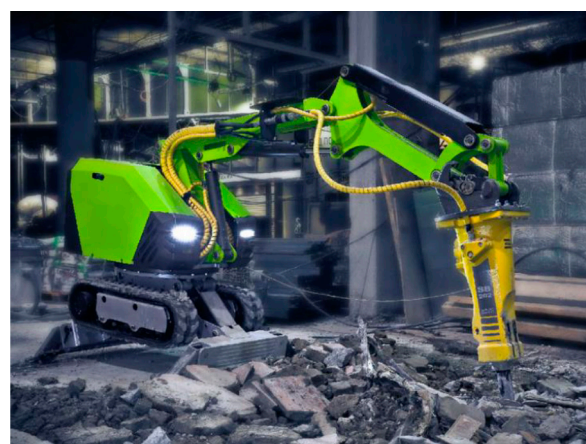
(а)



(б)



(в)



(г)

**Рис. 1.** Образцы специализированных роботов инженерного назначения с телеоператорным управлением: (а) «Brokk 300» (Brokk, Швеция); (б) «Husqvarna 310» (Husqvarna, Швеция); (в) «РОИН» Р-070 (Интехрос, Россия); (г) «Бетонолом 2000» (Роботехникс, Россия)

в полной мере отвечающих предъявляемым к ним требованиям, сопряжено с решением следующих ключевых проблем:

- организации развитого человеко-машинного интерфейса, позволяющего обеспечить оперативную постановку общей прикладной задачи;
- организации целесообразного взаимодействия между отдельными агентами в интересах выполнения общей прикладной задачи;
- обеспечения автономности агентов и системы в целом.

В свою очередь, проблема организации целесообразных взаимодействий между активными элементами в составе МАРС охватывает две важнейшие составляющие:

- планирование координированных действий агентов (исходя из анализа поставленной прикладной задачи, процесса ее выполнения и имеющихся ресурсов) с последующим формированием и выдачей соответствующих заданий;
- обеспечение информационно-логического взаимодействия и совместимости агентов (как на уровне использования единых форматов

представления данных, систем сообщений, команд и целеуказаний, так и на уровне технических каналов их передачи).

Анализ выявленных проблем показывает, что интеграция потенциальных подходов к их решению в рамках единой системы предполагает необходимость ее построения в соответствии со следующими принципами:

- общность целей функционирования агентов;
- адекватность интеллектуальных и функциональных возможностей агентов сложности решаемых задач;
- общность информационного пространства системы;
- взаимная информационно-логическая совместимость агентов.

Следует отметить, что одна из наиболее острых проблем при создании и внедрении МАРС связана с формированием порядка и способов совместного прикладного применения автономных роботов [9, 11] в сочетании с разработкой адекватного набора программно-алгоритмических средств группового управления с их последующей верификацией и отладкой.

## ПОРЯДОК И СПОСОБЫ ЦЕЛЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

Эффективность целевого применения МАРС в общем случае будет во многом определяться рациональностью выполняемых ею действий по решению требуемой прикладной задачи. Соответствующий сценарий, определяющий порядок и способы применения МАРС для автоматического поиска и разбора завалов, представлен на рис. 2 и предполагает поэтапное проведение следующей совокупности необходимых операций:

- выдвижение имеющихся роботов к назначенной точке исходного сбора в зоне чрезвычайной ситуации из мест их оперативной доставки или постоянного размещения;
- уточнение общей обстановки, оценка произошедших разрушений и определение параметров их дислокации с помощью одного или нескольких специализированных роботов поисково-разведывательного назначения;
- целенаправленное перемещение МАРС в зону дислокации обнаруженных завалов;
- автоматический послойный разбор завалов с распределением операций по отдельным исполнителям из состава МАРС.

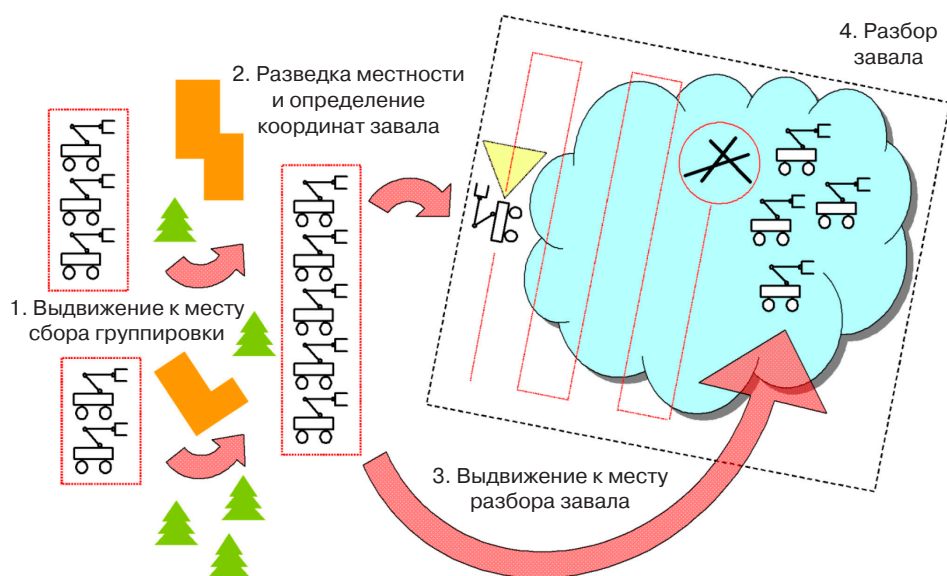
Анализ сценария показывает, что реализация последнего этапа предполагает разработку специализированных программных средств, обеспечивающих не только обработку визуальной информации для установления параметров положения наблюдаемых элементов завала, но и автоматический синтез модели проведения демонтажа его верхнего слоя.

## ОБОБЩЕННАЯ АРХИТЕКТУРА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

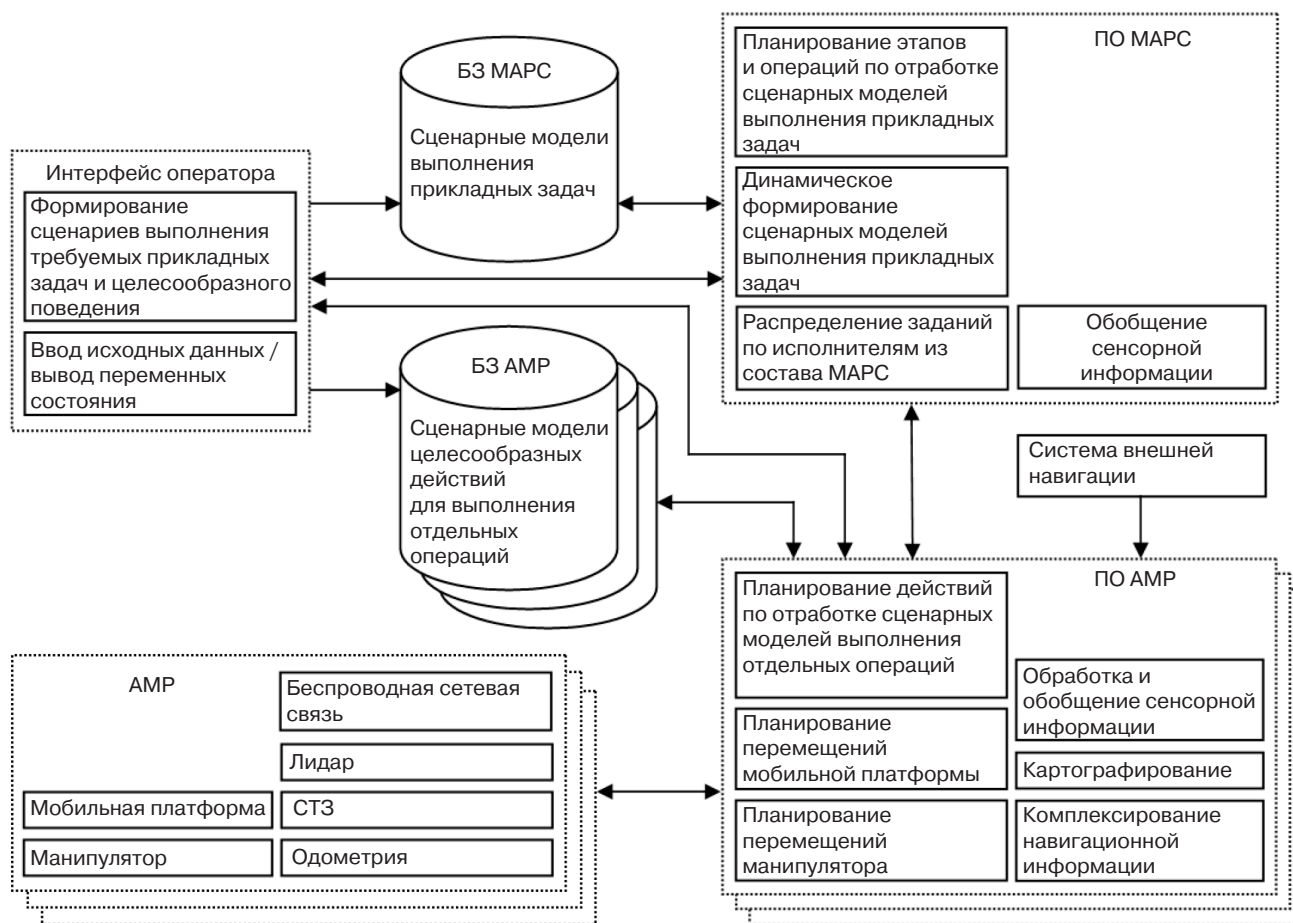
Разработанный комплекс программно-алгоритмических средств, архитектура которого показана на рис. 3, обеспечивает реализацию всех необходимых функций по обработке информации и интеллектуальному управлению МАРС, ориентируемых на выполнение операций автоматического поиска и разбора завалов и формируемых из числа автономных мобильных роботов с бортовым манипулятором и развитым сенсорным оснащением. Основными структурными элементами комплекса, построенного по блочно-модульному принципу на основе современных технологий обработки знаний, являются подсистема человеко-машинного интерфейса, подсистема интеллектуального планирования и распределения заданий в составе МАРС, а также подсистемы интеллектуального управления автономными роботами.

Программное обеспечение подсистемы интеллектуального планирования заданий в составе МАРС включает следующий набор основных функциональных модулей:

- базу знаний со сценарными моделями выполнения прикладных задач, создаваемыми по описанию оператора [9, 10] либо в автоматическом режиме (на основе информации о структуре наблюдаемого завала) [12] с использованием аппарата конечных автоматов;
- модуль обобщения сенсорной информации для формирования структурной модели наблюдаемого завала;



**Рис. 2.** Обобщенный сценарий функционирования МАРС при выполнении задач автоматического поиска и разбора завалов в составе мероприятий по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций



**Рис. 3.** Обобщенная архитектура комплекса программно-алгоритмических средств демонстрационного образца МАРС для автоматического поиска и разбора завалов. AMP – автономный мобильный робот; БЗ AMP – база знаний автономного мобильного робота; СТЗ – система технического зрения

- модуль динамического формирования сценарных моделей послойного разбора выявляемых завалов на основе аппарата конечных автоматов [12];
- модуль интеллектуального планирования этапов и операций по отработке сценарных моделей поставленных прикладных задач [9, 10];
- модуль распределения заданий между роботами из состава объединенной группировки на основе алгоритмов многокритериальной оценки полезности потенциальных исполнителей [9].

В свою очередь, подсистемы интеллектуального управления автономными роботами, входящими в состав МАРС, объединяет следующий состав программного обеспечения:

- база знаний с априорно заложенными сценарными моделями отработки отдельных операций, построенными на основе аппарата конечных автоматов;
- модуль интеллектуального планирования целесообразных действий на основе обработки сценарных моделей выполнения тех или иных операций [13];

- библиотека программных средств для планирования перемещений подвижной платформы и манипулятора (на основе избирательного использования ряда специализированных алгоритмов, таких, как A\*, потенциальных полей, быстрорастущих случайных деревьев (RRT) и др.), а также для решения задач картографирования (на основе алгоритмов SLAM) [14];
- модуль комплексирования одометрической информации и данных системы внешней навигации;
- модуль обработки и обобщения сенсорной информации от бортовой видеокамеры и лазерного сканирующего дальномера для оценки и распознавания внешней обстановки.

Бортовые подсистемы управления исполнительными устройствами автономных роботов обеспечивают отработку множества командных уставок, формируемых вышестоящей подсистемой.

Подсистема человеко-машинного интерфейса объединяет широкий набор программно-инструментальных средств для контроля работоспособности и текущего состояния МАРС, постановки целей



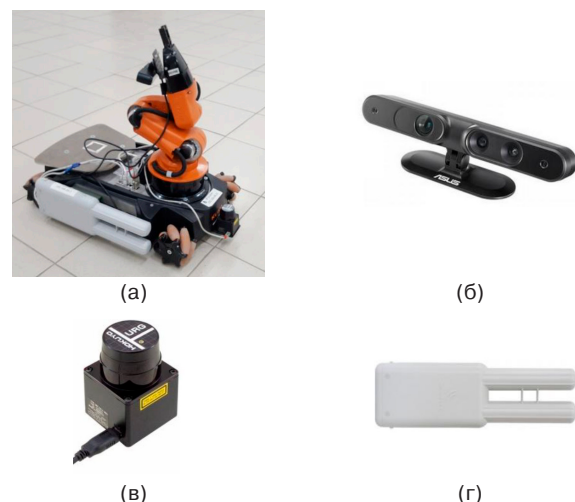
и задач ее функционирования, формирования сценарных моделей выполнения заданий и управления роботами, а также мониторинга телеметрической информации о ходе и результатах проводимых ими операций [15].

### ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОБРАЗЕЦ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

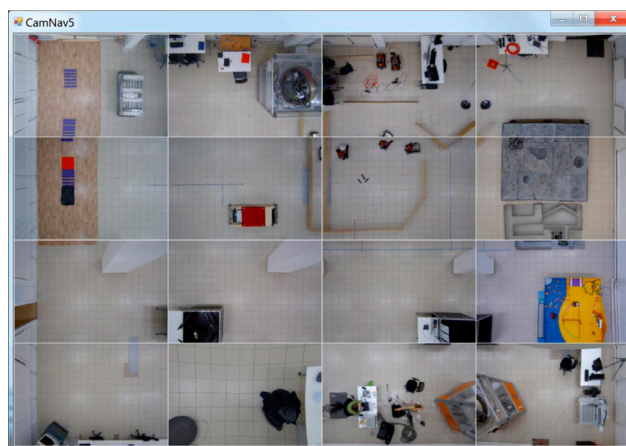
Создание демонстрационного образца МАРС ставило своей целью принципиальную отработку интеллектуальных технологий группового управления автономными роботами на примере задач автоматического поиска и разбора завалов в ходе натурных экспериментов с имитацией соответствующих условий на специализированном испытательном полигоне. В качестве условного прототипа автономных роботов инженерного назначения, объединяемых в составе многоагентной системы для автоматического поиска и разбора завалов, используется мобильная платформа «KUKA youBot» (KUKARoboter, Германия), которая построена по схеме «манипулятор на подвижном основании» и оснащается лазерным сканирующим дальнометром, стерео-видеокамерой, устройствами беспроводной сетевой связи (рис. 4) и программно-алгоритмическим обеспечением для поддержания режимов автономного функционирования и группового управления.

Закрытые помещения полигона оборудованы набором из 16 IP-видеокамер «Beward BD3670M» (НПП «Бевард», Россия), равномерно размещаемых под потолком на высоте 4 м и используемых как для непосредственного определения координат положения наблюдаемых подвижных объектов в пределах общего интегрированного навигационного поля (рис. 5), так и в целях эмуляции систем спутниковой навигации. Информационное взаимодействие автономных роботов в составе объединенной группировки реализуется по каналам беспроводной сетевой связи в соответствии со стандартами технологии Wi-Fi с использованием протоколов TCP/IP. При этом единство общего информационного пространства МАРС обеспечивается интеграцией сетевой инфраструктуры аппаратно-программных средств систем беспроводной связи и внешней визуальной навигации, как показано на рис. 6.

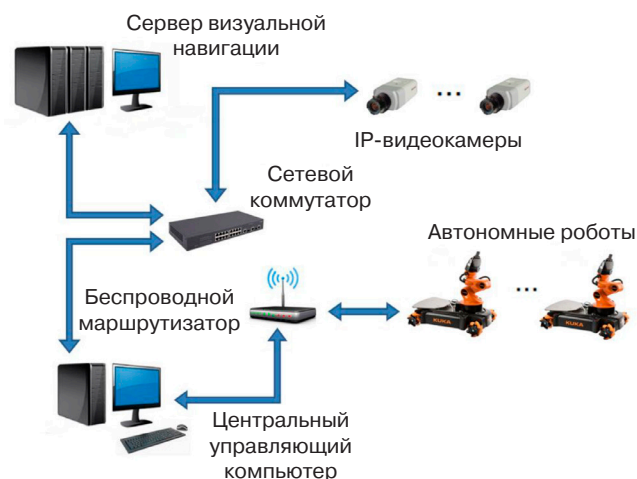
Оперативная постановка прикладной задачи и контроль за ходом ее выполнения осуществляется с помощью специализированных опций на панели интерфейса оператора (рис. 7), выводимой на экран монитора центрального компьютера.



**Рис. 4.** Мобильный робот «KUKA youBot» с бортовым комплектом информационно-измерительных средств: (а) автономная транспортная платформа; (б) RGBD видеокамера «AsusXtionProLive» (AsusTek Computer Inc., Китай); (в) лазерный сканирующий дальнометр «Hokuyo URG 04LX UG01» (Hokuyo Automatic Co., Япония); (г) беспроводная точка доступа «MikroTik OmniTik UPA-5HnD» (MikroTik, Латвия)



**Рис. 5.** Интегрированное поле системы визуальной навигации



**Рис. 6.** Объединенная сетевая инфраструктура аппаратно-программных средств системы визуальной навигации и беспроводной связи

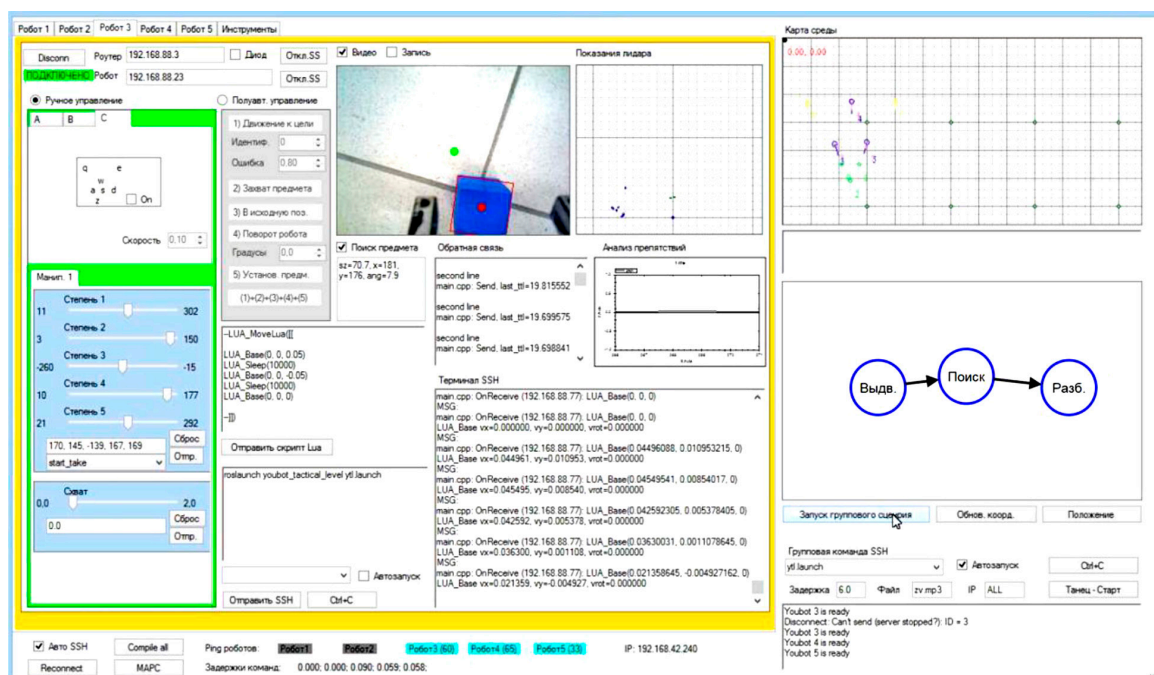


Рис. 7. Интерактивная панель интерфейса оператора демонстрационного образца MAPCS для автоматического поиска и разбора завалов

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАТУРНАЯ ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА И РАЗБОРА ЗАВАЛОВ

Серия запланированных экспериментов по натурной отработке программно-алгоритмических средств группового управления автономными роботами для автоматического поиска и разбора завалов выполнялась на примере макетирования последствий чрезвычайной ситуации с условной имитацией зоны разрушений и завалов (рис. 8) на специализированном испытательном полигоне Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА.

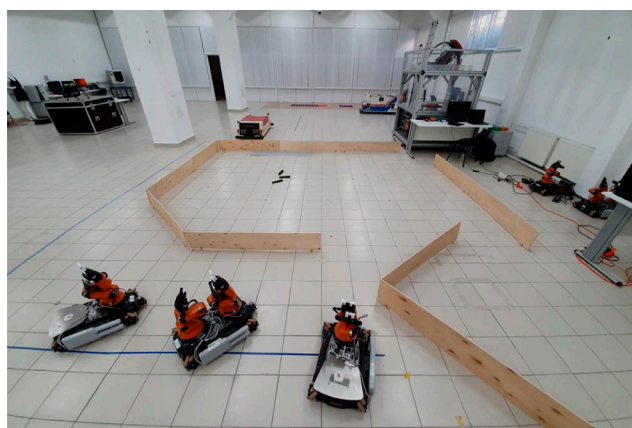


Рис. 8. Макет сцены для проведения экспериментов по автоматическому поиску и разбору завалов с использованием MAPCS

Постановка задачи, осуществляемая оператором с использованием интерактивных средств человеко-машинного интерфейса (рис. 7), предполагает формирование сценарного графа, узлы и дуги которого регламентируют состав и очередность основных этапов предстоящей к выполнению прикладной миссии. При этом с каждым из узлов создаваемого графа ассоциируется набор данных, определяющих параметры проведения соответствующего этапа. В случае необходимости в числе ассоциируемых данных указываются ссылки на привлекаемые алгоритмы или имена вложенных сценарных графов.

Подготовка и спецификация сценарных графов обеспечивает автоматическое построение формализованной модели решаемой прикладной задачи в виде соответствующей сети конечных автоматов, обеспечивающей реализацию контрольно-управляющих функций планирования поведения и целесообразных действий автономных роботов в составе MAPCS.

Так, в частности, постановка прикладной задачи, которая стоит перед MAPCS в рамках проводимых экспериментов, потребовала формирования сценарного графа с последовательным включением этапов выдвижения роботов к месту сбора, поиска и последующего разбора завала, как показано на рис. 8.

Важно отметить, что параметры проведения второго этапа, связанного с разведкой местности, предусматривают два возможных исхода, когда отрицательный результат поиска приводит к завершению всей миссии, в то время как обнаружение завала обуславливает переход к следующей стадии выполнения поставленной задачи.



В свою очередь, последний этап задается вложенным сценарным графом с циклическим повторением операций распознавания структуры верхнего слоя завала, динамического синтеза его модели и планирования операций демонтажа вплоть до последнего составного элемента.

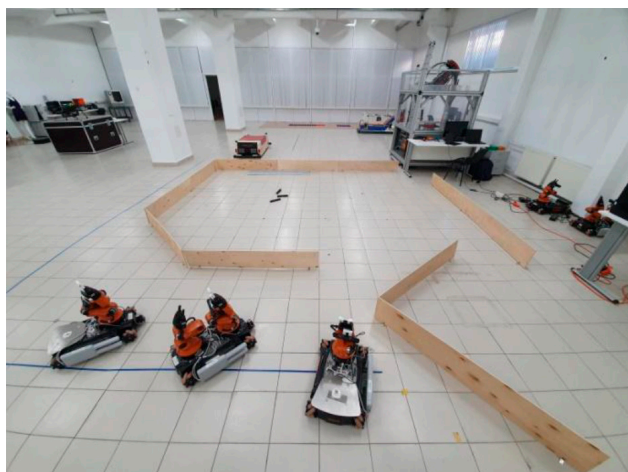
Завершающая стадия постановки задачи связана с инициализацией роботов, указанием их сетевых адресов и параметров функционирования, вводом координат места первоначального сбора и зоны последующей работы.

Запуск MAPC, осуществляемый по команде оператора, обеспечивает переход к непосредственному выполнению поставленной прикладной задачи в автоматическом режиме функционирования в соответствии с оперативно-введенными и априорно-заложенными сценариями автономного и группового управления.

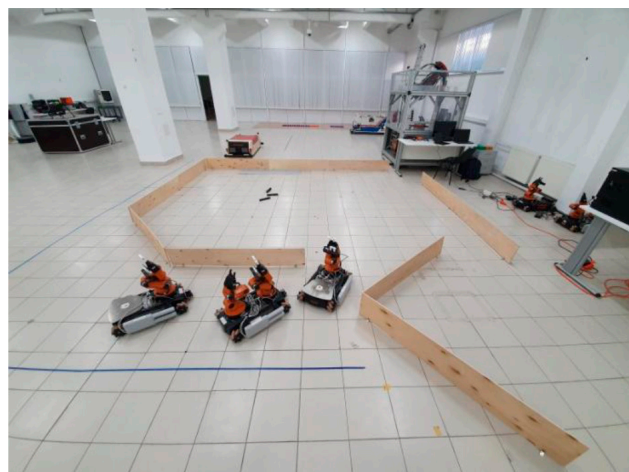
На рис. 9–11 показаны основные фрагменты одного из натурных экспериментов по отработке методов и технологий группового управления автономными роботами, действующими в составе MAPC

при совместном выполнении общей прикладной задачи по автоматическому поиску и разбору завала.

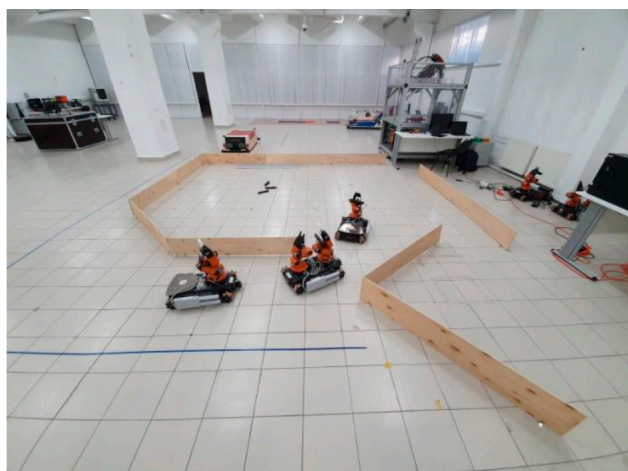
Так, рис. 9а–9г подробно отражает процесс выполнения первого этапа поставленной задачи, связанного с выдвиганием автономных роботов к назначенному месту сбора. Прокладка маршрута их целенаправленного движения обеспечивается алгоритмами A\* [16] и RRT [17], в то время как планирование перемещений с учетом условий поддержания конфигурации «конвой» осуществляется с помощью алгоритмической реализации метода «потенциальных полей» [18] и средств обработки визуальной, дальномерической и навигационной информации. Выбор используемых алгоритмов предопределяется сценарием выполнения поставленной задачи на уровне соответствующих ссылок, установленных при спецификации параметров проведения данного этапа. Выход роботов к назначенному месту сбора, подтвержденный по каналам беспроводной сетевой связи, служит не только фактическим подтверждением успешного завершения текущего этапа выполняемой задачи, но и сигналом



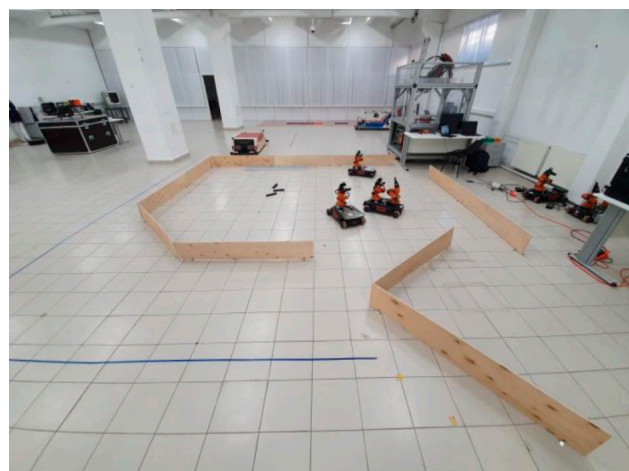
(а)



(б)



(в)



(г)

**Рис. 9.** Передвижение группы автономных роботов с поддержанием конфигурации строя типа «конвой» при выходе к назначенному месту сбора MAPC

о переходе к ее следующей фазе. При этом текущее состояние роботов и выполняемой ими задачи отображается на панели интерфейса оператора.

Рис. 10 иллюстрирует второй этап выполнения поставленной задачи, связанный с разведкой местности и поиском завала.

Выбор робота, используемого в этих целях, осуществляется по критерию подходящего функционала или наименьшего порядкового номера (при прочих равных условиях), а полнота осмотра заданной области определяется сценарием планирования и отработки поисковых движений с привлечением алгоритма  $A^*$  и средств обработки визуальной, дальнометрической и навигационной информации. Порядок необходимых действий регламентируется сценарием выполнения поставленной задачи, а также сценарием проведения поисково-разведывательных операций, априорно заложенным в базы знаний интеллектуальных систем управления автономными роботами.

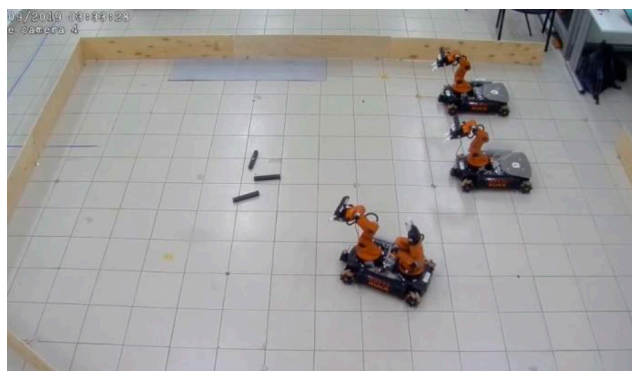
Критерием выявления завала служит превышение критического количества элементов разрушений на единице площади, определяемое по результатам обработки данных с бортового комплекса информационно-измерительных средств робота.

Обнаружение завала позволяет перейти к третьему этапу поставленной задачи, связанному с разбором и эвакуацией найденных объектов, как показано

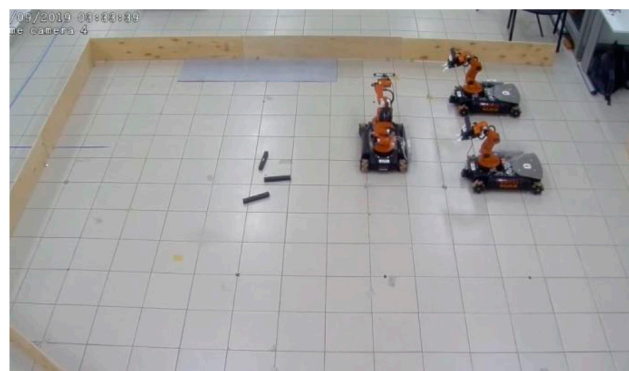
на рис. 11а–11г. Вложенный сценарий его проведения предполагает необходимость циклического повторения процедур обработки изображений, анализа и восстановления структуры верхнего слоя завала, а также динамического построения сценарной модели разбора выделенных элементов.

Формирование такой модели на основе использования аппарата конечных автоматов позволяет обеспечить планирование послойного разбора завала с оперативной выдачей упорядоченного набора заданий по его реализации с указанием удаляемых элементов и параметров их пространственного положения.

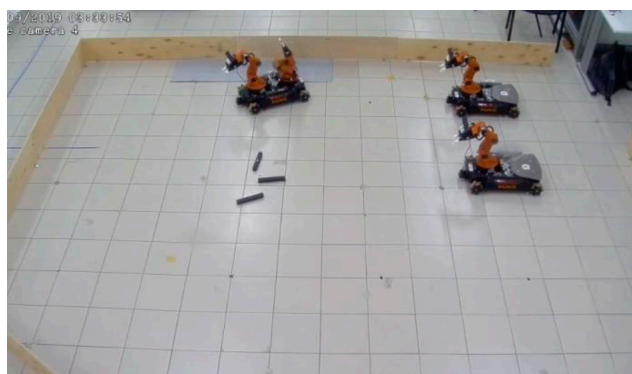
Распределение заданий между роботами осуществляется, исходя из оценок статуса их текущей занятости и степени удаленности по отношению к месту проведения соответствующих операций. Сформированные назначения передаются по каналам беспроводной сетевой связи выбранным адресатам из состава МАРС. Выполнение полученных заданий регламентируется набором сценарных моделей, априорно заложенных в состав бортовой базы знаний интеллектуальной системы управления каждого из роботов и определяющих порядок проведения необходимых операций по захвату и эвакуации указанных элементов завала на основе комбинированного использования целого ряда соответствующих алгоритмов. Так, планирование локальных



(а)



(б)



(в)



(г)

**Рис. 10.** Функционирование МАРС при выполнении операции разведки местности: (а), (б) выбор робота для поиска завала; (в) поисковые движения робота в ходе проведения разведки; (г) обнаружение завала по результатам обработки изображений с бортовой телекамеры робота



перемещений мобильной платформы и установленного на ней манипулятора осуществляется на основе алгоритмической реализации метода быстро-растущих случайных деревьев (RRT). Прокладка маршрутов целенаправленного движения мобильной платформы обеспечивается алгоритмом A\*. Обход подвижных препятствий при перемещении робота в условиях динамически изменяемой сцены контролируется с помощью алгоритмической реализации метода «потенциальных полей». При этом вся совокупность задач планирования перемещений и управления движением робота решается в реальном времени с использованием средств обработки визуальной, дальнометрической и навигационной информации для учета особенностей окружающей обстановки.

Объективный контроль результатов отработки каждой составной части сценариев того или иного уровня, осуществляемый на основе обработки показаний информационно-измерительных средств отдельных роботов, позволяет обеспечивать переход к следующей стадии выполнения задачи или ее завершению с отображением всей необходимой информации на интерактивной панели интерфейса оператора.

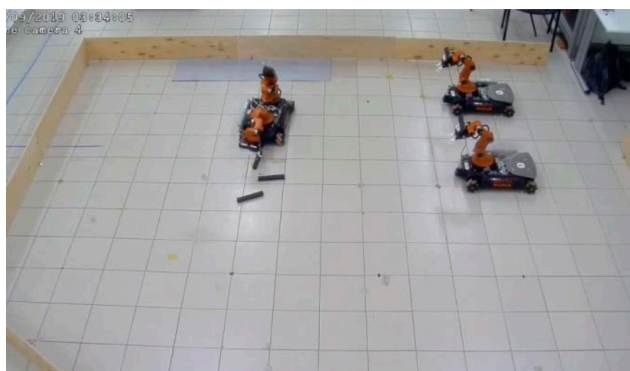
Создание демонстрационного образца МАРС и его натурные испытания позволили на практике отработать средства и методы группового управления автономными роботами, согласованное взаимодействие

которых обеспечивается на основе комбинированного использования различных стратегий:

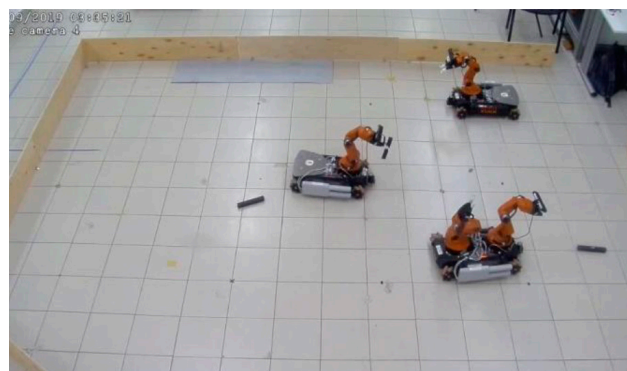
- стратегии централизованного управления при планировании этапов выполнения поставленной прикладной задачи с распределением заданий на проведение необходимых операций отдельным роботам;
- стратегии автономного управления при планировании целесообразных действий и координации движений роботов в процессе их совместного функционирования при выполнении полученных заданий.

Следует отметить, что принципы построения комплекса аппаратных и программно-алгоритмических средств демонстрационного образца МАРС допускают возможность его масштабирования по общему числу роботов, включаемых в состав группировки. Реализация подобных свойств позволяет повысить не только отказоустойчивость системы, но и степень ее универсальности в приложении к различным практическим задачам, сложность решения и объемность которых может потребовать оперативного изменения необходимой численности привлекаемых роботов.

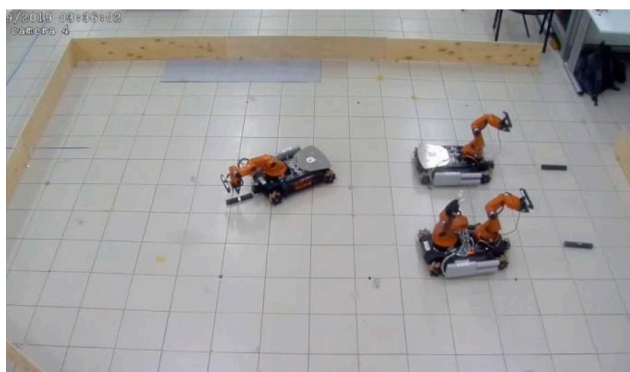
В этом смысле особый интерес приобретает вопрос об объемах информации, передаваемой по каналам беспроводной сетевой связи в процессе функционирования МАРС. Как показывает анализ, результаты



(a)



(б)



(в)



(г)

**Рис. 11.** Функционирование МАРС  
при выполнении операций разбора элементов завала



**Таблица.** Интенсивность информационных потоков в сети беспроводной передачи данных в составе МАРС

Назначение данных	Частота, Гц	Объем одного сообщения, Кбайт	Число устройств	Суммарная скорость передачи, Кбит/с	Содержание
Навигация	5	102	16	65 280	Изображения с IP-камер
Навигация	5	0.5	1	20	Строка с координатами обнаруженных роботов
Навигация	1	0.1	5	4	Строки с координатами каждого робота
Управление	1	0.1	5	4	Команды тактического уровня управления роботами
Управление	1	0.05	5	2	Подтверждения о выполнении команд тактического уровня
Интерфейс	10	25	5	10 000	Изображение с бортовой видеокамеры
Интерфейс	10	2	5	800	Данные с бортового лидара

которого представлены в таблице, для разработанной конфигурации МАРС с составом из пяти роботов интенсивность информационных потоков в сети передачи данных не превышает критический уровень.

Таким образом, проведенные натурные эксперименты убедительно доказали реальные возможности создания МАРС, ориентированных на выполнение различных прикладных задач, среди которых – автоматический поиск и разбор завалов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание прототипного образца многоагентной робототехнической системы позволило обеспечить комплексную отработку не только методов и алгоритмов группового управления, но и технологий обработки необходимых знаний, а также средств человеко-машинного интерфейса для оперативной постановки решаемых прикладных задач. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на примере задач автоматического поиска и разбора завалов, подтвердили эффективность разработанного программно-алгоритмического обеспечения, текущая версия которого реализует централизованную стратегию группового управления автономными роботами в составе объединенной группировки. Перспективы дальнейшего развития системы предполагают дополнение ее структуры механизмами доски объявлений для поддержки децентрализованных стратегий функционирования автономных роботов на уровне координации планов их поведения и согласования взаимодействий.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-29-04379 в рамках исследовательского проекта «Методы, модели и алгоритмы группового

управления автономными роботами на основе комплексного применения аппарата теории конечных автоматов».

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-29-04397) under the Research Project “Methods, Models, and Algorithms for Group Control of Autonomous Robots by the Integrated Application of the Apparatus of the Theory of Finite Automata.”

### Вклад авторов

**С.В. Манько** – разработал алгоритмы планирования и распределения заданий между агентами МАРС; предложил формализованное описание сценария решаемой прикладной задачи в виде сети конечных автоматов.

**В.М. Лохин** – разработал архитектуру МАРС и обобщенную структуру автономного робототехнического агента в ее составе; предложил концепцию натурного эксперимента по поиску и ликвидации завала и контролировал ход его проведения.

**С.А.К. Диане** – разработал алгоритмы технического зрения для автономных робототехнических агентов в составе МАРС; программно реализовал ключевые алгоритмы планирования и распределения заданий, а также обработки информации в МАРС.

### Authors' contributions

**S.V. Manko** has developed algorithms for planning and distributing tasks between MARS agents; proposed a formalized description of the scenario of the specified applied problem in the form of a network of finite automata.

**V.M. Lokhin** has developed the MARS architecture and the generalized structure of its autonomous robotic agent; proposed the concept of a full-scale experiment to search for and eliminate the blockage, and controlled the stages of its implementation.

**S.A.K. Diane** has developed vision algorithms for autonomous robotic agents in the MARS; programmatically implemented key algorithms for planning, distributing tasks, and processing information in MARS.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yasuda T., Ohkura K. (Eds.). *Multi-robot systems: trends and development*. InTech; 2011. 596 p. ISBN 978-953-307-425-2. <https://doi.org/10.5772/544>
2. Seenu S.N., Kuppan Chetty R.M., Ramya M.M. Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems. *Industrial Robot*. 2020;47(6): 929–942. <https://doi.org/10.1108/IR-04-2020-0073>
3. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. *Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2009. 280 с. ISBN 978-5-9221-1141-6
4. Пшихопов В.Х. (ред.). *Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2015. 305 с. ISBN 978-5-9221-1674-9
5. Рубцов В.И., Машков К.Ю., Лапшов В.С., Коновалов К.В. Многоуровневая система управления группой роботов для работы в условиях Арктики. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021;7:53–61.
6. Дацков И.В., Сероштанов А.В. Робототехнические комплексы специального назначения, состоящие на вооружении ФГКУ ЦСООР «Лидер». В сб.: *Материалы XXVII Международной научно-практической конференции «Предупреждение. Спасение. Помощь»*. 16 марта 2017 г. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России; 2017. С. 20–32.
7. Дацков И.В., Кубеко А.В. Возможности ЦСООР «Лидер» по применению робототехнических средств. В сб.: *Материалы XXVII Международной научно-практической конференции «Предупреждение. Спасение. Помощь»*. 16 марта 2017 г. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России; 2017. С. 32–34.
8. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012;3:11–16.
9. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Крюченков Е.Н., Кучерский Р.В., Худак Ю.И. Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012;5:44–50.
10. Лохин В.М., Манько С.В., Карпов С.А., Марголин И.Д. Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017;18(12): 802–811. <https://doi.org/10.17587/mau.18.802-811>
11. Манько С.В., Диане С.А.К., Лохин В.М., Новосельский А.К. Групповое управление роботами в задачах разбора завалов и демонтажа объектов атомной отрасли. *Экстремальная робототехника*. 2017;1(1):302–311.
12. Diane S., Manko S., Lokhin V. Task planning in robot groups for problems with implicitly defined scenarios based on finite-state automata technique. In: *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2017)*. 2017. P. 348–351. <https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970581>
13. Diane S., Manko S., Margolin I., Novosselskiy A. Hierarchical scenarios for behavior planning in autonomous robots. In: *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2019. P. 479–484. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657067>

## REFERENCES

1. Yasuda T., Ohkura K. (Eds.). *Multi-robot systems: trends and development*. InTech; 2011. 596 p. ISBN 978-953-307-425-2. <https://doi.org/10.5772/544>
2. Seenu S.N., Kuppan Chetty R.M., Ramya M.M. Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems. *Industrial Robot*. 2020;47(6): 929–942. <https://doi.org/10.1108/IR-04-2020-0073>
3. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov (Models and algorithms of collective control in groups of robots)*. Moscow: Fizmatlit; 2009. 280 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-1141-6
4. Pshikhopov V.Kh. (Ed.). *Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob'ektami v neopredelennykh sredakh (Group control of moving objects in undetermined)*. Moscow: Fizmatlit; 2015. 305 p. (in Russ.).
5. Rubtsov V.I., Mashkov K.Yu., Lapshov V.S., Konovalov K.V. Multilevel control system for a group of robots to work in Arctic. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya TulGU*. 2021;7:53–61 (in Russ.).
6. Datskov I.V., Seroshtanov A.V. Special purpose robotic systems in service of FGKU TsSOOR “Lider.” In: *Proc. of The 27th International Scientific-Practical Conference “Prevention. Salvation. Help.”* Khimki: Akademiya grazhdanskoi zashchity MChS Rossii; 2017. P. 20–32 (in Russ.).
7. Datskov I.V., Kubeko A.V. Capabilities of TsSOOR “Lider” in application of robotic means. In: *Proc. of The 27th International Scientific-Practical Conference “Prevention. Salvation. Help.”* Khimki: Akademiya grazhdanskoi zashchity MChS Rossii; 2017. P. 32–34 (in Russ.).
8. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P. Multiagent robotic systems construction principles and design problems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2012;3:11–16 (in Russ.).
9. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P., Kryuchenkov E.N., Kucherskiy R.V., Khudak Yu.I. Action planning and tasks distribution models and algorithms for multiagent robotic systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2012;5:44–50 (in Russ.).
10. Lokhin V.M., Man'ko S.V., Karpov S.A., Margolin I.D. Behavioral mechanisms ensuring network communications in multi-agent robotic systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2017;18(12):802–811 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.18.802-811>
11. Man'ko S.V., Diane S.A.K., Lokhin V.M., Novosel'skii A.K. Group control of robots for debris removal and construction disassembly in the atomic industry. *Ekstremal'naya robototekhnika = Extreme Robotics*. 2017;1(1):302–311 (in Russ.).
12. Diane S., Manko S., Lokhin V. Task planning in robot groups for problems with implicitly defined scenarios based on finite-state automata technique. In: *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2017)*. 2017. P. 348–351. <https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970581>
13. Diane S., Manko S., Margolin I., Novosselskiy A. Hierarchical scenarios for behavior planning in autonomous robots. In: *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2019. P. 479–484. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657067>

14. Егорцев М.В., Диане С.А.К., Кац Н.Д. Алгоритмическое обеспечение системы внешнего наблюдения и маршрутизации автономных мобильных роботов. *Российский технологический журнал*. 2021;9(3):15–23. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-15-23>
15. Лохин В.М., Манько С.В., Александрова Р.И., Романов М.П., Диане С.А.К. Принципы построения и программно-алгоритмическое обеспечение человеко-машинного интерфейса для автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016;17(9): 606–614. <https://doi.org/10.17587/mau.17.606-614>
16. Duchoň F., Babinec A., Kajan M., Beňo P., Florek M., Fico T., Jurišica L. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. *Procedia Engineering*. 2014;96: 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.098>
17. Mohammed H., Jaradat M.A., Romdhane L.B. RRT\*N: An improved rapidly-exploring random tree approach for reduced processing times. In: *2018 11th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISMA.2018.8330126>
18. Платонов А.К., Карпов И.И., Кирильченко А.А. *Метод потенциалов в задаче прокладки трассы*. М.: 1974. 27 с. (Препринт. Институт прикладной математики АН СССР; № 124).
14. Egorsev M.V., Diane S.K., Kaz N.D. Algorithmic support of the system of external observation and routing of autonomous mobile robots. *Russ. Technol. J.* 2021;9(3):15–23 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-15-23>
15. Lokhin V.M., Manko S.V., Alexandrova R.I., Romanov M.P., Diane S.A. Man-machine interface for autonomous robots and multi-agent robotic systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2016;17(9):606–614 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.17.606-614>
16. Duchoň F., Babinec A., Kajan M., Beňo P., Florek M., Fico T., Jurišica L. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. *Procedia Engineering*. 2014;96: 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.098>
17. Mohammed H., Jaradat M.A., Romdhane L.B. RRT\*N: An improved rapidly-exploring random tree approach for reduced processing times. In: *2018 11th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISMA.2018.8330126>
18. Platonov A.K., Karpov I.I., Kiril'chenko A.A. *Metod potentsialov v zadache prokladki trassy (Method of potentials in the problem of laying a route)*. Moscow; 1974. 27 p. (Preprint. Institute of Applied Mathematics, USSR Academy of Sciences; No. 124) (in Russ.).

#### Об авторах

**Манько Сергей Викторович**, д.т.н., профессор кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Специализируется в области интеллектуального управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими системами. Лауреат премии Правительства РФ в области образования. Член научного Совета РАН по робототехнике и мехатронике. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, SPIN-код РИНЦ 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

**Лохин Валерий Михайлович**, д.т.н., профессор кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Автор более 160 научных и учебно-методических работ в области интеллектуальных информационных технологий и автоматического управления. Лауреат государственной премии РФ в области науки и техники. Лауреат премии Правительства РФ в области образования. Член научного Совета РАН по робототехнике и мехатронике. Заслуженный деятель науки РФ. E-mail: kpu-mirea@yandex.ru. Scopus Author ID 6602931640, <https://orcid.org/0000-0001-6708-9124>

**Диане Секу Абдель Кадер**, к.т.н., доцент кафедры проблем управления Института искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Специализируется на вопросах обработки информации и управления в интеллектуальных робототехнических системах. E-mail: sekoudiane1990@gmail.com. ResearcherID T-5560-2017, Scopus Author ID 57188548666, SPIN-код РИНЦ 8691-0290, <https://orcid.org/0000-0002-8690-6422>

#### About the authors

**Sergey V. Manko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). He is a specialist in the field of intelligent control of autonomous robots and multi-agent robotic systems. Russian Federation State Prize Laureate in the field of education. Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on robotics and mechatronics. E-mail: manko@mirea.ru. Scopus Author ID 55761014700, RSCI SPIN-code 2070-1592, <https://orcid.org/0000-0002-6297-8894>

**Valery M. Lokhin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). Author of more than 160 scientific and educational works in the field of intelligent information technologies and automatic control. Laureate of the State Prize of the Russian Federation in the field of science and technology. Russian Federation State Prize Laureate in the field of education. Member of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on robotics and mechatronics. Honored Worker of Science of the Russian Federation. E-mail: kpu-mirea@yandex.ru. Scopus Author ID 6602931640, <https://orcid.org/0000-0001-6708-9124>

**Sekou Abdel Kader Diane**, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Management Problems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sekoudiane1990@gmail.com. ResearcherID T-5560-2017, Scopus Author ID 57188548666, RSCI SPIN-code 8691-0290, <https://orcid.org/0000-0002-8690-6422>